Stefano Giovanni Loffi

Piccola
Storia dell'Idraulica

libera traduzione, ridotta ma integrata, di

"*History of Hydraulics*" di Hunter Rose e Simon Ince
dell'Istituto di Ricerca Idraulica dell'Università Statale dell' IOWA – U.S.A.,
édita, nel 1954, come supplemento, su "*LA HOUILLE BLANCHE*" .

Cremona – 23 dicembre 2007

. . . ***in primis***

gran parte di quanto c'è di buono in me lo devo,
se non già alla mia mamma ed al mio papà,
alla mia amatissima Nunzia.
A lei dèdico, *in primis*, questo lavoro.
Per lei ho voluto iniziare la pubblicazione nel
giorno in cui, ogni anno, alle soglie del Natale
del Signore Gesù Cristo,
si rinnòvano, nella nostra famiglia,
tanti struggenti bellissimi ricordi**.**

Introduzione

Tutto sappiamo dell'acqua: come è composta, come si muove, come può essere utilizzata. Sapere tutto della sostanza che è il princìpio della vita non induce, purtroppo, a comportamenti sempre adeguati: non màncano cronache quotidiane che ci raccontano di un'acqua assente, scarsa, inquinata, oppure di fenomeni che fanno dell'acqua la causa di tragici eventi.

La conoscenza dell'acqua e di tutte quelle sostanze che non hanno una forma definìta, in scienza indicate con il genérico términe di 'fluidi' sìa liquidi che gassosi, è un traguardo raggiunto da poco tempo e forse non completamente; non è infatti impossibile aspettarsi nuovi progressi nella conoscenza, soprattutto immaginando la possibile realizzazione di nuovi fluidi, grazie alla straordinaria capacità che l'umanità ha raggiunto nel manipolare la materia e l'energìa.

Quanto oggi sappiamo è il frutto del lavoro di molti che, nel corso della plurimillenaria storia dell'umanità, si sono sforzati di capìre e descrivere i fenomeni osservati e sono stati in grado di comunicare agli altri, a chi li ha seguìti, i risultati delle proprie scoperte.

Il lavoro dei ricercatori a nulla sarebbe valso se non fosse stato seguìto e quindi stimolàto dalla realizzazione delle òpere idrauliche che, soprattutto nel lontano passato, sono costate fatiche e sofferenze oggi quasi inimmaginàbili; sofferenze di migliaia di esseri umani ai quali difficilmente riserviamo un seppur breve pensiero quando ammiriamo oggi i resti, ancòra stupefacenti, di ciò che realizzarono.

Il mérito di tutti e di ciascuno non sarebbe pienamente compreso né adeguatamente riconosciuto se non lo si considerasse unìto ai fattori in grado di creare condizioni più o meno favorevoli al lavoro svolto: l'ambiente, la civiltà, i tempi, la cultura, le condizioni economiche, l'organizzazione sociale sono stati certamente determinanti, ed ogni Storia, anche se in forma di racconto, non lo può ignorare.

Ritengo quindi necessario parlare non solo degli uomini, ma anche, dove significativo, delle situazioni nelle quali essi vissero, perché sìa meglio compreso e quindi apprezzato quanto oggi accettiamo come scontato e che invece è stato, a volte, frutto di intenso impegno di menti eccelse.

L'intento è di 'dare un volto' a molti nomi che gli studenti trovano, imparano, usano, a volte distrattamente; di dare significato e quindi occasione di apprezzamento a mille scoperte e conquiste, raggiunte con dedizione, passione, interesse, sacrificio, umiltà e coraggio: in alcune circostanze anche di coraggio ha bisogno chi si spinge nell'avventura della ricerca.

Ci sono molti modi di raccontare il passato: la scelta deve essere presa prima di iniziare.

Scrivere un testo è il prodotto del desiderio di comunicare agli altri; sono questi ultimi, lontani e sconosciuti, che si accosteranno al racconto se questo ne susciterà l'interesse.

Così il successo di un testo è riconosciuto dalla misura dell'interesse, espresso dal numero di copie vendute; se la cifra ha meno di quattro zeri non c'è successo.

L'eccezione, che sempre conferma la régola, è lo scritto dello specialista per gli specialisti; questi soli costituiscono il pubblico/giudice; la quantità prodotta non conta.

Nel raccontare la storia, però, anche lo specialista può desiderare rivolgersi non solo ai propri colleghi e quindi scrivere un testo divulgativo. In questo caso egli dovrà coniugare il rigore scientifico/documentale ad uno stile incalzante ed accattivante, che coinvolga il lettore, lo appassioni, lo conquisti con l'emozione della conoscenza. Il rischio è di uscire dallo schematismo storico ed 'uscire', quindi, dalla stessa Storia. Alcuni argomenti si prestano meglio di altri; l'Idraulica non pare particolarmente votata al grande pubblico, ma . . . non è mai detta l'ultima parola!

Non credo di sbagliare osservando che, in fatto di Storia, prevalgano temi che trattano lo sviluppo dell'umanità come fosse stato scandìto soltanto, o prevalentemente, da guerre, conquiste, distruzioni tra i popoli, vittime e protagonisti del carattere sociale ma, purtroppo, fortemente competitivo della natura umana. Per quanto evidentemente avvincente, cioè 'di successo', questo

modo di raccontare la storia esàmina gli avvenimenti che, travolgenti e stravolgenti, sono di per sé stessi la negazione dello sviluppo e della crescita umana: nessuna guerra, nessuna conquista violenta hanno mai creato qualcosa di così duraturo sulla Terra da valer la pena di tante sofferenze.

Credo invece indispensabile raccontare la Storia seguendo lo sviluppo della cultura umana, vero fattore di crescita da quando il nostro primo progenitore (protouomo, per non offendere nessuno, o superscimmia – chiedendo scusa ai 'cugini' quadrumani!) ha iniziato a sviluppare la fantasìa, elaborando le prime idee elementari.

Né per cultura né per ricerca, più che altro per una casualità, mi sono trovato sul tavolo l'òpera: "*History of Hydraulics*" di Hunter Rose e Simon Ince, dell'Istituto di Ricerca Idraulica dell'Università Statale dell' IOWA – U.S.A., uscìta, quale supplemento, al numero cinque del periodico "*LA HOUILLE BLANCHE*" nell'anno 1954.

"È già stata scritta.", mi dissi e smisi così di affaticarmi nel sognare di realizzare un'impresa per me quasi impossibile ed ora anche inutile. L'idea non morì, in me, rivelandomi la propria radice più profonda: il desiderio di sapere prima ancòra di raccontare.

Avventurarmi nella traduzione del testo, armato di una indecorosa conoscenza dell'inglese, è stato quasi un obbligo verso quella parte del mio 'io' che sempre scàlpita quando sono tentato di rinunciare ad un'idea, qualunque essa sìa.

Giunsi, in qualche modo, alla fine trovandomi davanti un testo spezzato, farcito di errori e frasi incomprensibili, a volte neppure in forma compatibile con . . . la lingua italiana!

Nonostante ciò, per quanto potessi intuire dell'òpera originale, il libro mi è sembrato poco adatto a quella forma divulgativa che immaginavo per una Storia dell'Idraulica da proporre ai non specialisti. Ho avuto persino l'ardìre di giudicarlo non completo, bisognoso di integrazioni e forse di un approccio meno anglosassone, cioè più attento anche agli sviluppi che, in questa scienza, si sono avuti (ovviamente!!) in Italia.

Che fare?

La presunzione è diventata forse supponenza:

"*Lo riscrivo, lo riprendo, lo adatto ai miei criteri, secondo il mio stile, eliminando alcune parti e, quando possibile e necessario, integrandolo; insomma, ne otterrò una 'edizione riveduta e corretta', ad uso più divulgativo che accadémico, tentando di progredire nella stessa direzione che hanno intrapreso i due autori americani.*"

Ho sbagliato?

Se mai incontrerò un giorno Hunter e Ince, certo avrò l'ùnica risposta adeguata!

Per assegnare al mio lavoro l'àmbito che mérita, ho scelto il titolo "Piccola Storia dell'Idraulica" per tre motivi:

- la mia levatura, certo ad un livello inferiore a quella dei due professori americani;
- il fatto d'aver eliminato molti passi dell'òpera originale, nella ricerca del maggior potere divulgativo (motivo 'ufficiale') ma anche, e qui mi ricollego al primo motivo, nell'incapacità di divulgare nozioni già per me difficili a comprendere (!);
- non sono uno storico e rispetto profondamente coloro che svolgono questa professione che réputo tra le più importanti del sapere; non v'è umanità senza un'intelligente memoria del passato.

Stefano Loffi – Cremona, Italia – dicembre 2005

1° P.S.: Ho lasciato pressoché ìntegra la *Premessa* di Hunter Rose, perché resti al lettore il messaggio di presentazione di chi creò l'opera originale: errori ed imprecisioni, nel resto del testo, saranno così più facilmente attribuìti a chi mérita!

2° P.S.: la versione qui proposta è preparata per essere pubblicata sul sito del Consorzio Irrigazioni Cremonesi, **www.consorzioirrigazioni.it** , ed è quindi povera di immagini, rispetto all'originale, al fine di rendere più agevole la circolazione sulla Rete. Resta il proposito, se mai si presenterà l'occasione, di pubblicare la versione completa.

* * *

Premessa

La storia, parafrasando Leibniz, è cosa utile: il suo studio non solo dà agli uomini del passato il loro giusto riconoscimento, ma offre alle generazioni di oggi la guida e la motivazione per meglio indirizzare i loro sforzi, ovviamente se orientati nell'infinìta e vorace fame di conoscenza della mente umana.

Il racconto dello sviluppo della ricerca, in ogni campo, è quindi assai importante: è percepita più 'viva' ogni scienza della quale si conosca la Storia.

L'Idraulica, scienza rivolta all'elemento primo della vita, non ha ancòra trovato uno studio che ne illustri la storia evolutiva, risalendo nel passato sin dove le testimonianze attendibili lo consentano.

Ci sono in verità alcuni trattati generali sul progresso della civiltà umana in campi prossimi all'Idraulica o su essa applicabili, come la Meccanica, l'Ingegneria, l'Aerodinamica; con un'accurata ricerca si potrebbe comporre una discreta e rappresentativa documentazione delle òpere che, nel passato, hanno trattato di aspetti particolari dell'Idraulica; purtuttavia pochi hanno il tempo o la costanza per tali ricerche e gli idraulici di oggi dispongono soltanto di nozioni confuse sulle origini della loro eredità culturale.

L'Idraulica è quindi spesso vittima, purtroppo non ùnica, dell'ignoranza della sua Storia, che porta ad attribuìre erroneamente importanti scoperte ed invenzioni, relegando nell'oblìo chi mérita la degna memoria; avviene addirittura che molte comunità conoscano poco o nulla dei contributi attribuibili a propri figli.

Inoltre, pregiudizi diffusi su singoli periodi storici se non su intere époche, caratterizzati da decadenza economica e sociale o da guerre travolgenti, sembrano giustificare lo scarso interesse al progresso culturale che invece, in quei tempi, non si è fermato ma anzi, a volte, nel bene e nel male ha trovato nuovi stimoli.

La situazione, certo disdicevole per chi si applichi con passione a questa meravigliosa scienza, mi portò, nel 1950, a convincere Simon Ince, uno studente con notevoli capacità linguistiche ed interesse nella storia dell'uomo e delle sue prospettive future, ad intraprendere la preparazione della *Storia dell'Idraulica*, in parte come componente del progetto dell'Istituto di Ricerca Idraulica dell'Iowa (I.I. of H.R.) ed in parte per dottorato di ricerca nel *Graduate College* dello Stato dell'Iowa. Ince in sèguito dedicò circa un anno per la lettura, l'organizzazione del materiale e gli incontri con le autorità americane in materia di Meccanica e di Idraulica. La relazione ed il rapporto all'istituto furono presentati, nell'estate del 1952, con il titolo "*Una storia dell'idraulica alla fine del diciottesimo secolo*".

Visto il notevole sviluppo che in tal modo è stato raggiunto dall'idea di partenza, tra il 1952 ed il 1953 dedicai la maggior parte del mio tempo come entusiasta ricercatore presso l'Università di Grenoble per il completamento dell'òpera.

L'ottima dotazione documentaria dei vicini Laboratori *Dauphinois* di Idraulica mi fu di grande aiuto ed i miei studi sulla letteratura specifica inclusero non soltanto il periodo considerato nelle precedenti edizioni ma anche i secoli precedenti e posteriori. Per ottenere la necessaria

continuità nello stile, il materiale fu riorganizzato ed interamente riscritto, con numerose correzioni e limature, mentre l'orizzonte fu notevolmente ampliato.

Nonostante le difficoltà della corrispondenza transoceanica, inoltre, parti del mio lavoro in Svizzera poterono essere esaminate ed analizzate criticamente dal dottor Ince; vi fu anche l'effetto positivo del ritardo con il quale mi giunsero le sue osservazioni, potendole esaminare con maggior sensibilità critica, soprattutto dove le nostre opinioni fossero apparse sostanzialmente differenti.

Certamente una storia di una scienza così vasta e dalle mille connessioni con tante altre realtà, come è l'Idraulica, può correre il rischio di concentrare l'interesse su certi aspetti a discàpito di altri, magari restando influenzati dalla propria conoscenza, dall'interesse specifico o dalla minore o maggiore facilità di reperimento delle informazioni. Non si deve inoltre sottovalutare la tentazione, che accomuna chiunque scriva un qualsìasi testo, di pensare costantemente all'interesse del potenziale lettore, rischiando di giungere all'assillo paranoico di adattare il testo a quanto si immagina gradito, a scàpito . . . della correttezza del contenuto!

Un primario interesse degli ingegneri idraulici – certo la categorìa che riterremmo tra le più interessate a questa Storia - potrebbe essere il progresso delle opere idrauliche ed anche, qui accomunati agli ingegneri meccanici, delle macchine idrauliche. I ricercatori teorici gradirebbero forse un maggior approfondimento sull'evoluzione delle tecniche sperimentali. D'altra parte l'esigenza della Storia può richiedere un continuo richiamo ed un costante riferimento alle relazioni tra l'evoluzione di una scienza e tutte le altre ad essa più o meno collegate.

Molteplici sono quindi gli approcci ed altrettanti i rischi.

Noi abbiamo scelto [ndr: Rouse e Ince], come tema principale, la formulazione dei princìpi che stanno alla base del moto dei fluidi, mai tralasciando i molti aspetti sperimentali, le applicazioni ingegneristiche, il progresso delle scienze collegate e, ove necessario, l'evoluzione storica del mondo laddove ha avuto significato per l'Idraulica.

La Storia dell'Idraulica, come è avvenuto per tutte le scienze che hanno avuto un'immediata applicazione pratica, comincia assai prima della conoscenza dei suoi princìpi; anche il più semplice di questi venne infatti compreso – cioè teorizzato e dimostrato – in tempi assai distanti dal giorno nel quale l'uomo iniziò ad applicarlo intuitivamente.

La vitale disponibilità dell'acqua – e quindi la necessità di essere in grado di raccoglierla, condurla ed usarla – ha grandemente anticipato e spesso sovrastato il bisogno di capirne le leggi.

Nello scorrere del tempo dell'umanità, i princìpi che per primi furono indagati, con quel rigore che la scienza allora consentiva, presentavano aspetti di comune interesse per gli scienziati e per gli ingegneri, questi ultimi tesi alla risoluzione di problemi pratici. Con il progresso della conoscenza si aprirono strade differenti, seppure nell'àmbito della stessa Idraulica, con percorsi non sempre paralleli di teoria e di pratica; a tratti addirittura assai discosti, a volte, invece, anche coincidenti; così avvenne anche per le categorìe degli studiosi che ad essi si applicavano.

I princìpî dell'Idraulica attinenti all'architettura navale, alle macchine, alla balistica, all'aerodinamica . . . . sono, per esempio, trattati unitariamente fino a che la necessaria separazione non divenne completa intorno al 19° sécolo, allorquando le scoperte della matematica fornirono gli strumenti adeguati all'interpretazione dei fenomeni che evolvono nel tempo, in particolare dello scorrere dei fluidi.

Questa Storia término in questo periodo moderno (20° sécolo), nel quale la conoscenza è ormai diffusa, sebbene non tutto sìa già oggetto di prova certa e di teorìa consolidata. Onde evitare il gigantismo dell'ultima parte del lavoro – generato dall'esponenziale aumento di ricerche, studi e sperimentazioni – l'attenzione sarà dedicata soltanto a ciò che appare maggiormente rappresenttaivo.

Dei sei millenni coperti dalla nostra Storia, è il quinto che appare il più interessante ed avvicente.

La massima attenzione è stata dedicata a quegli uomini che diedero il più significativo contributo allo sviluppo, raccontandone anche particolari ùtili per comprenderne qualche aspetto della loro personalità, della loro esperienza, della loro vita.

Anche qualcuno che si applicò in scienze diverse dall'Idraulica è stato ricompreso in quest'opera, a causa degli effetti indiretti, ma importanti, che il suo lavoro ha portato a questa scienza.

La storia dell'Idraulica non potrebbe essere trattata in modo soddisfacente se limitata allo studio esclusivo di un soggetto isolato o di una sola nazione – anche se apparisse 'eccezionale' in questo campo - perché il progresso scientifico avviene sempre con il contributo di tanti e di tutti; anche in processi culturali che sembrano essersi evoluti in modo indipendente per lungo tempo. La graduale intercomunicazione tra genti e paesi ha costituìto l'opportunità di un'unione di energìe che nella scienza ha sempre trovato argomento di dialogo, resistendo a tutto, anche alle incredibili brutture alle quali l'umanità ha dimostrato di saper sacrificare la propria ragione.

E' evidente l'inevitabile diversità del lavoro nella parte dedicata al tempo in cui viviamo [ndr: XX secolo], certo a causa dell'influenza delle conoscenze personali, delle esperienze dirette, dell'assenza di quella prospettiva che il tempo può dare solo quando diventa passato non più prossimo.

I documenti originali che descrivono le scoperte e lo sviluppo degli stessi princìpî possono ovviamente procurare una scarsa informazione delle circostanze nelle quali essi furono formulati, così nella "*Storia del mondo moderno*" di Palmer abbiamo acquisito una genérica ma sufficiente rappresentazione di ogni periodo, con l'aiuto dell'Enciclopedìa Britannica per particolari situazioni documentali.

Le più recenti e tradizionali enciclopedìe, in francese, tedesco ed italiano, ci hanno dato molte informazioni biografiche; ùtili sono state le memorie presso le Società di Ingegnerìa e le Società scientifiche alle quali appartennero i più recenti ricercatori. Le fonti sono citate nel testo soltanto quando esplicitamente richiamate oppure se il loro richiamo è risultato opportuno.

Le parti interessanti del materiale originale, incluso nella bibliografia alla fine di ogni capitolo, è stato letto da uno o da entrambi gli autori, nella versione originale, quando possibile, oppure nella versione tradotta.

Il materiale meno recente, ovviamente, è disponibile soltanto nella forma manoscritta. Frequente è stato l'uso della "*Storia dell'idraulica*" di Dugas, così come sono state guide di inestimabile valore l'"*Hydrodinamica*" di Lamb e la "*Hidraulica*" di Focheneimer.

Adeguati ringraziamento e riconoscenza sono dovuti a quanti hanno reso possibile l'opera, in particolare, relativamente alla prima versione, ai professori Thomas Farrel, dell'Università Statale dell'Iowa; a B.A. Bakhmeteff, della Columbia University; a R. von Mises, dell' Harvard University ed a J. M. Burges, Università Tecnica di Delfi, che provvidero a tradurre gli scritti di Stevino dal danese.

Sono personalmente debitore in particolare al sig. P. Daniel, direttore del Laboratorio *Dauphinois*, sia per la sua vasta conoscenza storica, sia per il privilegio di utilizzare il ponderoso materiale che è stato accumulato sotto la sua guida; al sig. R. Willner, capo del Servizio di Documentazione del Laboratorio Neyrpic e sopra tutti il Mme. G. Steinmann, bibliotecario del Neyrpic, che ha procurato i numerosissimi riferimenti di catalogo richiesti.

Attraverso la cortesìa del prof. J. Kravtchenko, direttore dei laboratori di Meccanica dei fluidi dell'Università di Grenoble, il sig. J. Dodu fu disponibile alle mie necessità per la traduzione delle fonti in latino. Uno stadio avanzato dell'òpera fu criticamente rivisto dai professori A. Craya, Università di Grenoble; da Giulio De Marchi del Politecnico di Milano; da R.S. Hoyt dell'Università Statale dell'Iowa e da J. S. McNown dell'Istituto di Ricerca Idraulica dell'Iowa.

Ciascuno di essi lasciò un'impronta nel risultato finale.

La storia, illustrata con stampe della collezione del Laboratorio *Neyrpic*, apparve a puntate sul supplemento gratuito de "La Hoille Blanche", nel corso di circa un anno, in francese ed

in inglese, allo scopo di attirare l'attenzione e l'interesse dei lettori così in grado di fornire agli autori critiche alla loro trattazione e materiali supplettivi che mancavano nel loro lavoro.

Dopo la diffusione in questo modo inconsueto furono apportate le necessarie integrazioni e furono poi pubblicate due versioni separate in "La Hoille Blanche" in Francia e dall'Istituto di Ricerca di Idraulica dell'Iowa in USA

Gli autori augurano ai propri lettori una comoda e piacevole lettura del loro lavoro e chiedono aiuto nel farlo ancòra più completo ed autorevole.

Hunter Rouse

Istituto di Ricerca Idraulica dell'Università Statale dell' IOWA – U.S.A. 1954

* * *

Indispensabili considerazioni

Quando si materializza un progresso in una scienza?

Nell'Idraulica, e non solo, questa risposta non è semplice e può anche essere non unìvoca.

Anche se gran parte del mio lavoro è copiare, modificare, forse integrare (spero non rovinare!) quello altrui, resta necessario che manifesti subito il mio pensiero in proposito, poiché comunque esso influenzerà le scelte, quindi il risultato finale.

La pratica dettata dall'esperienza è un passo nello sviluppo della scienza?

Le complesse e vastissime reti di irrigazione dei Suméri e poi degli Egizi, già estese nel quarto millennio avanti Cristo, seppur concepìte dalla sola esperienza pratica, sono parte della cultura Idraulica perché prova della capacità di governo di alcune leggi fisiche dei fluidi, anche se nell'incapacità di esprimerle in dimostrazioni teoriche?

Le scoperte di studiosi che non seppero o non poterono diffonderle ai posteri sono soltanto stérile episodio oppure mantengono un significato nell'evoluzione del sapere?

La storia della scienza deve essere costruìta limitando il racconto all'evoluzione della teoria quando interpreta, quindi verifica, i fenomeni osservati, e tralasciando le realizzazioni dettate dalla sola esperienza pratica e le scoperte che non hanno dato alcun successivo ésito?

Io penso, ed in questo credo di non allontanarmi da *Rose*, da *Ince* e da molti altri, che lo sviluppo della cultura umana debba essere raccontato sin dalle sue origini, per quanto esse possano sembrare modeste, maldestre, forse insignificanti di fronte alla certezza dell'interpretazione teòrica.

Ogni azione dell'uomo che cerca di sfruttare, ancor prima di capìre, i fenomeni della Natura è di per sé l'espressione della tensione interiore che ha mosso il progresso di ogni scienza, di ogni cultura.

Ogni fatto, per quanto minimo, rappresenta un progresso che sempre trova, nel vivere sociale, l'opportunità di comunicazione, anche nei tempi in cui il linguaggio non era ancòra disponibile, semplicemente provocando lo spirito di emulazione.

Nessuno saprà mai quali stìmoli abbia prodotto il solo sentir raccontare di uomini che, in terre lontane, sapessero dominare, a proprio vantaggio, i fenomeni fisici, come lo scorrere dell'acqua. Da qui discende, prima ancòra dell'emulazione, il pensiero che tali esperienze possano essere tentate, aspirando al medésimo successo, agli stessi vantaggi. Così anche il semplice diffondersi delle informazioni ha mosso l'intelligenza, anche in tempi nei quali le grandi distanze erano veramente tali, in tutti i sensi; ogni nuova realizzazione è una conquista degna d'essere raccontata.

Acquista, inoltre, maggior interesse raccontare di aspetti particolari dell'esperienza e della tecnologia, laddove dimostrino un livello di progresso delle civiltà antìche che il sapere

comune accoglie con stupore, come, ad esempio, leggere di quale capacità avesse raggiunto il popolo Suméro nel governo delle reti irrigue, quattromila anni prima di Cristo; oppure come gli antichi Romani riuscivano a dotare ogni grande città, ed a volte singole abitazioni, di ottima ed abbondante acqua corrente, captata a decine di chilometri di distanza, superando valli e perforando montagne.

Altra questione: è chiaro che l'esigenza prevalente di questa Storia è il raccontare ogni originale scoperta, procedendo in stretto ordine cronologico; originale scoperta che diventa risoluzione di ciò che, precedentemente, era mistero; mistero che viene così svelato e consegnato definitivamente al sapere, più o meno comune.

Vi può anche essere, in questo differente livello di condivisione, il caso di un mistero svelato che poi, per mancanza di comunicazione o di condizioni sociali e culturali ancòra premature, ritorna ad essere mistero dopo la scomparsa del suo scopritore, anche per molti sécoli: resta per me, comunque, un primato degno d'essere ricordato.

L'aggettivo che maggiormente risuonerà nel racconto sarà dunque: *primo* e *prima*.

Le formule saranno ridotte al minimo indispensabile, in questo scostandomi dai due autori americani. Le espressioni matematiche sono lingua usabile dai soli tecnici specialisti ma compresa alla perfezione (cogliendone così il vero significato) da pochi eletti; desidero invece un pubblico tanto più numeroso quanto più saprò in esso suscitare la piacevole emozione di capìre e di apprendere.

Da ultimo: qual è il peso 'perfetto' di questo lavoro, nel senso letterale del términe? In altre e più comprensibili parole: quanto deve essere estesa una simile Storia.

Massima sintesi e massima analisi sono due estremi che possono distare, in questo caso, migliaia di pagine: ogni capitolo potrebbe costituire, da solo, un intero volume; gioca, in questo, un ruolo importante (ci risiamo!) l'interesse del lettore, al quale bisogna dare elementi per stimolare e poi soddisfare la curiosità, quindi con una buona analisi, senza entrare eccessivamente nei particolari, nelle citazioni, nelle formule, negli argomenti collaterali (questi ultimi numerosissimi nell'Idraulica).

Ho deciso la dimensione secondo miei criteri che si rivelano meno ampi di quelli dell'òpera originale, tant'è che ho prodotto alcune riduzioni. Non so dare la sensazione di quanto sìa stato ridotto il lavoro di Rose ed Ince, perché i tagli si sono succeduti ad integrazioni, sebbene queste ultime non sìano di grande ampiezza e forse non di eccelso valore.

Un confronto, per chi volesse, non potrebbe che essere condotto accostando i due testi, cosa che io non faccio volentieri per evidente . . . timore!

Cap. 1 - L'Idraulica pratica nell'antichità remòta

Chi vuole ricostruire l'evoluzione storica della società si trova davanti due problemi tra loro opposti.

Man mano che ci si addentra nel passato, la documentazione diminuisce, a volte drasticamente, sino a scomparìre, costringendo lo studioso più caparbio a ricercare ogni possibile traccia o minimo segnale di fatti e conoscenze, a volte anche non pertinenti; si rischia così di cadere in interpretazioni quantomeno azzardate e non giustificate pienamente, come la Storia esìge; più l'argomento è ristretto più il rischio aumenta.

Se l'arco temporale deve esser completo, quindi abbracciare anche i tempi 'moderni', ecco comparìre il problema opposto: l'esplosione di documentazione, di scritti, di testimonianze. La difficoltà si materializza in questa enorme vastità di riferimenti, nei quali si deve saper distinguere il poco essenziale ed importante dal tanto che queste caratteristiche non possiede.

Ecco allora la sfida: scrivere una Storia coerente ma equilibrata, non cedendo alla fantasìa esplorando il remòto passato, né ampliando in modo sproporzionato il racconto dei tempi a noi più vicini, abbondantemente documentati.

La Storia dell'Idraulica, che inizialmente narra le vicende tra gli esseri umani e l'acqua, offre un più ampio campo d'azione, nella ricostruzione delle sue origini, dando cioè un poco di spazio alle ipotesi.

Infatti, anche se i primi sforzi dell'uomo primitivo di convivere con i fenomeni del moto delle acque o di sfruttarli sono solo immaginabili, possiamo di certo affermare che la convivenza con l'acqua fu una questione immediata che si pose al primo nostro progenitore ominide, quando iniziò ad elaborare le strategìe per affrancarsi dalle leggi della selezione naturale.

Reperìre l'acqua per dissetarsi, costruìre nell'acqua per difendersi (i villaggi palaffitticoli), cacciare nell'acqua per sfamarsi, spostarsi sull'acqua (più sicura se non a volte ùnica via), conoscere e riconoscere il ciclo stagionale per sopravvivere a siccità ed inondazioni: ecco i problemi che richiesero la conoscenza delle prime nozioni di Idraulica; ancòr prima del linguaggio, della scrittura, ancòr prima dell' *homo sapiens*.

I progressi della mente umana furono, inizialmente, lentissimi: circa tre milioni di anni fa, il genere *Homo* è stato protagonista del momento cruciale in cui iniziò il processo evolutivo della nostra specie, in tutto differente dai processi evolutivi dei precedenti genéri di ominidi. Soltanto dopo l'ultima glaciazione iniziano a comparìre le prime forme di organizzazione sociale stabile, ed è possibile affermare che più del 99% del tempo impiegato in questa evoluzione è stato necessario per giungere alle prime forme elementari di socialità, di linguaggio, di scrittura simbolica: solo un attimo, in proporzione, è bastato per passare dalla preistoria ai traguardi di oggi, mai disgiunti da altrettanti disastri! Ecco perché alcuni ritengono che 'un attimo' così nocivo potrebbe scomparire . . . in un attimo, con viva soddisfazione di tutte le altre specie viventi sulla Terra!

Per decine, forse centinaia di migliaia di anni il lancio di aste e pietre come semplici proiettili rappresentò la massima capacità di offesa. Con una lentezza, per qualsiasi racconto esasperante, iniziarono a comparìre forme affusolate, regolari, rettilinee per frecce, lance, canoe, ... , secondo un'intuitiva esigenza di migliore penetrazione nel fluido, aria o acqua, e di una rotta più stabile, cioè governabile: esigenze oggi affrontate in Idrodinàmica o Aeronautica.

La transizione dai tronchi-zattera alla piroga-tronco, alla canoa, alla barca sono passi significativi di progresso nell'Idrodinamica applicata; imbarcazioni dalla forma già affusolata, risalenti all'età della pietra, sono state trovate ovunque si sìa diffusa la preistorica specie umana.

Il passaggio dalla propulsione muscolare all'uso delle vele comporta la comprensione, ovviamente sempre intuitiva, ed il dominio dei fenomeni di pressione, di spinta, di risultante, di sforzo; il vento, finalmente 'catturato' dalle prime vele, rappresentò l'energìa di moto più costante, economica e potente per tutti i popoli affacciati sul mare, che contribuirono allo sviluppo dell'arte

della navigazione, strettamente dipendente dallo sviluppo delle abilità costruttive. Già nei mirabili dipinti egizi troviamo eleganti imbarcazioni, con remi e vele, databili intorno al 3000 avanti Cristo.

La tecnica costruttiva delle imbarcazioni risolse precocemente complessi problemi di Idrodinàmica, di Idrostatica e di Meccanica, perché l'acqua fu, per secoli, lo spazio privilegiato di separazione, ma anche la più efficace via di comunicazione e di trasporto.

Il livello di conoscenza dei fenomeni fisici fu intuitivo, ma lo sfruttamento dell'effetto raggiunse rapidamente una notevole qualità.

Anche l'evoluzione storica dell'Idraulica subì un processo simile all'Idrodinàmica ma probabilmente iniziato posteriormente, legato alla nascita delle prime società residenziali, sorte laddove iniziò la produzione, regolare, diffusa ed affidabile di derrate alimentari, certo provocata dal controllo e conseguente regolare disponibilità di acqua attraverso i primi sistemi di Irrigazione.

Il tracciare la storia delle scienze riserva all'Idraulica un vantaggio che la distingue, assieme a poche altre discipline oggetto di studio, perché le opere idrauliche del passato hanno lasciato segni sul territorio ancòra oggi visibili, per due ordini di motivi:

- il primo: la necessità di reperìre acqua per le popolazioni che si concentravano in agglomerati di dimensioni notevoli ed il bassissimo costo della mano d'opera portarono alla realizzazione di opere di grandi dimensioni, il cui uso a volte sopravvisse alla civiltà che le edificò, quindi con elevate possibilità di giungere ai nostri giorni, quantomeno in vestigia che si prestano a chiare interpretazioni;
- l'esigenza dell'acqua fu sempre così importante che le prime codìfiche scritte dell'organizzazione sociale ebbero la necessità di trattare anche dell'acqua, del suo uso, dei diritti ad essa connessi, assegnando una elevata probabilità di trovare, nei rari documenti esistenti, testimonianze sull'argomento.

Resta un fatto ineludibile: la storia si può studiare, quindi scrivere e raccontare, nella misura nella quale esistano testimonianze dirette; in loro assenza diventano importanti, *obtorto collo*, anche i riscontri indiretti, le analogìe, le deduzioni lògiche, che récano aiuto ed a volte sostegno in un'analisi che rimane comunque più povera di certezze e, conseguentemente, più ricca di ipotesi; il discrìmine temporale corrisponde al tempo dell'apparizione dell'arte del disegno e della scrittura, cioè il periodo oggi definito come passaggio tra la Preistoria e la Storia dell'umanità.

Ancor prima delle costruzioni, le cui vestigia sono a volte monumentali a volte soltanto tenui ombre nella sabbia, la testimonianza per immagini e poi scritta diventa la fonte certa dei fatti, anche se spesso raccontati con l'occhio e l'intenzione dell'autore del tempo, non sempre interessato all'analisi oggettiva.

Nel tardo Paleolitico e poi nel Neolitico, tra il 10000 ed il 3500 a. C., il rapporto dell'uomo con le acque portò alla realizzazione di òpere indubbiamente notevoli, le cui dimensioni, seppur dominate dalla limitata ampiezza delle comunità che di queste opere si giovavano, sembrano quasi non all'altezza della capacità tecnologica di quegli antichi popoli.

Canali di drenaggio e di irrigazione, per quanto primitivi, assolsero all'importante funzione di ridurre le acque alle esigenze dell'uomo, diventando motivo della crescita sociale attraverso il processo di sedentarizzazione.

Opere di sbarramento, anche di dimensioni mastodontiche, protessero molti iniziali agglomerati dalle inondazioni, oppure deviarono corsi d'acqua , a volte soltanto durante le piene, ad alimentare serbatoi naturali o ad irrigare vaste aree agricole.

L'Agricoltura nacque da un poderoso progresso culturale: concepìre l'azione di sotterrare parte della semente commestibile, di curarne la crescita e di saper attendere il raccolto; lavoro ed attesa che comportavano la necessità di vivere accanto al terreno coltivato, cioè di stabilirsi, in modo permanente quantomeno per l'arco temporale del ciclo della coltura.

Quando a questa prima agricoltura si aggiunse la capacità di condurre l'acqua sui campi nei modi e tempi opportuni, l'Irrigazione, la sedentarietà fu premiata da più abbondanti e sicuri raccolti, sempre meno dipendenti dai capricci meteoclimatici.

La sedentarietà diede impulso anche all'allevamento, all'addomesticamento delle specie ùtili come forza motrice e come nutrimento; le specie addomesticate produssero un notevole miglioramento della vita dell'uomo ma anche una propozionale maggior pressione sull'agricoltura, chiamata a sfamare 'nuove e voraci bocche'.

Solo la disponibilità costante di acqua in misura adeguata poteva accrescere e garantìre la produzione.

Così l'agricoltura irrigua fu la causa prima per lo sviluppo degli insediamenti umani, nei quali l'uomo si trasformò da cacciatore-raccolgitore, nomade, a cacciatore-allevatore, seminomade, e poi alla forma, ormai completamente sedentaria, di allevatore-coltivatore.

Il processo di concentrazione della popolazione in comunità stabili iniziò in diverse parti del mondo, con un processo definito, per questo, policentrico.

Non c'è, quindi, un'ùnica area originale dove tale fenomeno nacque per poi diffondersi. Esistono però alcune zone, ed in particolare nell'Asia Minore ed Occidentale, dove si hanno testimonianze archeologiche di siti particolarmente sviluppati già nel Neolitico Superiore, intorno ai decimila anni prima di Cristo.

Sono famosi, ma non ùnici, i siti di Gérico, sulle coste settentrionali del mar Morto, e di Catal Hüyük, nella Turchìa meridionale, di Giarmo, nel Kurdistan iracheno, di Zawi Chemi, poco distante da Giarmo, abitata quantomeno dal 9000 al 6500 avanti Cristo. In questo centro urbano, che visse per duemila e cinquecento anni, dall'esame dei resti animali e dei prodotti della terra vi si può leggere l'evoluzione dell'agricoltura e dell'allevamento, giungendo al ritrovamento di colture selezionate da un lungo periodo di evoluta pratica agricola.

In pieno Neolitico, quando nel continente europeo i pochi uomini presenti vivevano ancòra in piccolissime comunità erranti di cacciatori e raccoglitori, nelle regioni dell'Asia Minore ed Occidentale già sorgevano città di decine di migliaia di abitanti, caratterizzate non solo da un'attività agricola stabilmente irrigua, ma, per naturale conseguenza di questa, anche da una elaborata organizzazione socio-economica.

Sappiamo quindi, che, in diverse parti del mondo, tra il Paleolitico ed il Neolitico, cioè nelle fasi terminali della Preistoria, l'umanità imparò, con l'esperienza, molte applicazioni di Idrodinàmica e di Idraulica, realizzando una primordiale ma efficace capacità di governare le acque ai propri bisogni.

Tutte le informazioni che i testi di Preistoria e di Archeologìa ripòrtano, e che qui ripeteremmo inutilmente, appartengono però alla diffusa e tenue luce dell'aurora che preannuncia l'intensa luminosità dell'alba della nostra Storia; luce che si accende per sempre e senza più esitazione alcuna quando compare la prima forma di comunicazione scritta, o meglio: le prime immagini che hanno preceduto la prima scrittura.

Dobbiamo però osservare che la penombra, infine dissolta dai primi bagliori della Storia, fu un processo durato migliaia di anni. Le comunità si formarono, si svilupparono, scomparvero, per ricomparire in altre aree, con sempre più evolùte capacità nel produrre e nel socializzare, procedendo con una lentezza che la nostra immaginazione definirebbe semplicemente esasperante; una lentezza certo in parte dovuta alla mancanza della scrittura, di un linguaggio capace di esprimere concetti ed idee astratte, di consolidarli in régole per tutti uguali. Le régole in una comunità preludono alla necessità e poi riconoscimento dell'autorità, a sua volta sostegno di una organizzazione efficiente. Approdare in un tale ambito significò creare le premesse per poter, attraverso il linguaggio e la scrittura, di trasmettere alle nuove generazioni le esperienze ed i ricordi attraverso l'apprendimento.

Tèrmina la Preistoria ed inizia la Storia nel tempo, anch'esso non breve, nel quale alcune comunità convennero di dare a diverse immagini disegnate il medésimo significato. Il sole rappresentava il giorno; il disegno della luna esprimeva il concetto di notte.. Una serie di oggetti disegnati ai quali tutta la comunità dava, per ciascuno, lo stesso significato, divenne così scrittura pittorica, già in grado di esprimere concetti elementari, di produrre una prima forma di comunicazione comprensibile.

Il primàto della nascita della scrittura, cioè della Storia, è universalmente collocato nell'Asia Occidentale dove, cinquanta secoli prima di Cristo, tra i fiumi Tigri ed Eufrate si stabilì un popolo in quei luoghi migrato da direzioni e per motivi ancòra oggi sconosciuti: i Suméri.

Il popolo dalle teste nere, così essi stessi si definivano, si stabilirono nella parte più prossima al mare della pianura compresa tra i fiumi Tigri ed Eufrate. I due grandi fiumi formavano in quei luoghi un immenso susseguirsi di paludi e praterie, caratterizzate da un clima particolarlemente costante ed un sole implacàbile. La loro scrittura pittòrica passò, nel corso di un millennio, alla forma simbòlica, attraverso un processo di progressiva stilizzazione delle immagini che le ridusse ad un insieme di circa ottocento combinazioni di poche decine di caratteri composti da segni a forma di cuneo; nacque così nella Mesopotàmia meridionale, circa quaranta secoli prima di Cristo, la prima scrittura dell'umanità: la scrittura cuneiforme.

Nasce così la Storia dell'uomo e quindi, proprio ad òpera dei Suméri, anche questa nostra Storia dell'Idraulica.

La presenza dei due grandi fiumi, quasi paralleli e distanti tra loro alcune centinaia di chilometri, uno dei quali, l'Eufrate, che correva a quote maggiori rispetto al Tigri, consentì la realizzazione di tre canali principali, che collegavano i due corsi d'acqua, sfruttati anche come sistema di trasporto fluviale. Venne addirittura realizzata, come ricorda lo storico romano Plinio il Vecchio (Como 23 d.C. – Stabia 79 d.C.), una diga che sbarrava la foce dell'Eufrate e ne convogliava l'acqua residua, sino a quel punto non ancòra deviata dai canali irrigui, sul territorio per poi scaricarla in mare attraverso il Tigri.

Alcuni studiosi ritengono che proprio il complesso sistema di governo delle acque, con il quale i Sumèri prosciugarono le paludi e garantirono l'irrigazione di un'area così vasta, fu il principale stimolo allo sviluppo della scrittura, in grado di soddisfare l'esigenza di fissare, in mdo univoco, tempi e modalità di 'manovra' dei canali (alcuni dei quali lunghi centinaia di chilometri), orari, quantità, diritti ed istruzioni perchè le acque fluissero secondo l'òrdine stabilìto.

Ecco cosa leggiamo in una tavoletta sumérica redatta intorno al 1700 avanti Cristo ma che si presume essere copia di un documento ben più antico:

> . . . . . *sul punto di coltivare il tuo campo, abbi cura di aprire i canali di irrigazione in modo che l'acqua non raggiunga nel campo un livello troppo alto. Quando lo avrai vuotato dell'acqua, vigila sulla terra ùmida perché resti piana . . . . quando i germogli* [dell'orzo] *avranno riempito lo stretto fondo* [del solco dell'aratro], *bisogna irrigarli . . . . quando l'orzo è tanto fitto da coprire il campo come la stuoia il centro di una barca bisogna irrigare di nuovo. Il grano reale deve essere bagnato una terza volta. Se l'orzo cresce ancòra, allora deve essere ancòra irrigato, si avrà un maggior raccolto del dieci per cento.*

Per l'agricoltura del popolo Sumèro era nozione ordinaria disporre di acqua da distribuire sui campi al momento voluto e più volte nella stagione, alla bisogna, attraverso la semplice operazione di " . . *aprire i canali di irrigazione* . . " costituenti i términali (oggi detti 'adacquatrici') di una vastissimo sistema in grado di portare in ciascun campo acqua derivata dall'Eufrate anche a centinaia di chilometri di distanza, con il solo 'motore' della gravità.

Non solo: possiamo dedurre, dalla tavoletta, che anche l'azione di eliminare l'acqua in eccesso dal campo fosse un'operazione ordinaria, senza difficoltà alcuna, non degna che di una semplice istruzione: " . . . *quando lo avrai vuotato dall'acqua* . . "; era evidentemente efficiente un sistema di canali di colo dotati di pendenze e sezioni adeguate ad allontanare tutta l'acqua in eccesso. L'acqua per l'irrigazione, per quel popolo ed in quel periodo lontano circa sessanta sécoli (!), il sistema irriguo funzionava già, ordinariamente, come . . . quello odierno!

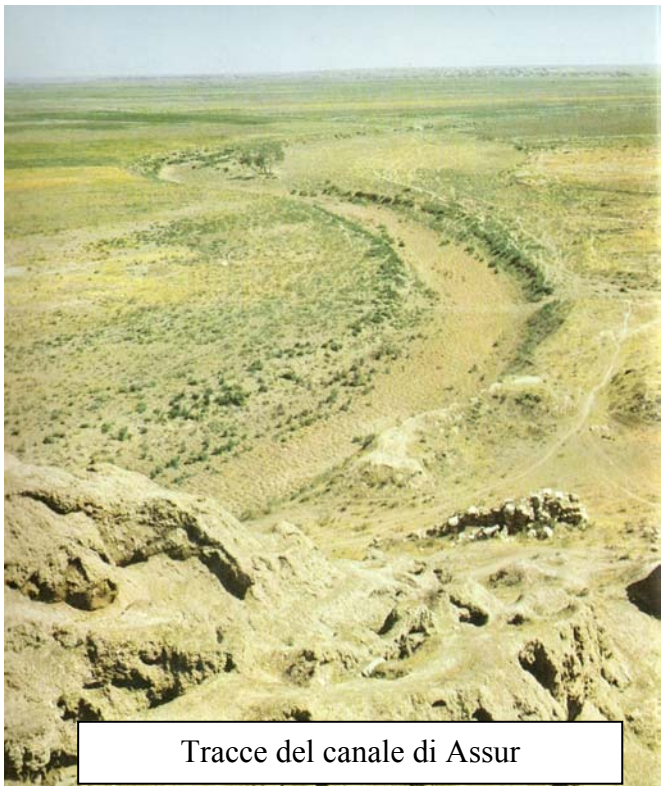
Saper regolare le acque in una rete estesa per migliaia chilometri (il solo canale di Assur, che traeva l'acqua dall'Eufrate, era lungo più di quattrocento chilometri) esìge una conoscenza profonda, anche se empirica, dei fenomeni idraulici nonché la definizione e la comunicazione di règole per tutti chiare, cioè inequivocabili.

Deviare le acque da un fiume, in una misura tale da non essere eccessive per le capacità della rete, ma sufficienti a soddisfare le esigenze di tutti i terreni irrigati, alcuni dei quali distanti centinaia di chilometri, è cosa ancor oggi impegnativa; immaginiamoci cinquanta sécoli fa!

Eppure nei racconti della civiltà delle teste nere, si racconta dell'Irrigazione come di un'azione così ordinaria da sembrare scontata, un servizio normalmente disponibile per l'agricoltore.

Non fu però soltanto una stupefacente, per quei tempi, capacità organizzativa sostenuta dalla prima forma di comunicazione scritta. Perché tutto funzionasse a dovere, era essenziale risolvere in modo efficiente il problema della quotidiana manutenzione di tutte le opere. I Suméri elaborarono un approccio culturale che faceva dell'Irrigazione un bene collettivo dell'intera società: tutti i cittadini, indistintamente, erano chiamati a svolgere i lavori di manutenzione dei canali che garantivano la sopravvivenza stessa della nazione; percepire il bene comune fu, probabilmente, il vincente fondamento di quella civiltà, come dovrebbe ancor oggi essere ovunque.

La capacità dei Sumèri di governare le acque non si riduceva al solo scopo irriguo. I loro canali servivano anche da via di comunicazione e trasporto (si conoscono i resti del porto-canale della città di Assur) nonché da linea di confine tra i domini delle città che, sebbene di uno stesso popolo, vivevano in costante competizione con dispute spesso non pacifiche. Nel 2600 a. C. si racconta (o meglio: è scritto!) di un canale appositamente realizzato per separare i domìni delle città di Lagash e di Umma, allo scopo di porre términe a cruente lotte territoriali; la posta in palio era il fertile e ben irrigato territorio di Guedinna.



Tracce del canale di Assur

La fortunata combinazione di terreni fertili, clima caldo, sole costante ed intenso, garanzìa di Irrigazione, portarono il regno di Sùmer, oltre a dimostrare capacità edificatorie e di scambi commerciali per quei tempi straordinarie, a diventare oggetto della cupidigia dei rozzi popoli delle montagne dell'altopiano iranico (Elamìti, Cassati . .) che, alla fine, portarono alla rovina del primo regno sumèro. Poi gli Accadi, 2350 a. C., con re Sargon di Accad, e di nuovo i redenti Sumèri, 2110 a. C., ripresero la pròspera civiltà, ma questa è . . un'altra storia.

I Sumèri sono accreditati di tante altre 'prime' nella Storia dell'umanità.

Le loro grandi, popolose e ricche città portarono a molteplici innovazioni la cui conoscenza si irradiò, attraverso i commerci, nel mondo eurasiatico. Del resto, giungere per primi alla scrittura portò, quasi naturalmente, a realizzare tanti altri primati, maturati in questo nuovo modo del vivere in una società stabilmente comunicativa: le prime scuole, le prime favole, le prime sentenze, il primo parlamento, i primi dogmi religiosi, le prime leggi.

Alla Mesopotàmia, culla della civiltà sumérica, è spesso associato il Codice di Hammurabi, re degli Assiri detti anche Babilonesi, dalla loro quasi leggendaria capitale Babilonia.

Questo insieme di leggi, al quale si attribuisce la data del 1780 a.C., è considerato il primo Codice di leggi scritte, nel quale si trova anche un interessante richiamo ad una régola di Irrigazione:

> *Art. 53. Se qualcuno è indolente nel mantenere il suo àrgine in buone condizioni e non lo conserva; se così l'àrgine si rompe e tutti i campi vengono allagati, così colui che era responsabile dell'argine rovinato venderà il necessario per denaro ed il denaro ripagherà il grano del quale egli ha causato la pérdita.*
>
> *Art. 54. Se egli non è in grado di ripagare il raccolto perso, egli ed i suoi poderi saranno divisi tra gli agricoltori il cui grano è stato allagato.*
>
> *Art. 55. Se uno apre i suoi canali per portare acqua alle colture, ma è negligente e l'acqua irrompre sui campi dei suoi vicini, allora egli li pagherà per la perdita del raccolto.*
>
> *Art. 56. Se uno si approvvigiona di acqua e l'acqua irrompe nella coltivazione dei vicini, egli pagherà 10 ur di grano per ogni dieci gan di superficie.*

Régole scritte, dunque, circa millecinquecento anni dopo la pienezza della civiltà sumérica, ma che rendono necessarie due considerazioni.

La prima: il sistema irriguo della Mesopotàmia godeva di ottima salute nonostante l'età già superiore a due millenni, a testimonianza di una costante ed efficiente attività di manutenzione, certo aiutata da adeguati progetti e accurate realizzazioni.

La seconda: il Codice di Hammurabi, pur essendo il primo testo legislativo orgànico della Storia, non è orginale; esso infatti derìva da leggi, da régole scritte dal precedente popolo delle teste nere, alcune già organizzate in Codici. Il più antico di questi, oggi conosciuto, è il Codice di Ur-Nammu, re suméro che diede inizio alla terza dinastia di Ur dal 2113 al 2096 a.C.. Segue il Codice Lipit-Ishtar, re semìta di Isin, che governò dal 1934 al 1924 a.C., periodo nel quale i semìti ebbero il sopravvento; la lingua è ancòra il Sumèro. E' invece in Accadico, lingua post-sumérica che utilizza i medésimi caratteri cuneiformi, il Codice Eshnunna (odierna Tell Asmar), probabilmente dell'epoca del re Dadusha (secolo XVIII a.C.); il Codice precede di poco la conquista da parte dei babilonesi, ad òpera proprio del grande re Hammurabi. In queste leggi sumériche già troviamo accenni di diritto delle acque: se un uomo causava l'allagamento di un terreno di proprietà altrui, veniva condannato al pagamento di 3 GUR di orzo (pari al valore di 3 sicli d'argento) per ogni IKU (terzo di ettaro) di terreno allagato. Analoga pena veniva comminata a chi provocava l'inaridamento di un terreno altrui.

La grandezza della civiltà sumérica resta evento marginale nella Storia che si insegna nelle scuole italiane, ùnica memoria del passato che avvicina la quasi totalità dei cittadini, còmplice il modesto fasto che hanno lasciato delle loro òpere, perlopiù realizzate con mattoni d'argilla seccati al sole, ormai miseri resti delle monumentali vestigia di un tempo.

La scuola, per prima, dovrebbe preoccuparsi di dare il giusto mérito a questo popolo, dalle orìgini ancòra sconosciute, che accese le prime e fondamentali 'mille luci' nell'evoluzione dell'umanità e del suo sapere; in questo, con esempi ùnici e strabilianti, anche nella scienza Idraulica.

Molti primàti sono contesi ai Suméri dalla civiltà dell'antico Egitto, da intendersi contemporanea anche se dall'inizio un poco successivo alla nascita della contemporanea organizzazione mesopotàmica. Nel limitato campo del governo delle acque, ci sono notizie che i primi sovrani sotto il gruppo dei Menes, leggendari fondatori della Prima Dinastìa, intorno al 4000 a.C., costruirono una diga in muratura attraverso il Nilo a Memphis (l'allora capitale, circa 14

miglia a Sud dell'attuale Cairo) ed in tal modo resero possibile recuperare una larga porzione delle vicine terre arìde.

Attraverso il cosiddetto canale di Giuseppe, il preistorico lago Maeris era allora utilizzato per accumulare grandi volumi d'acqua durante le piene del Nilo.

Al tempo di Ramses II, nel XIV secolo a.C., fu sviluppato un sistema assai esteso di canalizzazioni.

Nell'ultimo periodo dello splendore egizio, intorno al 500 a.C., fu costruito un canale d'acqua dolce dall'attuale Cairo fino a Suez e vi è testimonianza di ripetuti sforzi in séguito condotti per completare la navigazione lungo il percorso che oggi segue il canale di Suez, tra il Mediterraneo ed il Mar Rosso.

I fiumi ed i laghi, cioè le acque superficiali dolci, furono il luogo privilegiato per le prime esperienze di governo delle acque, calme o in movimento. Il contatto con le acque sotterranee, nei luoghi dove esse restavano in profondità nel sottosuolo, avvenne in tempi meno remòti, richiedendo infatti una capacità ed una tecnica di più elevate capacità. Nonostante ciò si conosce l'esistenza, in Egitto ed in Cina, di pozzi scavati nella roccia, già nel XVII sécolo, che hanno raggiunto profondità anche di trecento metri.

Al di là delle difficoltà di escavazione, l'uso dei pozzi diventa per noi interessante quando, in rapporto alle esigenze irrigue che richiedono quantità d'acqua maggiori rispetto al fabbisogno umano di quel tempo, si pose il problema di sollevare l'acqua con continuità per condurla sui campi.

Un nuovo passo, che apre la strada ad un nuovo capitolo dell'Idraulica, fu l'utilizzo di tubazioni, di condotte per condurre l'acqua anche per notevoli distanze, superando ostacoli fisici della morfologia territoriale. Ci sono testimonianze di importanti sistemi di acquedotti costruiti dai Fenici in Siria ed a Cipro, con gallerie scavate nella roccia e tratti in pressione. Sotto i re di Giuda, mille anni prima di Cristo, Gerusalemme fu dotata da un complesso acquedotto; dalla piscina di Salomone due condotti partivano verso la città, il più basso di essi, lungo circa 20 miglia, attraversava le valli di Hunnom grazie ad un ponte-canale ad archi, ancor oggi in buono stato di conservazione.

Completamente distinta dalla costruzione di quelle òpere idrauliche in grande scala fu l'invenzione e lo sviluppo dei dispositivi a piccola scala come il sifone, l'iniettore, il màntice, che però giocarono un importante ruolo nella comprensione dei princìpi del moto dei fluidi.

Poco è noto sulla loro graduale evoluzione, se non attraverso casuali illustrazioni nei documenti egizi che ne testimoniano l'esistenza ed i progressi costruttivi.

La siringa, prima applicazione del pistone scorrente in un cilindro a tenuta - certo precursore del princìpio della pompa – compare frequentemente nelle raffigurazioni che descrivono l'arte dell'imbalsamazione nell'antico Egitto.

Possiamo pensare che i primi màntici a mano accompagnarono ben presto il dominio del fuoco, per ravvivarlo – all'inizio – e poi per sfruttare l'effetto di elevare la temperatura della combustione sino a valori ùtili alla fusione dei metalli.

Il moto dei fluidi, sebbene non interpretato teoricamente, è stato utilizzato per altri numerosi scopi, a volte tra loro assai differenti, sino dagli albòri delle civiltà.

Sappiamo che gli Egiziani infatti usavano lo scorrere dell'acqua per misurare il tempo, sia attraverso l'efflusso da un contenitore graduato sìa con il flusso attraverso una corrente di un contenitore galleggiante.

Anche molte pratiche religiose, connesse a rituali pubblici, sfruttavano i fenomeni legàti al comportamento dei fluidi in pressione, sia liquidi che gassosi.

Poiché rimangono soltanto incomplete raffigurazioni pittoriche e vestigia di quelle antiche scoperte, si possono solo formulare congetture sulle conoscenze dell'antichità nel campo dei princìpi del moto dei fluidi; certo le conoscenze erano dettate dall'esperienza e dalla capacità di tramandarla di generazione in generazione attraverso il racconto e l'insegnamento, prima orale e poi scritto.

Non dobbiamo dimenticare che il successo di ogni antico progetto fu il risultato di molti tentativi ed errori; tanti probabilmente desistettero, ma alcuni – certo aiutati da progressivi successi, da intelligenza, da costanza e forse anche da buona sorte - acquisirono proporzionalmente maggiore abilità, seppero formulare ipotesi, prevedere e poi dimostrare il ripetersi dei fenomeni enunciati, riproducendo esperienze e realizzandone, così, applicazioni pratiche.

L'esperienza – prima che la scienza – fu il sostegno delle scoperte in Idraulica, come spesso accade per le scienze applicate ai fenomeni fisici (ancòr oggi molti ingegneri attribuiscono i loro successi più all'esperienza che a quello che hanno imparato a scuola!).

Esperienza ed intuizione, intuizione ed esperienza: facce della stessa medaglia

L'evoluzione degli oggetti destinati ad essere lanciati, come frecce e lance, oppure a scorrere nell'acqua, come le imbarcazioni, denòtano la ricerca di assecondare – per via sperimentale - i princìpi della dinamica dei fluidi. Fu certo avvertita sin da princìpio la connessione della dimensione e forma dell'area esposta al flusso rispetto alla minore o maggiore efficienza della penetrazione.

Anche il collegamento tra velocità e pendenza in un canale fu nozione presto intuìta chiaramente, ma il rapporto tra area della sezione del flusso e velocità del flusso medésimo, quale corretto approccio per la valutazione del volume transitato nell'unità di tempo (la portata), non apparve dimostrato, in letteratura, se non in època moderna, nel XVII sécolo. (Vedremo più avanti come già Erone di Alessandria, nel II secolo d.C., enunciò questo princìpio nella sua òpera '*Dioptra*', ma non ottenne alcun séguito, tant'è che oggi è l'abate Castelli, italiano del XVII secolo, ad essere considerato il padre dell'Idraulica moderna, avendolo riproposto per mezzo della sua 'favola'.).

Si può concludere che l'Idraulica nell'età antica fu soprattutto un'arte, miscela di intuizione, pratica e capacità costruttiva, senza basi scientifiche, elaborando anche teorie e principi, ma tradotti per approssimazioni successive sino all'ottenimento del risultato voluto.

Tuttavia furono tutte importanti le conquiste dei nostri predecessori, perchè seppero tracciare i primi metri della lunga strada della conoscenza, allora ben più irta di difficoltà, sìa concettuali sìa materiali.

Coloro che – nel più recente passato - hanno potuto e saputo sviluppare la scienza dell'Idraulica devono infatti molto ai loro predecessori, non solo perché è il dominio dell'acqua che ha permesso lo sviluppo ed il progresso delle civiltà – delle quali siamo tutti figli – ma anche perché gli sforzi, le scoperte e le testimonianze degli antichi sono da sempre il principale stimolo della ricerca dei loro successori.

Cap. 2 - Le conoscenze dell'antica Grecia

Gli antìchi Greci, che costituivano un insieme di comunità mai unìte in un'ùnica nazione ma fondatrici di una vasta ed originale cultura che ancòr oggi porta frutti in gran parte del mondo, furono grandi navigatori e mercanti, certo in questo aiutàti dalle particolarità della propria terra. I frequenti contatti e gli scambi con le altre civiltà del Mediterraneo assicurarono ai 'figli di Elléno' mille opportunità di confronto, di diàlogo e di apprendimento.

Quando l'Egitto aprì ad essi le proprie porte, intorno al 650 a.C., non solo in quel regno giunsero dalla Grecia mercanti e navigatori ma anche studenti e uomini di cultura, soprattutto filosofi e matematici.

Molti congegni, pratiche applicazioni di non noti princìpi di Idraulica (come il sifone, il màntice, la siringa, l'orologio ad acqua), in Egitto normalmente utilizzati da sécoli se non da millenni, furono acquisìti dai Greci, rappresentando – in alcuni casi – punto di partenza per nuovi traguardi poi ai soli Greci attribuìti.

Nonostante ciò, ai tempi nei quali la civiltà greca venne in contatto con altre comunità più progredìte e consolidate, erano già presenti, sul suo territorio, grandi òpere idrauliche.

Per esempio la galleria di drenaggio del lago Capsis, in Boezia, caratterizzata da ben sedici pozzi, il più profondo dei quali misurava 46 metri, oppure il sistema di approvvigionamento dell'acqua sviluppato da Eupalìno di Megàra per l'isola di Samo.

Architetto ed ingegnere del tiranno Polìcrate, intorno alla metà del VI sécolo a.C., Eupalìno fu artéfice di questo acquedotto, per i tempi grandioso. Eròdoto, storico greco del V sécolo, lo considerò alla stregua di altre grandi e famose òpere di quel tempo, come il tempio di Era, edificato nel dècimo sécolo a.C. nella stessa isola. Parte dell'acquedotto di Samo era costituìta da una doppia galleria, scavata nella roccia, lunga 1463 metri: la superiore di sezione 2,8 x 2,8 metri e l'inferiore 3,8 x 3,8; solo in quest'ultima galleria inferiore scorreva l'acqua. Attraverso quest'opera, la città di Samo aveva garantita l'acqua di una abbondante sorgente (così riferisce Eròdoto). Un problema risolto brillantemente da Eupalìno fu l'inizio dello scavo della galleria, partendo da entrambi i lati della montagna e conducendo le traiettorie in modo da renderle rettilineee ed allineate. Di quest'òpera sono ancòr oggi presenti ampie vestigia.

Negli acquedotti greci scavati in galleria lo schema del doppio cunìcolo non era infrequente. A lungo ci si è interrogàti per comprendere come mai in quei tempi, nei quali uno scavo in roccia era un'òpera di grandissimo impegno (sotto ogni punto di vista), si ricoresse, di fatto, a raddoppiare ogni fatìca, realizzando due condotti, dei quali solo l'inferiore destinàto a condurre le acque. La tesi oggi più accettata non può non destare stupore: la galleria superiore, collegata all'inferiore da pozzi verticali, svolgeva una funzione di protezione dai movimenti tellurici e dai crolli, che potevano così concentrare la propria energìa su di essa, a protezione di quella sottostante, portatrice di acqua. Evidentemente i costruttori greci erano stati in grado di osservare questo fenòmeno e di valutarne l'utilità superiore al prezzo dei maggiori costi e lavori di esecuzione, perché corrispondeva ad una miglior garanzìa di non vedere pregiudicato il vitale flusso delle acque, qualunque accidente fosse occorso alla galleria superiore.

La ricchezza documentale e scientifico/storica dell'antica Grecia è ricca di testimonianze che ci parlano del progresso della conoscenza scientifica, ed in particolare in Idraulica e nelle scienze ad essa collegate.

Ad esempio, l'ampio lavoro del fisico e storico Ctesias, che visse circa cento anni dopo Eupalìno. Ctesias trattò il complesso della storia dell'Assiria e della Persia, in un'òpera di 23 volumi, ed in essa, per la prima volta, riporta considerazioni ed osservazioni sul comportamento delle acque nei fiumi naturali: primi accenni di Idraulica fluviale.

Taléte di Miléto (640–546 a.C.) fu uno dei primi studiosi greci che si dedicò alla scienza presso i sacerdoti di Memphis e di Tebe, custodi del sapere egizio. Da questi trasse la cultura e lo stìmolo per fondare la più antica scuola greca di filosofìa: la Scuola Iònica. Egli ottenne particolare fama tra i suoi concittadini grazie alla corretta interpretazione dell'eclissi solare (Taléte trasse le principali conoscenze che lo portarono a questa scoperta dagli Egiziani, da molto tempo dédìti alle osservazioni astronomiche); a lui è riconosciuto il mérito d'aver attribuìto all'anno solare una durata di 365 giorni, dimostrandone la miglior adeguatezza rispetto al tradizionale anno lunare di 360 giorni, sebbene tale osservazione fosse già presente in scritti degli scienziati egizi.

Taléte proseguì nello sviluppo della Geometrìa, sòlida e piana, migliorando quanto già noto agli Egizi, ed introdusse la Geometrìa lineare; fu sua l'idea, che tanto successo ebbe per tanto tempo, che la Terra fosse piatta e l'acqua l'orìgine di tutte le cose.

Forse il più rilevante contributo allo sviluppo dell'Idraulica fu la tesi, originale della Scuola Iònica, secondo la quale lo studio della Natura debba essere condotto attraverso l'osservazione diretta, per descrivere e poi comprendere ogni fenomeno nel suo manifestarsi: un approccio quanto mai ùtile nello studio dei fenomeni idraulici.

Un più giovane contemporaneo di Taléte, Pitàgora di Samo (Samo ca 575 – Metaponto ca 497 a.C.), è degno di essere qui ricordato, sebbene non si conoscano di lui contributi diretti all'Idraulica. Nei documenti che parlano della sua vita, storia e leggenda si confondono: si dice che, come Taléte, sìa stato introdotto nelle più riservate conoscenze scientifiche dai sacerdoti dei templi egizi; con questi condivise la prigionìa in Babilonia, dove rimase per vent'anni. È certo che avvicinò le culture egizia, mesopotàmica e, probabilmente, indiana.

Pitàgora fu uno dei primi a sostenere che la Terra fosse sférica ed espresse il suo concetto di universo che anticipava, sebbene con poco convincimento, la teoria avanzata da Copérnico più di duemila anni dopo; resta famoso, per tutti, per il teorema sui triangoli rettangoli detto, appunto, il *Teoréma di Pitàgora*.

Verso il 535 si stabilì a Crotone, nella penìsola italiana, dove fondò la Scuola Itàlica, prima vera accadémia filosofica, ispirata al princìpio che la conoscenza fosse un mezzo di elevazione dello spirito, unendo l'interesse per la scienza ad un ascetismo dalle ferree régole. A séguito di una congiura, Pitàgora fu costretto a trasferirsi a Metaponto, sul finìre del sesto sécolo, e la Scuola Itàlica si sciolse per ricostituirsi poco dopo a Taranto, ad òpera dei suoi discepoli, dove fiorì fino alla fine del quarto sécolo prima di Cristo, dando vita ad una corrente folosofica detta Pitagorismo. La Scuola Itàlica, detta anche Pitagòrica, ebbe grande influenza sulla cultura della Magna Grecia, sviluppando studi soprattutto in Matemàtica ed in Astronomìa.

I Pitagòrici ritenevano che i numeri fossero il princìpio di tutte le cose; ogni cosa, quindi, è riconducibile a numeri ed a forme geométriche; ogni forma geométrica è scomponibile in piani, linee e punti sino a sìngole unità: i numeri. La comprensione della realtà giunge nella descrizione di ogni aspetto di essa attraverso i numeri.

All'importanza dell'osservazione, professata dalla Scuola Iònica di Taléte, si aggiunse quindi quest'altro approccio, quantomai stimolante, che mérita una sottolineatura, perché l'atteggiamento di fronte a ciò che si osserva ma non si comprende è determinante nel progresso delle scienze.

La Scuola Itàlica giunse alla conseguente conclusione: non esiste alcun aspetto della Natura che non possa essere compreso; l'ùnico limite alla ricerca è la capacità di scoprire il modo, comunque già determinàto, di tradurre ogni fenòmeno in espressioni numériche che lo descrivano pienamente. Nulla, quindi, è inarrivabile per la comprensione della mente; nulla è mistero impenetrabile: il vantaggio, nello sviluppo del sapere è strabiliante!

Un'altra importante scuola di pensiero sorse nell'antìca Grecia ad òpera di uno dei più importanti tra i filosofi greci che si formarono culturalmente in terre straniere: Demòcrito (Abdera

ca 465 – ca 370 a.C.); nato in Tracia ad Abdera, nel 465 a.C., trascorse quasi sette anni in Egitto e poi viaggiò in Persia, in India ed in Etiopia. Fu allievo di Leucippo di Miléto, padre dell'atomismo. Scrisse 70 opere delle quali restano solo 300 frammenti, comunque sufficienti per testimoniarne una cultura che spazia dalla Cosmologìa, alla Matematica, alla Geografìa, alla Medicina . . .

Fu fondatore della Scuola Atòmica, i cui insegnamenti influenzarono la filosofìa greca per molti sécoli. Perfezionando l'atomismo di Leucippo, Demòcrito considerò che l'universo fosse costituìto da una quantità costante di materia e di vuoto; la materia è a sua volta composta da un infinìto numero di particelle elementari o àtomi, solidi, omogenei ed indivisibili, differendo tra loro soltanto in forma, peso ed ordine. Come la materia, anche il moto era considerato eterno, con una sua origine in un moto precedente e così via all'infinito. Nulla considerò di fortuita formazione o di origine superiore e credette che ogni cosa in natura fosse dovuta a processi quasi meccanici, secondo un processo rigorosamente deterministico: c'è sempre una lògica in tutti gli avvenimenti.

Nei successivi due o tre sécoli le tre Scuole (Iònica, Itàlica ed Atòmica) produssero una vasta serie di documenti manoscritti su diversi aspetti del pensiero filosofico, ma di questi abbiamo oggi soltanto loro frequenti citazioni da parte degli scrittori successivi.

Per la Scuola Iònica l'aria era il princìpio base della vita. Per la Scuola Itàlica il fuoco era la vera essenza dell'universo; le due dottrine concordavano tuttavia sul fatto che il fuoco, l'aria, l'acqua e la terra fossero le quattro principali forme della materia.

La Scuola Atòmica considerò la parte di spazio vuoto essenziale tanto quanto quella occupata dalla materia. La Scuola Itàlica similmente sostenne che i vuoti esistevano tra le particelle elementari con le quali è composta la materia; vuoti che così consentono i movimenti relativi tra le particelle ed il miscuglio di materiali diversi senza un apparente mutazione del volume. La Scuola Iònica, al contrario, affermò che il vuoto assoluto fosse impossibile e che lo spazio tra le particelle fosse sempre occupato dall'aria.

L'essenza di quelle teorìe è ripresa e testimoniata negli scritti di molti filosofi greci: elàborata da alcuni, modificata da altri, ma invariabilmente agganciata – per quanto qui interessa – sull'esistenza o meno del vuoto.

Il filosofo Platone, che visse ad Atene tra il 428 ed il 347 a.C., rappresentò un estremo allontanamento dalle idee originali di Taléte, impostate sull'importanza dell'osservazione, mentre fu notevolmente affine a Pitàgora nella passione per la Matematica, scienza dei numeri che è la massima espressione della 'purezza concettuale'. Il grande rigore delle conclusioni logiche della Matematica spinse Platone a sostenere che la Matematica può portare alle verità assolute per cogliere l'essenza della realtà. Molte altre scienze hanno questa capacità, secondo Platone, ma non la Fisica, che egli considera una semplice osservazione dei fenomeni alla quale non va attribuìto alcun mérito né capacità di conoscenza.

L'evidente contrasto con l'atteggiamento di Demòcrito, sostenitore dell'osservazione e della capacità di questa di fornire la spiegazione fisica e matematica dei fenomeni osservati, trovò la filosofìa di Platone vincente, 'seppellendo' lo stìmolo della ricerca fenomenologica sino al XVI secolo. Platone fondò un'Accadémia, chiamata Prima Accadémia, che continuò ad esistere ed operare per molti sécoli, al punto che ancor oggi una corrente di pensiero è chiamata 'platonismo', che ripete e rinnova le basi del suo pensiero: l'identificazione dell'idea con la realtà e la conseguente oggettivizzazione della spiritualità, la massima considerazione del puro pensiero e la corrispondente svalutazione dell'esperienza e delle scienze empìriche, l'esaltazione dell'intuizione intellettuale come conoscenza perfetta.

Il più autorevole 'prodotto' di questa scuola – forse l'ùnico di particolare nota – fu Aristòtele (Sagìra 384 – Càlcide 322 a.C.), il cui pensiero estese per millenni, ed estende tuttora, la propria influenza sulle culture di quasi l'intero pianéta.

Aristòtele nacque a Sagìra, una colonia greca sulle coste nord ovest del mar Egeo, figlio di un médico. Tra l'età di 18 e 37 anni, trasferitosi ad Atene, fu discepolo di Platone fino alla morte di questi. Nel 343 fu chiamato da Filippo, re di Macedonia, affinché fosse precettore del suo figlio Alessandro, al quale Aristòtele infuse l'idea della superiorità della cultura ellénica e della sua naturale tensione alla diffusione ed al domìnio. Nel 335 Aristòtele tornò ad Atene e vi fondò la sua scuola, detta Licéo perché aveva la sua sede tra i viali che circondavano il tempio di Apollo Licéo. Aristotele era sòlito tenere le lezioni passeggiando tra questi viali e da questo la sua scuola fu detta Peripatética e Peripatétici i suoi discepoli. Sebbene allievo di Platone, egli se ne distaccò, rigettanto il concetto di Platone delle idee come realtà vera e riabilitando l'importanza degli eventi e dei fenomeni.

Aristòtele fu analista di grande spessore, studiando, attraverso l'osservazione, ogni aspetto della vita naturale; studiò il movimento degli astri, il moto delle cose e degli esseri viventi. La grande influenza, che si protrasse per molti sècoli, del pensiero di Aristòtele ebbe risvolti negativi soprattutto nel campo della Meccanica e della Fisica, dove la naturale mèta è nella comprensione stessa del fenomeno osservato.

Gli scritti di Aristòtele rappresentano una vera e propria enciclopedia della logica peripatética: Fisica, Psicologia, Biologia, Astronomìa, Metafisica, Ètica e Politica (intesa come scienza – cosa oggi quasi irriverente . . . per il concetto stesso di scienza!), con particolare ènfasi sull'evoluzione delle conoscenze in ogni campo.

In considerazione dei loro effetti sulla storia dell'Idraulica è più interessante notare che i suoi commenti sul moto dei fluidi erano relativamente brevi, incidentali; in essi è sempre presente la sua convinta negazione dell'esistenza del vuoto: ". . . *non vi è alcuna ragione che possa sostenere l'esistenza del vuoto, come non v'è ragione dell'esistenza dello zero come numero*." In altri fenòmeni egli portò conclusioni corrette ma senza alcuna dimostrazione: così il galleggiamento del legno nell'acqua è dovuto al fatto che questo materiale contiene spazi al suo interno; il nuoto è meno faticoso nell'acqua di mare perché è salata.

Se tutti i precedenti filosofi avevano considerato il moto dipendere da un altro moto e così via sin dalle origini delle cose, Aristotele attribuì il movimento di ogni cosa come prodotto della naturale tendenza di ogni elemento a ritornare al proprio stato iniziale; ma analizzando il moto 'violento', cioè il movimento di oggetti ai quali è stata applicata una intensa e ràpida spinta iniziale ed intensa forza di lancio, Aristotele giunse ad una conclusione paradossale: il mezzo attraversato (aria o acqua che fosse) è responsabile della resistenza al moto ma anche del suo sostentamento: ". . . *le cose che sono lanciate si muovono, anche se ciò che diede il loro primo impulso più non le tocca, per la ragione della mutua sostituzione, perché l'aria . . . le spinge con un movimento più veloce del moto naturale dell'oggetto . . .* "

Partendo dall'impossibilità dell'esistenza del vuoto, quindi che un oggetto che attraversa un fluido non può lasciare dietro a sé una scìa dove il fluido non torni istantaneamente, Aristotele, era quindi convinto che il fluido, attraverso il quale il corpo lanciato procede, è compresso davanti al proiettile, ma è immediatamente rimpiazzato dietro ad esso, cioè nello spazio che il corpo lascia dietro a sé, producendo una spinta all'avanzamento. L'idéa, figlia del rifiuto che il vuoto possa esistere anche solo per un attimo, che fosse lo stesso fluido, attraversàto dall'oggetto in moto, responsabile del movimento si diffuse come la '*Teorìa del mezzo del moto*'.

Sebbene Aristotele, abbandonando l'impostazione del suo maestro Platone, fu un decìso sostenitore dell'osservazione, riprendendo concetti di Demòcrito, e pensasse che la conoscenza dovesse continuamente progredire negli insegnamenti e nella documentazione, dopo la sua morte le sue òpere vennero come cristallizzate dai tanti che ne seguirono la via, al punto che costituirono esse stesse il principale ostàcolo al progresso.

Fu così che, anche se altri scienziati e filosofi ottennero riconoscimenti nella antica Grecia, per circa sette sécoli gli scritti di Aristotele vennero considerati come la più alta espressione culturale sui molti fondamentali aspetti della vita civilizzata. Alle sue òpere è addirittura attribuìto il mérito d'aver custodito la vera scienza dal generale 'disfacimento sociale e culturale' del Medio

Evo. Nessuno può dire quale diverso sviluppo avrebbe subìto il pensiero se Aristotele non fosse esistito; molti considerano infatti che il generalizzato, scrupoloso e spesso àcritico séguito dei suoi scritti produsse una diffusa stagnazione della ricerca.

Al potere di una nazione, purtroppo, si è spesso associata l'espansione a danno dei popoli vicini; la Grecia antìca non poteva non soggiacere a questa régola della Storia umana, forse smentita solo in questi ultimi decenni, anche se, purtroppo, non ovunque nel mondo.

Le attività bélliche, anche nel passato più remòto, in époche, cioè, caratterizzate da tali e tante 'infanzie culturali', erano causa del più ràpido progresso di quella parte della conoscenza legàta allo sviluppo degli strumenti di guerra, di conquista e di 'colonizzazione'. Con il passare dei sécoli, agli eserciti seguìrono e poi vennero affiancati gli uomini votati sìa alla ricerca teòrica che alle applicazioni pratiche e tecnologiche, chiamati a produrre non solo migliori strumenti di offesa ma anche alla realizzazione di òpere di consolidamento delle acquisizioni territoriali. La tecnologia nelle costruzioni, le conoscenze in Fisica ed in Meccanica divennero così una componente importante negli esérciti.

Nelle spedizioni militari dell'antìca Grecia iniziarono a comparìre stabilmente ingegneri/costruttori, ben prima del regno di Alessandro Magno (356 – 323 a.C.). Il re macédone diede ad essi una posizione privilegiata, perché essenziali nella costruzione sìa di macchine da combattimento e mezzi di trasporto, sìa nella realizzazione di nuove grandi opere civili, se non intere città, come Alessandria d'Egitto, edificata intorno all'anno 332 a.C.. Questa città, assieme a tante altre omònime che Alessandro fondò lungo il suo vittorioso cammino, doveva essere germe e suggello della supremazìa della cultura ellénistica attraverso la gloria del popolo macédone. Lo scopo fu raggiunto, superando persino le intenzioni originarie. Sotto il regno dei Tolomei, dal IV al I secolo a.C., Alessandria divenne la capitale intellettuale del mondo ellénico, anche se, paradossalmente, isolata, per volontà di quest'ultima dinastìa di faraoni, rispetto alla cultura ed al mondo d'Egitto. Tutti i manoscritti, allora esistenti nelle culture del Mediterraneo ed oltre, furono acquistati o copiati per la biblioteca di Alessandria, magnifico edificio dedicato alle Muse che divenne, sebbene in terra d'Egitto, il nùcleo della maggiore università greca.

Tra i molti sviluppi alessandrini si può, per esempio, citare la Matematica che, con Euclìde (Alessandria IV/III sécolo a. C.), elevò la città a maggior riferimento per la cultura scolastica greca fondandovi una Scuola di Matemàtica che restò famosa per sécoli.

Euclìde non fu, però, soltanto un matemàtico: nella sua òpera più importante, '*Elementi*', egli detta le régole per un rigido processo deduttivo della scienza, fondato sulla seguente successione: enunciazione, esempio, specificazione, costruzioni aggiuntive, dimostrazione, conclusione. La dimostrazione, a sua volta, è condotta attraverso l'analisi, la sìntesi, la confutazione dell'assurdo, l'esaustione e la determinazione. Il linguaggio tecnico e il nuovo e codificato formalismo éuclidei costituirono un modello di esposizione scientifica a lungo insuperato, anche se di Euclìde tutti ricordano, quantomeno come gradìta eco dell'esperienza scolastica, soltanto i due teorémi sui trangoli rettangoli che portano il suo nome.

Anche Archiméde (Siracusa 287–212 a.C.), matematico e fisico siracusano, figlio di Fidia, un astrònomo, completò i proprî studi alla scuola euclidéa di Alessandria. Tornato a Siracusa, mantenne stretti contatti con i matematici alessandrini, in particolare con Eratòstene.

Come per Pitàgora, anche sulla figura di Archiméde la storia si confonde con la leggenda, rendendo difficile il separàre con certezza la realtà dalla fantasìa, quest'ultima da Archiméde stesso aborrìta perché da essa scaturiscono concetti indegni della vera scienza. I suoi studi abbracciarono molteplici settori della scienza, tuttavia la sua notorietà è legàta soprattutto alle scoperte in Geometrìa ed in Idraulica.

È universalmente noto l'episodio della sua vita – non privo di alòne leggendario – nel quale intuì, e poi enunciò, il princìpio di galleggiamento, mentre faceva il bagno: tale fu la sua gioja

– narra la 'cronaca' – che Archimede, gridando "hĕ*urēka!"* (ho trovato!), si lanciò, senza vestiti, in strada.

Il *Princìpio di Archiméde* oggi è così ricordato:

"*Qualsìasi corpo pesante, se immerso in un liquido, riceve una spinta, diretta dal basso verso l'alto, che è uguale al peso del volume di liquido occupato dal corpo medésimo*."

. . . la conseguenza è evidente ma resta opportuna qualche considerazione.

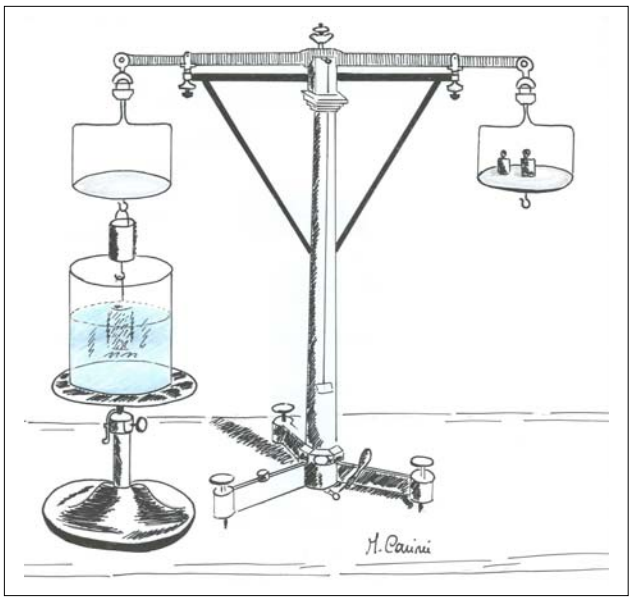
Immergendo un corpo in un liquido, possiamo dedurne la densità, rispetto a quella del liquido stesso, semplicemente osservandone il comportamento: se affonda ha maggiore densità, minore, se galleggia; ecco perché, ad esempio, come non desta alcuno stupore vedere un pezzo di legno galleggiare sull'acqua, altrettanto banale dovrebbe sembrare il veder galleggiare un chiodo di ferro immerso nel mercurio!

In realtà la densità dedotta in tale modo dovrebbe essere chiamata *densità apparente*, perché la spinta di Archimede è pari al peso del volume della parte immersa dell'oggetto, quindi del liquido spostato, e non tiene conto del fatto che il corpo immerso possa avere dei vuoti non comunicanti con il liquido nel quale è immerso: una nave fatta di metallo, materiale più denso dell'acqua, galleggia perché fatta anche di vuoti; affonda quando i vuoti entrano i comunicazione con l'acqua . . . riempiendosi.

Archiméde, però, proseguì in una successiva conclusione:

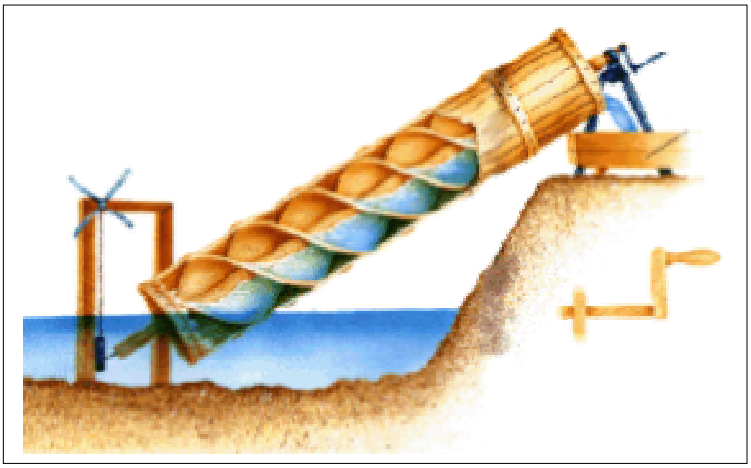
"*due corpi di idéntico volume, ma di materiale differente, immersi nello stesso liquido saranno spinti verso l'alto da una forza idéntica: misurandone il peso residuo si può concludere quale dei due sìa più denso*."

Fu così evidente, allo scienziato siracusano, che questo fenòmeno poteva essere ùtile per valutare la densità della materia di ogni corpo rispetto alla densità dell'acqua, presa come riferimento; sua fu l'invenzione dello strumento per effettuare queste misurazioni: la bilancia idrostatica, detta *Bilancia di Archiméde*. Con essa Archiméde risolse un quesìto postogli da Gerône, tiranno di Siracusa, che desiderava sapere se la corona a lui preparata fosse interamente d'oro e non invece composta anche da metalli meno preziosi; la difficoltà era l'ovvio òrdine di non rovinarla. Archiméde dimostrò, attraverso la sua bilancia, che in realtà la corona era composta di oro ed argento e non di solo oro, sapendo anche definire le proporzioni tra i due metalli.



Sotto la protezione di Gerône, del quale era amico e forse parente, Archiméde realizzò molte invenzioni: macchine per il sollevamento, sistemi di leve (gli si attribuisce la frase '*Dàtemi un punto di appoggio e vi solleverò il mondo*.'), macchine da guerra, tra le quali gli specchi ustori (grandi paraboloidi che concentravano la luce ed il calore del sole) ed il cannone a vapore (in un cilindro metallico, il 'fumo d'acqua', così era chiamato nell'antichità il vapor acqueo, era portato in pressione e poi liberato, permettendo il lancio di pesanti proiettili; vedremo presto che anche

Erone provò l'energìa che poteva racchiudersi nel 'fumo d'acqua' ma solo con Leonardo da Vinci, diciassette sécoli dopo, vennero riprese le esperienze sulla forza del vapore in pressione).



Sebbene compaia già in alcuni documenti egizi, anche se in forma semplificata, ad Archiméde è attribuìta l'invenzione della vite d'acqua, oggi detta *Vite di Archimede* o *còclea*: pompa dalla tecnologìa particolarmente semplice, che costituì un importante progresso nel sollevamento delle acque, soprattutto per l'irrigazione dei campi.

Siracusa, nel 209 a.C., fu assediata dai Romani, che la conquistarono dopo tre anni di assedio. Nel successivo saccheggio (*praedatio*), al quale erano autorizzati i legionari, Archiméde venne ucciso, si dice ma forse è un'altra leggenda, da un legionario, irritato perché non si era sùbito distolto dai suoi calcoli quando il soldato gli ordinò di alzarsi perché il Console Marcello lo voleva al suo cospetto. Il Comandante romano, infatti, aveva raccomandato ai suoi uomini di catturare lo scienziato siracusano sano e salvo; ma la férrea disciplina, allora vincente caratteristica delle truppe di Roma, produsse la reazione che portò alla morte di un sì grande uomo.

Di Archiméde sono noti dieci òpere; la più importante per la storia dell'Idraulica è il doppio volume dell'analisi dell'idrostatica e del galleggiamento: '*Sui corpi galleggianti*'.

Oltre all'enunciazione del *Princìpio di Archiméde*, già ricordato, l'òpera contiene un altro importante postulato:

la forza, con direzione verticale, che si manifesta nei corpi immersi in un fluido agisce come fosse applicata al loro centro di gravità, il baricentro.

Questa considerazione gli permìse di studiare, per differenti forme, l'equilibrio tra la forza peso e la spinta di galleggiamento, giungendo ad enunciare régole precìse per verificare quanto una forma fosse, in acqua, più stàbile di altre, con dirette applicazioni di ingegnerìa navale.

Lo stesso metodo di ricerca dell'equilibrio delle due forze, peso e galleggiamento, venne utilizzato da Archiméde per sviluppare métodi di determinazione di aree, volumi e centri di gravità.

Le scoperte di Idrostatica di Archiméde sono certamente tra i più rilevanti contributi della ricerca scientifica dell'antìca Grecia.

Riferendosi al trattato '*Sui corpi galleggianti*', l'italiano G. L. Lagrange, circa venti secoli dopo, affermò: "*Questo lavoro è uno dei più splendidi momenti attestanti il genio di Archiméde, perché contiene la teoria perfetta sulla stabilità dei corpi galleggianti, tant'è che dopo di lui ben poco è stato ad essa aggiunto*."

Altri tre rappresentanti della Scuola éuclidea di Alessandria méritano una citazione in questa storia, nonostante la scarsità dei documenti e la incertezza di alcuni riferimenti che rendono difficoltosa la loro esatta collocazione nel tempo.

Il primo di questi fu Ctesibio, che si ritiene vissuto dopo la metà o del terzo o del secondo sécolo prima di Cristo. Il secondo fu Philo di Bisanzio, probabilmente contemporaneo o immediatamente seguente di Ctesibio. Il terzo fu Eròne di Alessandria, che visse in un periodo ancòra indeterminato; a tutt'oggi la sua vita viene collocata, non senza qualche dubbio, nel primo sécolo dell'era cristiana.

Ctesibio nacque ad Alessandria; nonostante fosse figlio di un barbiere e barbiere lui pure, si applicò - con genio innato - agli studi di Idraulica, tant'è che gli si attribuiscono molte invenzioni, tra le quali l'orologio ad acqua e gli òrgani ad acqua. Per questi ultimi, a Ctesibio è riconosciuto il mérito d'aver per primo utilizzato l'aggettivo 'idraulico' per indicare il fatto che in essi la pressione dell'aria, che génerava il suono nelle canne, era prodotta dalla pressione dell'acqua.

Di particolare interesse è l'attribuzione a Ctesibio della pompa a pistoni, che con lui quindi farebbe la sua prima comparsa nella storia dell'Idraulica: due pistoni disposti uno di fronte all'altro e scorrenti in altrettanti cilindri, in grado di produrre un getto d'acqua con una pressione ùtile significativa. Nessuno degli scritti di Ctesibio sono giunti sino a noi; di lui abbiamo le sole notizie tramandateci dagli scrittori posteriori, come Marco Vitruvio Pollione (I sécolo a.C.) che, nel suo '*De Architectura*', gli accreditò quelle specifiche invenzioni.

Del secondo rappresentante della scuola alessandrina, Philo (o Philone) di Bisanzio, esistono alcuni scritti, purtroppo solo in frammenti, che tràttano argomenti di Pneumàtica. Esaminò e discusse il principio di funzionamento del sifone, utilizzandolo in molti ingegnosi dispositivi, come le camere a pressione, in parte riempite di aria; alcuni di questi sistemi avevano l'esplìcito effetto di mantenere, durante il flusso, il livello costante nel recipiente dal quale il sifone estrae il liquido. Il fatto che alcuni di tali sistemi avessero trovato applicazione nell'uso comune non è provata dai frammenti che parlano del lavoro di Philo; qualcuno però correttamente deduce che essi fossero utilizzati in numerosi dispositivi idraulici e pneumatici per creare giochi ed 'effetti speciali', in occasione di rappresentazioni e trattenimenti.

Tanti furono gli argomenti e le materie indagate da Eròne di Alessandria: Geometrìa, Matematica, Pneumatica, Meccanica, Fisica, Ottica, Geodesìa, Idraulica, come testimòniano i suoi numerosi lavori, in buona parte giunti sino a noi.

Di grande interesse, anche per lo sviluppo dell'Idraulica applicata, è la sua formula, di Geometrìa, per la risoluzione dei triangoli (ancòra oggi indicata come '*Formula di Eròne*') che, assieme all'invenzione della *diottra* (strumento topografico, progenitore del tacheòmetro e del teodolìte), permise di risolvere il seguente problema, qui enunciato con la dizione dello stesso scienziato greco: 'P*erforare una montagna con una galleria in linea retta, dati i punti iniziali e finali dello scavo*'.

L'applicazione di questa scoperta, matematico-topografica, consentì di realizzare grandi acquedotti che poterono superare, in galleria, alture diversamente insormontabili, collegando alle città acque sorgenti, ottime e in grande abbondanza, scaturenti a notevoli distanze.

Tra le molte considerazioni e scoperte attribuibili ad Eròne, rivestono grande rilievo, per l'argomento di questo libro, le sue analisi sul moto dei fluidi. Nell'introduzione dell'òpera '*Pneumatica*', egli prende spunto dall'aristotélico rifiuto dell'esistenza del vuoto, realtà che giudicò certo difficilmente intuìbile per la mente umana, perché innaturale, ma non impossibile: postulò, infatti, che il vuoto potesse non solo esistere ma addirittura essere prodotto artificialmente da una forza sufficientemente intensa, così come intensa dovrebbe essere una forza che eliminasse il vuoto che si trova tra le particelle elementari ed infinitesime che compongono la materia.

Il superamento del dògma aristotélico dell'inesistenza del vuoto aprì la mente di Eròne alla comprensione del princìpio di funzionamento del sifone. Egli prima dimostrò, contrariamente a quanto era ritenuto dagli studiosi del suo tempo, che un allargamento di una parte del sifone, quindi un aumento dell'acqua in questo tratto contenuta, non produce un cambiamento nel flusso in uscita, diversamente dipendente, oltre che dal diametro minimo della condotta, dalla differenza tra i livelli del fluido nei contenitori che il sifone collega, flusso che si annulla quando tale differenza scompare: ecco la prima esplìcita formulazione della relazione tra l'altezza d'acqua in un recipiente rispetto ad una foro ricavato nella sua parete (carico idraulico) e la quantità d'acqua che esce dal foro (portata dell'efflusso).

Per spiegare il princìpio che innesca lo scorrere dell'acqua nel sifone, la cui prima parte è una tubazione ascendente, Eròne così si esprime: "[Il comportamento dell'acqua in un sifone] *è dovuto alla stessa causa per la quale, utilizzando lo stesso dispositivo, noi possiamo aspirare vino facendolo salire* [dal contenitore] *nonostante ciò sia contrario alla naturale tendenza del liquido a cadere verso il basso. Così quando abbiamo aspirato nel nostro corpo l'aria che era nel sifone, la pressione esercitata dall'aria intorno a noi preme nell'atmosfera ed agisce tanto sinchè produce un vuoto sulla superficie del vino nel sifone e così il vino sale con tale pressione che lo spingerà nello spazio vuoto del sifone; in questo non v'è altro posto nel quale possa sfogarsi la pressione.*"

Ecco una nuova originale ed importante scoperta di Eròne: il concetto del peso dell'atmosfera, quindi della sua pressione esercitàta su ogni corpo o sostanza. Dovettero passare ben quindici sécoli perché l'italiano Evangelista Torricelli riprese questo princìpio per farne il càrdine delle scoperte, allo stesso attribuìte, che hanno dato il via allo studio, tra tanti altri aspetti, dei fenomeni atmosférici.

Nella stessa òpera '*Pneumatica*', Eròne discute su molte ingegnose applicazioni del sifone, simili ma spesso più complesse di quelle trovate nei frammenti di Philo.

Di particolare interesse è il semplice espediente di montare il sifone su un galleggiante, con lo specifico scopo di mantenere costante il livello nel serbatoio, in un desiderato intervallo, a fronte di una portata non costante in arrivo; il sifone, infatti, galleggiando segue l'andamento del livello stesso e così régola automaticamente la portata scaricata nel serbatoio ricevente: se il flusso in arrivo è eccessivo, il livello aumenta così come la differenza tra quest'ultimo ed il livello del serbatoio di scarico cosicchè, essendo proporzionale a tale dislivello, aumenta la portata scaricata sino a superare quella in arrivo; il livello allora torna a decrescere e con esso la portata del sifone galleggiante innescando un processo inverso e così via . . . Questo espediente è assai ùtile per i meccanismi che abbisognano di un livello il più possibile costante come, ad esempio, gli orologi ad acqua che misurano il tempo in proporzione alla quantità di flusso uscente da un serbatoio; più, in quest'ultimo, il livello è costante più precisa è la misura del tempo.

Nelle esperienze di Eròne troviamo anche la più antica esperienza di propulsione a getto, verificata attraverso un semplice dispositivo sferico rotante, mosso dai getti di vapore scaturìti da ugelli diametralmente opposti, per evaporazione – da surriscaldamento – dell'acqua contenuta nello stesso recipiente. Si narra, inoltre, che Erone realizzò un dispositivo che, sfruttando la pressione del vapor acqueo, azionava l'apertura delle porte di un tempio in Alessandria d'Egitto, provocando grande ammirazione tra i presenti. Queste esperienze, che avrebbero potuto anticipare di diciassette sécoli' l'utilizzo della forza del vapore, furono per Erone poco più di un'occasione per suscitare stupore e sorpresa, senza procedere, purtroppo, a conseguenti ben più ùtili applicazioni.

Assai più importante, per la storia dell'Idraulica, è il seguente passaggio tratto dall'òpera "*Dioptra*", che contiene la più antica espressione della relazione tra le aree delle sezioni, la velocità, il volume ed il tempo, necessarî per la determinazione della portata di un flusso:

"*Presa una sorgente, per determinare il suo flusso, che è la quantità d'acqua che passa non è sufficiente trovare l'area della sezione trasversale della corrente . . .* è*' anche necessario trovare la velocità del flusso, perché più veloce è la corrente e più la sorgente fornisce acqua, se meno veloce minore sarà la quantità*."

La scoperta di Eròne è l'archétipo di una delle due leggi fondamentali dell'Idraulica, detta *Legge di continuità*, che rimase, purtroppo, confinàta nei suoi scritti.

La sua mancata diffusione costituisce uno dei tanti incomprensibili misteri della Storia della ricerca scientifica. Possiamo solo supporre che il dissenso che Eròne manifestò apertamente,

non senza dimostrazioni ineccepibili, dell'assoluto rifiuto del vuoto della dottrina di Aristotele, come già detto così determinante nell'influenzare il pensiero scientifico sino al Rinascimento, abbia concorso ad una sorte di ostracismo e quindi all'oblìo di tutto il lavoro di Eròne, ivi compresa la corretta osservazione dell'importanza della velocità nelle misure della portata di una corrente fluida.

Tale assunto mancò nella cultura idraulica sino ad una precisa data: 16 agosto 1639. Quella data è della lettera che l'abate Benedetto Castelli (Brescia 1587 – Roma 1643) scrisse a monsignor Ferrante Cesarini proprio allo scopo di spiegare il concetto centrale del suo trattato "*Della misura delle acque correnti*". Pubblicato nel 1638 questo lavoro 'cadde' su un terreno finalmente fértile, ottenendo infatti grande crédito in Italia ed all'estero, soprattutto in Francia dove fu presto tradotto. La legge di continuità divenne così nota come '*Legge del Castelli*'; Eròne l'aveva scoperta e dimostrata ben 1500 anni prima ma, a quel tempo, il 'terreno delle menti' era per essa ancòra stérile.

Oltre al ricordato Teoréma sui triangoli, ad Eròne resterà attribuìta anche l'enunciazione del *Princìpio dei vasi comunicanti* (ma che non porta il suo nome!), che rappresenta il fenòmeno speculare rispetto al funzionamento del sifone; egli lo applicò nella pratica nella costruzione dell'acquedotto della città di Olinto.

Certo è che solo una parte delle scoperte di Eròne a lui sopravvissero, come abbiamo visto, segno evidente di una mente che si trovò ad operare in un'época ancòra non matura per acquisire alcuni dei suoi contributi, oppure ostìle. È altresì ragionevole pensare che egli stesso non seppe utilizzare o non ebbe gli strumenti adeguati per dare ai propri risultati la proficua risonanza a stimolarne la generale attenzione. Forse più plausibile è la prima ipotesi, cioè che la società di quel tempo non era pronta a tanti e tali pensieri; prova ne può essere il fatto che con Eròne di Alessandria la spinta dell'antica Grecia ai progressi della ricerca e quindi alla Storia dell'Idraulica giunse ad esaurirsi, non foss'altro perché si esaurì la stessa civiltà greca, confluita, per 'assorbimento', in quella di Roma.

Prima di affrontare l'epoca di Roma antìca, che seppe realizzare opere di tale complessità, efficienza e grandezza da essere elemento comune di riferimento della cultura di popoli e generazioni (i grandiosi acquedotti romani ad archi sovrapposti costituiscono immagine presente in tante culture), è necessaria una considerazione.

La scoperta di Eròne sulla relazione …

"*portata del flusso d'acqua = velocità della corrente x sezione della corrente*"

…rappresentò un progresso culturale fondamentale ma dimenticato per i successivi quindici sécoli.

Anche le scoperte di altri non hanno avuto sorte migliore; eppure le applicazioni pratiche ed in particolare le opere idrauliche si svilupparono grandemente prima in Grecia e poi a Roma, sino alla caduta dell'impero, cioè sino alla distruzione di un'organizzazione capace, per dimensioni territoriali e ricchezza di mezzi e di mano d'opera (quasi sempre gratuìta), di realizzarle, avendone la necessità.

Da questo deduciamo che il bisogno di governare le acque fu, nell'antichità, prevalente alla necessità di capirne le leggi fisiche, poiché le conoscenze empìriche e la tecnologia disponibile erano sufficienti a soddisfare le esigenze collettive.

Poco importava poter misurare con assoluta precisione la portata di una condotta inclinàta: in caso di errore, per esempio nel tracciato di un acquedotto, si procedeva alla rettifica delle pendenze.

Poco importava di conoscere con esattezza la capacità di una tubazione nel resistere alla pressione: se scoppiava si riparava o la si sostituiva con una più robusta;

Poco importava conoscere l'esatta portata che usciva da una apertura, sìa in pressione che a cielo libero, perché, nel caso, si modificava.

Poco importava la misura delle acque distribuite dall'acquedotto: la tassa fissa copriva le spese e l'acqua, evidentemente, era, per le esigenze del tempo, abbondante.

Poco importava sapere esattamente quanta acqua era disponibile per ogni singolo campo: l'agricoltura di allora era certamente da classificare estensiva e non come oggi costretta alla precisione del litro al secondo.

Poco importava la spinta dell'acqua in una curva di una condotta in pressione: se si sfilava . . la si ancorava con maggior forza.

A che serviva la ricerca di una esatta misura della velocità o della pressione o delle spinte?

Quale miglior tecnologìa costruttiva poteva sfruttare un tale progresso teorico/matematico, se le migliori tubazioni avevano gravi difetti di continuità, i giunti non sopportavano che pressioni modeste, le chiusure consentivano soltanto regolazioni grossolane, . . ?

Ecco allora che la pratica prese il sopravvento sulla teorìa; la ricerca cedette il passo alla realizzazione dettata dall'esperienza e dal lìmite delle necessità da soddisfare.

Così, dopo aver doverosamente citato coloro che, nel bacìno del Mediterraneo, hanno comunque dato molto alla Storia della scienza Idraulica prima del sopravvento di Roma, troveremo in séguito argomenti e citazioni soprattutto nel ricordare l'alto livello della tecnologìa costruttiva raggiunto dai popoli greco e romano ma poco in materia di sviluppi teòrici e di ricerca scientifica.

In questo giuocò un ruolo determinante l'innàto spirito pratico della cultura dell'antìca Roma, impegnàta soprattutto nella costruzione dell'impero, che portò ad un diffuso atteggiamento di ammirazione della cutura greca, quasi fosse il massimo traguardo culturale raggiungibile, piuttosto che una fase di un progresso da seguire e sviluppare.

Giungeremo così all'oscurità calata con la morte dell'impero romano, non tanto sulla cultura e negli studi, che, per certi aspetti, ripresero la créscita, quanto nell'abbandono e quindi nella rovina di queste stesse grandiose òpere e con esse dell'organizzazione sociale di vasti territorî.

Non mancherà, nel seguìre lo scorrere del tempo, il riferimento alla cultura che, sempre attorno al mare Mediterraneo ma sulla sponda meridionale in qualche modo meno coinvolta nel processo di involuzione sociale del Medio Evo, senza alcun dubbio contribuì a non interrompere ma anzi ad accrescere lo sviluppo della conoscenza dell'umanità: l'Islam.

Prima di 'entrare in Roma' facciamo un passo indietro per indagare l'evoluzione di categorie di òpere idrauliche e di conoscenze, essenzialmente pratiche, delle quali non si conoscono gli scopritori ma che costituiscono quel 'terreno delle esperienze' che è sempre fértile alimento della ricerca.

* * *

Si ringrazia, per le immagini:

- **Bilancia Idrostatica di Archiméde**: disegno da modello - Mònica Carini Bajetti – Castelverde, Cremona;
- **Vite di Archimede:** Istituto Statale Comprensivo di Negrar, Verona, per cortese disponibilità del prof. Franco Erbesato - http://www.icnegrar.org/ .

Cap. 3 – Le acque sotterranee e gli invasi: pozzi, pompe, *qanāt,* e dighe.

Con le esperienze della civiltà della Grecia antìca sembrano interrompersi gli sviluppi della ricerca teòrica legata allo studio del comportamento dei fluidi e dell'acqua in particolare. La civiltà di Roma subentrò a quella ellénica superandola nelle realizzazioni pràtiche ma subendone l'influenza con apparente soggezione, quasi a considerarla già compléta, non più suscettibile di sviluppo. Non troviamo infatti in Roma nomi di studiosi oggi accostati a fòrmule matemàtiche o a princìpi fisici, ma possiamo ammirare le grandi realizzazioni della civiltà romana anche nel campo delle òpere idrauliche, alcune giunte sino a noi perfettamente conservate ed alcune . . . funzionanti.

La pràtica costruttiva non nasce soltanto dalle conoscenze scientifiche ma anche, ed in quei lontani tempi soprattutto, dalle esperienze dei popoli e delle civiltà precedenti, secondo un processo continuo di realizzazione di òpere, esempi realizzati e quindi ripetibili e migliorabili, che non ha conosciuto interruzioni.

Poco o nulla sappiamo di coloro che realizzarono quelle òpere; in questo capitolo vogliamo comunque tracciare il racconto di quanto è noto del cammino che ha avvicinàto l'umanità all'acqua, attraverso alcune categorìe di esperienze pràtiche che, seppure prive di conoscenze e spiegazioni teòriche, costituirono il necessario sostegno allo sviluppo sociale e quindi alla créscita delle civiltà.

Possiamo soltanto immaginare quando le prime forme di civiltà iniziarono ad attingere acqua dal sottosuolo, cioè maturarono l'idea che scavando in profondità si poteva incontrare un'acqua spesso di migliore qualità rispetto a quella dei fiumi e dei laghi, a temperatura costante, fresca, insensibile alle variazioni climatiche soprattutto durante le stagioni calde.

Senz'altro l'esperienza, che ancor oggi si ripéte in alcune popolazioni alle quali affibbiamo il tèrmine di 'primitive', può essersi sviluppata dall'osservazione di quanto avveniva nella pozze d'acqua scavate o già esistenti in prossimità di un fiume o di uno stagno. La buca, ad ogni attingimento, tendeva a riempirsi, per infiltrazione, con acqua dalle caratteristiche migliori rispetto alla vicina acqua superficiale, proprio perché filtrata dal terreno.

Per semplice intùito o per casualità, fu certo non difficile osservare che il miglioramento della qualità dell'acqua aumentava man mano che ci si allontanava dal fiume e si raggiungevano maggiori profondità: da qui la nàscita dei primi pozzi?

Vedremo, più avanti, la validità di un'altra ipòtesi, un'altra via di 'scoperta' di questo tipo di attingimento.

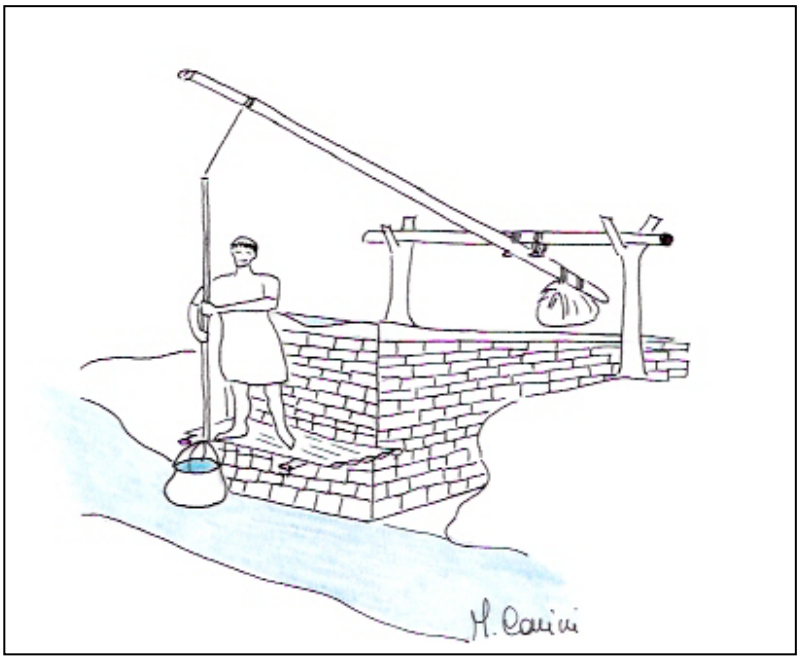
Per quanto qui interessa, lo sfruttamento delle acque sotterranee richiede il superamento di alcuni problemi che attengono: all'Idraulica, alle scienze da essa direttamente derivate nonché alle tecniche di scavo; regìna di tutte le questioni è, ovviamente, la necessità di sollevare il liquido sino alla quota del suolo, sino al punto cioè dell'utilizzo o dell'accùmulo in recipienti o bacìni.

All'inizio il sistema elementare di utilizzare contenitori, calàti e poi issati con funi, era sufficiente per assolvere alla funzione di procurare acqua per il consumo umano e, forse, per abbeverare il bestiame; la forza dell'uomo limitava la quantità d'acqua sollevata e la portata risultava intermittente.

Un miglioramento, soprattutto nella quantità di acqua sollevata ad ogni ciclo, si ebbe con l'introduzione della carrùcola, posta a perpendìcolo sull'apertura del pozzo, sulla quale scorreva la fune. La carrucola però, per questo è detta leva indifferente, non produce alcuna amplificazione dell'effetto della forza applicata alla fune, cosicchè l'acqua sollevata non poteva essere di peso superiore alla capacità fisica degli addetti al sollevamento, limitàta inoltre non solo come massimo

sforzo ma anche in términi di resistenza alla fatìca nel caso di cicli ripetuti, necessarî quando si doveva abbeverare il bestiame ed ancòr più per alimentare fossi d'irrigazione.

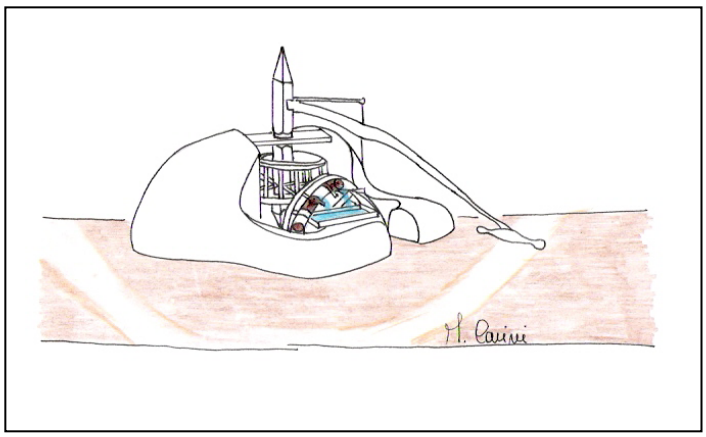
Da quest'ultimo punto di vista, un progresso nella resa delle forze applicate si conseguì nei numerosi dispositivi a bilancere, fatti di pali sospesi, in un punto non mediàno, alla cui estremità più lontana dal punto di sospensione è posto un contenitore ed un contrappeso all'estremo opposto. Questo dispositivo compare in alcune raffigurazioni accàdiche risalenti al 2500 a.C. mentre le testimonianze egizie iniziano ad illustrarlo intono al 2000 a.C..



Questo dispositivo, chiamato in lingua araba *šādūf*, deve alla propria semplicità il motivo di una longevità che lo trova ancòra in uso ai giorni nostri in gran parte del mondo 'non tecnològico', soprattutto in molte aree dell'India e dell'Africa. Il sistema, che costituisce questa volta una leva efficace, consente di moltiplicare, con il contrappeso, la forza di sollevamento (oppure di ridurre la forza necessaria e quindi di accrescere la resistenza alla fatica) aumentando la quantità di acqua sollevabile ad ogni ciclo oppure il numero dei cicli; il difetto principale è non poter raggiungere grandi profondità ed il flusso prodotto era ancòra discontinuo con portate, quindi, assai limitate.

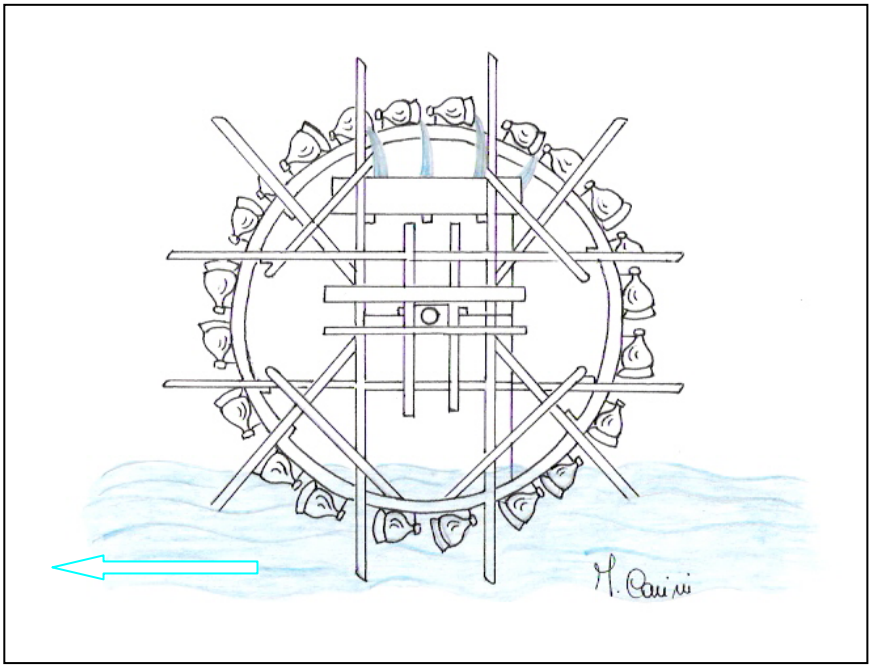
Gradualmente ci si avvicinò all'ottenere un flusso continuo dell'acqua sollevata utilizzando, invece che un solo contenitore, una serie di contenitori fissati ad una fune o ad un nastro circolari, chiusi su due carrucole. La carrucola superiore, o meglio la puleggia superiore, era a sua volta mossa da una o più ruote alle quali si applicava o la forza di uomini o di animali. Le ruote agìvano sìa come leve efficaci, aumentando l'effetto della forza applicata, sìa garantendo maggior continuità al movimento quindi anche alla portata estratta, quest'ultima dipendendo, in questa caratteristica, dal numero dei contenitori. Marco Vitruvio Pollione (I sécolo a.C.), nel suo **'*De Architectura*',** racconta che un tale dispositivo era stato applicato per la prima volta da Philo di Bisanzio (III sécolo a.C.): non v'è altra testimonianza alla quale tale informazione faccia torto.

Qui ricordiamo un altro dispositivo per il sollevamento dell'acqua anche se poco o per nulla si presta per l'attingimento da pozzi, perché può essere considerato il perfezionamento della ruota di Philo e, rispetto a questa, ha dimostrato una longevità straordinaria, al punto da poter essere considerata un'attrezzatura attualmente assai diffusa.



Detta in lingua araba *sāqiya*, comparve in Egitto intorno al 200 a.C.: le due pulegge e la corda, con i contenitori, della ruota di Philone, sono sostituìti da una ruota verticale, alla quale i contenitori sono fissati, che si immerge nell'acqua nella sua parte inferiore. Alla ruota verticale è accoppiata una ruota

orizzontale, che le trasmette il movimento rotatorio, a questa indotto dalla rotazione di una lunga asta fissata al suo centro e normalmente spinta da un animale da sòma, costretto a muoversi in un continuo percorso circolare attorno al dispositivo. Questa macchina ebbe grande fortuna perché semplice nella costruzione e nella manutenzione. A partire dal IV sécolo d.C. si diffuse nel bacìno del Mediterraneo, poi in Europa e nell'Asia centrale sino in Cina; giunse poi, nel XVI sécolo, anche nelle terre americane ad òpera di tecnici spagnoli. La semplicità costruttiva e l'uso di energìa animale ne fanno un dispositivo ancòra presente in moltissime aree ed anche oggetto di studio per migliorarne l'efficienza.



Una macchina derivata dalla *sāqiya*, più sémplice ma concettualmente più sofisticata, è la *nòria*: una grande ruota a raggi che términano, nella parte che dalla ruota sporge, con una forma a pala. Alla ruota, nella parte che si trova immediatamente prima dell'estremità di ciascun raggio, sono fissati numerosi contenitori. La nòria, descritta per la prima volta da Vitruvio, immersa nella corrente di un fiume inizia il moto rotatorio per effetto dell'acqua in movimento che preme contro le pale; la rotazione consente il sollevamento delle acque raccolte dai contenitori quando questi giungono nel punto più basso della ruota, costantemente immerso; lo sfruttamento dell'energìa della corrente évita il destìno crudele del continuo peregrimare in tondo dell'animale legato all'asta della *sāqiya*.

Anche la nòria si è diffusa in molte parti del mondo; ne sono oggi esistenti esempi perfettamente funzionanti ed utilizzati, come in Siria, sul fiume Oronte, dove alcune nòrie, del diàmetro che sùpera i venti metri, aliméntano la città di Hama e le irrigazioni delle circostanti campagne.

Come per la *Vite di Archiméde*, che abbiamo incontrato nel Capitolo 1, *sāqiya* e nòria sono dispositivi non utilizzabili per sollevare le acque da un pozzo, qui sono citate come conseguente evoluzione della macchina di Philone di Bisanzio.

Tornando ai pozzi, dobbiamo ricordare che per la captazione delle acque sotterranee, che attraverso di essi erano rese accessìbili, all'energìa muscolare (di uòmini o di animali) si affiancò ben presto non solo l'utilizzo dell'energìa della stessa acqua in movimento ma anche di quella del vento, con una sostanziale differenza: l'energìa eolica è ben più significativa perché il vento c'è ovunque, in particolare nelle zone àride, dove più frequente è la necessità di reperìre acqua. Intorno al X-IX sécolo a.C. compaiono, nell'attuale Iran, le prime rudimentali ruote a pale mosse dal vento.

La conoscenza e lo sfruttamento dell'energìa dell'acqua e del vento, cioè dei fluidi in movimento, sarà oggetto di trenta sécoli di studi, ancòr oggi non conclusi, in una scienza nata dall'Idraulica e parte di essa: l'Idrodinàmica. Nei tempi antichi, caratterizzati da una tecnologìa alle prime armi, il lìmite nell'uso di questa energìa fu soprattutto il basso valore della velocità che ruote, ingranaggi e funi potevano sopportare.

I pozzi sono vie artificiali che mettono in comunicazione la superficie terrestre con l'acqua presente, ferma o in movimento, nel sottosuolo; ma l'acqua sotterranea ed i fenòmeni che ne governano la presenza ed il movimento, nascosti alla vista, devono essere in qualche modo conosciuti, per evitare troppi insuccessi o indurre problemi a volte più gravi di quello che si voleva risolvere.

In questo non màncano, nell'antichità, dimostrazioni di un certo grado di conoscenza del moto delle acque sotterranee, sebbene oggetto di un'esperienza confinata nelle sole aree di escavazione dei pozzi. Si ha testimonianza indiretta di una prescrizione attribuita a Solòne (ca 630 – 560 a.C.), arconte di Atene, citata da Plutarco nella sua *Vita di Solòne*:

"*Poiché l'Attica non ha acqua sufficiente né da fiumi perenni né da laghi o da sorgenti copiose, ma la maggior parte della gente si serviva di pozzi artificiali, Solòne stabilì una legge in base alla quale se doveva esistere un pozzo pubblico entro il raggio di un hyppicon* [pari a quattro *stadi*, cioè complessivamente 705,36 o 780,60 metri] *si doveva attingere a quello; se invece era più distante, si doveva cercare acqua propria; qualora poi, avendo scavato sino alla profondità di dieci orgìe* [17,63 o 19,59 metri] *non ne fosse trovata nel proprio terreno, si poteva prenderne dal vicino, riempiendo due volte al giorno un' idria di sei congi* [17,6 o 19,6 litri]. *Egli infatti riteneva suo dovere soccorrere il bisogno, non incoraggiare l'indolenza.*"

Questa legge sopravvisse alla costruzione dell'acquedotto ateniese, realizzato alla fine del VI secolo a.C., tant'è che è ripresa, in términi più generali, negli scritti di Platone.

Possiamo quindi dedurre che già si aveva coscenza che le acque sotterranee non erano illimitate, ma soffrivano l'eccesso di prelievo, sino all'esaurirsi dei pozzi se tra loro troppo vicini o troppo sfruttati. Inoltre sappiamo che l'approvvigionamento d'acqua potabile già doveva affrontare i primi casi di inquinamento, anche a grande scala; nel VI sécolo a.C., gli ateniesi furono privàti della principale fonte d'acqua potàbile, il fiume Erìdano, che aveva raggiunto insostenibili livelli di inquinamento per gli scarichi della città stessa; il fatto è forse collegabile alla ricordata legge di Solone sui pozzi, il cui moltiplicarsi rese necessaria una rigida disciplina, ed alla costruzione del primo acquedotto ateniese: la grande città aveva bisogno di nuova acqua.

La tutela della qualità dell'acqua era un problema sentìto; Platone, nelle sue *leggi*, non ésita nel prescrivere sanzioni a chi non usi l'acqua in modo accorto o ne deteriori la qualità.

Un cenno mérita la scoperta, tecnologicamente più evoluta, dei sistemi di sollevamento a pressione.

Abbiamo già visto, nel precedente Capitolo 1, che al greco Ctesibio è attribuìta l'invenzione, o la prima realizzazione, della pompa a pistoni, come ci racconta Vitruvio.

Questa conoscenza greca fu ben presto assimilàta e perfezionata dalla civiltà di Roma, capace di produrre pompe a stantuffo, con uno o due cilindri, di prestazioni certo notevoli per quei tempi. Alcuni ritrovamenti nell'Europa centrale dimòstrano l'esistenza di pompe, infisse in pozzi, in grado di superare dislivelli superiori ai quindici metri e di produrre una portata continua anche superiore ai sessanta litri al minuto. I cilindri, in legno rivestiti di piombo, erano percorsi da stantuffi in legno con guarnizioni in pelle, mentre le valvole, alla base del cilindro, erano in pelle fissate al cilindro con chiodature.

Appreso il princìpio di funzionamento, i Romani antichi non mancarono di sfruttarlo per risolvere un problema costante: l'evacuazione dell'acqua di sentìna nelle navi. Si conoscono reperti che ci dimostrano la notevole capacità di costruìre piccole pompe portatili in bronzo, in grado di svolgere egregiamente la funzione di espellere le acque che penetravano negli scafi.

L'idea di costruìre i pozzi, cioè un condotto verticale per càptare le acque dal sottosuolo, può essere nata anche dallo sviluppo di un altro sistema di approvvigionamento di acqua

sotterranea, che ebbe, ed ha tuttora, dimensioni veramente strabilianti: le *qanāt*, in Africa settentrionale indicate con il termine *foggara*.

Sin dall'epoca sumérica, probabilmente proprio ai piedi dell'altopiano iranico, comparvero le prime opere di captazione delle acque sotterranee sotto forma di gallerie drenanti: individuata la presenza di acqua nel sottosuolo si procedeva a costruìre cunicoli che seguivano la vena acquifera nel ventre della montagna. Più gallerìe si costruivano e maggiore era la portata che esse potevano raccogliere e concentrare in un punto del sottosuolo, dal quale poi si dipartiva una o più linee, sempre in gallerie sotterranee, della lunghezza a volte di centinaia di chilometri.

Questo sistema si sviluppò gradualmente nel corso di millenni, soprattutto nell'Asia medio-orientale ed in Africa settentrionale, sino a costituìre immense reti di canalizzazioni sotterranee, spesso di lunghezza complessiva di migliaia di chilometri per ogni area servìta. La rete sotterranea, raccolte tutte le filtrazioni d'acqua, sìa in forma di flussi consistenti o gocce stillanti per filtrazione o condensazione, procedeva nella pianura che, digradando, ne provocava l'avvicinamento alla superficie senza necessità di alcun sollevamento meccanico.

Lo sgorgare delle acque, oppure il sollevamento finale per modeste altezze (attraverso, ad esempio, una *sāqiya*) portava alla nascita di una città o di un'oasi in pieno deserto.

Il sistema consentiva, come ancor oggi in parte consente, di 'inseguire' nel sottosuolo, spesso di dura roccia, la presenza delle acque giunte sino in quel punto da infiltrazioni originatesi dalle piogge su rilievi montuosi assai distanti, sia nello spazio che nel tempo.

Come fossero minatori che seguono la vena del più prezioso metallo, che capricciosa si estende all'infinito nel cuore della terra, schiere di lavoratori, quasi certamente ridotte in schiavitù, si consumarono in queste gallerie; òpere ancor più sbalorditive se si pensa agli uténsili disponibili in quei tempi! Non per nulla questo lavoro era reputato tra i più gravosi, tant'è che meritò l'appellativo di '*lavoro assassino*' oppure, nell'Asia Minore, di '*lavoro persiano*', ad esemplificazione di una civiltà non aliena, come frequentemente avveniva nell'antichità, da comportamenti brutali.

I percorsi di ogni sìngola galleria potevano superare i cento chilometri e, evidentemente, non poteva essere priva di pozzi intermedi - per l'accesso, lo scarico del materiale di scavo e la ventilazione – distanziati non più di cinque/dieci chilometri, ma a volte molto più ravvicinàti. Ancor oggi questi pozzi sono ben visibili nelle zone àride, presentandosi come cùmuli allineàti di detriti, risultato dell'escavazione risalente anche a tre/quattro millenni fa!

Le migliaia di pozzi verticali delle *qanāt* furono il prodotto di una tecnica assai evoluta in questo tipo di manufatti e non è inverosimile pensare che da essi sìa nata l'idea, o la casualità, di scavarne alcuni indipendenti dal percorso delle gallerìe sotterranee per estrarre acqua presente nel sottosuolo per cause naturali.

Il sistema delle *qanāt*, una volta realizzato, poteva funzionare, come ancòr oggi funziona, per sécoli quasi senza manutenzione, se non intervenivano crolli. Polibio, storico greco 'romanizzato' del II secolo a.C., nella sue *Storie* scrisse " . . . *al giorno d'oggi chi usa tali acque non sa da dove sgorghino e siano state condotte*.".

La tecnica di esecuzione delle *qanāt*, cioè dello scavo in galleria e l'utilizzo delle gallerie stesse per drenare e concentrare le acque disponibli di una zona acquifera, è stata con ogni probabilità d'esempio per le popolazioni della Grecia, dove fu frequentemente utilizzata nel drenaggio delle sorgenti e negli acquedotti; di queste òpere è rimasta soltanto la testimonianza nei loro resti perché non si conoscono testi originali greci che ne parlìno.

Su questo argomento, copiosa è invece la documentazione della civiltà islamica.

Scritto intorno all'anno 1000 d.C., il trattato '*Inbāt al-miyāt al-<u>h</u>āfiya*' ("*Sul modo di scoprire le acque nascoste*"), redatto da al-Karaǵī, contiene dettagliate istruzioni per la costruzione delle *qanāt* : individuazione della vena d'acqua, calcolo delle pendenze, scavo di pozzi e gallerie, tecnologìa dei rivestimenti, utilizzo degli strumenti di misura. Dal testo apprendiamo che in quel tempo ed in quella civiltà, la costruzione era affidata ad un vero e proprio corpo di tecnici esperti, detti *muqannī*, in grado di risolvere il problema principale: fissato il punto di arrivo ed individuata

la presenza dell'acqua, bisognava calcolare le corrette direzione e pendenze per collegare i due punti, a volte distanti centinaia di chilometri.

A tale proposito sappiamo che il califfo, della dinastìa degli Abbàsidi, al-Mutawakkil, che regnò a Baghdad dall' 847 all'861, per rifornire di acqua il suo palazzo a Samarra ordinò la realizzazione di un sistema di *qanāt* che raccoglieva le acque in una falda dell'alto corso del fiume Tigri ad una distanza di 480 chilometri.

Le *qanāt* nel solo Iran attuale sono stimate di uno sviluppo complessivo di 160000 chilometri; ancòr oggi la sola città di Teheran è servita da trentasei *qanāt*, provenienti dalle falde del monte Elburz, lontane mediamente 20 chilometri, in grado di assicurare una portata che oscilla, a seconda delle stagioni, tra i 15000 ed i 30000 metri cubi al giorno.

Un método per approvvigionarsi d'acqua è anche quello di trattenerla in serbatoi: così avviene ancor oggi per quelle di pioggia, a mezzo di cisterne, e per le correnti fluviali, grazie alle opere di sbarramento: dighe o traverse.

Le cisterne sono elementi diffusi in tutte le civiltà, anche le più antiche: convogliare le piogge colmando volumi appositamente costruiti è un'idea elementare e poco interessa questo lavoro, coinvolgendo maggiormente l'Archeologìa e, nei casi più spettacolari, l'Architettura.

Meno intuitiva e di grande impegno è l'azione di fermare le acque che scorrono nei fiumi, attraverso òpere che ne sbarrino il cammino. Al problema idraulico si somma quello idrologico, che deve dimensionare non tanto lo sbarramento quanto le òpere di sfogo delle piene in modo che la struttura non rovìni. Anche i particolari costruttivi richiedono evolùte tecnica, conoscenza ed esperienza, sìa per la stabilità dell'òpera che per la sua impermeabilità e resistenza alla corrente dei flussi che su di essa possono verificarsi.

Tutta l'Asia minore e l'Egitto dipendevano in gran parte dalla disponibilità dell'acqua superficiale soggetta, certo con andamenti climatici meno ricchi di eccessi, ad aumenti e diminuzioni di portata anche consistenti. Dighe che arginassero i fiumi, provocando invasi di raccolta o li deviassero verso depressioni da allagare durante le piene, erano òpere già in essere nel terzo millennio prima dell'Era Cristiana.

Nella terra dei Suméri si sa di uno sbarramento sul fiume Tigri che consentiva di alimentare un canale di irrigazione lungo quattrocento chilometri. Già abbiamo ricordato, nel Capitolo 1, la testimonianza di Plinio il Vecchio (Como 23 d.C. – Stabia 79 d.C.), che ci parla di una diga sumérica che sbarrava la foce dell'Eufrate per diffondere nelle campagne prossime al mare le sue acque per l'Irrigazione, poi defluenti nel Tigri.

Gli sbarramenti assolvevano a volte la funzione di deviazione piuttosto che di accumulo delle acque, come quello micenéo di Tirinto intorno al XIV secolo a.C., che deviava un fiume a protezione della città di Kofini. Ancòr prima in Beozia, nel II millennio a.C., una diga in muratura si opponeva alle abbondanti acque dei fiumi Cefiso e Melo e le scaricavano nel lago di Copaide, salvaguardando una fertile pianura sottostante.

Nelle zone ai màrgini dei deserti troviamo strutture di sbarramento realizzate per intercettare, controllare, deviare ed utilizzare le acque delle piogge, rarissime ma capaci di produrre notevoli portate nelle zone dove i pendìì le concéntrano, nel Sahara chiamate *wadi*.

La più nota è senz'altro la diga di Marib, realizzata dai Sabatéi a sbarramento della depressione *wadi Dhana*, nella zona settentrionale dell'attuale Yemen. La prosperità del sito di Marib, determinata dalla disponibilità di acqua garantìta dalla grande struttura, è ricordata nella Bibbia, dove si racconta come Abramo avesse giudicato i giardini di Marib degni d'essere portati nel Regno dei cieli. Lo storico arabo al-Masudi, nel X sécolo d.C., scrive che i giardini di Marib, o meglio l'oasi, erano tanto vasti che un viaggiatore aveva bisogno di un mese per attraversarli a cavallo. Molti sono i racconti su quest'area, certo permeàti di leggenda, ma è indubbio che l'oasi

era tanto vasta e ricca di colture da suscitare stupore ed ammirazione in coloro che vi giungevano dopo aver attraversato l'àrido deserto arabico.

In quel luogo ancòr oggi sono esistenti le costruzioni in muratura che costituivano le due estremità dello sbarramento del *wadi Dhana*, dove erano realizzate le òpere di regolazione ed alimentazione di due reti irrigue che dalla diga si dipartivano. Il corpo centrale dello sbarramento, lungo quasi settecento metri, alto sedici e largo alla base sessanta, non esiste più: era costruìto in terra e, secondo gli stòrici, crollò definitivamente intorno al sesto sécolo dopo Cristo, dopo aver funzionato per circa tremila anni!

Un'iscrizione, rinvenuta tra i resti della diga, testimonia che essa fosse ancòra funzionante nel 525 d. C., quando il condottiero Abraha, dagli Arabi soprannominàto *dũal manār* (quello del faro), dopo aver riconquistato la parte meridionale della penisola aràbica, che così ritornò per poco tempo 'protettorato' del cristiano regno di Abissinia, si preoccupò di realizzare molte òpere tra le quali il restauro della diga di Marib, perché potesse ancòra assolvere alla sua funzione. La diga di Marib consentiva quindi di arrestare ed accumulare le acque delle scarse ma violente piogge che si abbattevano sulla regione a monte di quel sito e lì convogliate dalla grande depressione *wadi*; le due monumentali chiuse, poste alle estremità dello sbarramento, si aprivano per rilasciare gradualmente le acque ad alimentare la rete irrigua che consentiva una pròspera agricoltura.

Oggi quell'area è solo deserto.

Innumerevoli sono gli esempi che potrebbero essere citàti; la diga di Marib costituisce certo uno dei casi più stupefacenti per dimensioni e tecnica, ma ogni àrea geografica ha comportato la realizzazione di òpere che si sono adattate alla topografìa, alla quantità di acqua disponibile ed alle esigenze colturali e culturali di ogni popolazione. Il popolo dei Nabatei, per esempio, nel loro dominio dove cùlmina la città di Petra, regolarono le acque con moltéplici sbarramenti e dighe di piccole dimensioni piuttosto che limitarsi a poche grandi strutture, segno evidente che la stessa conoscenza risponde in modo diverso a differenti esigenze, ambienti e condizioni.

Le civiltà greca e romana érano senz'altro a conoscenza di questa tecnica e della tecnologìa in grado di realizzarla; ma sia i Greci prima che i Romani poi sembrano aver ignorato questi dispositivi sino al secondo secolo dopo Cristo, tempo nel quale comparvero nuovi sbarramenti fluviali o lacuali, connessi all'interesse verso l'approvvigionamento idrico da acque di superficie, avendo sino ad allòra privilegiato l'attingimento da sorgenti o da pozzi.

Nonostante questa ripresa degli attingimenti fluviali, anche in epoca tardo imperiale, le dighe romane assolsero in maggioranza la funzione, soprattutto nelle zone àride, di riparo contro le piene e di deviazione delle acque in aree non urbanizzate. Nel deserto sahariano del Negev è ancòra visibile uno sbarramento lungo novecento metri nello *wadi Caam*, a Sud della città romana di Leptis Magna; questa costruzione assolveva la funzione di frenare ed allontanare dall'abitato le rare ma violente alluvioni.

Tutte le dighe romane erano di forma massiccia ed andamento rettilineo, opponendo alla forza dell'acqua la resistenza del proprio peso. Le altezze erano comunque modeste rispetto ai valori di oggi: la diga di Harbaqa, lunga 365 metri, ha il primàto di massima altezza pari a ventuno metri.

All'andamento rettilineo si conosce una sola eccezione, in ogni senso indicabile con il términe di diga ad arco, schema architettonico di contrasto alle spinte del quale gli ingegneri romani erano maestri. La struttura, sita nel *Vallon de Baume* in Provenza-Francia, venne descritta dallo studioso E. Calvet che, nel 1765, la disegnò in uno schizzo; purtroppo oggi di questa singolare òpera, realizzata per alimentare la città romana di *Glanum*, non resta nulla.

Molte costruzioni dei Romani, a volte giunte sino ai giorni nostri quasi ìntegre, ne testimoniano la grande e, per quei tempi, ùnica capacità realizzativa, certo ben proporzionata alla loro grande potenza militare, politica e civile.

Ed è proprio della civiltà dell'antica Roma che ci occupiamo nel prossimo capitolo.

* * *

Per le immagini si ringrazia Mònica Carini Bajetti – Castelverde, Cremona

Cap. 4 - Il sistema di approvvigionamento dell'acqua nell'antica Roma

Se i Greci trassero dai Babilonesi, dai Fenici e dagli Egizi le basi delle loro più antiche scoperte scientifiche e meccaniche, è certo che altrettanto fecero i Romani nei confronti della civiltà ellénica che velocemente assorbirono.

L'influenza che la Grecia ebbe sulla civiltà romana nasce dai primi contatti di Roma con quella cultura durante la conquista delle città della Magna Grecia. Anche se gli Etruschi avevano destato l'ammirazione e quindi la conseguente emulazione da parte della nascente società romana, con l'annessione delle colonie greche in Italia (*in primis*, di Siracusa nel 212 a.C.) iniziò il volgere della cultura di Roma verso il modello di pensiero greco.

La Grecia diventò terra romana in modo pressoché incruento, perché i Romani si sostituirono, nel dominio delle *pòleis* greche, ai Macédoni costretti, con una serie di guerre, alla pace di Tempe (196 a.C.) davanti al console Tito Quinzio Flaminio.

Questa acquisizione, diremmo 'in dote', facilitò, per parte greca, l'accettazione del nuovo conquistatore, giungendo, da principio, sino a spontanee acclamazioni popolari per poi approdare inevitabilmente a reazioni ormai tardive, a volte sedàte con la forza. Per i Romani la conquista senza guerra evitò i consuetudinarî saccheggi e distruzioni, facilitando la generale percezione del popolo greco come entità di pari dignità ed organizzazione sociale e di superiore cultura.

L'alta considerazione della cultura greca ed il non aver combattuto per la sua conquista, portarono Roma a mantenere un particolare rapporto con quel popolo, accogliendo con favore i loro grandi pensatori, filosofi, studiosi e tecnici: per il popolo greco si trattò di una 'fuga di cervelli' *ante litteram*.

Alla conquista, la Grecia reagì così, per mano degli stessi conquistatori, diffondendo, nella cultura e nei costumi romani, i proprî usi, cultura e princìpî.

Una rivincita silenziosa, incruenta ma efficace al punto da scatenare una reazione xenofoba della quale si ricorda il suo massimo esponente, Marco Porcio Catone (Tuscolo 234 – 149 a.C.), che, esercitando la carica di Censore, nel 184, si oppose con energìa al diffondersi, nella società romana, dell'Ellenismo – favorìto, a suo dire, dalla potente famiglia degli Scipioni - orìgine e causa di ogni vizio e corruzione.

Numerosissime furono le realizzazioni idrauliche dei Greci, che i Romani conobbero, poterono vedere ed utilizzare direttamente. Ópere certo nate non da idee originali ma dalla conoscenza di simili manufatti realizzati dai Babilonesi, dai Fenici, dagli Egizi, dai Micenéi: popoli i cui territori erano méta degli intensi scambi commerciali dei Greci attraverso il Mediterraneo orientale. Ciò che i Greci realizzarono nelle òpere idrauliche, infatti, appare più come una prosecuzione di esperienze di popoli precedenti che non un'applicazione pratica delle conquiste teoriche dei proprî scienziati e filosofi.

Per tracciare, nella Storia dell'Idraulica, l'esperienza di Roma si deve quindi partire dall'esperienza pratica dei Greci, un poco tralasciata nel precedente Capitolo 2 perché, nell'àmbito del nostro interesse, assai meno rilevante.

Sebbene non manchino notizie di grandi realizzazioni idrauliche, certamente degne di nota nella storia della civiltà di Roma, il contributo originale dei costruttori romani fu senza dubbio nella realizzazione dei sistemi di approvvigionamento delle acque per le città, importante dal punto di vista realizzativo e tecnologico, quantunque scevro di sviluppi nella teòrica comprensione di alcun principio di Idraulica.

In Grecia, nell' età Arcaica (VIII – VI sécolo a. C.), gradualmente compaiono numerosi esempi di strutture destinate alla raccolta delle acque sorgenti, al trasporto ed alla distribuzione pubblica.

Ogni sorgente, prima fonte di approvvigionamento, non era costituìta da un ùnico punto di emersione delle acque, bensì un'area, più o meno estesa, dove le formazioni geologiche consentivano alle acque sotterranee di emérgere in superficie oppure di essere intercettate a non grande profondità.

Ecco allora la necessità di individuare, in una data area, tutti i punti di flusso naturale, concentrarne la portata in un'ùnico bacìno di raccolta per poi distribuirla o, sempre più frequentemente, trasportarla alle città. Si sviluppò quindi la tecnica del drenaggio delle acque di falda, con canali, gallerie e vasche, anche sotterranee, realizzando complessi sistemi di raccolta che i Greci ìndicavano con il términe *krenai*. Le gallerie potevano addentrarsi nella roccia acquifera per molte decine di metri; la loro inclinazione verso il punto di raccolta permetteva un flusso continuo.

Le prime sorgenti si trovarono in prossimità dei centri abitati; forse questi stessi vi sorsero accanto.

Con l'aumentare delle dimensioni della popolazione urbana, fu necessario cercare altre sorgenti, più lontane.

Al punto di raccolta delle *krenai* si collegava la condotta destinata a trasportare le acque, mosse dalla gravità grazie al fondo della condotta costantemente inclinato.

Nacquero così i primi acquedotti greci, di lunghezza via via crescente sino a raggiungere decine di chilometri, secondo percorsi che dovettero superare ostacoli fisici: montagne e vallate.

La necessità di mantenere una costante inclinazione non consentiva di allungare i percorsi per aggirare gli ostacoli ed appare essere più frequente, in Grecia, la ricerca di percorsi che privilegiavano lo scavo di gallerie piuttosto che la costruzione di ponti-acquedotto. Probabilmente in questa predilezione vi è l'influsso dell'esperienza, pratica e costruttiva, delle *qanāt* dell'Asia occidentale o delle *foggara* nell'Africa mediterranea - delle quali abbiamo parlato nel precedente Capitolo 3 - territorî che i Greci ben conoscevano. Le realizzazioni furono notevoli già in tarda età arcaica.

Gli acquedotti greci potevano avere anche tratti di condotte in pressione, quindi in grado di servire zone urbane poste a quote maggiori del punto di arrivo della condotta. L'esempio più antico che si conosca è l'acquedotto della città di Olinto, nella penisola Calcìdica, realizzato su progetto di Eròne di Alessandria. La quota della sorgente, la lunghezza del percorso e la parte alta della città, isolata su un'altura, costrinsero Eròne a realizzare una condotta in pressione, con tubature in cotto, che doveva resistere ad una pressione di dieci metri di colonna d'acqua.

Da allora, seppur per brevi tratte e modeste pressioni, si realizzarono altri acquedotti con funzionamento di loro parti con tubazioni in pressione.

Tutte le grandi città greche furono dotate di acquedotto, a volte anche più di uno: Atene, Siracusa, Agrigento, Corinto, Megara, Egina, Olinto . . . . .

Raggiunto il centro urbano, l'acquedotto assolveva alla sua funzione di distribuzione attraverso punti di distribuzione pubblica: le *krene*; fonti di distribuzione, anche a zampilli multipli, spesso caratterizzate da complesse e monumentali strutture; luoghi non solo di attingimento delle acque ma anche di culto e di contatto sociale.

Gli acquedotti, quindi, svolgevano la sola funzione di distribuzione pubblica dell'acqua, senza raggiungere le sìngole residenze, come avvennne poi nelle città romane, sebbene con una precisa gerarchìa che tutelava, comunque, la priorità dell'uso collettivo.

In Grecia le abitazioni private continuarono ad approvvigionarsi di acqua in modo autònomo, ricorrendone la possibilità, attraverso pozzi o cisterne; alcune di queste ultime raggiunsero dimensioni ed architetture straodinarie.

Assieme a tante altre realtà culturali ed organizzative della Grecia antìca, questo efficace sistema di approvvigionamento dell'acqua, così diversificato, si presentò alla nascente civiltà romana che alla conquista di nuove terre faceva immediatamente seguìre la fase di colonizzazione, realizzando infrastrutture e città secondo la propria organizzazione sociale e politica.

Servizio essenziale di tale organizzazione territoriale era la comunicazione: strade e rotte marine, queste ùltime rese sicure dalle flotte di àgili e veloci galee da guerra. Nella costante comunicazione tra i diversi territorî troviamo anche la ragione di una notevole omogeneità della cultura romana, che tendeva a realizzare, in ogni città ovunque essa fosse, modelli e strutture anàloghi, per non dire identici. Non solo l'organizzazione degli spazi urbani o degli edifici pubblici, ma anche i servizi formavano lo stile di vita romano, in ogni parte dell'impero; tra i servizi più importanti non poteva non esserci l'approvvigionamento dell'acqua e lo smaltimento dei conseguenti liquami.

Poiché le nuove città romane erano edificate in luoghi strategici dal punto di vista militare e di controllo delle vie o rotte di comunicazione e dei traffici commerciali, non sempre si poteva conciliare la posizione ideale con un'altrettanto adeguata dotazione di acqua dolce.

I Romani, quindi, per ogni nuovo insediamento, del quale dovevano poi 'seguire' la crescita a volte neppure inizialmente prevedibile, impararono a risolvere il problema attingendo le acque ove esse erano disponibili, anche se a notevoli distanze dalla città, non trovando ostacolo alla realizzazione di acquedotti grandiosi lunghi molte decìne di chilòmetri. L'acquedotto di Corinto, costruito sotto l'imperatore Adriano, misura centotrentadue chilòmetri, nonostante la sorgente, presso Stìnfalo sui monti dell'Arcadia, distasse in linea retta 'soltanto' cinquantasei chilometri dalla città. Il suo percorso è dovuto alla propensione dei Romani, all'opposto dei greci, ad evitare, ove possibile, i percorsi in galleria preferendo gli scavi in superficie e gli acquedotti su arcate.

Ovviamente le più magnificenti òpere di adduzione dell'acqua hanno trovato collocazione nella 'città eterna': Roma.

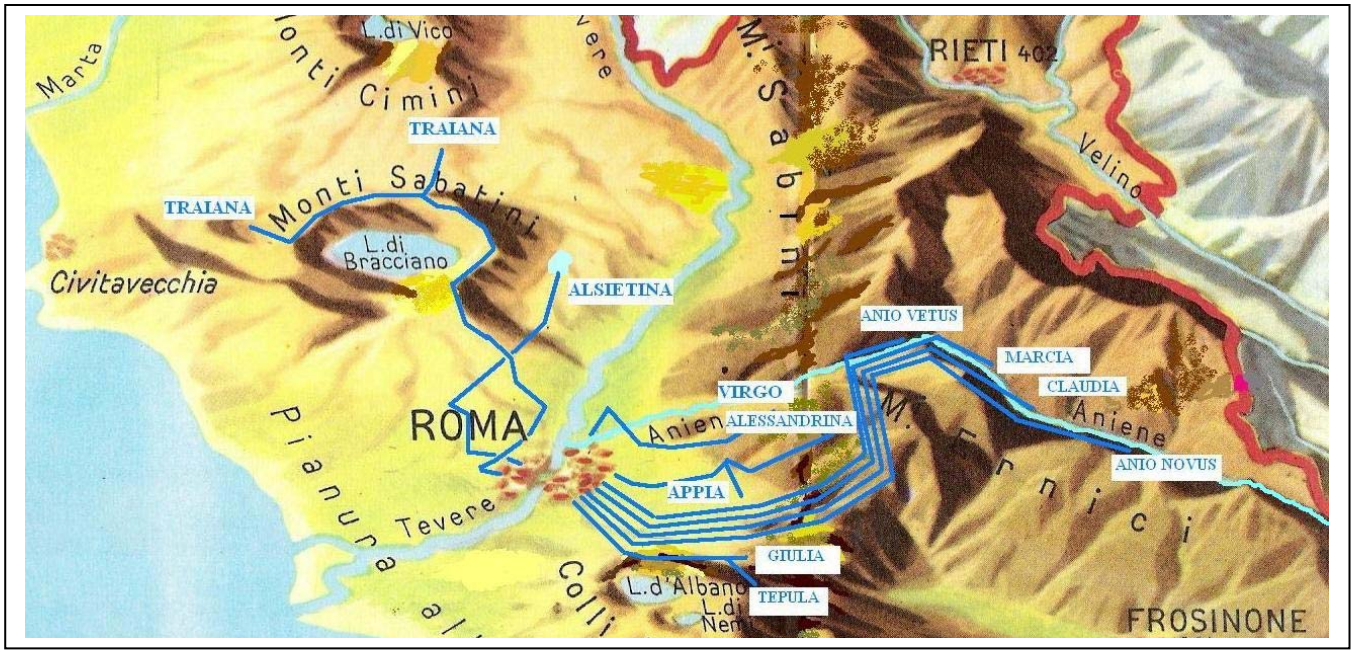
Lo storico e geògrafo greco Strabone (Amasia, Ponto ca 64 a.C. – 20 d.C.), nell'ùnica òpera di lui rimasta "*Geografia*", osservò:

"*La quantità di acqua che viene condotta nella città è talmente grande che attraverso la città e nei canali sotterranei scorrono veri e proprî fiumi e quasi ogni casa ha condutture e serbatoi proprî e possiede fontane che zampillano in abbondanza*."

Quando Strabone scriveva questo testo, Roma era servita da sette acquedotti, salìti a nove alla fine del primo sécolo dopo Cristo, sino a giungere ad undici, con l'ultimo, terminàto nel 226, quando la rete complessiva dei soli acquedotti principali misurava oltre cinquecento chilometri.

La portata d'acqua poteva superare, nella stagione più favorevole, i cinquecentomila metri cubi al giorno, poco meno di sei metri cubi al secondo. Poiché la popolazione della capitale imperiale giunse a superare il milione di abitanti, il sistema acquedottistico garantìva una dotazione, per ogni abitante, pari a cinquecento litri al giorno, che è il consumo medio *pro capite* delle più moderne civiltà di oggi, sebbene questo aspetto non sìa per nulla un sìntomo di modernità!

Dobbiamo però osservare che il flusso era continuo, giorno e notte, quindi gran parte dell'acqua 'passava in città' senza essere utilizzata, confluendo nei canali di scàrico. Questo apparente ma inevitabile consumo assicurava, per contro, una continua pulizia di tubazioni, canali e fognature, forse il vero motivo di sicurezza di fronte alle epidemìe che una così grande popolazione, raccolta in un'ùnica città, poteva subìre in quei tempi.



Si conosce la data precisa nella quale Roma iniziò ad approvvigionarsi di acqua con il mezzo dell'acquedotto: Frontino, sovrintendente alle acque di Roma, che tra poco incontreremo, scriveva:

"*441 anni dopo la fondazione della città i Romani si accontentavano di usare l'acqua che attingevano dal Tevere, da fonti o sorgenti*"

Infatti è nel 312 a.C., per volontà del censore Appio Claudio Ceco, che venne realizzato il primo acquedotto della città *caput mundi*, l'*Aqua Appia*, completamente interrato; la sua vena di alimentazione fu individuata da un certo *Caio Plauzio*, di professione *putearius* – cioè costruttore di pozzi; la scoperta gli valse l'appellativo di *venox*, il cacciatore di vene (. . . acquifere).

Il primo acquedotto che, a Roma, sfruttò la tecnica di scavalcare le valli con ponti ad arcate è l' *Anius Vetus*, (272 a.C.), alimentato dalle acque del fiume Aniene.

Nel 140 a.C. entra in servizio *l'Aqua Marcia*, condotta di oltre 90 chilometri voluta dal Pretore Quinto Marcio; l'*Aqua Iulia* nel 33 a.C.; *l'Aqua Claudia*, dell'omonimo imperatore, nel 52 d.C., per citare i maggiori.

Già in età repubblicana il sistema acquedottistico della città eterna aveva assunto proporzioni spettacolari. Nel 33 a.C., l'Edìle Menenio Agrippa fece costruire l'acquedotto *Aqua Virgo* e " *. . . fece costruire settecento bacini* [*lacus*]*, oltre a cinquecento fontane* [*salientes*] *e a centotrenta serbatoi* [*castella*] *e parecchie di queste opere furono molto lussuose. Su questi impianti eresse trecento statue di bronzo e di marmo e quattrocento colonne marmoree; tutto quanto in un solo* anno.*"* (Plinio, *Naturalis Historia,* XXXVI – 121).

I tanti acquedotti realizzati in ogni parte dell'impero romano, alcuni parzialmente in esercizio ancor oggi, sarebbero tutti degni di essere citati per molti motivi: la magnificenza dei tratti a ponte-canale ad arcate sovrapposte; la lunghezza e complessità esecutiva; la precisione dei livelli; . . . .

Qui citiamo soltanto, per alcune interessanti particolarità, l'acquedotto di *Saldae*, in Numidia, realizzato, nel II sécolo d.C. su progetto del *librator* (oggi diremmo ingegnere idraulico) Nonio Dato, in forza alla terza legione '*Augusta*', acquartierata a *Gemellae*, città fortificata nel deserto sahariano dell'*Africa Proconsularis*. E' raro poter attribuire con certezza un acquedotto al suo progettista; quello di Saldae è 'firmato'! Si può infatti ancòr oggi vedere, in una nicchia all'inizio della condotta, l'iscrizione che cita l'autore dell'òpera, Nonio Dato, sormontata da una piccola scultura raffigurante l'immagine di tre teste di donna a rappresentare le tre virtù che debbono accompagnare il tecnico idraulico:

PATIENTIA – VIRTUS – SPES

da tradursi in: costanza, abilità e fiducia.

Costretto ad attraversare un monte, Nonio Dato progettò una galleria lunga 482 metri, lasciando ai costruttori le istruzioni per eseguirne lo scavo partendo dagli opposti lati della montagna.

Eseguìto il tracciato, il *librator* lasciò *Saldae* per tornare al quartier generale della legione, a *Gemellae*.

Ben dieci anni più tardi (156 d.C.), il Procuratore della Mauritania, Vario Clemente, lo richiamò: le due squadre di scavatori avevano sbagliato le traiettorie e le gallerie, inziate dai due estremi, si erano spinte nella montagna superandone la mezzerìa senza incontrarsi.

Questo episodio ci permette due considerazioni: la prima sugli ancòra primitivi mezzi di scavo che comportavano tempi lunghissimi per la realizzazione di opere che oggi ammiriamo senza poterne valutare appieno il costo in fatto di tempo, di enormi fatiche, di sofferenze e . . . certo anche di pérdite di vite umane; la seconda: è evidente come l'esperienza pratica avesse il sopravvento anche nella progettazione, allora priva di un linguaggio tecnico universale ed unìvoco, tant'è che il solo autore dello studio era in grado di trarre dall'impiccio coloro che avessero imboccato una strada errata (nel caso citato il modo di dire è quantomai azzeccato!) nell'interpretazione dei documenti che egli stesso aveva lasciato e, è ragionevole presumere, quantomeno illustrato ai tecnici locali.

L'approvvigionamento d'acqua non si esauriva, come per quasi tutte le condotte greche, con l'arrivo dell'acquedotto in città. Soprattutto nel periodo imperiale, si sviluppò un diffuso sistema di tubazioni, generalmente in piombo, correnti sotto il piano stradale, ad alimentare le fontane pubbliche, i bagni e le terme pubbliche, le case patrizie.

La distribuzione avveniva attraverso torri idrauliche a vasche sfalsate (i *castella*) in grado di garantire, come vedremo più avanti, una prefissata gerarchia tra le differenti tipologie di utenza. Un parallelo e conseguente sistema di raccolta delle acque usate, la rete delle fognature, garantiva una buona tutela sanitaria. Al massimo sviluppo dell'impero, tutte le maggiori città disponevano di un sistema di approvvigionamento di acqua e di evacuazione dei liquami, ai quali si affiancava un òttimo servizo di manutenzione.

Per disporre di notizie dettagliate del livello di conoscenza dei Romani in Idraulica e quale sìa stato il loro contributo originale ci si deve rivolgere ai lavori dei soli due ingegneri romani che scrissero diffusamente su tale argomento: Vitruvio e Frontino.

Il primo fu Marco Vitruvio Pollione, del quale sappiamo poco se non che visse durante l'época di Giulio Cesare e Ottaviano Augusto - quindi tra il primo sècolo prima di Cristo ed il primo dopo Cristo - e che fu attivo nella costruzione e riparazione di macchine da guerra e di fortificazioni; ebbe anche un ruolo importante nella riedificazione di Roma sotto Ottaviano che si vantò, in questo, d'aver trovato una città di mattoni ed averne lasciata una di marmo. Nel trattato, di

dieci libri, "*De Architectura*", dedicàto a questo imperatore, Vitruvio non lo cita con il nome ufficiale di Augusto, che egli acquisì nell'anno 27 dopo Cristo, e questo ci fa concludere che il trattato fu redatto prima di quella data.

Vitruvio indagò ogni aspetto dell'ingegneria e dell'architettura romane: opere civili e militari; nel volume ottavo, affronta il tema delle fonti e della distribuzione dell'acqua, con numerose descrizioni ed indicazioni sulla localizzazione delle sorgenti, sullo scavo dei pozzi e sui differenti tipi e sapori dell'acqua.

Nell'ultima parte Vitruvio tratta degli acquedotti, delle tubazioni in piombo ed in terracotta, delle giunzioni dei tubi, degli ancoraggi delle curve, degli accorgimenti per far depositare le impurità, della gerarchìa nella distribuzione, degli orològi ad acqua, degli òrgani ad acqua, delle pompe aspiranti e prementi, delle ruote idrauliche e dell'idrostatica.

La sua fu una crònaca delle cose realizzate, unìta a raccomandazioni tecniche desunte dall'esperienza degli stessi realizzatori; nulla vi si trova in tema di sperimentazione e ricerca teorica:

"*Quando si fa scorrere dell'acqua nelle tubature, si genera inizialmente una forte pressione dell'aria in grado addirittura si spaccare le pietre; è quindi opportuno che l'acqua della sorgente sia immessa gradualmente e senza ìmpeto e che si abbia l'accortezza di fissare saldamente al suolo e di zavorrare i gomiti e le curvature. . . . . Prima di introdurre per la prima volta l'acqua nelle tubature è anche bene introdurvi una quantità di cenere sufficiente ad otturare eventuali fessure rimaste. . . . . E' consigliabile inserire dei serbatoi* [*castella*] *ogni duecento acri* [780 metri circa] *in modo che in caso di guasti non venga compromesso l'intero acquedotto e si potranno facilmente individuare le rotture. I bacini, però, non devono esser costruiti né lungo i pendii, né in corrispondenza dei ventri, né in salita, se soprattutto a fondovalle, ma soltanto in zone pianeggianti."* (Vitruvio - Libro VIII , 6 – 8).

Sesto Giulio Frontino (40 – 103 d. C.) iniziò la carriera, come molti tecnici romani, come ingegnere militare, prendendo parte a molte campagne. Il suo interesse, lasciato l'esército, si rivolse all'amministrazione politica: ottenne l'incarico di Pretore e poi di Governatore della Britannia.

Nel 97, sotto l'imperatore Nerva, ottenne la nomina di *Curator aquarum* per la città di Roma, che potremmo oggi tradurre con 'Sovrintendente al servizio idrico urbano'; per svolgere questa funzione egli ideò una Magistratura delle acque, gestendola con il denaro pubblico ricavato dalle tariffe dell'acquedotto.

Il grande mérito che riconosciamo a Frontino è di aver condotto uno studio accurato del sistema acquedottistico della capitale imperiale, contenuto nella sua opera più famosa "*De aquis Urbis Romae*". Il trattato di Frontino fu pubblicato nel 1772 a Padova, su iniziativa avviàta dallo scienziato veneto Giovanni Poléni (Venezia 1685 – Padova 1761), che incontreremo nel Capitolo 16, ma conclusa da altri, dopo la sua morte. Il trattato fu tradotto e stampato in francese nel 1820 dall'achitetto Rondelet e poi, in estratto, sulla rivista *Annales des Ecole des Ponts e Chaussées* nel 1858, a cura dell'ingegnere Rozat de Mandres. La versione in inglese comparve, a cura dello statunitense Clemens Herschel, nel 1868; anche di questo scienziato troveremo cenni in alcuni Capitoli di questa Storia.

E' la migliore testimonianza dello stato dell'Idraulica applicata in quei tempi; in esso è contenuta la completa descrizione delle tecniche e dei métodi romani nella distribuzione dell'acqua, dei quali egli dimostra grande orgoglio giungendo a scrivere:

"*Nessuno comprenderà le inutili piramidi . . . . né gli inutili pensieri o le opere famose dei Greci, in confronto a questi acquedotti, a queste indispensabili strutture*".

In queste affermazioni, l'eccesso di fierezza del *civis romanus* può essere visto come un'azione di omaggio al potere che gli aveva affidato tale prestigioso incarico, non certo nel rifiuto di civiltà passate che erano famose per saper gestire le acque in modo assai efficiente al tempo in cui Roma era un rozzo villaggio di capanne.

Dalle testimonianze di Vitruvio e di Frontino possiamo trarre interessanti informazioni.

La fonte di alimentazione di ogni acquedotto era abitualmente una sorgente, qualche volta le acque di un lago o di un corso d'acqua. Per i primi acquedotti, di ridotta lunghezza, l'alimentazione poteva avvenire anche a mezzo di pozzi; l'acqua, sollevata attraverso diversi metodi (di solito con un elevatore a secchi) poteva essere abbondante e di ottima qualità, ma la portata comunque assai inferiore a quella derivàta da una fonte costante.

Come già si faceva in Grecia, spesso più sorgenti erano unìte da gallerie drenanti che ne captavano e concentravano la massima portata traibile della zona acquifera.

Sia che l'alimentazione avvenisse da sorgenti, singole o raccolte in gruppi attraverso i drenaggi, sia che l'acqua fosse captata direttamente da fiumi o laghi, prima dell'imbocco della condotta principale l'acqua passava attraverso un serbatoio con funzione si sedimentazione delle sabbie e dei limi in essa contenuti: la *piscina limaria*.

La condotta per il trasporto a destinazione, cioè la parte della struttura dove scorreva l'acqua, era un canale, in muratura o scavato in roccia, rivestito da diversi strati di intonaco impermeabilizzante e accuratamente lisciato per facilitare lo scorrere dell'acqua (in questo intuendo l'importanza della resistenza al moto dovuta all'attrito con le pareti del condotto). L'intonaco era in *opus caementicium* (miscela di schegge di pietra e malta di calce) oppure in *opus signinum* (sabbia e calce). I canali erano coperti per impedire che l'acqua fosse contaminata da polvere, sporco ed altre impurità e perché il sole non la scaldasse né si formasse vegetazione acquatica, ostacolo intollerabile allo scorrere dell'acqua. C'erano passaggi di ventilazione e di ispezione, approssimativamente ogni 80 / 100 metri. A volte gli acquedotti erano costituìti da due o tre canali sovrapposti, il più alto dei quali destinato nel tempo a seguire l'aumento della richiesta. La sezione del condotto era normalmente rettangolare, dalle dimensioni tra i 0,5 e 1,8 metri in larghezza e dai 1,5 ai 2,4 metri in altezza. Ovviamente, ragioni strutturali piuttosto che requisiti idraulici determinavano le proporzioni delle sezioni.

Con la conoscenza di tali particolari, meglio si comprende il livello di conoscenza dei Romani in Idraulica, soprattutto applicata. Non è ozioso affermare che gli ingegneri romani conoscevano – come i loro predecessori egizi e greci – la proporzionalità tra quantità d'acqua che scorre e pendenza del canale che la trasporta; da ciò ne consegue che la costruzione di un acquedotto doveva partire 'dalla sua fine', cioè dall'altitùdine della zona che si voleva servire. Per tale motivo, fissata la quota di arrivo del condotto, si doveva procedere a ritroso giungendo ad individuare un punto di captazione a quota tanto elevata da consentire la pendenza necessaria, a volte allontanandosi dalla città di decine se non centinaia di chilometri.

Frontino scrisse: "*I molti acquedotti che raggiungono la città hanno quote differenti. Da come ognuno di essi giunge, distribuisce acqua . . . . ma non può servire zone a quote superiori a quelle raggiunte al suo arrivo.*"

Tuttavia, le pendenze degli acquedotti sembrano essere state fissate più da esigenze topografiche che idrauliche; l'*Aqua Virgo* ha il primato del valore minimo, in alcuni tratti, dello 0,0025%; in alcuni tratti urbani si giunge a massimi dell'ordine di qualche punto percentuale.

Vitruvio scrive di aver personalmente verificato pendenze da sette a quindici centimetri ogni trecento metri, paventando, per valori minori, una non costante alimentazione. La pendenza non era sempre la stessa lungo il percorso e numerose sono le tracce di correzioni portate durante o dopo la costruzione dell'acquedotto. Clemens Herschel, in occasione dell'approfondìto studio sugli acquedotti romani durante il quale tradusse, come già ricordato, l'òpera di Frontino, giunse a questa conclusione: " *mi chiedo se a Roma* '*mensor'* o '*librator*' o '*architecton*' *avessero la conoscenza*

della scelta della sezione giustificata dalla pendenza . . . . E' infatti probabile che, realizzato un tratto di acquedotto e verificato l'insufficiente fluire dell'acqua rispetto alle esigenze, si procedesse a stringere la sezione oppure ad incrementarne la pendenza . . . . "

L'acquedotto, sia a pelo libero che, in alcune parti, in pressione, portava l'acqua in città, giungendo a numerosi punti di distribuzione, detti c*astella*; da questi, tubazioni separate conducevano a reti di distribuzione per i diversi usi consentiti.

Vitruvio scrisse su tale argomento: ". . . *tre tubazioni, di ugual misura, sono collegate, nel castello, a tre serbatoi; quando l'acqua è abbondante, l'esubero nei due contenitori esterni alimenta il contenitore centrale . . . . . il primo contenitore è destinato alle fontane; il secondo contenitore porta acqua ai bagni del servizio pubblico; le case private vengono approvvigionate attraverso i contenitori della terza serie, che hanno acqua soltanto quando sono soddisfatti i due usi precedenti. La ragione per la quale ho operato questa divisione è che quelli che usufruiscono di un servizio privato all'interno delle loro case devono contribuire con una parte dell'acqua a mantenere gli* [altri usi]*.".*

Per la distribuzione all'interno della città, ed occasionalmente su tratte degli stessi acquedotti, furono utilizzate condotte in pressione. Erano realizzate in materiali diversi, in funzione delle pressioni che dovevano sopportare. L'uso della terracotta era già frequente nella civiltà minoica (VI secolo a.C.) con produzione di pezzi con un sorprendente grado di standardizzazione. La giunzione 'maschio/femmina' a bicchiere comportava un notevole restringimento del diametro che, associato a lunghezze di ciascun pezzo mai superiori al metro, davano una scarsa efficienza del flusso, cioè una notevole riduzione della velocità e quindi della quantità d'acqua lungo il percorso. Vitruvio, però, ne riferisce la facilità di riparazione e la maggior salubrità (pensiamo al solo apprezzamento organolettico: il cotto non 'insaporiva' come il piombo o il rame).

L'utilizzo del piombo, episòdico sino al tempo della civiltà greca, si sviluppò assai nell'impero romano. Tra i principali vantaggi vi era la facilità della produzione e dell'unione: i *plumbarii*, addetti alla produzione ed alla posa delle tubazioni, piegavano a freddo le lastre rettangolari sino a congiungerne i lembi più lunghi, ribattendoli per poi saldarli con piombo fuso che, unìto allo stagno, era utilizzato anche per eseguire l'unione dei tubi, accostati senza restringimenti (unione 'testa a testa'). Moderne ricostruzioni hanno consentito di verificare la capacità di queste tubazioni di sopportare più di dieci atmosfere di carico idraulico, subendo la rottura intorno alle diciotto atmosfere per cedimento della parete, non della saldatura.

Più raramente, per i tubi della distribuzione urbana in pressione si utilizzava il rame o il bronzo: quest'ultimo, sebbene assai costoso, era preferito per la sua alta indeformabilità e resistenza ad eventuali forature ad òpera di coloro che estraevano l'acqua abusivamente.

In qual modo i Romani ritennero di comprendere alcuni basilàri princìpi di Idraulica si può dedurre dallo stesso Frontino:

"*Non dimentichiamoci . . . . . che ogni corrente d'acqua, ogniqualvolta viene da un punto più alto e fluisce in un serbatoio finale attraverso una tubazione di piccola lunghezza, non solo giunge alla sua altezza, ma concede di più, un eccesso; ma ogni volta che viene da un punto basso, cioè sotto poca pressione, ed è condotta per una apprezzabile distanza, si ridurrà nella misura della resistenza del suo condotto, così che . . . . . è necessario un controllo della perdita di carico.*"

Da questa osservazione Frontino non elaborò alcuna teoria né condusse prove o misurazioni; possiamo concludere, da questo ùnica testimonianza da considerarsi comunque emblemàtica, che i Romani si accorsero di molti fenomeni idraulici senza approfondirli, senza fermarsi ad indagare, quasi travolti dalla frenesìa del costruire: il loro sapere restò, pertanto, allo stadio della pratica esperienza in grado di soddisfare le esigenze della società di quel tempo.

Abbiamo detto che l'acquedotto, giunto in città, terminava in un *castellum*, o in più *castella* alla fine di ogni diramazione principale.

Dalla descrizione nel '*De Architectura*" di Vitruvio, sappiamo che ogni *castellum* assolveva la funzione di 'torre di distribuzione', attraverso vasche concentriche o 'a cascata': dalla prima vasca si dipartivano le tubazioni destinate alle fontane ed alle piscine pubbliche; la seconda collegava i teatri e le terme; la terza le case e le fontane private.

Quando l'acqua era scarsa, non potendosi assicurare tutte le utenze, era la terza vasca che, per prima, vedeva ridursi la portata, in modo automatico, poiché si riduceva l'acqua che usciva, per tracimazione, dalla precedente seconda vasca nel *castellum*. Se il flusso si riduceva ancòr più, era la seconda vasca che cessava d'essere alimentata dall'acqua, perché la prima non scaricava più nulla.

Ecco quindi la gerarchìa nell'alimentazione urbana: fontane pubbliche e piscine, bagni pubblici (terme) e teatri, case private – agli ultimi due gruppi di utenze era imposta una tariffa.

La tecnologia permetteva di disporre di efficienti valvole di intercettazione e di rubinetti, generalmente in bronzo o in lega di piombo, la cui malleabilità riduceva le perdite.

Poiché però il flusso era continuo, la corrente nelle tubazioni principali correva altrettanto costantemente. Ogni consumatore, soggetto alla tariffa, non pagava in proporzione all'acqua che consumava, ma un importo fisso in base al diàmetro della tubazione di allacciamento, che era considerato significativo per la valutazione della quantità (la portata) delle acque erogàte.

Frontino, forse più entusiasta che pedante nello svolgimento del compito di *Curator aquarum*, volle effettuare i controlli tra le portate giunte in città e quelle effettivamente distribuite, allo scopo di individuare perdite e ruberie, queste ultime attribuibili, leggiamo nel trattato, a cittadini forestieri, non certo *cives romani*!

Al fine di garantìre che le quantità di acqua distribuìte ad ogni utente allacciato all'acquedotto fosse sempre la stessa, Frontino impose l'inserimento di un tratto di tubo in ottone, difficilmente deformabile, detto *fistula*, lungo venticinque centimetri ed inserìto all'inizio di ogni tubazione di derivazione: a pari diametro, questo è il ragionamento, fluirà pari portata (Soltanto pochi decenni prima Eròne – lo abbiamo ricordato nel Capitolo 2 – aveva dimostrato che la portata è determinata non solo dalla sezione ma anche dalla velocità dell'acqua che in essa scorre, quindi, nel caso della tubazione in pressione, anche dal valore raggiunto dalla stessa pressione all'imbocco di ogni *fistula*).

Con tale errata impostazione, non stupisce l'uso dell'unità di misura della portata detta *quinaria*, che era riferìta, secondo tutte le possibili interpretazioni degli storici, all'àrea della sezione di passaggio, senza alcuna partecipazione della velocità del flusso o della pressione dell'acqua in quel punto.

Secondo la tesi più probabile, il término *quinaria* è da riferirsi alla tubazione con un diàmetro interno di 5/4 di pollice, pari a circa 2,3 centimetri. Questa tesi è coerente con le altre misure in uso a quei tempi che differivano dalla *quinaria* perché di diàmetro maggiore per multipli di ¼ di pollice: *senaria* – 1/6, *settenaria* – 7/4, e così via sino alla *ventenaria* – 20/4 di pollice.

La *quinaria* prevalse quale unità di misura; gli orifizi e le tubazioni erano quindi misurati per multipli di *quinaria*, che corrispondeva ad un'area unitaria pari a circa 4,2 centimetri quadrati. La progressione era per quarti, ecco quindi misure espresse in: 'una *quinaria* ed un quarto', 'tre *quinariae* e tre quarti', ecc . . . Così almeno deduciamo dai calcoli di Frontino che ìndica il càlibro degli acquedotti romani dividendo le sezioni del flusso per la supeficie di una quinaria: sappiamo così, dal suo trattato "*De aquis Urbis Romae*", quante quinarie misuravano i principali acquedotti di Roma: l'*Anio Vetus* – 2362 *quinariae*, il *Virgo* – 2504, l'*Aqua Marcia* – 2944, l'*Aqua Julia* - 1206, l'*Aqua Claudia* - 3312 . . . .

A causa della grande differenza tra i diàmetri delle tubazioni principali e delle *fistulae* ad essi collegate, ed anche per le pressioni modeste degli acquedotti e quindi limitate velocità del flusso, l'utilizzo di questa unità di misura, esclusivamente geomètrica perché riferìta al solo diàmetro o alla sezione di passaggio, per quanto errata dal punto di vista concettuale non fu completamente irragionevole e quindi suscettibile di dare quantomeno risposte sull'òrdine di grandezza delle diverse portate transitanti. Non solo: si poteva affermare, con buona approssimazione, che la quantità di acqua erogata, a parità di numero di *fistulae*, era equivalente per ogni utente. Non era grande l'errore del considerare che tubazioni di area corrispondente a due *quinarie* potevano erogare il doppio di acqua di un tubo che misurava una *quinaria*.

Per le applicazioni pratiche dei tecnici romani di allora, come abbiamo già detto, ciò bastava.

Utilizzare questa unità di misura per condurre il bilancio tra acqua entrata nell'acquedotto, alla sua origine, ed acqua distribuìta a tutte le utenze allacciate portava però a pesanti approssimazioni.

Di questo si accorse Frontino, perché volle proprio condurre un bilancio tra entrate ed uscite dalla rete degli acquedotti di Roma, per contrastare, almeno nelle intenzioni, le numerose utenze abusive; ecco cosa scrive dell'acquedotto *Aqua Virgo*:

La misura potrebbe non essere fatta alla presa, perché Virgo è costituita da numerosi tributarî ed entra nel suo canale [principale] *con una velocità troppo bassa. Vicino alla città, tuttavia, alla pietra del settimo miglio, sui terreni che appartengono a Cajonis Commodus, e dove Virgo ha una grande velocità, feci la misura* [dell'area di pasaggio del flusso] *ed essa ammonta a 2504 quinarie essendo 1752 quinarie in più rispetto a quanto scritto nei registri. Ma la prova della correttezza della nostra misura è evidente: le distribuzioni* [complessive] *dell' Aqua Virgo sono pari a tutte le quinarie che trovai al punto di misura: 2504*.

Secondo Frontino, che non aveva a disposizione che l'unità di misura *quinaria*, confrontare la somma delle aree di tutte le tubazioni, alimentate dall' *Aqua Virgo*, con l'area trasversale della sezione della corrente dell'acqueddotto al '*settimo miglio*', corrispondeva alla misura effettiva dell'acqua entrante ed erogata.

Ancor più chiaro l'errore parlando dell'*Aqua Appia*:

"*L'Aqua Appia è accreditato nei registri di 841 quinarie. L'acquedotto non può essere misurato alla presa perché colà è formato da due canali, ma alle Torri, dove sottopassa lo Spes Vetus ed incontra il braccio di Augusta, io trovai una profondità di acqua di cinque piedi e una profondità di un piede e 3/4 per un'area di 8 e ¾ piedi quadrati; i tubi alimentati . . . . assommano a 1825 quinarie, cioè ben 984 in più di quelle dei registri,. . . .*"

L'incomprimibilità dell'acqua, ovviamente, comporta il fatto che tutta l'acqua che entra in un sistema sia pari a quella che dallo stesso se ne esce, ma ogni singola uscita non estrae la stessa

quantità di acqua, a pari sezione, eppertanto non è possibile – senza tener conto della velocità – valutare la presenza di perdite, di allacciamenti abusivi, né considerare la distribuzione assolutamente equànime.

A dispetto dei grandi progressi dei Romani nell'arte della distribuzione dell'acqua si può concludere, dall'evidenza, che essi non indagarono i princìpi dell'Idraulica, ignorando addirittura le scoperte fatte dai più prossimi ed esemplari vicini Greci.

Ma in realtà la cultura idraulica greca fu un'avanguardia di pochi, nella marcia del progresso scientifico, che non riverberò né sulla propria civiltà né su quella che poi, seguendo, li superò nelle realizzazioni ma non nel progresso della conoscenza dei princìpi.

Il pensiero greco fu cioè una 'fuga in avanti', che si arrestò nella civiltà romana impegnata nella costruzione dell'impero, fatto di opere colossali ma realizzate secondo il livello culturale già raggiunto e, evidentemente, in quel tempo sufficiente.

Se nel campo della scienza Idraulica ed in quelle ad essa strettamente correlàte (soprattutto la Geometrìa, la Matemàtica e la Fisica) Roma appare 'statica', altrettanto non fu in molti campi: l'Architettura; la Scultura; la Letteratura; . . . il Diritto.

Ancòr oggi, il *Diritto Romano* costituisce il presupposto ed il riferimento del quadro normativo di quasi tutti i paesi del mondo.

Nel *corpus* dei princìpî romani troviamo una prima codifica sistemàtica del '*Diritto delle acque*', che pare aver poco o nulla ha a che fare con la scienza Idraulica ma che alla stessa è strettamente collegàta. Ogni azione o struttura, che le conoscenze idrauliche permettono di concepìre, ha necessariamente bisogno di una codìfica normativa che ne consenta la realizzazione e l'esercizio.

Molti concetti proprî delle leggi odierne risalgono a Roma: la classificazione delle acque in pubbliche e private; i beni patrimoniali dello Stato e quelli destinàti ad *usus publicus*, cioè disponibili a tutti i cittadini; il diritto all'uso delle acque private e la servitù di acquedotto; la demanialità delle acque sorgenti se destinàte ad alimentare l'acquedotto pubblico; la concessione alla derivazione (*ductio*) delle acque dai fiumi pubblici, subordinata agli usi di generale utilità come, ad esempio, la navigabilità: "*si flumen navigabile sit, non oportere praetorem concedere dutctionem ex eo fieri quae flumen minus navigabile efficiat*", oppure: "*ne derivationibus minus flumina exarescant*", prima formulazione di Deflusso Minimo Vitale!

Non màncano norme che régolavano i diritti ed i doveri di chi possedeva le terre prossime all'acqua pubblica (*circumlentes*).

Per vigilare, dirimere le liti e sanzionare gli abusi esisteva una Magistratura specializzata, individuata nella figura dei *Censores*, anche se, nel corso del tempo, si ha testimonianza di intervetnti condotti da *Edili*, da *Quaestores*, se non addirittura dallo stesso impertaore.

Il primo imperatore, Cesare Ottaviano, nel 10 a.C. istituì uno speciale ufficio per l'amministrazione delle acque pubbliche, la *Statio aquarum*, affidata ad una nuova figura di magistrato: il *Curator aquarum*. Con tale organizzazione si potè, come abbiamo visto nel caso di Frontino, gestire in modo sistemàtico le acque di Roma e, analogamente, delle altre città dell'impero, e riscuotere, aspetto non certo irrilevante, il tributo degli utenti soggetti a questa tassa.

Il *Diritto Romano*, quindi, ha dato un contributo anche alla cultura dell'acqua, a quei tempi ùnico fluido oggetto di attenzione, e, a nostro avviso, mérita questa breve citazione: il progresso della civiltà avanza soltanto laddove esistano régole certe . . . e le règole certe di Roma danno un po' di certezza anche a quelle di oggi, per quanta certezza queste, ahinoi, possano avere!

I Romani, con Vitruvio e Frontino, ebbero il mérito, dal nostro punto di vista, di scrivere 'della tecnologìa dell'acqua', lasciandoci il motivo di ricordarne le òpere in questa Storia, non solo

come progresso della tecnica ma anche per aver raccontato della capacità della mente umana di concepìre e realizzare strabilianti progetti.

Nel normale corso dello sviluppo scientifico la scoperta dei princìpi di base è séguito delle osservazioni empiriche. Molti princìpi di Idraulica sembrano invece aver preceduto la pratica ma senza trovare in essa applicazione, ricadendo nell'oblìo per sécoli e sécoli.

Il grande impero romano, spezzato in due tronconi nel V sécolo, nella sua parte occidentale seguì una veloce dissoluzione; convenzionalmente essa cessò di esistere nel 476 d.C. quando Odoacre, re barbaro, inviò a Costantinopoli i vessilli dell'ultimo imperatore d'Occidente che ancòra si proclamava 'romano'.

Iniziò così, il Medio Evo, epoca convenzionale nella quale è identificato il periodo successivo alla distruzione di un'organizzazione sociale, economica e politica che durava da dodici sécoli. Gioco forza, ridare alle comunità un'organizzazione stabile richiese lo scorrere di altri sécoli, nei quali da un ùnico impero nacque l'Europa degli Stati.

Inevitabile riconoscere al Medio Evo il carattere di periodo di transizione, di travaglio, di faticosa e lenta ricostruzione, nel quale l'assenza di organizzazioni sociali in territorî ampi portò ad una chiusura culturale e ad un rallentamento della ricerca che per progredìre già allora aveva bisogno di comunicazione e contatti.

Mentre 'in Occidente tutto crollava' e doveva essere ricostruìto dalle fondamenta, nel deserto aràbico si assisteva alla nàscita di una civiltà in tutto nuova, alla quale la cultura del mondo, ed in particolare dell'Europa, deve moltissimo: l'Islam.

* * *

L'immagine degli acquedotti di Roma è stata prodotta dall'autore sulla base di una carta fisica tratta da 'CONOSCERE', enciclopedìa, édita dalla 'Fratelli Fabbri Editori' nel 1963, che ha accompagnàto tante generazioni di studenti italiani che la ricordano compagna fedele ed esauriente della propria giovinezza.

Cap. 5 – Continuità e sviluppo nella cultura islàmica

"*Meravigliosa cosa veramente è a pensare la gran mutazione e alterazione che fece in tutto l'imperio romano la venuta dei Goti e altri barbari in Italia, conciòsiacosache tali populazioni estinguessero tutte l'arti, tutte le scienze e tutti i traffici e mercanzìe che in diverse parti del mondo si facevano: e durarono per quattrocento anni e più, quasi come le tenebre d'una oscura notte . . .* "

" *. . . Questo sogno fu una delle ragioni più forti per tradurre i libri. Al-Ma'mūn scrisse allora al re dei Bizantini chiedendogli il permesso di farsi spedire quanto egli avrebbe scelto delle scienze antiche depositate e conservate nel paese dei Romani . . . Al-Ma'mūn inviò* [emissari] *. . . Essi presero quanto avevano scelto . . . ed egli ordinò di tradurre le opere ed esse sono state tradotte.*"

Due scritti affiancati, apparentemente incoerenti tra loro, per tempi e spazio, ma che invece possono portare a considerazioni significative e, per certi aspetti, conseguenti; due tra gli innumerevoli documenti che dimostrano quanto sìa ingiusto l'atteggiamento nei confronti dei mondi nati dal disfacimento dell'impero romano, entrambi affacciati sul mare Mediterraneo, un tempo '*nostrum*' e poi semplice frontiera, separazione da sècoli ritenuta netta ma culturalmente assai poco consistente.

Il primo testo è di Giovan Battista Ramusio (1485 – 1557), umanista veneto che descrive il pensiero comune che, già in pieno Rinascimento, descriveva il Medio Evo come un periodo di sola barbarie.

Il secondo è il racconto, dello storico àrabo al-Nadīm, del sogno profético del califfo al-Ma'mūn, dall' 813 all' 833 a capo dello sterminato impero àrabo alla sua massima espansione ma già in procinto di sfaldarsi in molti pezzi. Nel sogno, al-Ma'mūn afferma d'aver parlato con Aristotele che gli ha aperto gli occhi sull'importanza della cultura greca, ordinandogli di tradurre i testi, in greco, conservati a Bisanzio.

La cultura europea, come si dice – impropriamente – 'del mondo occidentale', riprese vigore nel Rinascimento, considerando il Medio Evo come una successione di sècoli bui, privi di qualsìasi progresso della conoscenza e delle scienze.

Il Rinascimento fu inteso nel significato letterale del términe, una nuova nàscita sociale e culturale dal 'quasi nulla', poco o per niente considerando i méríti della cultura àraba, sorta, questa sì dal 'quasi-nulla' del deserto, ad òpera di popoli unìti non solo dall'Islam ma anche dalla volontà di apprendere ed assorbire tutte le conoscenze del sapere di ogni civiltà, al punto da indurre i proprî capi supremi a dare, in questo, il senso di una volontà profètica.

Se è vero, come abbiamo già avuto occasione di dire, che le culture antiche, precedenti alla greco-romana e questa stessa, sono tutt'oggi presenti in tanti segni caratteristici di molti popoli, grande deve essere il riconoscimento da riservare alla civiltà àraba che, nella sua sete di conoscere e di apprendere, preservò dalla distruzione il lavoro della Grecia antica, assimilò altre culture, tra le quali il sapere dell'India, e seppe anche aggiungere proprî contributi e sviluppi originali a tutte le scienze, anche all'Idraulica. L'Islam diede cioè vita ad una cultura, nata al séguito della diffusione

del nuovo credo religioso, profonda ed innovativa, che si è poi diffusa, durante il Medio Evo, nella nascente nuova Europa.

È questo un processo poco nòto, a volte addirittura misconosciuto; già questo darebbe un motivo vàlido per parlarne, in questa Storia; ma la cultura àraba è troppo importante perché non sìa qui citàta, sebbene in estrema sìntesi: sarebbe una imperdonàbile omissione.

Dell'Islam fu culla, nel VI sécolo dopo Cristo, la terra d'Arabia, dove convivevano religioni monoteiste, Ebraismo e Cristianesimo, e credenze politeistiche, a volte neppure definibili come religioni, proprie delle popolazioni arabe, suddivise in numerose e piccole comunità, o tribù, nell'immenso deserto, dédite al commercio, alla pastorizia, al controllo delle carovane sulle vie verso l'Oriente e alle sòlite contese armate per un predominio sempre geograficamente limitato.

L'Ebraismo era presente da tempi remòti; alcuni ne fanno risalire la presenza al tempo ed a motivo dei contatti tra la regina di Saba ed il re d'Israele Salomòne, nel X sécolo a.C.. Altri ritengono che l'arrivo degli Ebrei in Arabia sia dovuto ai profughi fuggiti dopo il disastroso ésito delle due rivolte contro i Romani nel 70 e nel 135 d.C.. Comunque sia, l'Ebraismo si diffuse tra le popolazioni locali sino a formare comunità arabe convertite: Ebrei di lingua àraba. Numerose erano le òasi e le città, solitamente fortificate, occupate da queste comunità.

Per il Cristianesimo la penìsola àraba era semplicemente una regione posta lungo una delle tante direzioni verso le quali diffondere, proseguendo l'òpera degli Apòstoli, il messaggio di Gesù Cristo. Fu una lenta espansione, caratterizzata, diversamente dall'Ebraismo, da 'mutazioni' teologiche portatrici di dottrine discoste dall'ortodossìa originaria, della quale si ergeva a strenuo difensore l'impero cristiano di Bisanzio. Le comunità cristiane, piccole o grandi, vivevano integrate nelle città arabe dove, per abitudine, la tolleranza religiosa era atteggiamento naturale almeno sino a quando la religione non diventava pretesto per sostenere altri interessi, devianza foriera di guai allora come oggi, ovunque.

Il politeismo degli Arabi si manifestava nell'adorazione di pietre, alberi, oggetti, dove ritenevano risiedessero gli spiriti delle divinità.

La società àraba era un aggregato di tribù, ciascuna delle quali era un'organizzazione assai compatta e sòlida, unìta nei princìpi di lealtà, generosità e coraggio, doti essenziali per gruppi costretti a sopravvivere nell'inospitale deserto. Ogni componente maschio della tribù doveva difendere i diritti comuni sino alla morte, essere ospitale nei confronti di chiunque, proteggere le donne e partecipare, senza riserve, ad ogni battaglia o . . . rapina. Anche nell'àmbito di coalizioni o regni, più o meno grandi, che sorgevano, a volte per poco tempo, tra più tribù, restava sempre questa impostazione che caratterizzava, nel bene e nel male, ogni gruppo.

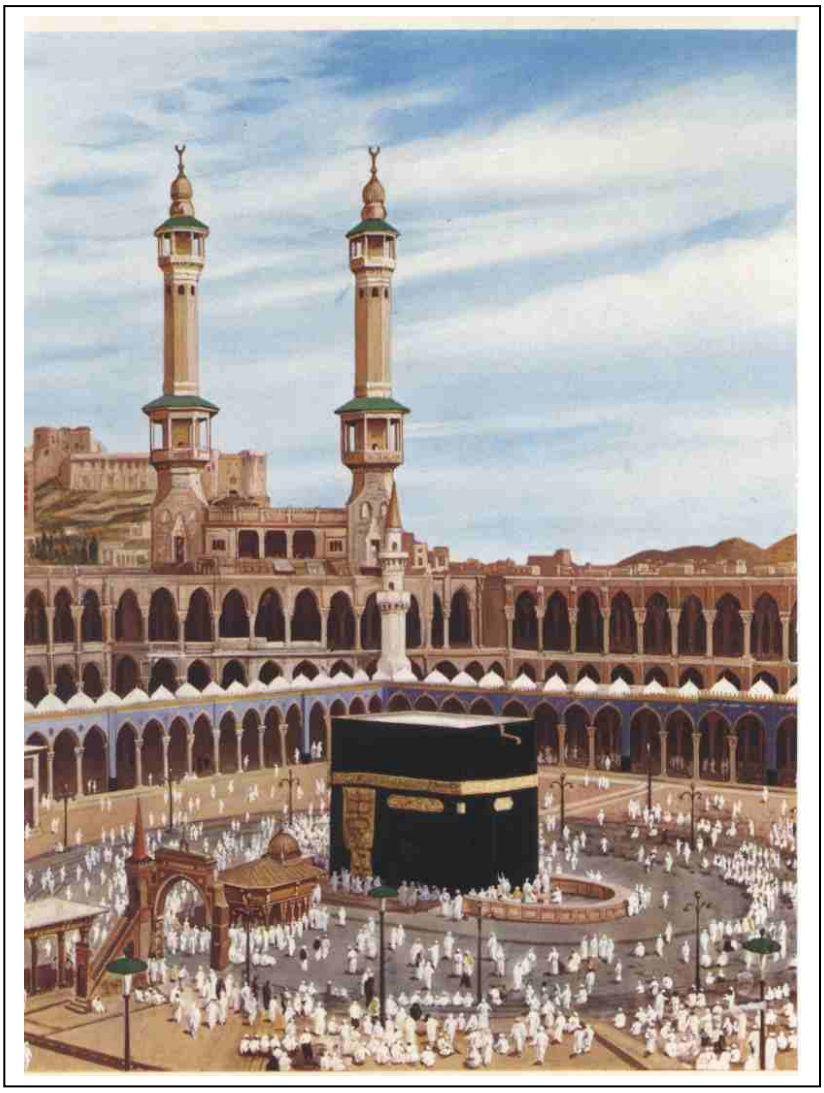
L'Arabia, sub-continente vasto quanto l'India, nel VI sécolo era patria di molte realtà sociali.

A Sud l'*Arabia felix*, dove era fiorente il regno di '*Saba, e Du-Raydān e Yemen*', caratterizzato da non unìvoche tensioni religose monoteistiche nelle quali l'ebraismo dominava sul cristianesimo monofisìta di origine abissina.

A Nord, il territorio patria dei ridimensionati Nabatei e dei piccoli regni di Hira e di Gassān, risentiva grandemente del costante conflitto tra l'impero di Bisanzio ed il regno di Persia, e la maggior parte delle popolazioni arabe erano indicate con il termine genérico 'Talmùd', dèditi soprattutto alle attività carovaniere.

Nell'Arabia centrale dominavano, ciascuna per la propria parte di . . . deserto, numerose tribù, spesso in competizione, non tutte nomàdi.

Tutti i gruppi tribali avevano, nelle loro credenze religose e mistiche, un riferimento in comune: la *Kaaba*, nella città della Mecca; un edificio di forma quasi cùbica (larga dieci metri, lunga dodici ed alta quindici), ricoperto da drappi di seta nera, dove ogni comunità conservava i proprî ìdoli e che aveva, incastonata nello spigolo rivolto a Sud-Est, la '*Pietra Nera*', un meteorìte, grande quanto un pugno, da tutti veneràto perchè da sempre ritenuto di origine divina.



Fu questo il punto di partenza ed oggi riferimento supremo di tutto l'Islam.

In quella terra, in quel tempo, in quell'ambiente, tra quelle comunità, in un anno compreso tra il 567 ed il 572, nacque, nella città chiamata Mecca, Muhammad, più noto, al mondo non di lingua àraba, come Maometto.

Prima della Rivelazione, nel 612, Maometto ebbe modo di conoscere le realtà della propria terra, di avvicinare le grandi religioni monoteistiche e verificarne la più potente capacità di valorizzare l'essere umano e di dimostrarne il bisogno di conoscere l'ùnico vero dio, a differenza dei culti pagani, spesso privi di qualsìasi orizzonte di speranza, di elevazione dello spirito, di certezza della voce divina.

Nell'anno 622 Maometto fugge da Mecca per rifugiarsi nella città di Yatrhib, che da allora prenderà il nome di *Madināt al-nabī* (città del Profeta), oggi Medina.

È l'anno 0 della cultura, della storia e del calendario islàmici: l'Egìra, in àrabo, *Hiğra*.

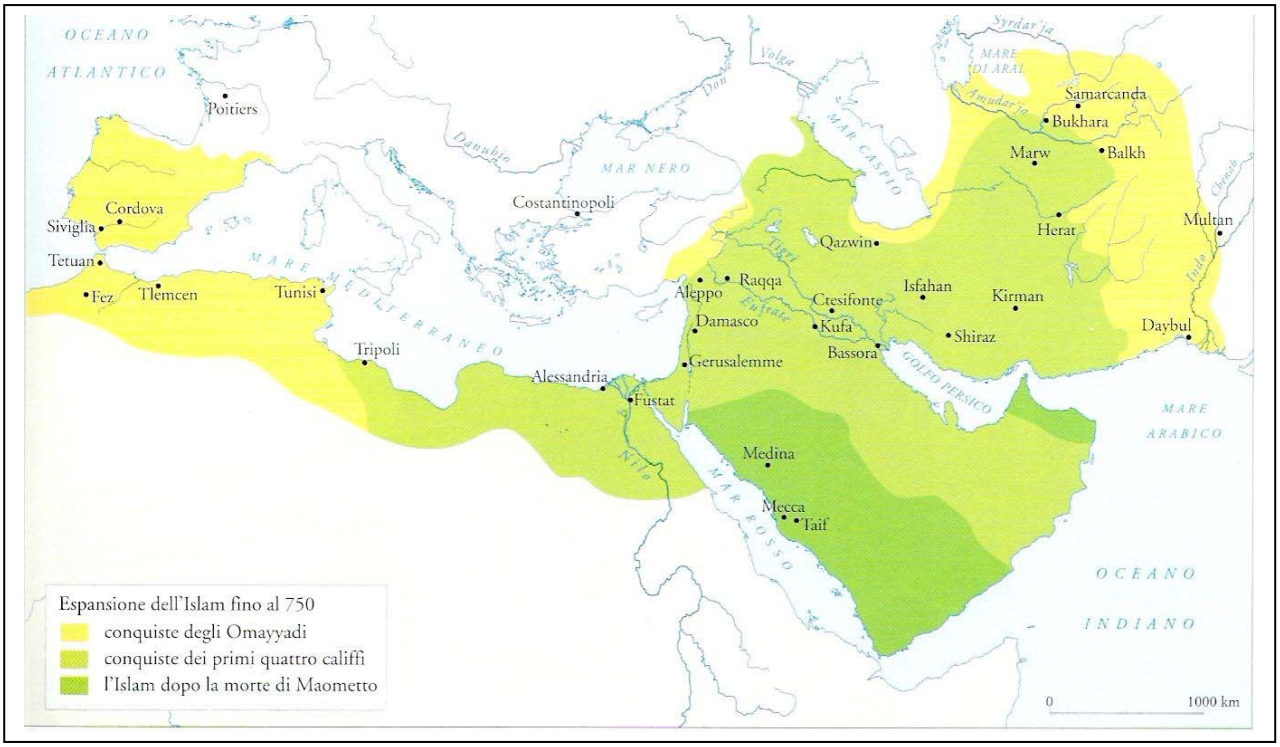
Dopo 128 anni, nel 750 d.C., la fine della supremazìa della casata degli Omayyadi consegnò, alla nascente dinastìa degli Abbàsidi, un impero che si estendeva dalle rive del fiume Indo al mare d'Aral, a tutta l'Africa affacciata al Mediterraneo, sino all'intera penìsola ibérica.

Centoventotto anni: mai e mai più un tale sterminato dominio si compì in così breve tempo.

Nel costruìre, la velocità difficilmente si accompagna alla solidità; questa affermazione, certo troppo drastica nel sintetizzare crescita e disfacimento del grande impero islamico, è efficace banalizzazione della predestinazione del dominio temporale dell'Islam.

Mentre la religione rivelata e scritta nel Corano conquistò centinaja di milioni di persone, in tutto il mondo, la questione della successione a Maometto fu sùbito causa o pretesto per liti, dissidi, guerre ed addirittura scismi nella stessa dottrina corànica, già all'época dei primi quattro successori (poi chiamàti '*i ben guidàti*'), che potevano vantare d'aver vissuto e condiviso sin dall'inizio l'esperienza con il Profeta: i *Califfi*, términe che deriva dal titolo di *Khalifat Rasùl Allàh* (successore dell'inviato di Dio), che prese il primo di essi, Abu Bakr.

Così è che il grande impero, appena giunto alla sua massima espansione, iniziò a spezzarsi in regni, più o meno indipendenti, ma caratterizzati comunque dalla stessa religione, sebbene a volte con qualche variazione.



La capitale si spostò da Medina a Damasco ed infine a Baghdàd, fondata *ex novo* con il nome di *Madīnat as-Salām* (città della pace), per volontà del califfo abbaside al-Manşūr, nel 762, segno dello spostamento degli interessi dell'impero islamico verso la Persia, Bisanzio e l'Asia centrale (ancòr oggi non è certo perché e quando la città cambiò l'originale nome in Baghdad, parola dall'etimologìa incerta, forse derivante da un término siriano – cioè neo-aramàico – che significa 'città di Dio').

Il popolo islàmico costituiva una nuova identità religiosa alla quale però mancava della necessaria dote culturale che ne facesse una società distinguibile ed organizzabile: una nazione. I califfi, con lo stesso impegno con il quale ampliarono l'impero, perseguirono la conquista delle esistenti culture e, in questo, anche la crescita di una cultura islàmica originale.

La cultura greca fu la prima ad essere assorbita, attraverso due principali punti di contatto.

Il primo, più evidente, fu la conquista di Alessandria d'Egitto, nel 642, dove erano ancòra esistenti molti lavori dei filosofi e scienziati greci ed anche sinossi delle principali òpere di Ippocrate di Coo e di Galeno, testi di Medicìna che costituirono il riferimento culturale di questa scienza ancòra per mille anni.

L'arrivo dell'Islam comportò una rapida traduzione in àrabo di gran parte di ciò che ancòra esisteva nella capitale della cultura greco-romana. L'Alessandria del VII sécolo mostrava infatti i segni di una decadenza iniziata nel III sécolo, alle prime avvisaglie della crisi dell'impero romano, quando iniziarono conflitti tra romani cristiani e locali popolazioni pagane.. Nel IV sécolo alcune biblioteche erano state depredate se non addirittura distrutte come il *Caesareum* ed il *Serapeum* e molti filosofi e scienziati furono costretti ad abbandonare la città. Alessandria, quindi, costituì una fonte di documenti, un forziere di preziosi testi ed òpere ma già in parte depredato e disorganizzato. L'accesso si produsse nella traslazione in àrabo di testi dei quali pochi facevano uso in quel tempo; era quasi un archivio storico più che 'corrente'.

Nella parte 'persiana' dell'impero islàmico la situazione era invece ben più prolìfica di informazioni, stìmoli ed anche di riferimenti di persone ed organizzazioni, grazie ai riflessi dell'intransigente ortodossìa cristiana alla quale era votato l'Impero Romano d'Oriente.

Nel IV sécolo gli imperatori di Bisanzio avevano, infatti, dato un 'giro di vite' alla tolleranza religiosa e culturale, perseguitando gli aderenti a gruppi religiosi che si distaccavano apertamente ai dogmi della fede cristiana ufficiale. Nel 451 i seguaci della dottrina di Nestorio furono cacciati dalla città di Edessa e nel 489 questa confessione fu bandìta dall'impero. Una variante del monofisitismo, i giacobìti monofisiti, furono scacciati nel VI sécolo; subìrono la stessa sorte nello stesso periodo gli appartenenti all'Accademia Platonica di Atene, chiusa per ordine dell'imperatore Giustiniano nel 529.

Tutti costoro trovarono rifugio e tolleranza in Persia, dove già erano emigrati Ebrei bizantini, e lì fondarono centri religiosi, scuole, accademie e si applicarono nella traduzione dei testi greci nella lingua siriana, una sorta di neo aramàico (la lingua della Palestina al tempo di Cristo).

Dalla Persia, i mònaci nestoriani si diffusero, attraverso l'Asia, giungendo sino in Cina.

Sotto il re Persiano Cosroe I Anosharwan, che regnò sulla Persia dal 531 al 579, questi cervelli, fuggiti dall'oppressione bizantina, furono in tutto aiutati a ricostruìre le proprie attività scientifiche nella nuova terra.

Conquistata la Persia, la cultura della Grecia antica giunse così all'Islam attraverso filosofi greci, ebrei e cristiani perseguitàti, che ne avevano tradotto il sapere dal greco al siriano.

Sotto il regno Abbaside iniziò la traduzione di questi lavori nella lingua àraba. Man mano che si diffondeva la conoscenza di queste òpere, l'interesse per la cultura greca aumentava ed il califfo al-Ma'mūn (r. 813-833), del quale abbiamo ricordato il sogno profetico, durante le molte guerre contro i Bizantini in Asia Minore si preoccupò di far bottino di tutti i testi che venissero trovati nelle città che occupava. Forse il sogno che volle celebrare fu uno degli stratagemmi di al-Ma'mūn per dare maggior crédito, presso il popolo, alla scuola di traduttori che fondò a Baghdàd, a metà del IX sécolo, alla quale affiancò la *Bayt al-Hykma*, la 'Casa della Sapienza', vera e propria Accadémia delle Scienze dove fiorirà il meglio delle ricerche e degli studi scientifici del mondo islàmico sino all'XI sécolo.

La Baghdad del IX sécolo era quindi una città cosmopolìta, centro del potere religioso, politico e culturale dell'intero Islam.

Nel X sécolo l'impero islàmico disponeva di un repertorio quasi completo, in lingua àraba, della letteratura scientifica e filosofica greca allora ancora esistente ed inoltre, a differenza del mondo medioevale europeo e dell'impero bizantino, aveva acquisìto gli elementi della cultura di un altro paese già assai evoluto: l'India.

Ciò che giunse dalle fonti indiane passò, in gran parte, sotto le porte di Baghdad seguendo la 'via della Medicina' che portava, dall'India, a Jundishapur, dove era forte il richiamo del suo rinomàto ospedale con l'annessa Accadémia di Medicina, fondati, assieme a quella città, dal re persiano Šāpūr I, che regnò tra il 240 e il 273 d.C..

Il già ricordato re Persiano Cosroe I Anosharwan diede rinnovàto impulso e vigore a questo centro di ricerche e di attività médiche, che divenne rinomàto riferimento sino almeno al IX sécolo; all'arrivo degli Arabi, in esso già lavoravano, fianco a fianco, médici in gran parte Ebrei, Cristiani ed Indiani.

Médici e studiosi indiani mescolarono così idee e sapere con Persiani, Ebrei, Cristiani, Arabi; molti i campi: Astronomìa, Medicina, Matemàtica, Ottica, Topografìa . . .

Curiosamente non sono numerose le òpere che possano essere consideràte diretta traduzione in àrabo di scritti indiani. La più conosciuta, tra queste, è '*Ziğal-Sind-hind*' (Tavole astronòmiche indiane), che, secondo lo storico al-Bīrūnī, corrisponde al *Brahmamasphuṭasiddhānta* dello scienziato indiano Brahmagupta (VII sécolo); questo testo, sòrta di manuale

matemàtico/astronòmico, comparve e fu oggetto di grande attenzione alla corte del primo califfo abbaside, al-Mansūr, che regnò tra il 754 ed il 775.

Del contributo indiano alla cultura àraba méritano un posto di assoluto riguardo tre elementi fondamentali per lo sviluppo della Matemàtica moderna: i numeri 'arabi', la numerazione posizionale decimale, il numero o, meglio, il concetto di 'zero'.

L'aritmética indiana era già nota e molto apprezzata in Persia; il vescovo cristiano-sirìaco Severo Sebokht scriveva, nel 662, che ". . . *i loro programmi di calcolo superano tutto ciò che si può immaginare* . . . " sottolineando che " . . . *questi calcoli si fanno con nove segni* . . .".

I numeri arabi, chiamàti oggi così in tutto il mondo, non sono per nulla 'arabi' ma indiani. I matemàtici del primo Islam li hanno semplicemente copiati e diffusi, cogliendone la maggior potenzialità e razionalità espressiva.

È quantunque assai singolare che l'ingiusta paternità attribuìta a questa numerazione, nata in realtà in India, non sìa neppure giustificata dall'uso che di essa ne fecero gli scienziati arabi, che infatti continuarono a preferìre la numerazione, questa sì àraba, costituìta da lettere, la cosiddetta *abǧad*, accostate, di volta in volta, in òrdini prestabilìti come avveniva, più o meno, tra i Greci ed i Romani. I numeri, che noi oggi chiamiamo arabi, erano dagli scienziati Arabi utlizzati perloppiù in Astronomìa, quando i calcoli astronomici producevano numeri grandissimi.

L'Aritmética indiana si diffuse pertanto non nell'ambiente scientifico ma nella pubblica amministrazione dell'impero durante la dinastìa degli Abbasidi, soprattutto a partire dall'XI sécolo.

La necessità di organizzare, ad ogni livello, una burocrazìa efficiente ed efficace, soprattutto nel controllo dei redditi, nel pagamento delle imposte, nella gestione dei dazi e delle dogane, nell'amministrazione dell'esercito - strumento essenziale nel sempre turbolento califfato, esigeva metodi di calcolo ràpidi e semplici, affinchè il crescente numero dei funzionari pubblici potesse dotarsene con adeguata padronanza.

Nell'organizzazione dell'apparato statale, inevitàbile fu il favore riservato all'Aritmética indiana; così ne scrisse il matemàtico al-Uqlīdisī:

"*La maggior parte degli esperti di aritmética trae vantaggio a servirsene nella sua pratica: per quanto essa ha di facile e di rapido, per il poco che bisogna ricordare, per la brevità del tempo impiegato a dare risposte, per quel poco di riflessione su ciò di cui essa si occupa, che essi si trovano necessariamente a disposizione . . . Diciamo dunque che si tratta di una scienza e di una pratica che richiedono uno strumento, come lo richiedono lo scrivàno, il fabricante, il cavaliere nella loro pratica; perché se manca al fabbricante, o gli risulta difficle trovare ciò per cui esercita il proprio lavoro, non potrà ottenere ciò che gli serve, e capire ciò che non è difficile, né impossibile, e non c'è bisogno di preparazione*."

Semplicità ed immediatezza in ogni còmputo, assai ùtili per qualsiasi governo la cui prima preoccupazione è sempre costituìta da tasse e pubblici stipendi: nell'Islam, le prime a carico dei cittadini non islàmici, chiamàti ad assicurare il reddito dei soldati di Allāh.

Mentre il calcolo àrabo restava la forma dell'Aritmética dotta degli scienziati e delle Accadémie, il sistema decimale indiano si diffuse in ogni angolo dell'impero, con grande rapidità. La nuova Aritmética indiana giunse ovunque, al fianco della travolgente cavalleria àraba, per depositarsi stabilmente in ogni àngolo dell'impero dell'Islam, come la polvere sollevata dalle sue armate.

Divenne così, per tutti, una Matemàtica àraba fatta di numeri arabi.

Il concetto di zero, cioè l'espressione del nulla, appare indubbiamente difficile da cogliere come esprimibile; il nulla, come il vuoto aristotélico, se non esiste come può essere rappresentato?

Muhammad ibn Mūsā al-Hwārizmī, considerato il fondatore dell'Álgebra, nel IX sécolo scrisse, a propòsito della numerazione indiana: " . . . *come fanno i calcolatori indiani . . . si scrive con nove di queste cifre . . mettendo il segno zero nelle caselle vuote . . . in modo da tener conto*

àraba letterale (*abǧad*)	ا	ب	ج	د	ه	و	ز	ح	ط	
indo-àraba X séc.	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	٠
européa XIV sec.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

soltanto della posizione . . ". Lo zero, quindi, non immagine del nulla ma 'posizionatore', ìndice d'ordine nella numerazione: un concetto certo meno astruso ed estràneo a qualsìasi polémica!

La Matemàtica, oggetto di tale passione tra gli Arabi da essere motivo di sfide alla risoluzione di problemi sempre più complessi, ottenne numerosi e fondamentali contributi:

- il càlcolo combinatorio;
- il càlcolo con le frazioni;
- il càlcolo infinitesimale, al quale dedicheremo l'intero Capitolo 11;
- la tecnica bancaria;
- la Trigonometrìa, acquisìta anch'essa dall'India;
- la geometrìa ed il calcolo delle aree nelle figure piane e solide;
- la geometrìa analitica e la teorìa delle curve;
- la Topografìa;
- l'Ottica;
- l'Astronomìa;
- la Dinàmica;
- l'Álgebra.

Muhammad ibn Mūsā al-Hwārizmī, matemàtico sotto il regno del califfo al-Ma'mūn (r. 813 - 833) e membro illustre della Casa della Sapienza di Baghdad, scrisse il trattato *Kitāb al-Ǧabr wa-'l-muqābala* ('*Libro dell'Algebra*'), considerato il primo testo che fonda questa nuova disciplina matemàtica.

Quasi la metà del '*Libro dell'Álgebra*' si occupa dell'applicazione delle complesse régole, stabilìte nel Coràno, in materia di successione e di eredità; la complessità era tale da richiedere, perché fossero applicàte con precisione, la formulazione di càlcoli, che oggi identifichiamo senz'altro come àlgebrici. Del problema, evidentemente molto sentìto a quei tempi, ne aveva proposto una soluzione il libro '*Hisāb al-waşāya*' (che signìfica: '*Càlcolo dei testamenti*'), di Muhammad ibn Hasan al-Šaybāni (749 – 803). Da questa particolare applicazione algébrica prenderà spunto la disciplina detta *Hisāb al-farā'id*, ovvero: Càlcolo delle obbligazioni, forse il primo testo di tecnica finanziaria.

"*Al-ǧabr*" signìfica: '*ciò che unisce*'; parola àraba che poi diverrà, per il mondo intero, '*Álgebra*'.

Nel términe '*algoritmo*' ancòr oggi ricordiamo il nome del padre dell'Álgebra, al-Hwārizmī, che, nelle prime traduzioni 'europee' dei suoi lavori, fu indicato con il nome 'latinizzato' di *Algoritmus*.

Mentre l'Aritmetica tratta delle operazioni con i soli numeri, l'Algebra esplode nelle infinite possibilità e combinazioni di qualsiasi espressione matematica sostituendo ai numeri lettere, ciascuna delle quali, a sua volta, può rappresentare incognite, numeri o altre espressioni matematiche.

L'Álgebra, quindi, nasce e si sviluppa come nuova disciplina, separata e distinta dall'Aritmetica, ma fortemente connessa alle altre discipline scientifiche. Fomulare e risolvere qualsiasi fòrmula matematica, contenente sìa numeri che parametri, permette di applicare la matematica in molti orizzonti della ricerca, di associare espressioni matematiche a fenòmeni fisici (posizione, velocità, accelerazione, forza, . . .), di dare espressione allo spazio a due, a tre ed a . . . n dimensioni, di concepire e risolvere equazioni di qualsiasi grado, ...

L'Álgebra di al-Hwārizmī, tra le tante innovazioni, introduce l'uso sistemàtico degli algoritmi: schematizzazione di procedure e strutture matemàtiche che portano a soluzione intere classi di problemi algébrici. Una volta teorizzato sulle equazioni di primo e di secondo grado, enunciandone tutti gli innumerevoli casi, al-Hwārizmī, nel suo trattato, ne definisce gli algoritmi che, in un numero prefissato di passaggi, porta alla loro risoluzione. L'algoritmo diventa così la chiave, fatta di schemi fissi e di régole, per la soluzione di classi di problemi che si estenderanno agli infiniti campi della matemàtica, sino all'informatica dei giorni nostri

Non è questo il luogo né l'occasione per procedere nel racconto di quanto la civiltà àraba contribuì allo sviluppo scientifico: è ora di occuparsi della sola Idraulica.

Ğābir ibn Hayyān, scienziato vissuto tra l'VIII ed il IX sécolo d.C., scrisse il trattato *Kitāb Wazn al-tāğ* (Libro del peso della corona), traduzione del testo con il quale Archiméde dimostrava il método da lui utilizzato per risolvere il problema di definìre se la corona del tiranno Geròne fosse di oro puro, come abbiamo riferìto nel Capitolo 2.

L'Idrostàtica attirò particolarmente l'attenzione tra gli studiosi arabi proprio nella definizione della densità specifica di metalli e di pietre preziose.

Della versione àraba del trattato di Archiméde '*Sui corpi galleggianti*' sono oggi esistenti soltanto alcuni frammenti che contengono, a differenza della versione a noi giunta per via 'greco-latina', la definizione di peso specifico ed anche una miglior definizione della pressione idrostatica: modifiche che possono essere state introdotte dagli stessi traduttori arabi che, per quanto specialisti, erano spesso – è bene ricordarlo - anche scienziati della stessa materia.

Nell'òpera enciclopédica *Kitāb Mīzān al-hikma* ('*Libro della bilancia della saggezza*'), scritto nel 1121 da 'Abd al-Rahmān al-Hāzinī, il capitolo dedicato all'Idrostatica enuncia i princìpi di Archiméde aggiungendo osservazioni al moto dei corpi in un mezzo diverso dall'aria:

"*Se un corpo pesante si sposta in un liquido, il suo peso decresce di una quantità che dipende dal volume, per cui nel liquido diventa più leggero di una quantità pari al peso del volume del liquido spostato . . . Se le forme sono diverse le forze che muovono i due corpi sono diverse*."

Al-Hāzinī quindi distingue due forze che agiscono in un corpo che si muova in un fluido: una è determinata dal peso e dalla forma del corpo; l'altra è la spinta di Archiméde, diretta verso l'alto, determinata dal volume del corpo nella parte immersa.

Le osservazioni di al-Hāzinī sul fenomeno del galleggiamento lo condussero a studiare il caso di un corpo internamente vuoto che rechi, nella cavità ed in molteplici conbinazioni di forme, distribuzione e peso, altri corpi pesanti: è, quindi, lo studio del comportamento delle imbarcazioni che trasportano càrichi, prima codificazione di teorìa navale.

L'osservazione del moto dei corpi galleggianti recanti pesi al proprio interno, curiosamente, non trova però, nei testi arabi, alcuna diretta applicazione alla tecnica di costruzione delle imbarcazioni con le quali gli arabi solcavano il Mediterraneo e soprattutto il più difficle oceàno Indiano, caratterizzato dagli stagionali ed intensi monsoni. Sappiamo però che disponevano

di navi assai snelle, dalla lunga prora sottile e dal quadrato di poppa rialzato, dotate di vela 'àraba' ad antenna, in grado di spingere la nave 'di bolina' cioè contro vento. Curiosamente le ùniche illustrazioni in grado di darci un'idea del naviglio àrabo si trovano in alcune rappresentazioni protoghesi del XVI sécolo.

Esaminando il comportamento dei corpi galleggianti immersi in fluidi differenti, al-Hāzinī per la prima volta, nel suo '*Libro della bilancia della saggezza'*, rende la corretta definizione di 'peso specifico', rapporto costante, per una stessa materia, tra peso e volume:

"*Il peso di un corpo relativamente piccolo, di qualunque sostanza esso sìa, ha con il volume del corpo lo stesso rapporto di un corpo più grande, della stessa sostanza, con il proprio volume*."

Per il popolo àrabo, originàtosi nel deserto, il rapporto con l'acqua è caratterizzato dall'essenziale necessità di poterne disporre per vivere, nonostante le avversità dei luoghi.

Quanto si sviluppò, nell'Islam, che possa essere ricondotto all'Idraulica ha poco di teòrico, a dispetto dell'incredibile sviluppo delle scienze matemàtiche, ma si concretizza soprattutto nelle òpere, a volta in tutto caratteristiche di quei soli territorî, che furono realizzate per disporre della indispensabile acqua, preziosa ma spesso scarsissima.

L'approvvigionamento per l'uso umano e per l'irrigazione è stato il problema dominante nella cultura idraulica àraba, e le soluzioni adottate non mancano di originalità.

Nel Capitolo 3 abbiamo parlato delle *qanāt* e delle macchine semplici per il sollevamento delle acque: il *šādūf*, la *sāqiya*, la noria; anche se a noi note con il término àrabo ed ancòr oggi diffuse proprio nei territori un tempo costituenti l'impero dell'Islam, non è a quest'ultimo che possano essere attribuìte, perché di origine ben più antica.

È nel campo degli sbarramenti, che gli arabi, ormai islàmici, raggiunsero tecniche eccellenti. Lo sbarramento delle valli *wadi* nel deserto, tecnica già nota da millenni, si diffuse sino ad applicarsi anche nell'àlveo di fiumi perenni, come avvenne in Persia e nella penisola iberica. Tanti gli esempi.

Il califfo, della famiglia dei Buwayhidi, 'Adud al-Dawla, che regnò a Baghdad intorno al 960, fece costruìre una grande diga, chiamata Band-i Amīr, sul fiume Kurr, nella provincia di Fars, nell'attuale Iran. Di questa struttura, ancòra esistente, scrisse il geografo al-Muqaddasī:

"'*Adud al-Dawla ha chiuso il fiume tra Shiraz e Istahkr con un grande muro, rinforzato con il piombo. E l'acqua dietro al muro è aumentata di livello fino a formare un lago. Su di esso, su entrambi i lati, vi sono dieci ruote idrauliche, come quelle che avevamo visto nel Khuzistan, e sotto ogni ruota un mulino, e questa è oggi una delle maggiori meraviglie di Fars.* ['Adud al-Dawla] *poi ha costruito una città. L'acqua scorre nei canali ed irriga trecenti villaggi*."

In Spagna esistono tuttora, e perfettamente funzionanti, molti sbarramenti fluviali, costruìti intono al X sécolo, quando in quel territorio dominava la famiglia omayyade.

Sul fiume Turia, che giunge al mare nella città di Valencia, sono numerosi gli *azud*, così erano chiamate quelle piccole dighe che costringono l'acqua ad innalzare il proprio livello per essere poi convogliata in canali, in questo caso destinati all'irrigazione, dotati degli stessi dispositivi di regolazione in uso oggi: chiuse d'ingresso, scaricatori di piena, dissabbiatori, ecc. . . .

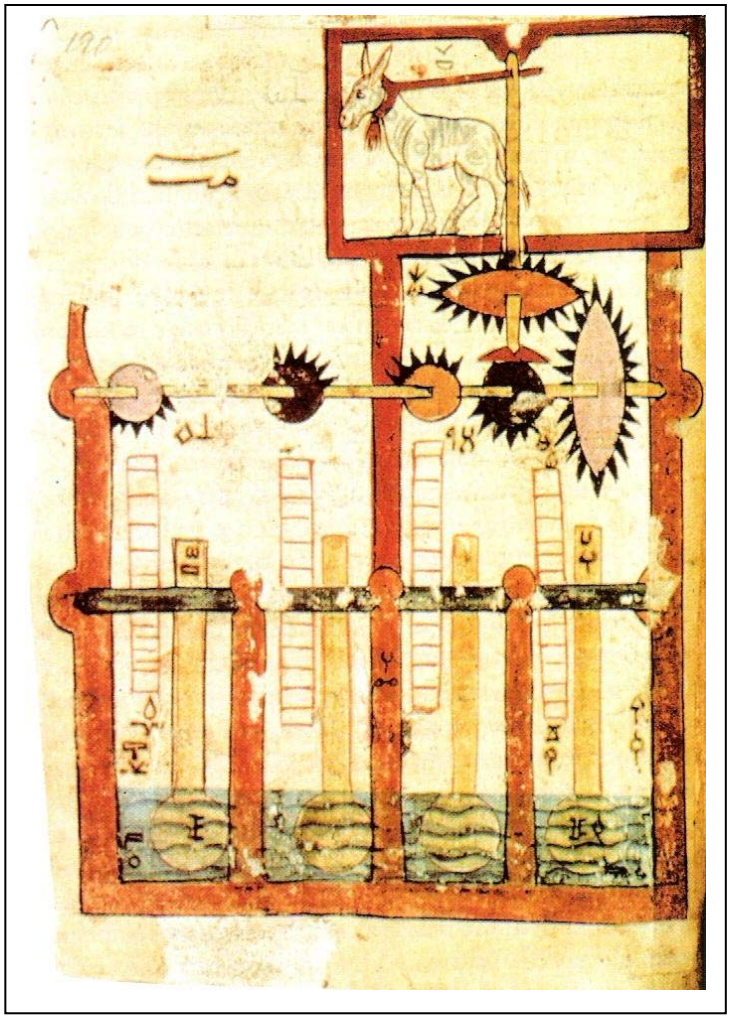
Alcune dighe arabe dimostrano la tecnica raggiunta per ovviare al problema dell'erosione che l'acqua produce quando le scavalca, tracimando, durante le piene: al piede esterno della struttura, cioè verso valle nell'àlveo del fiume, realizzarono delle vasche di smorzamento dell'energìa cinética acquistata dalle acque in caduta dal coronamento della diga, con criteri in tutto simili a quanto ancòr oggi si realizza.

Alle dighe, nuove o ricostruite, si affiancarono nuove o ricostruìte reti di irrigazione e di approvvigionamento di acqua per le grandi città dell'impero. Grande impulso fu dato all'irrigazione della Mesopotamia, riprendendo le antiche canalizzazioni, alcune ancòra risalenti all'era sumèrica, ampliandole o realizzando nuovi tracciati. Al tempo della dinastìa degli Abbasidi, a partire dall'VIII sécolo, si dovette far fronte all'esigenza di garantire acqua e cibo a grandi città, tra le quali Baghdad, che già contava quasi un milione e mezzo di abitanti. Fu esteso il canale, ad est del fiume Tigri, che gli arabi chiamavano Nahrawān, probabilmente l'antico sumérico canale di Assur, e con esso tutta la rete di irrigazione tra il Tigri e l'Eufrate.

Assieme alla fondazione di Bassora, il secondo dei primi quattro *Califfi ben guidàti*, Omar (r. 634 - 644), fece scavare due grandi canali che collegavano la città al fiume Tigri: al-Ubulla e Ma'qil; fonte di acqua potabile per la città e motivo di floridezza agricola della circostante vasta pianura.

Ai lavori di canalizzazione contribuì notevolmente il livello raggiunto dagli Árabi in Topografìa, la scienza della misura del territorio, e la Geometrìa. Modificando il modello dell'astrolabio, strumento utilizzato in astronomìa, si realizzò uno strumento che consentiva di tracciare allineamenti, misurare angoli e distanze e, per quanto qui interessa, impostare dislivelli e pendenze nelle costruzioni, elemento fondamentale nella realizzazione dei canali. Applicando questa capacità agrimesoria, furono anche scritti testi e manuali sulla costruzione delle grandi òpere idrauliche di canalizzazione e distribuzione delle acque che giungevano sino ad indicare il numero e la dislocazione più opportuni per gli scavatori (in àrabo '*pale*') per rendere ottimale il rendimento di ciascun addetto allo scavo, cioè ciascun '*pala*', nelle fasi di scavo e trasporto del materiale escavato.

Il progresso della cultura dell'impero islàmico in Idraulica si configurò, in gran parte, come approfondimento di quanto tratto dalla conoscenza greca, che portò comunque a realizzazioni, come abiamo visto, degne di nota.



Pochi furono i contributi originali e, tra questi, purtroppo sono giunti sino a noi soltanto due dei venti trattati, in Idraulica e della tecnologìa ad essa applicata, realizzati sotto la guida dei tre fratelli Banū Mūsā: Muhammad, Ahmad e al-Hasan.

Scienziati, ingegneri e matemàtici, i Banū Mūsā iniziarono la propri attività a Baghdad alla Casa della Sapienza, sotto il regno del già ricordato ed illuminato califfo al-Ma'mūn. In uno dei due volumi sopravvissuti, *Kitāb al-Hiyal*, scritto intorno all'850, si trova la descrizione costruttiva e di funzionamento di centinaia di dispositivi che sfruttavano i princìpi di Idraulica e di Pneumatica, senza però che questi venissero in qualche modo enunciati. Recipienti 'truccati per effetti speciali', lampade ad olio ad alimentazione regolabile, maschere antigas da utilizzare nei pozzi con presenza di gas, bracci e gru a funzionamento idraulico, dispositivi con valvole coniche autoregolanti.

Anche se di questi trattati ne

conosciamo soltanto due dei venti realizzati, sappiamo che quanto prodotto dai fratelli Muhammad, Ahmad e al-Hasan Banū Mūsā era tenuto in grande considerazione nell'Islam: frequenti sono le citazioni, in molti testi. Paradossalmente il loro lavoro non trovò alcun successore che continuasse sulla via tracciata, probabilmente per la necessità di un più evoluto livello nella tecnologìa costruttiva degli stessi dispositivi che non giunse se non dopo circa ottocento anni, in Europa.

Citiamo, ultimo in òrdine di tempo, Ismā'īl ibn al-Razzā al-Ǧazarī, che nel 1206 compose un'òpera enciclopèdica sulla macchine note all'Islam.

Il trattato, voluto dall'autore con l'espressa volontà di lasciare ai pòsteri un'organizzata documentazione dei '*fragili congegni*' esistenti all'epoca, è composto di cinquanta capitoli, che riportano istruzioni tanto dettagliate da mettere in condizione, chiunque avesse avuto accesso all'òpera, di poter ricostruìre le macchine descritte; un dettaglio, quindi, che permette anche di capìre cultura e capacità tecnologica di quel popolo in quel tempo.

Oltre alla presentazione di numerosi, ingegnosi e precisi orologi ad acqua, nel trattato troviamo la descrizione della prima pompa aspirante e premente mossa dall'energìa idraulica. Due pistoni che scorrono in cilindri a tenuta stagna, contrapposti, collegati ad una biella a sua volta collegata ad un perno fissato in un punto della circonferenza di una ruota dentata orizzontale; quest'ultima mossa, attraverso ingranaggi, da una ruota idraulica mossa dall'acqua. Valvole a cerniera poste nei cilindri consentivano all'acqua di entrare in essi, nella fase di aspirazione, e di uscire, con la pressione esercitata dal pistone, durante la fase di compressione. Il fatto che i due cilindri fossero contrapposti ed i pistoni azionati dalla stessa biella, comportava che la fase di compressione di uno coincidesse con la fase di aspirazione dell'altro, con un'evidente vantaggio per la continuità del flusso, che poteva raggiungere l'altezza di quattordici metri.

Abbiamo già detto che l'impero islàmico cedette ben presto a tensioni interne che ne frantumarono l'unità in regni, emirati, califfati, sempre più indipendenti dal potere centrale di Baghdad. Ciò non toglie però che l'unità culturale del popolo àrabo si mantenne a lungo, dimostrandosi più solida dell'organizzazione politica, forse perché basata sulla grande disponibilità di testi e documenti e scuole di pensiero e di istruzione, prodotto dell'attività, quasi frenètica, dei califfi dei primi sécoli delle grandi conquiste.

La Spagna e la Sicilia erano, nel XII sécolo, porte di diretto collegamento ormai aperte tra l'Islam e l'Europa, dove si stavano già delineando, se non consolidando, i nuovi Stati ed era in fase di completamento la ricostruzione di un tessuto sociale organizzato.

Proprio in questo periodo si compì il processo di traslazione delle conoscenze più evolute del tempo secondo una direzione che, sei sècoli prima, aveva proceduto in senso inverso: la cultura dell'Islam, *summa* ed evoluzione della cultura greca-persiana-indiana e forse anche un po' cinese, tornava a rinnovare la conoscenza dell'Europa ancòra attraverso l'òpera di grandi traduttori, in Italia meridionale ed in Spagna; in quest'ultima regione operò colui che è considerato il più importante traduttore dall'àrabo al latino: Gerardo da Cremona.

Gerardo (o Gherardo) da Cremona (Cremona 1114 – Toledo 1187), uomo di chiesa, studioso di letteratura, si trasferì a Toledo, in Spagna, verso il 1144, dove, canònico della cattedrale, iniziò l'attività di traduzione in latino di testi arabi. Ben presto diventò, come è oggi ancòra considerato, il maggiore traduttore latino di testi arabi del XII sécolo, dal quale è iniziato il primo significativo processo di rinnovamento culturale nell'Occidente.

La città di Toledo, riconquistata dai Cristiani nel 1085 per òpera di Alfonso VI di Castiglia, con le sue numerose biblioteche arabe e le scuole di Astronomìa, era per Gerardo una vera miniera di manoscritti, la cui lettura era confortata dalla presenza di sapienti provenienti da differenti culture e civiltà.

Molto apprezzata fu, ed è, la sua fedeltà letteraria che lascia trasparìre non solo il significato più corretto di ogni espressione, ma anche l'appassionato interesse che lo scrittore originale aveva trasfuso nel testo àrabo.

Assai vasta fu la produzione di Gerardo da Cremona; gli si attribuisce la traduzione dall'Árabo al Latino di oltre ottanta òpere, dedicate ai campi più diversi: Matemàtica, Astronomìa, Ottica, Medicina, Chimica (Alchimìa), Filosofìa, ...

Eccone un elenco, certo non esaustivo, ma emblemàtico di un caso veramente ùnico nella storia della cultura medioevale europea:

- la versione àraba dell'*Almagesto* di Tolomeo, "*Islāh al-Mağistī*", di Ğābir ibn Aflah; la traduzione di questa grande òpera, che influenzò la cosmologìa europea sino al XVII sécolo, era stato lo scopo del viaggio di Gerardo a Toledo nel 1144: la concluse soltanto nel 1175;
- il trattato di Astronomìa "*Ziğ al-Šāh 'ilm al-hay'a*", di Māšā'allāh;
- il trattato di Atronomìa indiana "*Ziğ al-Ğayyān*", di Ibn Mu'ād;
- le tavole astronòmiche dette '*Tavole di Toledo*', di Abū Ishāq al-Zarqālī e altri, che ebbero un'amplissima diffusione in tutto l'Occidente;
- il trattato di Astronomìa "*Kitāb fī ğawāmi 'ilm al-nuğūm* (Compendio della scienza degli astri)", di Ahmad Ibn Muhammad ibn Katir al-Fargāni;
- il trattato in Astronomìa, dal titolo tradotto "*De hiis que indigent antequam legatur Almagesti*" di Tābit ibn Qurra;
- il trattato di Euclìde "*Divisione delle figure*", versione àraba di Tābit ibn Qurra, tradotto ma andato perduto;
- il testo di Filosofìa "*Enumerazione delle scienze*", di Abū Nasr Muhammad al-Fārābī
- il testo di Geometrìa "*Risāla fi'l-musādara li-Uqlīdis* (Epistola sul celebre postulato di Euclìde [sull'uguaglianza degli àngoli alterni formati da una retta traversale a due rette parallele])", di Abū 'l'-Abbās al-Nayrīzī, nome che Gerardo latinizzò in '*Anaritius*', con il quale il documento si diffuse in tutto l'Occidente;
- il commento al libro X degli '*Elementi*' di Euclìde, di Abū 'l'-Abbās al-Nayrīzī;
- il trattato di geometrìa "*Kitāb Ma'rifat misāhat al-aškāl al-basīta wa-'l-kuriyya* (Libro per conoscere l'area delle figure piane e sferiche)", di Muhammad, Ahmad e al-Hasan Banū Mūsā;
- il testo "*La misura del cerchio*", di Archiméde, documento che suscitò grande interesse tra i maggiori matemàtici del XII sécolo tra i quali Ruggero Bacone;
- il completo trattato '*Elementi*' di Euclìde, riportato con le integrazioni dalle due versioni di Ishāq ibn-Hunaym e di ibn Yūsuf ibn Matar Hağğāğ;
- l'òpera di Geometrìa solida "*Al-Šakl al-qattā*", di Tābit ibn Qurra;
- il trattato "*Maqāla fī 'l-marāyā al-muhriqa bi-'l-qutū* (Trattato sugli specchi ustori parabolici)", di Ibn al-Hayṯam. Con il titolo latino, dato da Gerardo, "*Liber de speculis comburentibus*", questo testo è il documento che introdusse, per la prima volta, la curve còniche nella scienza dell'Occidente;
- il trattato "*Fī ma'rifat quwāt al-adwiya al-murakkaba* (Sulla conoscenza delle facoltà dei farmaci composti)", di Abū Yūsuf Ya'qūb ibn Ishāq al-Kindi;
- il trattato di chimica, nel titolo latino, "*Liber luminis luminum*", di Abū Bakr Muhammad Ibn Zakariyyā al-Razī;
- il trattato di ottica "*Kitāb al-Manāzir*", assai noto nel titolo latino "De aspectibus", di Abū Yūsuf Ya'qūb ibn Ishāq al-Kindi;
- i due componimenti, entrambi dal titolo latino "*De speculis*", uno di Tideo ed uno di origine pseudoeuclidea, contenenti una raccolta di teoremi tratti dall'Ottica e dalla Catottrica di Euclìde e dalla Catottrica di Eròne;
- il trattato di Ottica, nel titolo latino "*De gradibus*", di Ibn al-Hayṯam;
- il trattato di Medicina "*Kitāb al-Tibb al-mansūrī*", di Abū Bakr Muhammad Ibn Zakariyyā al-Razī;
- il testo di medicina "*Liber canonis totius medicinae*", del filosofo e medico persiano Abū 'Alī al-Husain Ibn Sīnā – dai latini chiamato Avicenna;

- il trattato di Medicina "*Cànone*", di Avicenna. La traduzione di Gerardo divenne il manuale di Medicina preferìto nell università del tardo Medio Evo, a causa del suo orientamento filosofico assai affine alle teorìe della Scolastica;
- il trattato di Medicina "*Kitāb al-Tasrīf li-man 'ağiza 'an al-ta'līf*", di Abū 'l-Qāsim al-Zahrāwī;
- il trattato di Medicina "*Kitāb al-Adwiya al-mufrada* (Libro dei medicinali semplici)", di Ibn Wāfid al-Lahmī;
- il commento al "*Ars medica*" di Galeno, scritto da 'Alī ibn Ridwān;
- il compendio di Medicina generale "*al-Kunnās al-sagīr* (La piccola raccolta)", di Yūhannā ibn Sarābiyūn;
- il libro di Medicina "*Kitāb Tasqīm al-'ilal wa-'l-tašğīr* (Libro delle divisioni delle malattie)", di Abū Bakr Muhammad Ibn Zakariyyā al-Razī;
- il libro di Medicina "*Kitāb al-Mudhal ilā sinā' at al-tibb* ((Introduzione alla Medicina), di Abū Bakr Muhammad Ibn Zakariyyā al-Razī;
- il trattato filosofico "*Kitāb al-Istaqisāt* (Degli elementi)", di Ishāq al-Isrā'īlī;
- il trattato di logica "*Analytica posteriora*", di Aristotele;
- le opere di Aristotele "*Fisica*", "*De caelo*" e "*De generatione*";
- i primi tre libri dell'òpera "*Meteorologica*" di Aristotele;
- l'òpera di Geografìa "*De causis proprietatum elementorum*", di autore non noto;
- il trattato filosofico "*Kitāb al-Hudūd wa-'l-rusūm* (Delle definizioni e denominazioni)", di Ishāq al-Isrā'īlī.

Non può stupire l'universale convincimento che l'òpera di Gerardo da Cremona si configuri quale contributo determinante nella diffusione, nella cristiana Europa medioevale, della cultura àraba e di tutti i tesori delle precedenti culture, che assimilò, e dei progressi che essa stessa raggiunse grazie all'impero dell'Islam ed ai suoi illuminàti Califfi.

L'attività di traduzione, a Toledo, seguì un vera e propria azione di programmazione sistemàtica, sicchè ogni traduttore curava di non affrontare testi già tradotti e manteneva, per questo, contatti con gli altri centri di traduzione in Spagna ed in Sicilia.

I testi, una volta tradotti in latino, iniziavano a moltiplicarsi e diffondersi attraverso il lavoro dei copiatori, gli amanuensi, a volte organizzati in congregazioni o inquadrati in òrdini religiosi monàstici. Già nel sècolo XIII i manoscritti 'di Toledo' erano disponibili nei centri culturali di Oxford, Parigi, Montpellier, Bologna . . . .

Si chiude così un 'cerchio': il sapere del tardo ellenismo migrò verso Oriente per incontrare e fondersi, attraverso l'Islam, con la cultura della Persia, dell'India ed anche della Cina.

Gli Árabi poi ne fecero una sìntesi ragionata e da questa svilupparono proprî originali contributi, in moltissimi campi, per poi trasferìre all'Europa questa nuova ed evoluta cultura, ad alimentare le idee che, lentamente ma inesorabilmente, maturarono nuovi orizzonti costruìti nel medioEvo e dispiegati poi nel Rinascimento.

* * *

Cap. 6 - La Meccànica nel Medio Evo

Con la caduta dell'impero romano d'occidente iniziò un periodo di transizione, di circa mille anni, ancòr oggi spesso considerato, lo abbiamo già visto, un intervallo di immobilità quasi completa del progresso delle civiltà d'Europa, se non addirittura di regresso.

Fortunatamente sono sempre più gli storici che non concordano su tale dràstico giudizio, rilevando infatti, nell'approfondire lo studio delle realtà del Medio Evo, un concreto ed a volte assai importante sviluppo di molte scienze e, in generale, della conoscenza.

Questo corretto convincimento, nello spazio di qualche generazione di studenti, ha buone probabilità di divenìre patrimonio culturale delle comunità tutte, a beneficio della verità storica e, speriamo, passo non irrilevante nella universale comprensione recìproca.

Vero è che scomparve, in tempi rapidissimi, il tessuto sociale dell'immenso impero di Roma, le cui dimensioni, potenza, organizzazione, cultura, consentivano di mantenere efficienti opere di grandissimo impegno.

Non si fermò comunque la créscita delle scuole di pensiero, in un certo senso favorìte dall'essere costrette alla speculazione piuttosto che alla realizzazione, ma fu senz'altro di gran difetto l'aggravarsi delle difficoltà di comunicazione, di scambio delle idee e delle esperienze.

Durante la millenaria fase medioevale, il sapere europeo dovette riorganizzarsi e, contestualmente, assimilare e sedimentare i nuovi concetti ed i nuovi métodi, muovendo forse piccoli ma inesoràbili passi nelle scienze speculative, prima di rivolgere le acquisìte nuove potenzialità teòriche alle applicazioni pratiche nelle aperture del Rinascimento..

Per la Storia dell'Idraulica, se qualcosa in questa fase retrocesse fu nel campo della realizzazione delle òpere e nel mantenimento di quelle esistenti, in gran parte destinàte all'abbandono.

Dopo le prime scoperte dei Greci, abbiamo già visto come la ricerca teòrica si fosse già arrestata di fronte alle realizzazioni pratiche, sia per il costante impulso 'del fare' della civiltà romana, senza tregua tesa alla conquista ed alla colonizzazione, sia per la mancanza di adeguàti strumenti matematici e di mètodi sperimentali, i cui primi sviluppi giunsero in Europa, come già abbiamo visto, dalla cultura àraba, a partire dal dodicesimo sécolo.

Così, in questo capitolo, ben poco diciamo 'di Idraulica', perché ad essa nel Medio Evo europeo non giunse alcun significatìvo contributo; non altrettanto si può dire del progresso in quelle scienze, prime fra tutte la Fisica, la Meccanica, supporti indispensabili – al fianco della Matemàtica - per risolvere i problemi di interpretazione dei fenòmeni legàti ai fluidi.

Ecco il motivo dell'argomento di questo capitolo.

Nella storia del mondo occidentale, ovvero di quella parte dell'impero romano detto, appunto, d'Occidente, che si dissolse ben prima di quello d'Oriente, possiamo individuare quattro fenomeni evolutivi di grande significato:

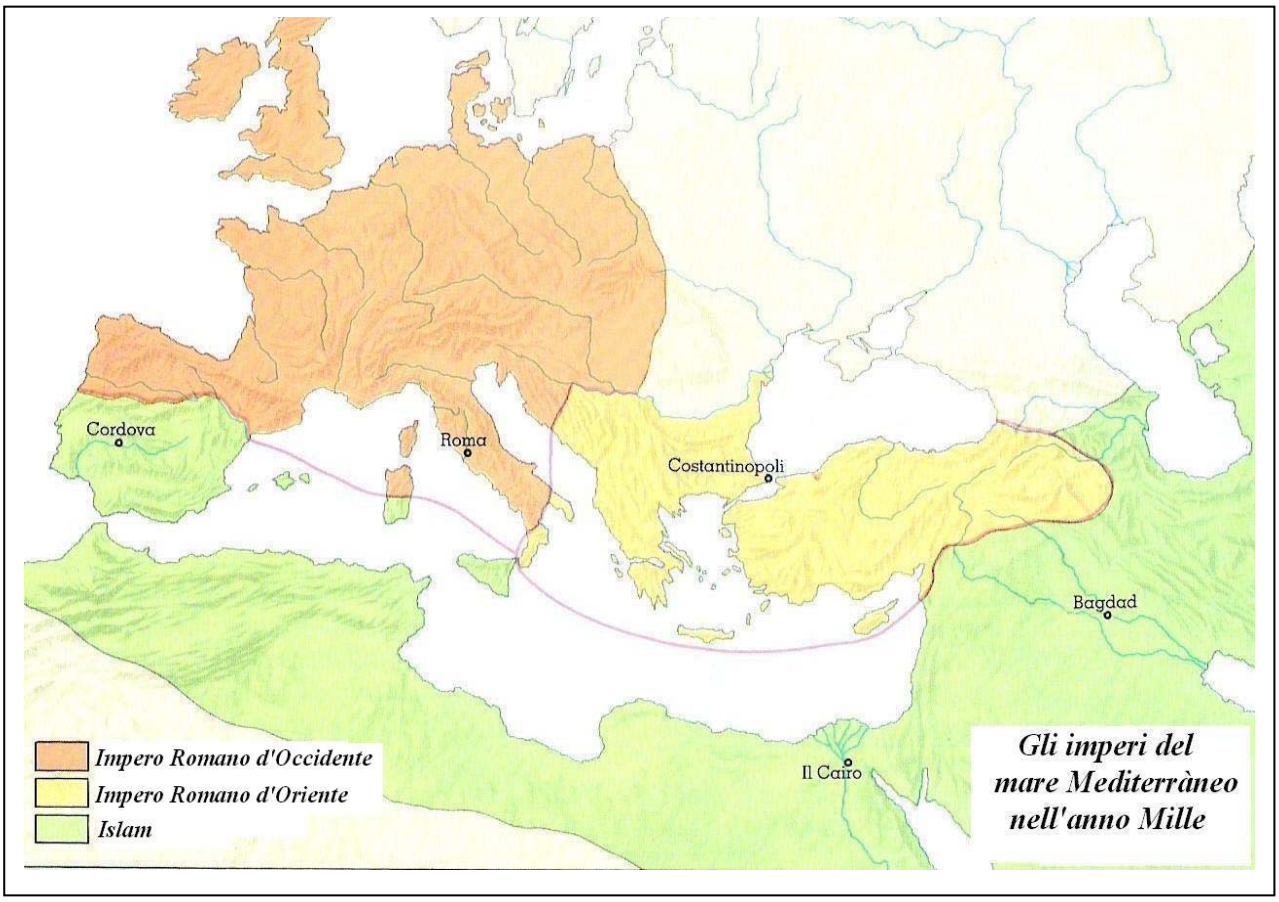
- I : dissòltosi l'unificante controllo dell'impero romano, i popoli, le sìngole comunità gradualmente impararono l'arte dell'autodeterminazione, organizzandosi secondo modelli che esprimevano, seppure in diverse forme, l'originalità di ciascuno;
- II : la Chiesa Cristiana accrebbe, assieme al potere spirituale, il proprio ascendente su popoli e potentàti, sviluppando una capillare organizzazione, di chiese ed òrdini, in tutto l'Occidente. La figura del Papa fu al centro dei maggiori interessi, incarnando quel potere divino invocàto da tutti i regnanti (o aspiranti tali) a suggello indiscutibile di una consacrata investitura;

- **III** : le scuole filosòfiche greche penetrarono nella cultura dell'Occidente attraverso le porte aperte dell'Islam, in Spagna ed in Sicilia, giungendo addirittura ad influenzare l'impostazione intellettuale dei dottori della chiesa romana; le òpere di questi filosofi, sebbene così lontane nel tempo, prima tradotte dall'àrabo in latino e poi trascritte da migliaia di amanuensi, spesso organizzati in istituti religiosi diffusi in tutto il territorio dell'Europa occidentale, portarono l'interesse per la speculazione filosofico/scientifica sotto il sostegno, l'interpretazione ed anche il rìgido controllo della chiesa cristiana;
- **IV** : oltre alla filosofìa greca, trascritta quasi senza interferenze, la cultura àraba fece giungere altri nuovi sviluppi in molte scienze, alcune delle quali già ad un livello notevolmente evolùto, come ad esempio la Matemàtica, nella quale il contributo della scienza indiana donò all'Europa, attraverso l'Islam, i numeri 'arabi'; il sistema decimale; il numero 'zero'. Non solo: i testi àrabi, tradotti in latino, accesero le menti su nuovi orizzonti e nuovi métodi di indàgine, in molte discipline: la natura della materia, l'osservazione e la misurazione dei mòti astronòmici, lo studio dei fenòmeni naturali, la medicìna, i primi métodi sperimentali, . . .

Il crescente distacco tra Impero d'Occidente e d'Oriente derivò anche da alcuni presupposti di natura politica, prima che storica.

Quando l'imperatore romano Costantino divenne cristiano, nel IV secolo, fu inevitàbile la sua ambizione di dominare anche la chiesa, o meglio, di porre un lìmite al crescente suo potere. Questo desiderio, quasi necessità, unìto ad una impostazione comunque ancòra 'pagana' del governo imperiale, giocò un ruolo importante nella decisione di spostare il centro del potere politico a Costantinòpoli, il più possibile lontano da Roma, città che la cristianità 'papale' aveva eletto a centro di riferimento universale.

Fu quindi per una precisa strategìa che Costantino volle, nella nuova capitale, il quinto soglio vescovile - che andava ad aggiungersi ai quattro originarî di Roma, Alessandria, Gerusalemme ed Antiòchia - lontano da Roma e 'a portata di mano' dell'imperatore.



La separazione tra Occidente ed Oriente iniziò così ad avere anche connotàti religiosi, nell'àmbito della stessa cristianità, che, tra l'altro, si dimostrò, sin dalle orìgini, ben più esposta a subìre il moltiplicarsi di diverse confessioni. L'Oriente, quindi, si separava anche nella fede, crescendo in una 'pietrosa' ortodossìa che, come abbiamo visto nel precedente Capitolo 5, sarà orìgine e motivo della conservazione e della diffusione della cultura ellénica.

In occidente, l'influenza del Papa crebbe costantemente e còlse un grande contributo dall'azione di Carlo Magno (? 742 – Aquisgrana 814), P*rinceps Populi Christiani*, che, tra l'altro, contribuì a costituìre il dominio temporale della chiesa di Roma.

Il Sacro Romano Impero, del quale Carlo Magno fu consacrato re, da Papa Leone III, nella cattedrale di S. Pietro in Roma la notte di Natale dell' 800, rese ancòr più grande la distanza da Costantinòpoli, che ora rivendicava, oltre alla maggior ortodossìa alla dottrina di Cristo, l'esclusività nel rappresentare la continuità con l'impero di Roma antica.

Il dominio carolingio non sopravvisse al suo costruttore, ma la chiesa di Roma ne soffrì poco o nulla.

Il papato, infatti, gradualmente crebbe nel potere spirituale e nel controllo dei territorî, ma soprattutto nel mantenersi abilmente equidistante dai diversi regnanti che si alternavano nei molti regni occidentali, annullando definitivamente il perìcolo d'essere assorbito da parte di qualsiasi singolo stato.

L'ormai consolidàto e riconosciuto potere spirituale della chiesa di Roma, spesso non disgiunto da atteggiamenti più inclìni alla gestione politica, richiamò, nel XII sécolo, i popoli d'occidente ad una grandiosa impresa collettiva, nella quale l'unità della fede fece resuscitare, in Europa, una nuova, sebbene provvisoria e strumentale, unità politica e militare: le Crociate.

'*Salviamo i luoghi sacri della Terra Santa*', un grido , tra i tanti, al quale accorsero enormi schiere di soldati ed a volte interi popoli. Non mancarono, in questo, strumentali azioni di propaganda ('il fine sempre giustifica i mezzi?) come, ad esempio, la certezza del paradiso al Crociato che morisse per liberare Gerusalemme. . . . anche in questo la chiesa cristiana ha imparato dall'Islam?

Mentre, ad òpera di traduttori ed amanuensi, il sapere degli Árabi 'conquistava' la cristianità occidentale, con velocità apprezzabile – per quei tempi - ed in modo assai stimolante, le Crociate furono il veicolo cruento di un'altra componente importante nel progresso delle scienze: l'emulazione.

I Crociati, che combatterono e vissero nelle terre dell'Islam, provarono l'esperienza diretta del livello di civiltà del popolo di *Allah*; ne videro e ne apprezzarono le realizzazioni. Chi sopravisse a quell'avventura contribuì al diffondersi, in Occidente, della conoscenza di tante pratiche applicazioni della scienza.

Nell'àmbito delle realizzazioni idrauliche, esempio eclatante fu la reintroduzione e la ràpida diffusione della ruota idraulica per muovere mulini, magli, màntici e folli.

Dalla Persia giunse la versione 'aerea' della ruota ad acqua: il mulino a vento.

La costruzione dei grandi impianti di irrigazione, alimentàti da sbarramenti artificiali posti negli àlvei dei fiumi, fu senz'altro òpera ammiràta ed apprezzàta per il rilevantissimo vantaggio nel garantìre raccolti sicuri ed abbondanti.

All'attività di irrigazione e di sistemazione fondiaria, gli Árabi svilupparono anche l'indispensàbile organizzazione regolamentare.

Nei territorî arabi che si affacciano sul mar Rosso (la terra di *Higiàz*), ancòra prima dell'Islam ed ancòr più nell'Islam, esistevano, infatti, istituzioni di diritto agrario che definivano: la servitù di acquedotto; i tempi ed i modi di diritto dell'acqua per l'irrigazione; la comunione degli utenti di uno stesso corso d'acqua; l'attribuzione delle acque ai terreni di coloro che avevano contribuìto alla realizzazione della rete irrigua; l'attività coatta della bonifica e l'attribuzione dei

terreni bonificàti in proporzione al lavoro compiuto. Sono régole che poi ritroveremo, quale ritenùto bagaglio culturale 'autoctono', nelle grandi òpere irrigue che iniziarono a formarsi, a partire dall'undicesimo sécolo, nel nord della penìsola itàlica.

La chiesa di Roma non riuscì però ad evitare che attorno ad essa i grandi poteri europei ruotassero ed interferissero, prima di tutto a spese di una sempre meno probabile formazione di uno stato forte nella penisola italiana, mentre l'Europa occidentale si divise in stati, grandi o piccoli, aggregatisi in forza di comuni situazioni linguistiche, geografiche, storiche.

L'Italia, certo la più 'sfortunata', rimase per quattordici sècoli suddivisa in piccoli se non piccolissimi principàti e regni, certo anche per effetto della continua tensione che faceva di Roma e del Papa méta ambìta e contesa dai potenti stati europei: il 'controllo' della chiesa romana, in forma più o meno evidente, non poneva ostàcoli al sacro suggello del potere personale di qualunque monarchìa occidentale.

La Svizzera formò, ben presto, una federazione di Cantoni che ha resistito sino ad oggi.

La Francia fu riunita da Carlo Magno intorno al nono secolo, e da allora restò identificata come un'unica nazione.

La Spagna fu interamente conquistata dall'Islam già a metà dell'ottavo sécolo e restituìta ai cristiani divisa in pochi vasti regni (Castiglia, Navarra, Portogallo e Aragona) nel XII sécolo.

La Germania vedeva la sua prima definizione territoriale e culturale nel regno 'dei Franchi orientali', con il trattato di Verdun nell'843.

L'Inghilterra, invasa successivamente da Sassoni, Danesi e Normanni, poté sviluppare, dall'inizio del secondo millennio, un'organizzazione unitaria su tutto il proprio territorio, certo facilitàta dall'essere ìsola.

L'Europa occidentale stava così definendo un nuovo assetto, con nuove aggregazioni di popoli, in qualche modo identificàti in omogeneità di tradizioni, di lingua, di storia e di cultura, mentre l'Impero islàmico, in un lampo, comparve sulla scena producendo grandi sviluppi in molte scienze.

Abbiamo visto, nel Capitolo 5, come l'Islam fu prezioso nel conservare le culture antiche delle quali produsse non solo traduzioni ma anche libri di commento ed integrazioni originàli. Ancòr più appropriàto appare così il términe '*Árabo*' che sta a significare, nell'omònima lingua, '*potere di spiegare chiaramente*'.

La traduzione e la diffusione delle òpere dell'Islam, nella nascente e cristiana Europa 'degli stati', favorì la nuova ascesa della dottrina di Aristòtele, nella quale si intravedevano profili compatibili con il Cristianesimo, ed in particolare d'aristotélica dimostrazione dell'esistenza di Dio.

A questo rilancio dell'aristotelismo nell'àmbito della chiesa contribuì, verso la fine dell' ottavo sècolo, l'azione dello stesso Carlo Magno che, re analfabéta, volle fondata una *Schola* in ogni abbazìa del suo regno e contemporaneamente stabilì che fossero assunte come fondamento dell'educazione dei religiosi quelle che chiamò le sette arti liberali: Grammàtica, Retòrica, Lògica, Aritmética, Musica, Geometrìa ed Astronomìa.

Il diffondersi della cristianità e delle autorità locali ecclesiali produsse, nonostante il frazionamento della geografìa politica, un'unicità spirituale che l'Europa non aveva mai conosciuta prima, neppure al tempo del più splendente impero romano. Un'unità spirituale che riconosceva nel Papa di Roma l'autorità assoluta, suprema, . . . divina.

La penetrazione nell'Europa della dottrina di Aristòtele trovò, quindi, centri di diffusione ben distribuìti nel territorio e ben governàti da un potere centrale, allora tanto indiscusso quanto indiscutibile.

La predilezione della chiesa cristiana per quella parte della cultura che ne confermasse, quindi rafforzandoli, i proprî dogmi, trovò alcune vie maestre, che ne divennero sostegno incontestabile.

Nel campo della concezione dell'universo, assunse grande rilievo la diffusione dell'òpera di Claudio Toloméo (Alessandria, intorno al II sécolo d.C.), che elaborò la più compléta sìntesi astronòmica dell'antichità, nel suo trattato '*Magisté syntaxis*' (il titolo originale è '*Megalé mathematiché syntaxis*'), tradotto in àrabo con il titolo '*Islāh al-Mağistī*', ad òpera di Ğābir ibn Aflah, e poi reso in latino, come abbiamo già visto, da Gerardo da Cremona con il titolo '*Almagesto*'.

In quest'òpera Toloméo postulò che la Terra fosse al centro dell'universo che attorno ad essa ruotava; di conseguenza, per rendere compatibile a questo modello il moto degli astri, formulò una complessa teorìa geométrica fatta di eccentricità ed òrbite non circolari chiamàte *epicìcli*.

Poiché l'elaborazione di Toloméo di fatto riusciva a seguìre con precisione il moto di stelle, pianéti e Sole, ottenne grande favore nella medioevale Europa cristiana: porre la Terra al centro dell'universo era la miglior conferma della centralità di tutto, anche della religione di Cristo, o per meglio dire . . . di Roma!

Così è che questa teorìa divenne l'ùnica ufficiale ed ammessa scienza astronòmica per quasi mille anni, sino al XVII sécolo, quando giunsero, come vedremo, scienziati che seppero associare al potere della mente il coraggio del proprio cuore.

Nel campo della Filosofìa, lungo la stessa 'via araba', giunse l'òpera di Giovanni Filòpono, detto il Grammàtico, cristiano di Alessandria del sesto sécolo,che si dedicò ad un àmpio studio critico delle teorìe di Aristòtele, producendo anche lavori originali in materia di Teologìa, Filosofia e Matemàtica.

Il pensiero di Giovanni Filòpono ebbe un destìno emblemàtico.

La chiesa romana guardò, infatti, con favore alla parte teologico/filosofica di Giovanni Filòpono, laddove, nel libro '*Sull'eternità del mondo*', dava certezza all'esistenza delle tre essenze in un solo Dio (Padre, Figlio e Spirito Santo) ed anche alle due nature nello stesso Cristo (Dio e uomo): la dottrina di Aristòtele inizia così a 'conquistare' la cristianità.

Invece, nel campo della Fisica, il netto distacco del 'Grammàtico' dalle teorìe aristotéliche ne decretò, in questa parte, l'oblìo.

Filòpono criticò, infatti, i Peripatétici almeno su tre aspetti: negò che la velocità di caduta dei gravi fosse influenzata dal loro peso; ritenne inaccettabile la teoria aristotélica che il mezzo detérmini il moto degli oggetti elaborando la teoria dell'ìmpeto (che oggi chiamiamo 'variazione della quantità di moto'); rifiutò infine la negazione dell'esistenza del vuoto, vero dògma granìtico di Aristòtele.

Con Giovanni Filòpono inizia così una critica alla dominante cultura aristotélica che giunse, ben mille anni dopo, alla definitìva affermazione delle teoria di Galileo Galilei:

" ……. *Il mezzo si oppone al movimento dei proiettili che non possono avanzare senza dividerlo, anche se essi si muovono a contatto con esso. Nulla tuttavia potrà impedire che una freccia, un sasso, o qualsiasi altro corpo sìa lanciato nel vuoto, a condizione che esistano il motivo agente, il corpo mobile e lo spazio per riceverlo.*"

La riscoperta e la nuova valorizzazione dei princìpî dei Peripatetici e l'impulso nell'educazione e nella speculazione filosofica negli istituti religiosi, alimentarono e caratterizzarono il nuovo movimento filosofico, nòto sotto il términe di Scolàstica, perché sòrto, intorno all'undicesimo sècolo, proprio nelle *Scholae* dei centri religiosi volute da Carlo Magno.

Nel términe Scolàstica, però, si devono individuare diverse dottrine filosofiche e teològiche, elaboràte tra l' XI ed il XIV sécolo, che avevano, seppure differenti tra loro, alcuni caratteri comuni, tra i quali il método utilizzato nel ragionamento del sillogismo, idéntico a quello

di Aristòtele, entràto nella Scolàstica nel XII sécolo attraverso le versioni latine dei testi di filosofi musulmani.

Gli scritti di Aristòtele, in particolare quelli dedicàti alla prova dell'esistenza di Dio ed alla parte teològica della metafisica, divennero ben presto il riferimento dell'istruzione della Scolàstica, tant'è che la principale attività tra gli studenti fu l'assimilazione della lògica dei Peripatetici nella teologìa cristiana. Questa pratica fu portata al culmine da Tommaso d'Aquino (Aquino 1225 – Fossanova 1274) – chiamàto il prìncipe dei filosofi Scolastici – che è ritenuto l'origine dell' 'aristotelizzazione' della cristianità.

Purtroppo, l' assimilare la metafisica di Aristòtele fu un tutt'uno con l'assimilazione della sua Fisica, argomenti che, per gli Scolastici, neppure erano nettamente separàti.

Il pensiero scientifico, quindi, restò legato o, per meglio dire, imprigionàto, dall'approccio aristotélico:

Nomina sunt consequaentia rerum

i nomi, i puri concetti corrispondono alla realtà delle cose ancor prima dell'esperienza.

Poiché di puri concetti è fatta la dottrina d'ogni religione, i dògmi della fede, ecco che, nel Medio Evo cristiano, ogni branca della conoscenza umana doveva necessariamente non essere contraria al pensiero ufficiale della chiesa, pena la contestazione d'eresìa, che a quei tempi portava a conseguenze quantomeno 'spiacevoli'.

Ancòr oggi viviamo 'di Scolastica', nei frequentissimi confronti dove tanti uniscono altre grida attorno a temi 'di moda' con posizioni ingiustificate, preconcette, vuote di contenuti (per non dire di peggio!). Ancòr oggi è difficile ottenere l'opportunità di un adeguàto spazio mediàtico quando si vuole esprimere un pensiero 'contro corrente', spesso semplicemente vero: "*Solo l'errore ha il privilegio di dare il proprio nome ad una setta*.", così scriveva Voltaire . . .

Oggi potremmo sostituìre il términe '*errore*' con '*falsità*', '*ipocrisìa*', '*convenienza*', . . . '*conformismo*', ed il tèrmine '*setta*' con tanti moderni neologismi, che individuano aggregazioni di persone più o meno 'pensanti', accomunàti dal suffisso terminàle '-*ista*' !

Nel Medio Evo, contestare la dottrina 'dominante' chiedeva un grande coraggio: si poteva mettere in gioco la vita ed anche l'ancòr più preziosa ànima.

Questo Capitolo, come già detto 'poco idraulico', vuole essere anche un sentìto omaggio a questi coraggiosi studiosi che, per primi, tra mille rischi, alzarono la voce della scienza al di sopra di quella 'del popolo' e . . . del 'potere'.

Ricordiamo quindi coloro che iniziarono la demolizione della dottrina aristotélica, protetta nel sòlido 'castello' della Scolastica, opponendosi al potere religioso che incarnava anche quello scientifico; fu, in alcuni casi, una aperta ribellione che sorse proprio al tempo in cui queste dottrine giunsero alla loro massima espressione con Tommaso d'Aquino.

Questi, riproponendo la teorìa che il moto di ogni oggetto fosse sostenuto dal mezzo nel quale esso procede, respinse, come errate, le teorìe dell'ìmpeto e dell'esistenza del vuoto, elaboràte da Giovanni Filòpono, che non ebbe quindi, e l'umanità con lui, la stessa 'fortuna' che ebbero coloro che sostennero le medèsimi tesi nell'Islam.

Il procédere del pensiero scientifico, quindi, còmplice il potere anche culturale della chiesa romana, trovò il maggior ostàcolo nella difesa preconcetta dei dogmi di Aristòtele, adeguàti al cristianesimo e quindi rinvigorìti.

Desta così poca sorpresa che il movimento Protestante abbia trovato maggior impulso dalle scuole che reclamavano la libertà della scienza; così come è comprensibile che i primi

movimenti di opposizione si manifestassero in aree geografiche lontane da Roma e dalla sua potentissima chiesa 'aristotelicizzata'.

Il filosofo e scienziato inglese, Ruggero Bacon (Ilchester Somersetshire 1214 - Oxford 1292?), contemporàneo di Tommaso d'Aquino, fu esemplare di quell'epoca: come frate francescano egli insegnò la filosofia di Aristòtele; tuttavia il suo pensiero scientifico se ne distaccò, attribuendo alla scienza la missione di migliorare la condizione umana ed affermando la necessità di dedicarsi all'esperienza dei fenomeni osservàti ed allo studio della natura, ùnico mezzo per ampliare e verificare le proprie conoscenze scientifiche.

La matemàtica, per Ruggero Bacon, diventa il mezzo indispensabile "*per conoscere le altre scienze o le cose di questo mondo*"; tutto ciò che non regge la verifica dell'esperienza non può essere che confinàto nella superstizione e nella magìa; gli esperimenti sono il vero veìcolo della ricerca scientifica.

Questo nuovo approccio costituisce certo un passo di assoluto valore nella storia della scienza e dell'umanità tutta.

A dispetto del fatto che Tommaso d' Aquino fosse anch'egli un religioso, mònaco Domenicano, educàto alle sette arti liberali della Scolàstica in Italia ed in Francia., il suo insegnamento aristotélico fu fortemente avversato dalle autorità ecclesiastiche di Parigi e, in un secondo tempo, anche da quelle di Canterbury, dove, in prima fila, troviamo il filosofo inglese e religioso francescano Giovanni Duns Scoto (1265–1308) attivo a Canterbury.

Efficàce, negli effetti e nel séguito, fu il pensiero di Guglielmo di Ockham (Ockham 1295 - Monaco di Baviera ca. 1350), anch'ègli frate francescano, seguàce di Ruggero Bacon e pupillo del confratello Giovanni Duns Scoto.

I tre furono protagonisti di una vigorosa disputa contro le dottrine scolastiche e quindi contro la Fisica e la Metafisica di Aristòtele; il fatto che appartenessero tutti all'ordine del 'poverello di Assisi' è significativo: la régola dei seguàci di Francesco, povertà nella carità, inequivocabilmente vicina al messaggio di Cristo, costituìva una sòrta di protezione per quegli spiriti, meno costretti alla ottusa obbedienza della disciplina culturale ufficiale.

Guglielmo di Ockham mantenne la sua ricerca filosòfica all'interno di una rigida régola:

"*Entia non sunt moltiplicandi praeter necessitatem*"

. . . chiamata '*Il rasoio di Ockham*', perché produceva una pesante spoliazione, nelle dottrine scolastiche, di tanti concetti, soggetti e princìpî superflui, creati per spiegare e giustificare, secondo la stessa razionalità scolastica, l'universo ed i rapporti tra uomo e Dio. Il frate, filosofo e scienziato, sostenne che la fede e la ragione òperano in assoluta perfetta autonomìa; la prima esplòra il 'soprasensibile' entro i lìmiti del dògma; la ragione òpera nel campo dell'esperienza.

Ne esce da questo una netta frattura con le teorie fisiche di Aristòtele ed un recupero dell'impostazione di Demòcrito (filosofo greco, incontràto nel Capitolo 2), che poneva al centro della conoscenza l'esperienza diretta dei fenomeni studiàti.

Guglielmo di Ockham accétta la teoria dell'ìmpeto: non è il mezzo che muove gli oggetti bensì la forza iniziale che a loro è stata impressa.

A Parigi, la critica a Tommaso d' Aquino trovò la propria principale sede nella locale università, la Sorbona, dove, in questo, si distinsero:

- Jean Buridan (Bethune ca 1300 – ca 1358), che fu Rettore dell'Università parigina nel 1327;
- Nicole Orésme (Caen ca 1320 – Lisieux 1382), poco più giovane di Buridan e che insegnò a Rouen e poi divenne vescovo di Lisieux nel 1377;
- Albert di Sassonia (Rickmersdorf ca 1316- Halbertstadt 1390), insegnante all'università di Parigi, poi rettore dell'università di Vienna ed infine vescovo di Halberstadt.

Anche se indirettamente, questi tre filosofi diedero un vigoroso contributo alla disgregazione dell'approccio alla scienza sostenuto dalla Scolàstica, evidenziando la necessità, nella ricerca, dell'osservazione, della sperimentazione ripetuta e della verifica degli effetti.

Jean Buridan, certo influenzàto dal pensiero di Guglielmo di Ockham, confutò la teoria aristotélica del sostentamento del moto operato dal mezzo nel quale esso si sviluppa; egli rilevò con chiarezza che il volo di una penna e quello di una pietra sono chiaramente differenti, anche se vengono inizialmente spinti alla stessa velocità.

Buridan osservò che le lance vengono appuntite, all'estremità anteriore, per meglio fendere l'aria, ma se si appuntisse anche l'estremità opposta, contro la quale Aristòtele riteneva si esercitasse la spinta del mezzo che 'si chiude' dietro l'oggetto in movimento, perché, a parità di spinta iniziale, non si riduce la velocità e lo spazio percorso?

La velocità iniziale di un corpo in movimento, egli affermò, è proporzionale all'ìmpeto ed alla quantità di materia che compone il corpo stesso; nel prosieguo del moto, per effetto della resistenza dell'aria ed anche del peso, l'ìmpeto costantemente diminuisce finché il movimento del corpo si arresta.

L'interpretazione del moto degli oggetti, per quanto intuitiva, è ormai perfetta.

Estendendo questo ragionamento agli astri, osservàti in costante movimento e quindi apparentemente non soggetti ad alcun rallentamento, Jean Buridan li considerò come oggetti che hanno subìto un ìmpeto iniziale ad òpera di Dio; questa spinta primordiale però, nel caso dei corpi celesti, non si riduce nel tempo perché essi, nel cosmo, non incontrano forze contrastanti.

Nicole Orésme, probabilmente allievo di Jean Buridan, si occupò inizialmente dei princìpi della Cinemàtica, investigando vari casi di moto uniforme, uniformemente variato (cioè di corpi che subiscono un'accelerazione costante, come, ad esempio, quelli in caduta lìbera sottoposti alla costante accelerazione di gravità) ed anche non uniformemente variato, valutando la relazione tra tempo e distanza, attraverso costruzioni geometriche.

In Stàtica, partendo dal càlcolo dell'area del triangolo, che è pari a quella del rettangolo con stessa base ed altezza pari alla metà di quella dello stesso triangolo, egli giunse alla seguente régola generale per il primo approccio rigoroso all'esistenza del baricentro di ogni corpo:

"*Ogni grandezza uniformemente variata mantiene le stesse misure totali come se essa mantenesse uniformemente il valore che acquista il suo punto di mezzo.*"

Iniziò così ad interrogarsi sui moti relativi di oggetti che si muovono in direzioni e velocità differenti, giungendo ad affermare che l'idea di Aristòtele e di Toloméo che la Terra fosse

fissa al centro dell'universo non era una certezza: non essendoci in questo alcuna esperienza, poteva essere vera anche l'ìdea contraria:

"*Se un uomo fosse nel cielo . . . . potrebbe sembrargli che la Terra ruoti in un moto a periodo giornaliero così come il cielo sembra fare a noi sulla Terra. Similmente: se la Terra si muove in un movimento giornaliero e non il cielo a noi appare che la Terra sia fissa ed il cielo in movimento.*"

La cosmologìa di Nicole Orèsme, iniziando a mettere in discussione la teorìa della Terra al centro dell'universo - quindi dubitando anche della centralità universale dell'umanità fatta ad immagine e somiglianza di Dio – incontrò la contrarietà della Chiesa ma anche l'imperitura fama, essendo oggi ricordata come la teorìa del '*Precopernicanesimo*'.

Albert di Sassonia fu interessato sìa al concetto di centro di gravità che ai fenòmeni della caduta dei gravi.

Benché paragonasse l'attrazione della Terra al fenomeno del magnetismo, egli credeva che, a differenza dell'attrazione magnética del ferro, la gravità fosse la stessa a tutte le altezze e proporzionale alla distanza, anche se ciò poteva portare ad immaginare la possibilità di una velocità infinìta: aumentando all'infinìto la distanza di caduta, infatti, la velocità, se alla distanza stessa proporzionale, sarebbe diventata anch'essa infinìta.

Per confutare questa apparente illogicità della propria teorìa, Albert di Sassonia introdusse, per via solo empìrica, un concetto assai importante nello studio della caduta dei gravi e, in generale, del moto degli oggetti in un fluido, liquido o gassoso che sìa: nel caso dei pesi in caduta libera, la resistenza al moto, crescendo più rapidamente dell'ìmpeto impresso dalla gravità, porta, dopo un certo tempo, ad annullare l'accelerazione e quindi a mantenere la caduta ad una velocità costante, di valore finìto.

Anche all'università di Oxford si deve riconoscere un originale nuovo fermento culturale che contribuì a liberare la ricerca scientifica dai vìncoli e dalle superfetazioni che Guglielmo di Ockham aveva per primo 'tagliato con il suo rasoio'.

Gugliemo Heytesbury, che divenne cancelliere di Oxford nel 1371, dopo quarant'anni di insegnamento, per primo fece osservazioni ed elaborò considerazioni sulla relazione tra la distanza e la velocità ed anche tra la velocità e l'accelerazione:

"*Per un corpo che lascia lo stato di quiete, si può immaginare una misura del moto* [cioè: della distanza, ndr] *che cresca indefinitamente; similmente si può immaginare una misura della variazione del movimento seguìta da un corpo che può incrementare o decrescere il suo movimento con una velocità o lentezza infinitamente variabili. La misura di quest'ultima grandezza ha la stessa relazione con la misura del movimento, come il movimento porta alla distanza che è continuamente attraversata.*"

Nel sécolo successivo, il XV, uno scrittore di Oxford, nòto soltanto con il nome di *Il Calcolatore*, per primo formulò la relazione tra velocità e tempo nel moto uniformemente accelerato:

"*Se un corpo aumenta il suo moto in modo uniforme, come esso comincia a fare nel primo istante, egli attraverserà nella seconda metà del tempo tre volte la distanza attraversata nella prima metà.*"

Una tale andar a tentoni nello studio degli elementi della Meccànica continuò a Parigi e ad Oxford attraverso il quindicesimo sécolo, ma, contemporaneamente, crebbero i centri di pensiero e di studio in Spagna, in Italia ed in Germania.

È singolare constatare che quasi tutti i personaggi, ricordàti in questo Capitolo, appartengano ad ordini religiosi, con prevalenza dei discépoli di San Francesco.

La stabilità dell'organizzazione della chiesa cristiana aveva consentìto, durante il Medio Evo, l'ininterrotta attività della sue *Scholae*, che erano, quindi, l'ùnico centro di riferimento della cultura, ma anche dell'approccio ad essa: chi desiderava accedere agli studi non aveva altra possibilità. Cosi è che l'attività di conservazione della cultura antìca, sulla quale si era costruìta e si voleva staticamente mantenere la base fondante del pensiero della stessa chiesa cristiana d'Occidente, fu anche stìmolo per la créscita del dissenso, fonte di nuove idee, alimento della critica e delle nuove aspirazioni.

Il cammino della ricerca fu però spesso deviato o reso faticoso da concetti erràti ma purtroppo ben radicàti profondamente nella cultura degli scienziati. Per esempio: sebbene molti progressi fossero già compiuti nell'analisi dell'accelerazione uniforme, cioè lo studio di corpi in moto che subiscono una costante accelerazione, ancòra sòlida era l'idea che la velocità della caduta libera di un oggetto dipendesse soltanto dal proprio peso.

Galileo Galilei, invece, dimostrò, come vedremo, che ogni corpo in caduta è soggetto alla stessa accelerazione di gravità. Quanto noi vediamo di differente nella velocità di caduta, e quindi nel tempo, di corpi diversi è soltanto dovuto alla presenza dell'aria, che agisce opponendosi al moto in modo differente; nel vuoto, una palla di piombo ed una piuma càdono dalla stessa altezza nel medésimo tempo.

Il progresso, che elimina gli errori e porta alla corretta e compléta conoscenza dei fenòmeni, fu assai lento nel Medio Evo anche perché, in quell'época, ai vìncoli ideològici e dogmàtici della religione 'di stato' e della filosofìa, si affiancava un ancòr faticoso sistema di diffusione e scambio di informazioni ed esperienze.

Lo sforzo di molte persone, contemporàneo ed a volte idéntico, ma in luoghi differenti e lontani, richiese ancòra sècoli, prima che i prìncipî della Meccànica e della Fisica fossero chiarìti; princìpî, oggi recepìti come elementàri, sui quali si basa la scienza dell'Idraulica.

* * *

Cap. 7 - La nàscita del método sperimentale

Tra i periodi nei quali è stata suddivisa la storia dell'umanità, uno dei più i più ricchi di progressi e di tesori è considerato il Rinascimento, in questo certo aiutato dall'immeritàto scarso apprezzamento spesso attribuìto al precedente Medio Evo, che del Rinascimento, al contrario, è stato l'indispensàbile culla.

Dividere in periodi la storia della civiltà costituisce uno schematismo inevitabile ma che può trarre in inganno, perché tende a diffondere l'idéa che ogni época sìa di fatto esperienza indipendente nell'evoluzione. Ciascun periodo storico, invece, è frutto del passato e premessa dell'immediato futuro: il Rinascimento costituisce, infatti, il prosieguo naturale e conseguente del Medio Evo.

Tra il XIV ed il XVI sécolo si regìstrano numerose conquiste di tutta la cultura, raggiungendo spesso livelli superlativi, in alcuni casi neppure più raggiunti in séguito; si pensi, a tal proposito, all'architettura, alla scultura, alla pittura, all'arte letteraria; stupisce, inoltre, l'accelerazione che subirono alcuni campi, con veri e propri sorprendenti balzi in avanti.

L'umanità tutta conobbe, durante il Rinascimento, grandi 'rivoluzioni' culturali, accompagnàte da scoperte scientifiche, tecnologiche, econòmiche, sociali, geografiche, che risolsero innumerevoli problemi, sino a quel tempo non decifràti oppure completamente nuovi che aprirono, questi ultimi a loro volta, altrettanti scenàri ed opportunità.

Il pensiero scientifico si orientò definitivamente verso i métodi matematico-sperimentali, abbandonando le certezze metafisiche della Scolàstica.

Tra le scienze, l'Idraulica, che da sempre aveva mosso i proprî passi dall'osservazione e dallo studio delle esperienze, trovò grande impulso nella ricerca man mano che si consolidava il metodo sperimentale e, con esso, trovavano nuovi sviluppi la Meccànica e la Matemàtica, discipline strettamente legate alla Fisica; per questo motivo diventa essenziale seguìre gli sviluppi di queste scienze di riferimento.

Molti eventi impressero notevoli accelerazioni nello sviluppo delle scienze: l'invenzione della stampa, nell'anno 1445, che permise una più rapida diffusione del progresso umano accumulàto nelle conoscenze; la caduta di Costantinopoli, nel 1453, con il conseguente flusso di insegnanti e studenti cristiani verso Occidente; la scoperta del continente americano, nel 1492, che tra l'altro scatenò una stupìta coscienza dell'esistenza di un vastissimo mondo ignòto, che apriva un nuovo orizzonte tutto da scoprire.

Queste novità non impedirono difficoltà ed ostacoli: il controllo sulla cultura da parte della chiesa romana cedette assai lentamente il proprio potere ed i primi che cercarono di introdurre teorie nuove in terra itàlica, quindi a contatto diretto con la massima autorità spirituale che si ficcava d'esserlo anche nelle scienze, si mossero tra mille pericoli, a volte pagando duramente la libertà del loro intelletto.

I tempi erano però maturi: l'assalto delle menti si dimostrò, alla fine, l'unica vera offensiva che gli esseri umani hanno saputo creare incontenibile ed irreversibile.

La più famosa e conosciuta figura del Rinascimento, superiore a tutte le altre per i livelli di eccellenza che seppe raggiungere in numerosi campi, fu senz'altro Leonardo da Vinci (Vinci 1452 – Amboise 1519). Figlio di Ser Piero, notajo fiorentino, e di Caterina, non soltanto lasciò la sua traccia indelebile nella ricerca italiana, nella pittura e nella scultura, ma mostrò uguale genio nella musica, nella filosofia naturale, nell'anatomìa, nella botànica, nell'architettura, nella geologìa e nell'astronomìa. Da alcuni è ritenuto come colui che capì i princìpî della scienza sperimentale meglio di quanto fecero, successivamente, Galileo Galilei, Francis Bacon, Isaac Newton.

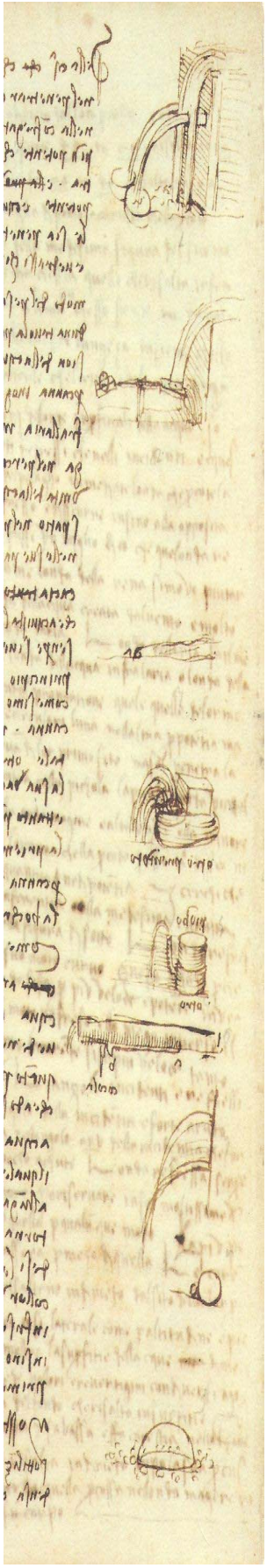
Dopo sette anni in povertà, come studente d'arte a Firenze nella bottega del Verrocchio, Leonardo superò velocemente il suo maestro e cominciò, come artista indipendente inscritto nel 1472 alla corporazione fiorentina di S. Luca, ad acquisire commissioni in proprio. Nel 1482 fu inviato a Milano da Lorenzo de' Medici presso gli Sforza, dove rimase per vent'anni. Si occupò di arte e di architettura, quantunque mai abbandonò l'abitudine di osservare e ricordare i fenomeni della natura in ogni aspetto. Scrisse di Matemàtica e di Meccànica; disegnò molti lavori di ingegneria per il territorio lombardo. Nel 1499, con la conquista di Milano da parte dell'esercito francese di re Luigi XII, Leonardo si trasferì a Venezia per poi rientrare a Firenze.

Moltéplici furono i lavori di Leonardo. Ricordiamo che tra il 1502 ed il 1503 fu il capo ingegnere presso Cesare Borgia, progettando e supervisionando lavori di canali e porti in una larga parte dell'Italia centrale. Milano lo richiamò, nella persona del governatore francese Carlo d'Amboise nel 1506. Qui progettò e seguì i lavori per la sistemazione del naviglio Martesana - dove ancòr oggi sono funzionanti le porte delle conche di navigazione dette, appunto, '*vinciane*' - e da questo elaborò il progetto per collegare, via acqua, il lago di Como a Milano, sfruttando l'alto corso del fiume Adda.

Alcuni anni prima della sua morte egli si stabilì ad Amboise, in Francia, invitàto dal re Francesco I; là egli disegnò un castello ed un canale che connetteva la Loira con la Saone; cercò, nell'ultimo periodo, di riordinare la vastissima mole di note e documenti (circa cinquemila pagine) scaturìti dalla sua mente vulcànica.

Purtroppo le sue note cominciarono, dopo la sua morte, a disperdersi e molte delle geniali intuizioni e scoperte restarono confinàte in queste carte, anche a causa della ritrosìa di Leonardo di condividere il proprio pensiero con gli altri; in questo egli sembra essere ancòra chiuso in un recinto culturale di medioevale memoria.

Tanto è stato scritto di Leonardo, ma il suo genio fu tale che vi sìa ancòr oggi qualcosa da scrivere. Qui, ovviamente, ci limitiamo a ricordarlo nelle sue idee collegabili all'Idraulica.



Pierre Duhem (Parigi 1861-Cabrespine, Ande 1916), in un esteso studio '*Ĕtudes sur Léonard de Vinci*', ha tracciato l'origine di molte osservazioni di Leonardo, nel campo della Meccanica, dimostrando l'influenza dei grandi scienziati del passato: Archiméde, Euclìde, Vitruvio, Eròne, sino al più recente Albert di Sassonia. Lo stesso Leonardo parla con familiarità degli studiosi antichi e contemporanei.

Pierre Duhem inoltre dimostra che scienziati successivi a Leonardo ebbero accesso alle sue note; alcuni dei suoi schizzi su dispositivi meccanici apparirono più tardi sotto diverso nome; sue osservazioni senz'altro raggiunsero e suscitarono interesse presso Cartesio, Pascal e Huygens.

In nessun modo, anche se poco 'divulgativo', il lavoro di Leonardo da Vinci può essere considerato come un fenomeno isolato nel Rinascimento, senza influenze del passato e senza influenza sul futuro; fatto è che l'eccellenza della sua mente fu troppo elevata per i suoi diretti successori, tant'è che ciò che di lui fu assimilàto è poca cosa rispetto a ciò che avrebbe potuto significare lo sviluppo di ogni sua idéa.

Tanto è vasta la giusta ammirazione di Leonardo che a volte se ne pérdono alcuni aspetti: a lui, infatti, non è riconosciuto d'aver per primo applicàto, in tutte le sue indagini, il metodo sperimentale, così come lo descrive:

" . . . *Io tratterò di tali argomenti, ma prima farò molti esperimenti e poi dimostrerò perché i corpi sono forzati ad agìre in questo modo. Questo è il método che uno deve perseguire nell'investigare i fenomeni della natura. E' vero che la natura inizia a ragionare e términa dall'esperienza; ma tuttavia noi dobbiamo portare il modo opposto: come ho detto dobbiamo iniziare con l'esperimento e cercare attraverso esso di scoprire le ragioni. . . .* "

Nel campo della Meccànica, Leonardo anticipò Galileo Galilei – che giunse un sècolo dopo - nel riconoscere che un corpo che scorre liberamente su un piano inclinato può raggiungere la stessa velocità alla stessa quota, senza tener conto dell'angolo di inclinazione; da qui non riuscì a dedurre la legge della caduta libera a causa degli errori nel calcolo della distanza percorsa in un dato tempo, cosa che poi riuscì a Galileo.

Di interesse per la storia dell'Idraulica sono i suoi scritti racchiusi nell'opera "*Del moto e misura dell'acqua*", un trattato in nove parti che tratta dei seguenti argomenti: la superficie dell'acqua, il movimento dell'acqua, le onde dell'acqua, le scìe, l'acqua in caduta, la distruttiva forza dell'acqua, la navigazione dei corpi, efflussi da fori ed aperture, correnti nelle tubazioni, mulini ed altre macchine idrauliche.

Queste osservazioni, spesso male interpretate, sono oggi da considerare novità troppo elevate per la scienza del tempo, anticipando princìpî ed interpretazioni che giunsero assai dopo. Resta celebre la sua premessa:

"*Ricòrdati che quando parli di correnti d'acqua devi portare prima l'esperienza e dopo la ragione.*"

Nello studio dei moti nei fluidi, egli per primo descrisse: la distribuzione della velocità in un vortice; i profili dei getti liberi; la formazione delle scìe dei moti relativi (prodotte, ad esempio, da un ostacolo fisso in una corrente o da un corpo galleggiante che si muove con velocità diversa da quella della corrente stessa); la propagazione, la riflessione e l'interferenza delle onde; il salto idraulico.

Leonardo da Vinci per primo propose: l'ottimizzazione aerodinamica dei corpi, il paracadute, l'anemòmetro, la pompa centrifuga, l'osservazione della distribuzione della velocità nei liquidi, utilizzando paréti in vetro e particelle lasciate in sospensione nella corrente.

Dobbiamo accreditare a Leonardo - che, come già Eròne di Alessandria, non ottenne séguito alcuno - la corretta osservazione e la formulazione del princìpio di continuità dell' Idraulica, secondo il quale, partendo dall'assunta incomprimibilità dei fluidi, i differenti flussi in ingresso ed in uscita da un sistema a cielo libero sono accompagnati da una proporzionale variazione di livello.

In un serbatoio, per esempio, se entra più acqua rispetto a quella che esce, nello stesso tempo, allora il livello del serbatoio si alzerà . . . . in un sistema chiuso, cioè in una tubazione, la variazione della quantità di acqua che fluisce in un dato tempo (la *portata*) si manifesta nella proporzionale variazione della velocità.

Così osserva Leonardo nell'analizzare il principio di funzionamento della siringa:

" . . . *le sezioni dell'ugello, attraverso il quale l'acqua furiesce, sono cento volte più piccole della sezione principale dello stantuffo; l'acqua fluirà nell'ugello cento volte più veloce del movimento del pistone. Immaginiamo che un secondo pistone, cento volte più piccolo del primo, si opponga al flusso dell'acqua; certo avverrà che la forza che si applica al secondo pistone sìa circa uguale alla centesima parte di quella che spinge il pistone largo; e se la forza supera le cento parti, il piccolo pistone avanza e quello grande recede. . .* "

Questa affermazione contiene non solo il princìpio di continuità dell'Idraulica, ma anche quello della trasmissione della forza attraverso la compressione di un fluido, oggi noto con il nome di '*Princìpio di Pascal*', enunciato da Blaise Pascal, come vedremo, circa un sécolo e mezzo dopo.

Discutendo della continuità nei fluidi, Leonardo si rese conto della differenza tra velocità della corrente e velocità della propagazione delle perturbazioni, come ad esempio le onde:

" . . . *La velocità della propagazione delle onde spesso supera considerevolmente la velocità della corrente perché l'acqua generalmente non può cambiare posizione; proprio come il grano in un campo, che resta fissato al terreno ed assume sotto l'impulso del vento la forma di onde che corrono attraverso la campagna. . . .* "

Leonardo cercò di estendere il principio di continuità all'acqua contenuta in due tubazioni verticali interconnesse di diametro differente, la più grande delle quali (chiamata *pompa*) contiene un leggero pistone. A quale altezza, egli chiese, l'acqua salirà nell'altro tubo quando un peso (che chiama *contrappeso*) è posto sul pistone?

Sostituendo al posto del contrappeso una equivalente altezza d'acqua egli arrivò alla seguente affermazione:

" . . *L'acqua che è salita per causa di ogni grado di movimento dell'altra acqua è minore di quella che si muove nello stesso modo come è più lungo. Moltiplico l'acqua che discende per la sua lunghezza di diminuzione e divido il prodotto per il peso al quale tu vuoi far salire l'acqua; il risultato come la lunghezza dell'acqua di caduta è contenuto nel peso di salita, tante volte più sottile è l'acqua che sale.*

Il peso dell'acqua che ogni tubazione solleva sopra il livello del serbatoio lo stesso motivo al peso dell'altra acqua (equivalente al contrappeso) che guidalo come la sezione del tubo porta a quello della pompa . . ."

Ora questa conclusione non è soltanto corretta, ma contiene un princìpio dell'idrostatica non evìnto né da Archiméde né da Eròne o dagli Árabi o dagli Scolastici.

Non solo: Leonardo applicò questa osservazione all'equilibrio dei liquidi di densità differenti in contenitori comunicanti.

Nel problema dell'efflusso, cioè dell'uscita di un fluido da un recipiente attraverso fori nella sua parete posti a differenti altezze, Leonardo cadde in errore credendo che l'efflusso fosse proporzionale al carico idraulico in modo diretto, cioè che la portata in uscita dipendesse dal valore dell'altezza con la quale l'acqua sovrasta il foro. In realtà vedremo, più avanti, che questa proporzionalità è pari alla radice quadrata della stessa altezza.

L'errore fu ripetuto da Leonardo nelle sue osservazioni sulle correnti a pelo libero e sulle piene dei fiumi:

"*Se uno stramazzo porta una data quantità di acqua di due pollici di strato* [cioè di spessore] *e noi aggiungiamo un altro pollice allora il pollice più basso raddoppia la sua portata, la sua velocità ed il suo carico. Questo è provato dalla prima dimostrazione che le velocità sono proporzionali alla distanza dalla superficie dell'acqua.*"

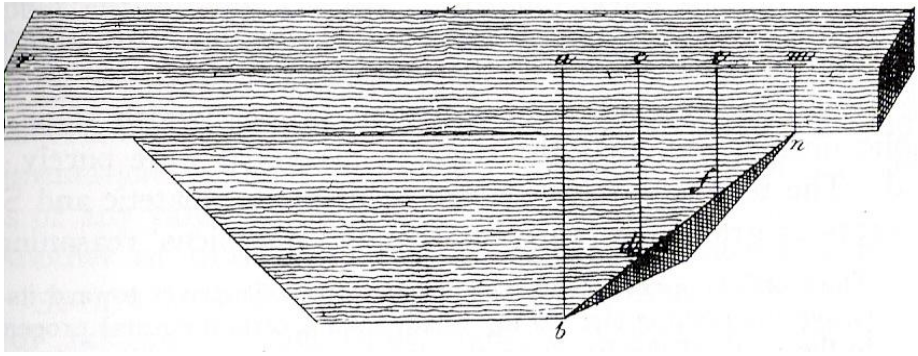
Le sue osservazioni sulla distribuzione delle velocità nelle correnti dei corsi d'acqua sono più accurate.

"*Nei fiumi rettilinei è più rapida l'acqua più lontana dalle sponde a causa della resistenza. L'acqua ha una velocità maggiore in superficie che sul fondo. Questo avviene perché l'acqua alla superficie lambisce l'aria che è di poca resistenza, perché più leggera dell'acqua e l'acqua sul fondo tocca la terra che è molto più resistente perché più pesante dell'acqua ed immobile. Da questo discende che la parte che è più distante dal fondo ha minore resistenza che quella sotto.*"

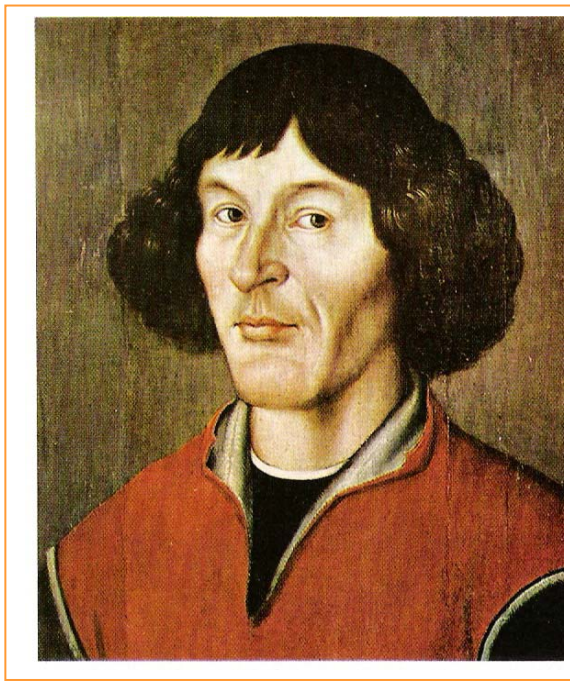
Nell'Idraulica fluviale le considerazioni di Leonardo sono quantomai originali ed esaurienti della profonda conoscenza raggiunta in

questi fenomeni:

"*Un fiume in ogni parte del suo percorso nello stesso tempo dà passaggio ad una eguale quantità di acqua, nonostante la larghezza, la profondità, la corrente, la irregolarità, la tortuosità. Ogni movimento dell'acqua di una eguale superficie in larghezza correrà più rapida e meno in profondità . . . e il suo moto sarà di questa qualità: io dico* [con riferimento al disegno accanto, ndr] *che in m-n l'acqua ha più rapido movimento che in a-b, e come molte volte più che m-n entra in a-b; esso entra quattro volte il moto sarà quindi quattro volte come rapido in m-n che in a-b; tre volte rapido come in c-d e due volte come in e-f. Un fiume di profondità uniforme avrà una più rapida corrente nella sezione più ristretta che in quella più larga, all'estensione che la maggior larghezza supera la minore.*"



Sebbene, in questo passo, l'interpretazione di Leonardo della distribuzione delle velocità in una sezione della corrente non sìa corretta, ci sarebbe comunque motivo per sostenere che il '*Princìpio di continuità*', prima legge dell'Idrodinàmica, potrebbe ben essere chiamato *Principio di Leonardo*, o forse, con la numerazione d'ordine, sarebbe stato il '*Primo o il secondo o . . . il terzo . . Princìpio di Leonardo*'. Purtroppo, come già detto, la sua mente complessa e versàtile, rivolta a mille interessi ed a mille scienze, non gli consentiva d'essere anche un buon maestro, né crediamo che questo fosse per lui uno sforzo interessante. Così altri, dopo di lui e spesso senza di lui, scoprirono molto di ciò che lui aveva già scoperto; lasciò così un po' di spazio e di gloria anche ai pòsteri!



In un altro luogo, un contemporaneo di Leonardo, un poco più giovane, meno versàtile ma più 'socievole', ebbe una maggiore influenza sul susseguente corso della scienza: Niccolò Copérnico (Thorn 1473 – Frauenburg 1543), nato nella Prussia polacca e istruìto, in numerose materie, in altrettanti luoghi: nella Matemàtica e nelle scienze a Cracòvia; nella legge canònica e nella Astronomìa a Bologna; nella Medicìna a Padova. Copérnico, che fu anche praticante médico ad Heildelberg e canònico nella cattedrale di Frauenburg, durante i suoi studi in Italia elaborò la nuova teorìa astronòmica che poneva il Sole e non la Terra al centro dell'universo. Confortàto, nel privato, da molti studiosi italiani che già criticavano le tolemàiche teorìe geocentriche, tanto care alla Scolastica, Copérnico ripartì dalle affermazioni eliocentriche di Pitàgora.

Nonostante la rozzezza dei suoi strumenti, Copérnico dimostrò che l'ipòtesi che fossero i pianéti, e con questi la Terra, a ruotare intorno al sole, secondo percorsi circolari, era quella che meglio e più semplicemente si adattava alle osservazioni.

Copérnico seppe superare l'ostacolo ed il pericolo(!) della chiesa, trovando il modo di ottenere l'approvazione papale e l'autorizzazione a pubblicare le sue scoperte. La stampa del principale lavoro apparve appena prima della sua morte; tipico dei tempi fu il fatto che un amico intimo, il predicatore A. Osiander, ebbe ad inserìre una anònima prefazione che affermava, per evitare la pubblica disapprovazione, che le teorìe presentate erano puramente ipotetiche. A tale affermazione si oppose fieramente Giordano Bruno, che fu il primo a trattare l'òpera di Niccolò Copérnico per sostenere una nuova visione filosofica del mondo.

Per quasi due sécoli il nome di Copérnico divenne la bandiera di coloro che lottavano contro l'autorità religiosa che premeva ed opprimeva la sete di libertà della scienza.

Gli Scolastici francesi di questo periodo tentarono di rinnovare la propria dottrina, in particolare con Francisco Soto, detto Domingo, (Segovia 1494 - Salamanca 1560), mònaco domenicano spagnolo che studiò a Parigi. Autorevole figura nella chiesa romana, partecipò al Concilio di Trento, Scoto tentò una originale interpretazione del pensiero di Tommaso d'Aquino, cercando di conciliare le teorie aristotéliche con il nascente nuovo pensiero scientifico. Ne discesero alcune aperture come, ad esempio, l'analisi del problema della caduta libera dei gravi, che fu riconosciuto essere dovuto all'accelerazione uniforme:

"*Il moto uniformemente variato, con rispetto al tempo, è quello nel quale la deformazione è la seguente: se qualcuno divide secondo il tempo, in ogni parte, il moto nel punto di mezzo eccede il moto più debole nella quantità che esso eccede dal più forte . . Questo tipo di moto è quello che è caratteristico dei corpi mossi sotto il moto naturale e dei proiettili.*"

Si deve sottolineare che questa affermazione fu stesa prima degli esperimenti di Galileo; tuttavia fu considerata non come la scoperta del filosofo/scienziato spagnolo bensì come una conoscenza già esistente.

Dagli studi di Pierre Duhem emerge che alcuni studiosi italiani successivi a Leonardo non solo ne riprendono le osservazioni ma hanno concorso nel portarle all'attenzione di quelli che, più tardi, formularono i princìpi dei quali egli era solo imperfettamente cosapevole.

Uno di questi fu Girolamo Cardàno (Pavia 1501 – Roma 1576), matemàtico e médico di Pavia, la cui intelligenza ne superò grandemente l'ética. Egli è infatti nòto per aver plagiato liberamente i lavori di molti; Leonardo ne fu una vittima frequente. Una parte certo originale dei suoi scritti, tuttavia, non ebbe Leonardo come origine, ma Aristòtele. Dagli insegnamenti della scuola dei Peripatetici accettò, anche se in forma genérica, che l'aria, come l'acqua e la terra, avesse un peso, e che il moto naturale di ogni sostanza attraverso un'altra fosse governato unicamente dalle loro relative densità.

Girolamo Cardàno cercò di determinare la densità dell'aria, ponendola in relazione alla densità dell'acqua, attraverso la misura del tempo di caduta di palle di vetro nei due mezzi; ne discese l'indicazione di 1 a 50, errata ma significativa per dimostrare che il metodo sperimentale senza un controllo analìtico non era sufficiente per produrre risultati di qualche valore.

Giambattista Benedetti (Venezia 1530 – Torino 1590), matemàtico e fisico, si interessò sia al princìpio della caduta libera dei gravi che dell'equilibrio dei liquidi in vasi comunicanti. La sua opera '*Diversarum speculationum mathematicarm et phisicarum liber*', pubblicata nel 1580, lo mostra quale precursore delle scoperte di Galileo Galilei. In un volume di differenti scritti scientifici, dato alle stampe nel 1585, Benedetti discusse una "*pompa che preme e solleva l'acqua*",

strettamente somigliante a quella che Leonardo cercò di analizzare. Benedetti raggiunse esattamente la stessa conclusione di Leonardo, relativamente alla relazione tra le aree delle sezioni trasversali, considerate applicate al pistone, e l'altezza della colonna di liquido.

Un terzo studioso 'di transizione', dopo Leonardo, fu Bernardino Baldi (Urbino 1553 – 1617), che ricevette una educazione classica a Padova e divenne nòto per la sua abilità linguistica ed i suoi numerosi scritti. Egli incluse traduzioni e commenti sui lavori di Aristòtele, Euclìde, Eròne, e Vitruvio. I suoi commentarî di Meccànica, Idrostàtica ed Idraulica frequentemente contenevano, quasi parola per parola, estratti delle note di Leonardo, evitando accuratamente di far menzione di questa provenienza.

Un matemàtico danese, dédito anche alla Fisica ed all'Ingegnerìa, che contribuì allo sviluppo dell'Idraulica senza essere influenzato dalle considerazioni di Leonardo da Vinci, fu Simon Stevin, chiamato anche Simone di Bruges, (Bruges 1548 – Aia 1620).

Inizialmente occupàto in attività commerciali nella città di Anversa, Stevin si rivolse agli studi scientifici all'età di trentacinque anni, iscrivendosi all'università di Lovanio. Da ingegnere progettò e curò la realizzazione di grandi opere idrauliche di controllo e smaltimento delle acque, dalle quali ottenne grande fama al punto che fu nominato direttore del 'Dipartimento per le strade ed i canali', poi Intendente per l'esercito dei Paesi Bassi ed infine Commissario Generale d'Olanda.

Per primo, Stevin concepì piani di difesa di quei territorî che prevedevano l'allagamento delle terre basse attraverso sbarramenti mobili nei canali di drenaggio. Professore di Matemàtica a Leida, sviluppò la scomposizione delle forze: ogni forza può essere rappresentata con un segmento di retta che può essere scomposto in due altri segmenti, tra loro perpendicolari, dei quali la forza originale è l'ipotenùsa ed anche la risultante.

Stevin diffuse l'uso delle frazioni decimali e predisse l'avvento del sistema decimale anche nella monéta, nei pesi e nelle misure.

A lui si deve l'enunciazione del principio fondamentale dell'Idrostàtica, contenuto nella sua opera, pubblicata in fiammingo nel 1586, dal titolo "*De Beginseln des Waterwichts*", che lo portò alla massima reputazione, perché conteneva la prima corretta analisi della forza esercitata da un liquido su una superficie piana, oggi detta '*Legge di Stevin*', che riportiamo nell'enunciato usuale:

> *"In qualsiasi fluido a cielo libero, la pressione in un punto dipende solo dalla sua distanza dalla superiore superficie libera e la differenza di pressione tra due punti è data dal peso della colonna d'acqua, con superficie unitaria, di altezza pari alla differenza delle quote dei due stessi punti considerati."*

Partendo da questa legge, Stevin propose il primo tentativo di spiegazione del cosiddetto '*Paradosso idrostàtico*', secondo il quale: se due recipienti di forma diversa ma di ugual base contengono lo stesso liquido che raggiunge in essi la stessa altezza, la forza agente sul fondo è per entrambi uguale.

La fama del lavoro di Stevin giunse sino in Italia, in tempo per essere menzionata in una prefazione di Bernardino Baldi, ma l'ostàcolo delle assai differenti lingue sembra aver precluso la rapida diffusione di queste scoperte sino a quando furono tradotte in latino nel 1608.

Le proposizioni di Stevin erano strettamente sìmili a quelle di Archiméde, ma il método seguìto per dimostrare le condizioni dello stato di equilibrio era basato sull'impossibilità del contrario. Per esempio, dimostrando la verità dell'affermazione "*ogni corpo in acqua mantiene sempre una stessa posizione*", Stevin propose l'impossibile affermazione opposta, concludendo che "*. . . questa acqua doveva essere in perpetuo movimento . . . il che è assurdo*".

Il suo primàto nell'Idrostàtica non era privo di errori.

Stevin non comprese infatti che la pressione idrostatica di un fluido agisce su un punto del liquido in modo uguale in qualunque direzione; la conseguenza è che l'olandese non procede nelle analisi per fenomeni diversi (principio di Archiméde, paradosso idrostatico, pressione contro una parete) come aspetti di uno stesso comportamento.

Tre altri scienziati, lavorando certo indipendentemente in tre differenti paesi, saranno considerati quali protagonisti della conclusione del periodo del Rinascimento per quanto interessa la storia dell'Idraulica.

Il primo di questi – e certo il minore – fu Francis Bacon (Londra 1561 – 1626), baròne di Verulàmio e visconte di Sant'Albano. Considerato più filosofo e statista piuttosto che scienziato, egli evidenziò gli errori della Scolàstica ed avocò al suo posto lo studio della verità attraverso le analisi scientifiche dell'osservazione dei fatti. Sostenne con decisione la finalità pràtica della scienza e l'importanza dei dati sperimentali "*non tanto perché danno frutto ma perché danno luce*". Le sue òpere portarono ai primi movimenti culturali prodròmici alla nascita della Royal Society (1660), Accadémia, presentata nel prossimo Capitolo, che giocò un decisivo ruolo nella successiva diffusione della conoscenza. A Francis Bacon è attribuìto il primo esperimento che dimostra la compressibilità dell'acqua.

Giovanni Kepléro (Weil, Wüttemberg 1571 – Ratisbona 1630), tedesco contemporaneo di Francis Bacon, di ùmili origini e di salute cagionevole, fu avviato agli studi ecclesiastici nel seminario di Tubinga, dove venne iniziato all'Astronomìa copernicana dal matematico M. Mästlin.

Nel 1594 abbandonò il seminario ed accettò un incarico di insegnamento al ginnasio di Graz. Nel 1596 diede alla stampa la sua prima òpera "*Prodromus dissertationum continens mysterium cosmographicum de admirabili proportione orbium coelestium*", che gli consentì di entrare in contatto con alcuni astrònomi, tra cui Galileo Galilei. In questo documento cercò di stabilire una corrispondenza tra le orbite dei pianéti e le proprietà geometriche dei cinque solidi: cubo, tetraedro, dodecaedro, ottaedro e icosaedro.

Allontanàto dalla scuola di Graz, perché protestante, nel 1600 Kepléro accolse l'invito di Tyco Brahe di stabilirsi al castello di Benatek vicino a Praga. Qui, assieme a Brahe, cercò di correggere gli errori risultanti dalla teoria copernicana delle orbite circolari dei pianeti e, dopo la morte di Brahe, Kepléro fu nominato suo successore come matemàtico imperiale da Rodoflo II d'Asburgo.

La situazione fu straodinariamente fortùita e fortunata, perché Brahe era stato un eccellente meccànico e Kepléro cominciò ad essere un qualificato analista dei dati misuràti. Egli proseguì partendo dalle nozioni, dalle osservazioni e dai documenti di Brahe, in particolare sul moto del pianéta Marte; scoprì che le difficoltà relative alle irregolarità della sua orbita svanivano utilizzando per la traiettoria la figura dell'ellisse; da questo egli riuscì ad enunciare le prime due leggi sul moto dei pianéti del sistema solare, che pubblicò, nel 1609, nell'òpera "*Astronomia nova seu physica coelestis tradita commentariis de motibus stellae Martis ex obsevationibus G. V. Tyconis Brahe.*":

1. *Le orbite dei pianéti sono di forma ellittica ed il sole ne occupa uno dei due fuochi*;
2. *Nello stesso tempo ogni pianéta copre settori dell'ellisse di ugual area*.

Nel 1610 confermò la straordinaria scoperta di Galileo dell'esistenza dei satelliti del pianéta Giove; nel 1611, celebrando il cannocchiale di Galileo, ne propose una versione con lente ad oculare convesso; nel 1619 pubblicò l'òpera "*Harmonices mundi libri V*" e nel 1621 riassunse in modo orgànico e coordinato, le ricerche di Copérnico e di Galileo. In "*Harmonices mundi libri V*", Kepléro enunciò la sua terza legge:

3. *I quadrati dei tempi impiegati dai pianéti per completare le rispettive orbite sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle òrbite stesse.*

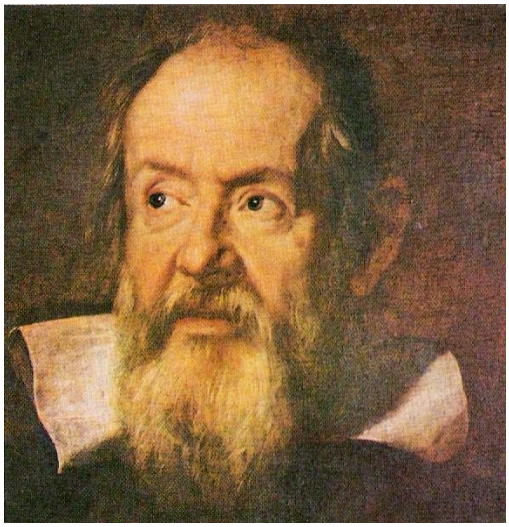
Nel 1627 Kepléro potè pubblicare le *Tabulae Rudolphianae*, alle quali aveva lavorato dalla morte di Brahe, che furono usate per oltre un sécolo in quanto consentivano di calcolare con notevole precisione la posizione dei pianéti.

Galileo Galilei (Pisa 1564 – Arcetri 1642) fu contemporaneo di Bacon e di Kepléro e – per quanto concerne questa storia – il più importante dei tre.

Nacque a Pisa da Vincenzo, matematico e musicista, e da Giulia Ammannati, di illustre ma decaduta nobile famiglia.

A Firenze ebbe la sua prima educazione di carattere umanistico-letterario. Nel 1581 si iscrisse alla facoltà di Medicìna dell'università di Pisa. Le ristrettezze economiche e la scarsa propensione verso la Medicìna lo costrinsero ad abbandonare l'università senza conseguire il diploma, ma senza impedirgli di continuare, da autodidatta, gli studi in Fisica ed in Matemàtica.

Già nel 1586 ideò un originale modello di bilancia idrostatica per la determinazione del peso specifico delle sostanze. Nel 1587 enunciò alcuni teoremi relativi al baricentro dei corpi, pubblicati soltanto nel 1638.



Nel 1589 ottenne l'insegnamento di Matemàtica all'università di Pisa. Qui, avendo già esplorato le leggi del péndolo (per le quali si dice che ebbe la sua prima intuizione osservando le oscillazioni di un lampadario pendente dal volto del duomo di Pisa, nel 1583), si applicò nello studio della caduta dei gravi e sulla teorìa dell'ìmpeto.

Tra il 1592 ed il 1610 Galileo fu professore di Matemàtica all'univesità di Padova, dove trovò "*un ambiente vivo e stimolante*", alla quale il governo della Serenissima Repubblica di Venezia assicurava ampia libertà di pensiero.

Si occupò di costruzioni militari, di Topografia, di Fisica; nel 1604 abbozzò, in una lettera

a Paolo Sarpi, la prima sua interpretazione della legge di caduta libera dei gravi.

Dopo aver insegnato Astronomìa secondo le teorìe tolemàiche, nel 1597 indirizzò due lettere, una delle quali a Kepléro, dove dichiarò d'essere giunto all'adesione alle teorìe di Copérnico; sostenne anche di avere elementi in grado di dimostrare la validità di questa interpretazione, senza però farne cenno, probabilmente perché temeva reazioni a proprio danno da parte delle autorità scientifiche e, soprattutto, ecclesiastiche, potenti anche nella libera Venezia.

Fu nel 1604 che, per la prima volta, Galileo dichiarò pubblicamente la validità delle teorie eliocentriche, in occasione di tre lezioni dove spiegò la sua interpretazione della comparsa di una nuova stella, scontrandosi, come sempre aveva temuto, con gli ambienti scientifici più conservatori. Quando venne a sapere dell'invenzione del cannocchiale, ad opera di due occhialai olandesi, si applicò a questo nuovo congegno costruendone un modello in grado di raggiungere 32 ingrandimenti. Con questo, nel 1610, iniziò sistematiche osservazioni astronòmiche con le quali scoprì le catene montuose della Luna, i quattro satelliti di Giove, la via Lattea, le fasi di Venere. Nel frattempo costruì egli stesso quasi cento telescopi per poter, con la loro véndita, racimolare qualche guadagno; uno di essi venne usato dallo stesso Kepléro.

Nel marzo del 1610 pubblicò il trattato "*Sidereus nuncius*" , con il quale, annunciando le proprie scoperte, demoliva la teoria aristotélica geocentrica.

Cosimo II de'Médici, in onore del quale Galileo aveva chiamato i satelliti di Giove '*Medicéi*', lo volle a Firenze nominandolo '*Primario matematico e filosofo*'.

A dispetto della recente approvazione papale delle scoperte di Copérnico, nel 1616 il Papa vietò a Galileo Galilei di procedere nell'insegnamento della sua teoria ed egli promise di obbedire, ma sette anni di silenzio a Firenze furono tutto ciò che riuscì a sopportare e gradualmente tornò ad insegnare e scrivere nonostante l'accusa di eresìa.

Nel 1632 la pubblicazione fiorentina del suo "*Dialoghi sopra i due massimi sistemi del mondo*" fu acclamàta in tutta Europa. In esso Galileo mise a confronto diretto le due teorie, aristotélica e copérnicana, dimostrando la validità di quest'ultima; il suo trattato divenne un vero e proprio manifesto di conferma aperta del lavoro di Copérnico.

L'òpera ben presto scatenò la reazione della chiesa di Roma, che ne vietò la diffusione e la lettura.

La Santa Inquisizione convocò lo scienziato a Roma, dove giunse nel febbraio del 1633, subendo l'accusa di essersi reso "*veementemente sospetto d'heresìa, ciè d'aver tenuto e creduto dottrina falsa e contraria alle sacre e Divine Scritture, ch'l Sole sìa il centro della Terra e che non si muova da oriente ad occidente, e che la terra si muova e non sìa centro del mondo*".

Fu così costretto a ritrattare pubblicamente le sue scoperte. Condannàto al carcere a vita ottenne la conversione prima nell'isolamento assoluto, presso il vescovo Piccolòmini, e poi nella sua villa ad Arcetri dove morì nel 1642.

Soltanto nel 1638 la sua ultima e riassuntiva opera "*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*" fu pubblicata in Olanda, a Leida, ed ebbe enorme successo in tutta Europa, trattando però non tanto di Astronomìa, che resta documentata nel precedente lavoro, bensì di resistenza dei materiali e di Dinàmica.

Nel 1640 pubblicò un ultimo lavoro sulla luce lunare "*Sopra il candore della luna*', che ebbe anch'esso molto séguito e fu in particolare oggetto di attenzione da parte dell'abate, e suo allievo prediletto, Benedetto Castelli in occasione dei suoi studi sulla variazione della luce cinérea, dei quali diremo più avanti.

Le scoperte di Galileo Galilei più rilevanti per questa Storia dell'Idraulica sono nel campo della Meccànica, più specificatamente nella Cinemàtica, per aver risolto, qualitativamente, il moto dei corpi soggetti ad un'accelerazione uniforme, cioè in caduta libera o che scorrono su un

piano inclinàto: in tutti e due i casi l'accelerazione costante alla quale sono sottoposti è l'accelerazione di gravità; caso in cui Galileo parla, per questo, di *movimento naturale*.

Così leggiamo nel "*Dialoghi sopra i due massimi sistemi del mondo*":

"*Le distanze coperte nel movimento naturale sono proporzionali al quadrato del tempo della caduta*."

Oggi noi sappiamo che la relazione che lega lo spazio percorso ed il tempo, nel caso di moto uniformemente accelerato, è:

$$S = \frac{1}{2} a\, t^2$$

Lo spazio 'S', cioè, è proporzionale al quadrato del tempo 't' secondo il fattore di proprozionalità $\frac{a}{2}$, dove 'a' è l'accelerazione uniforme che, in questo caso, sarebbe più corretto indicare con 'g', sìmbolo universale dell'accelerazione di gravità.

Galileo Galilei, però, nulla dice su questo fattore di proporzionalità costituìto dalla metà del valore dell'accelerazione; nonostante questa mancanza, potè affermare d'aver dimostrato che la velocità di caduta di corpi, seppure di diverso peso, era uguale se non si considerava l'influenza del mezzo nel quale essi si muovono.

Nell'aria, cioè, una piuma e una sfera di metallo, cadendo dalla stessa altezza, raggiungono il suolo in tempi diversi soltanto a causa della resistenza dell'aria; nel vuoto questa differenza scompare.

Dalle osservazioni sul moto in caduta libera e lungo piani inclinàti, Galileo, esaminando il moto di un proiettile, scrive nel suo libro, già ricordàto, '*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*":

". . . *Un proiettile, animàto dal movimento composto di movimento uniforme orizzontale e naturalmente accelerato verso il basso, descriverà* [, nel suo percorso, ndr] *una parabola.*"

L'aspetto sorprendente del lavoro di Galileo è che nonostante il suo stretto contatto con Kepléro, in materia di accelerazione di gravità e di moto planetario - che Isaac Newton fu più tardi capace di esplicitare con completezza - non vi è traccia di un altrettanto mutuo scambio di idee su tutte le altre e ben più definitìve scoperte di entrambi, come se, su questi argomenti, si ignorassero vicendevolmente.

Nonostante il lavoro "*Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua o che in quella si muovono*.", contenente alcune considerazioni di Idrostàtica, accanto ad una prevalenza di considerazioni volte alla riabilitazione degli studi di Archiméde e quindi che colgono l'occasione di un altro scossone alla 'fortezza scolastica/aristotélica', i contributi di Galileo all'Idraulica furono indiretti, perché compiuti nel campo della Fisica e della Meccànica, strumenti necessari al discernimento, ma non elementi propri della scienza dei fluidi.

Attraverso i suoi esperimenti con i corpi in caduta e con il péndolo, egli dimostrò non soltanto che questi due moti erano ostacolàti dall'attrito dell'aria ma anche che tale resistenza cresceva sia con la velocità del corpo che con la densità del fluido attraversato.

Galileo Galilei sembra aver considerato sìmili il fenòmeno della corrente in un fiume o in un canale e la corsa di un corpo lungo un piano inclinàto. L'analogìa con quanto osservava nel caso del piano inclinàto gli fece così concludere che la velocità della corrente non dipendesse anche

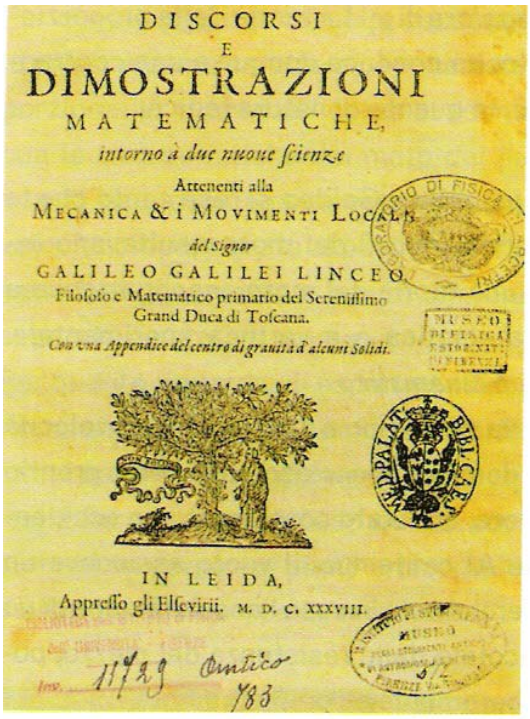
dalla lunghezza del percorso; da qui trasse la conseguenza, erràta, che non portasse alcun l'effetto il raddrizzare il corso dei fiumi.

Nel "*Dialoghi sopra i due massimi sistemi del mondo*", Galileo diede una pertinente revisione dell'aristotélico rifiuto del vuoto. Descrivendo per la prima volta un fenomeno evidente nell'osservazione del funzionamento delle pompe aspiranti; usando le sue parole, ecco la sua sorpresa suscitata dal fatto che una pompa aspirante non potesse sollevare acqua neppure per " . . *una altezza di un capello sopra i diciotto cùbiti* [circa otto metri,ndr] . . .". ; tuttavia poi accettò questa situazione così ragionando:

". . . . . *non è questa cosa che è attratta nella pompa una colonna d' acqua attaccata all'estremità superiore e strappata più e più volte sino al punto finale che è raggiunto quando si rompe, come una corda, in acconto del suo eccessivo peso?. . . questa fissata elevazione di 18 cùbiti è vera per ogni quantità di acqua, qualsiasi essere la pompa grande o piccola e anche stretta o larga. Noi possiamo senz'altro dire che sul peso che l'acqua contiene in un tubo di 18 cubiti, non importa quale sìa il diametro, noi otterremo il valore della resistenza del vuoto in un cilindro di ogni solido materiale avente una bocca di questo diametro.*"

La conclusione di Galileo, quasi nascosta, fu evidentemente che la 'ripugnanza aristotélica' della Natura per il vuoto aveva ormai un lìmite certo e definibile.

Un grande mérito da riconoscere a Galileo, che va anche al di là di ogni sua scoperta e che raramente è sottolineàto in modo adeguàto, è quello di avere adattato il linguaggio a seconda dell'obiettivo che egli si prefiggeva. In latino, infatti, sono composti i documenti che Galileo riteneva di assoluto valore scientifico, destinàti ad essere comunicàti al mondo scientifico ufficiale.


DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuoue scienze
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI,
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filosofo e Matematico primario del Serenissimo
Grand Duca di Toscana.
Con vna Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi.
IN LEIDA,
Appresso gli Elsevirii. M. D. C. XXXVIII.

L'italiano venne da Galileo considerato non solo "*bastevole a trattare e spiegar e' concetti di tutte le facultadi*" ma anche valido strumento di diffusione della conoscenza delle nuove conquiste scientifiche e della nuova concezione del mondo.

Galileo potè così rivolgersi ad un pubblico ben più ampio, conducendo una personale 'battaglia culturale' a vantaggio di strati della popolazione sino a quel momento sostanzialmente tenuti all'oscuro da ogni progresso del sapere, ponendosi così, forse per la prima volta, il problema dell'accessibilità del pensiero scientifico.

Il periodo compreso tra la giovinezza di Leonardo e la morte di Galileo, circa due sécoli, vide il passaggio definitivo della Meccànica dalla Metafisica alla Fisica e, più in generale, l'affermarsi del método sperimentale.

Poiché i necessarî strumenti analitici non erano àncora disponibili tale importante progresso rimase ampiamente di natura empìrica; ma il recupero della fiducia nel potere della ragione e la coscienza della necessità delle osservazioni sperimentali furono indubbiamente il salutare viàtico per gli sviluppi post-rinascimentali.

L'Idraulica stessa, dipendente dalla Fisica e dalla Meccànica, ma bisognosa della interpretazione della sua 'continuità' attraverso un adeguàto e sofisticato linguaggio matematico, segnò giocoforza il passo.

Ciononostante, Leonardo, Copérnico, Benedetti, Stevin, Kepléro, Galileo Galilei, compirono passi di grandissima importanza, non solo per l'Idraulica.

Vedremo, nel prossimo Capitolo, la nàscita di un nuovo modo di 'fare scienza', attraverso processi di diffusione e di confronto delle idee, delle informazioni e delle esperienze, che consentìrono di superare sistematicamente l'isolamento di cui spesso, sino ad ora, avevano sofferto molti scienziati e, con essi, il progresso dell'umanità.

* * *

Cap. 8 - Le Accadémie e la Comunità Scientifica

Akadémeia era la località, nei pressi di Atene, dove il filosofo greco Platone (Atene 428 – 347 a.C.) si stabilì, dopo che il tiranno Dionisio il Vecchio lo ebbe allontanàto da Siracusa. In quel luogo egli fondò la propria scuola che chiamò, così, '*Accadémia*', che, successivamente, fu trasferìta ad Atene, mantenendo questo nome che divenne un nuovo término del vocabolario di tutte le lingue del mondo.

L' *Accademia Platònica* fu attiva sino al 529 d.C., quando fu sciolta dall'imperatore bizantino Giustiniano; i suoi membri, lo abbiamo visto nel Capitolo 5, andarono ad ingrossare le fila delle menti di Persia.

Luoghi di incontro e confronto tra uomini di cultura, dèditi alle arti del sapere, spesso con prevalenza per quelle umanistiche, le Accadémie ricomparvero, con tali término e scopi, nel XV sécolo in Italia, dove sorsero numerose.

La prima tra queste, l'Accadémia Platònica Fiorentina si formò a séguito del Concilio convocato in quella città nel 1439, per realizzare l'unione delle chiese cristiane greca e latina. Nella villa di Marsilio Ficino, a Careggi, si raccolsero i migliori umanisti fiorentini profondamente colpìti dalla tradizione classica greca, soprattutto ad òpera di Gemisto Pletone, convenuto per il Concilio. Il sospetto di aver dato appoggio ad una congiura contro la famigla Médici decretò la fine di questo istituto nel 1522.

In Italia, nel campo letterario nacque a Firenze l' *Accadémia della Crusca*, nel 1583, che si adoperò a difesa della lingua volgare fiorentina, che mosse i primi passi nel Trecento, e che produsse, a Venezia nel 1612, il '*Vocabolario degli Accademici della Crusca*', primo dizionario della lingua italiana.

Nel 1603 nacque a Roma la più antica Accadémia scientifica italiana e, in assoluto, la prima Accadémia scientifica moderna: l' *Accadémia dei Lincei* - tra i cui soci si annòvera anche Galileo Galilei - che si propose di rinnovare il sapere scientifico su basi di ricerca e sperimentazione, rigettando ogni riferimento al soprannaturale ed alle dottrine aristotéliche.

L'aggettivo sostantivato '*Lincei*', dovuto ai fondatori, tra i quali Federico Cesi (1586 – 1630) studioso di botànica e di scienze naturali, vuole riferirsi all'acutissima vista della lince, che compare nel simbolo dell'istituto, figurando la volontà di indagare con acutezza e profondità i segreti della natura, secondo una osservazione libera da qualsivoglia preconcetto o condizionamento. Trapéla evidente l'anélito ad una società nuova, dove il sapere scientifico si liberi dagli ambienti conservatori delle scuole e delle università, sìa svincolàto dalle ragioni e dalle pressioni del contrasto politico, confessionale, econòmico, e contribuisca concretamente al cambiamento

radicàle della società. In questa impostazione non manca il contributo, o la reciproca influenza, del pensiero di Francis Bacon, personaggio che incontreremo tra poco, la cui ammissione all'*Accadémia dei Lincei* fu proposta, senza ésito, nel 1625.

Vittima dell'aridimento della ricerca scientifica italiana nel XVII sécolo, l'*Accadémia dei Lincei*, come altre ad essa contemporanee, ebbe vita breve, sciogliendosi già nel 1630 alla morte del suo fondatore Federico Cesi; riprese poi l'attività a Rìmini ma per soli dieci anni, tra il 1745 ed il 1755; infine ottenne una stabile esistenza a Roma, dove venne rifondata nel 1801 con il nome *Accadémia dei Nuovi Lincei*.

Tra le molte Accadémie sorte e brevemente vissute nel Seicento italiano non si può non citare l'*Accadémia del Cimento*, istituita da Leopoldo de' Mèdici nel 1657, su suggerimento di alcuni allievi di Galileo Galilei, tra i quali il Vincenzo Viviani (Firenze 1622 – 1703), fisico e matematico. Con sede a Palazzo Pitti, il suo motto era '*provando e riprovando*'; come embléma fu scelta l'immagine di tre crogiuoli con il fuoco acceso, a simboleggiare la centralità del metodo sperimentale. Durò soltanto dieci anni, tanti quanti ad essa dedicò attenzione e risorse economiche la famiglia medìcea. Grazie all'ottima dotazione di attrezzature, i suoi iscritti condussero numerosi esperimenti di fisica, rigorosamente analizzati e descritti nelle *Memorie*, nelle quali si cercò di utilizzare uno stile chiaro, vivace ed accattivante, alla ricerca del massimo potere divulgativo, continuando così l'originale attenzione di Galileo Galilei ad avvicinare un pubblico sempre più vasto. Così il testo che riassunse i dieci anni di attività dell'*Accadémia del Cimento*, '*Saggi di naturali esperienze*', édito del 1667, ebbe ed ha tuttora importanza anche nella storia della letteratura italiana.

L'Italia, dove comparvero le prime Accadémie, ne vide, salve rare eccezioni, anche il repentino declìno e la scomparsa. La crescente esigenza degli studiosi di condividere esperienze e conoscenze, che alimentava l'adesione a queste società, mal si conciliava con la mancanza di una unità nazionale.

Inoltre, un'attenzione al prestigio molto vicina alla vanagloria - che i sovrani di ogni italico stato, ivi conpreso quello Pontificio, dedicàvano a tutto ciò che potesse definirsi con il términe 'Accadémia' - portò alla generazione di sodalizi d'ogni tipo, spesso inconsistenti, di scarso valore ed anche dalla breve vita.

Non così avvenne nelle nazioni già identificate nell'unità del proprio territorio, all'inizio in Francia ed in Inghilterra.

In Francia il precursore dei sodalizi culturali tra ricercatori, dotti e scienziati fu Marin Mersénne (Oizé 1588 – Parigi 1648), scienziato e filosofo francese. Educàto nel collegio dei Gesuìti di La Flèche, fu Abate dell'ordine mendicante francescano dei '*Minimi*', fondato nel 1435 da S. Francesco di Paola.

Mersénne condusse studi di Idrostatica e di Idrodinàmica (problema dell'efflusso) ma il suo più grande mérito fu l'aver intessuto costanti e frequenti contatti epistolari con gli scienziati del tempo, presenti in ogni paese europeo, diventando egli stesso centro di collegamento e di scambio di informazioni e di comunicazione nella ricerca scientifica.

Non appena giungeva alla conoscenza di una novità, il frate francescano si preoccupava di renderla nota a tutti i suoi corrispondenti, che chiamava '*La Repubblica delle Lettere*'. Non solo: presso il convento '*Dell'Annunciata*', a Parigi, Marin Mersénne convocava periòdiche riunioni di studiosi e ricercatori, ai quali sottoponeva i nuovi problemi e dai quali otteneva notizie ed informazioni che poi metteva in circolazione in ogni parte d'Europa dove vi fosse un suo contatto.

Si sviluppavano così, a Parigi, le prime esperienze scientifiche sull'importanza della comunicazione e del confronto, ponendo le basi per la costituizione della *Académie Française*.

Mersénne diede un importante contributo alla divulgazione delle òpere di Galileo Galilei, traducendole, diffondendole e schierandosi a loro difesa nei momenti più difficili del contrasto con la cultura scolastica/ecclesiale. Con il dichiaràto obiettivo di difendere l'essenza della religione cristiana, sostenne l'importanza dell'esperienza quale punto di partenza della scienza che, a sua volta, non ne può mai confutare la realtà.

La fitta corrispondenza e l'appassionàta partecipazione alle riunioni presso il Convento '*Dell'Annunciata*' furono la manifestazione della diffusa esigenza dei ricercatori del tempo di condividere le conoscenze e le esperienze nelle rispettive attività di ricerca.

Mentre i pochi studiosi del Cinquecento dovevano competere con un potere conservatore che li opprimeva, consumando energie per demolirne le posizioni preconcette, coloro che operarono nel sécolo successivo poterono giovarsi del risultato di questo faticoso lavoro di liberazione dai legacci culturali di regìme, godendo di una libertà intellettuale che, in Francia, era sostenuta dallo stesso potere centrale.

Sull'esempio dell'*Accadémia della Crusca* nacque così l'*Académie Française*, voluta dal Cardinale Richelieu nel 1635 allo scopo di tutelare e codificare la lingua francese, operandone una completa riforma, iniziata nel 1639 e conclusasi, con la produzione del primo *Dizionario*, nel 1694.

Voluta dal potere reale, del quale il Richelieu era espressione, nel solo indirizzo letterario l' *Académie Française* fu dallo stesso potere rifondata nel 1666, ad òpera di Jean Baptise Colbert (Reims 1619 – Parigi 1683), Segretario di Stato del re Luigi XIV, nel nome di *Académie royale des scienses*.

La nuova entità fu dotata di un'organizzazione gerarchica, articolata in specifiche discipline, sìa umanistiche che scientifiche; iniziò così ad accogliere, tra gli Accadémici, scienziati e ricercatori, non più soltanto filosofi e letterati. L'*Académie* subiva, a differenza della *Royal Society* inglese, l'essere soggetta direttamente al potere reale che l'aveva voluta, al punto che uno dei suoi più illustri iscritti, il fisico olandese Christiaan Huygens, del quale parleremo più avanti, la abbandonò, dopo vent'anni di attiva partecipazione, lasciando Parigi, poiché non più poteva tollerare l'ingerenza del potere assoluto ed onnipresente di Luigi XIV, il Re Sole.

L'immanente presenza del potere reale nelle attività dell'*Accadémie* aveva, quantunque, anche aspetti positivi, concretizzandosi nella notevole disponibilità di mezzi, messi a disposizione dalle pubbliche finanze, che permisero – ad esempio – di realizzare un grande Osservatorio Astronòmico, assai ben attrezzato, dove poter condurre osservazioni di Astronomìa ed esperimenti di Fisica. L'Osservatorio attirò anche studiosi stranieri, tra i quali l'astrònomo italiano Giovanni Domenico Cassini (Perinaldo, Imperia 1625 – Parigi 1712), scopritore dei satelliti di Saturno, che ne divenne direttore dal 1699 sino alla morte.

Gli Accadémici della *Académie royale des scienses*, limitàti al numero di quaranta, di nòmina reale, potevano ricevere incarichi e commissioni dal governo del Re ed avevano accesso alla corte del Re Sole, vero ed ùnico centro di potere nella Francia pre-rivoluzionaria.

L'*Académie royale des scienses* scomparve bruscamente nel 1793, con la Rivoluzione Francese, per poi ricomparire, nel 1803, come sezione dell'*Institut de France*. Riprese poi nome e còmpiti originali con la Restaurazione post-napoleonica, sopravvivendo, in ottima salute, sino ad oggi.

In Francia sorse, nello stesso periodo, un istituto assai particolare, primo e forse ùnico in quei tempi, in tutto differente dallo schema dell'Accadémia, perché indirizzato alla sola attività scolastica, all'insegnamento, dal quale, però, giunsero anche contributi importanti ai progressi nella scienza e nella tecnica: la *Ecole des Ponts e Chaussées* di Parigi.

Già con le riforme seicentesche di Jean Baptise Colbert crebbe in Francia una nuova categoria di professionisti, tecnici e scienziati, chiamati all'intensa attività di costruzione e ricostruzione; Colbert fu certo stimolàto, nel promuovere l'istituzione di scuole di alta specializzazione, dalla disastrosa esperienza dell'emorraggìa di menti che aveva prodotto la persecuzione degli Ugonotti, protestanti, nel cattolico regno di Francia.

Le premesse erano favorevoli a re Luigi XV nel sentìre l'esigenza di dare al regno una scuola che preparasse in modo orgànico e completo i costruttori del futuro; il 14 luglio 1747, il monarca firmò l'atto di costituzione della *Ecole*.

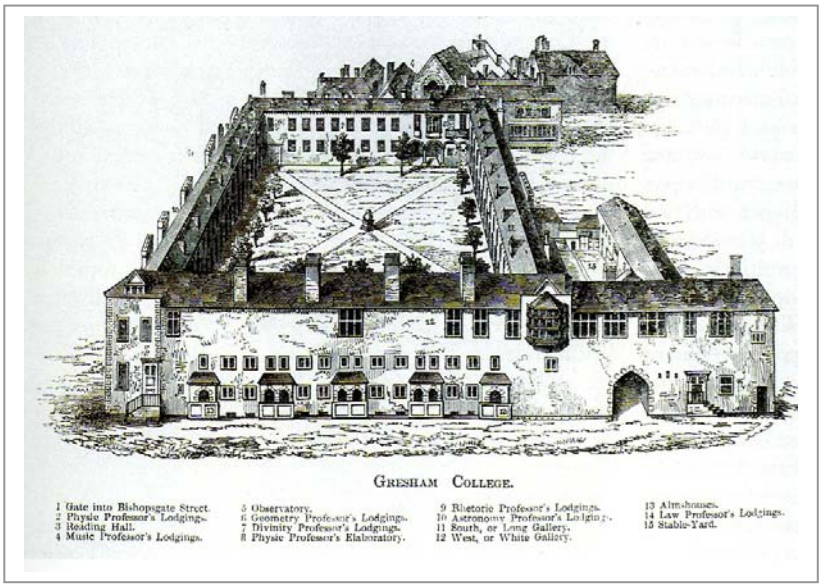
Nel 1794 ne fu Direttore Jean Rodolphe Perronet che ne operò la riorganizzazione, avviando i cinquanta allievi iscritti in ogni corso non solo ad assimilare le scienze che producevano pratiche applicazioni, ivi compresa l'Idraulica, ma anche a collaborare 'sul campo' alle stesse realizzazioni, impegnandoli a svolgere attività nei numerosi cantieri e nei territorî dove effettuare le misurazioni ed i rilievi per nuove costruzioni e studi.

L'aspetto teorico-pratico della didattica produsse risultàti assai vàlidi anche nel campo della ricerca, come si evince, in questo testo, quando sono citati studenti e professori della *Ecole*, istituto che ancòr oggi svolge la sua importante funzione. Da questa prima esperienza e sulla scorta del crescente scambio di informazioni tra i diversi paesi, sòrsero ben presto numerose scuole specialistiche in molti campi della tecnologìa e della tecnica.

Nell'ambiente culturale inglese, alla metà del Seicento, erano sorte numerose iniziative scientifiche e filosofiche, in contrasto, più o meno aperto, con le Università, sedi della cultura dominante, ancòra assai permeàta dai vìncoli della Scolastica e dagli influssi, pertanto, del potere religioso e politico.

Tra le iniziative di maggior rilievo spicca la fondazione del *Gresham College* ad òpera del finanziere inglese ed agente della Corona ad Anversa, sir Thomas Gresham (Londra 1519 – 1579).

Il *Gresham College* era una sorta di Università privata, parallella alle più blasonate di Oxford e di Cambridge, rivolta alle nuove leve dei ceti che stavano accrescendo la propria influenza nella società inglese: la borghesìa mercantile e gli artigiani.



L'insegnamento, in questa nuova scuola, non si limitava alle discipline umanistiche, come avveniva nelle Università, ma spaziava in molte altre scienze, con particolare riguardo agli aspetti dell'immediata applicazione pratica.

Nel *Gresham College*, cioè, trovava concretizzazione il pensiero di Francis Bacon (Londra 1561 – 1626), filosofo e uomo di stato inglese, che considerava il sapere dell'umanità patrimonio di tutti e di ciascuno, la cui diffusione contribuiva alla nobile missione di migliorare la condizione sociale di ogni cittadino.

Francis Bacon, barône di Verulàmio e visconte di Sant'Albano, nel suo trattato "*New Atlantis*", pubblicato nel 1626 poco dopo la sua morte, immaginava il sorgere di una nuova istituzione, la '*Casa di Salomone*', organizzazione finanziata con denaro pubblico, il cui scopo fosse di condurre studi e ricerche sul mondo naturale, contemplando ogni tipo di indagine scientifica, ed i cui membri agissero in perfetto coordinamento, ciascuno secondo le proprie capacità e competenze.

Ecco un suo passo, tratto da "*Redargutio philosophiarum*":

" . . . *Non rivolgiamo il nostro animo verso la gloria di fondare una setta, ma occupiamoci responsabilmente della utilità e grandezza degli uomini . . . . che nàscano cioè invenzioni salutari ed ùtili, capàci di vincere ed alleviare – per quanto possibile – i bisogni del genere umano*."

In quel periodo, un gruppo di scienziati naturalisti, tra i quali Robert Boyle (Lismore Castle 1627 – Londra 1691), iniziarono a tenere periòdiche riunioni al *Gresham College*, aperto non solo all'insegnameno ma anche al *libero pensiero*, ispiràti dai princìpî di Francis Bacon. Gli incontri vertevano su ogni questione fosse posta dai partecipanti, senza alcuna formalizzazione o produzione di documenti collegiali, tant'è che questo sodalizio culturale era chiamato *Invisible College*.

Il 15 luglio 1662, dopo due anni di lavoro, Carlo II Stuart, re di Inghilterra e di Scozia, concesse il riconoscimento reale al sodalizio, che nacque con il titolo di *Royal Society*.

Al di là della prerogativa di nominarne il Presidente, la Corona inglese non si riservò altro potere di ingerenza nelle attività della società, che potè così agìre in piena autonomìa, anche economica, cosa che procurò – per contro - non poche difficoltà nel reperìre i necessarî finanziamenti.

I tempi erano quantomai maturi per alimentare questa nuovo modo di condurre la ricerca in forma collettiva. Ormai i princìpi meccanicistici del cartesianesimo imperàvano nell'Europa del XVII sècolo, stimolando la ricerca in ogni direzione, nella convinzione che tutto avesse una spiegazione e quindi ogni fenomeno fosse degno d'essere indagato.

Inoltre, il meccanicismo Seicentesco, quantunque non negasse l'esistenza di Dio, riuscì ad evitare d'essere coinvolto nelle contese religiose che, in quel periodo, generavano gravissimi conflitti tra popoli e tra confessioni.

La conciliazione tra meccanicismo ed affermazione dell'esistenza di Dio è tanto ben illustrata in una notazione del medico-naturalista inglese Nehemiah Grew (Coventry 1641 – Londra 1712) che giova ricordare:

[Non penso] . . . *che vi sia contraddizione alcuna quando la Filosofia insegna essere fatto dalla Natura ciò che la Religione e le Sacre Scritture ci insegnano essere fatto da Dio; non maggior contraddizione che il dire che il bilancere di un orologio è mosso dall'ingranaggio successivo, significhi negare che l'ingranaggio e il resto siano mossi dalla molla; e che la molla e tutte le altre parti siano fatte muovere insieme dal costruttore loro. Così Dio può veracemente essere causa di questo effetto, anche se si può supporre che intervengano migliaia di altre cause;*

poiché la natura tutta è come una grande Macchina, fatta dalle Sue Mani e tenuta in esse. (da *Anatomy of Plants* – 1682).

In tali prospettive di pensiero mosse i primi passi la *Royal Society* procedendo anche alla pubblicazione della prima rivista periodica europea: *Philosophical Transactions*.

La *Royal Society*, caratterizzata da una maggior apertura verso chiunque meritasse la considerazione per il valore delle sue ricerche, a differenza della rigida limitazione reale imposta alla *Académie royale des scienses*, accoglieva tra le fila dei suoi soci (*fellows*) studiosi, anche non inglesi, di ogni disciplina, che potevano illustrare i proprî lavori senza condizionamento alcuno.

L'essere accolto tra i *fellows* non fu l'ùnico prestigio offerto dalla Royal Society, che promosse, con regolarità, competizioni scientifiche su temi prefissati ed istituì premi per i lavori che emergessero per eccellenza.

L'indipendenza da qualsivoglia potere 'esterno' nell'accoglienza di un nuovo f*ellow* assicurò l'obiettiva e l'autònoma selezione delle candidature, a garanzìa dei livelli di qualità degli ammessi.

L'iniziativa di assegnare premi e promuovere competizioni nel campo della ricerca, soprattutto scientifica, si diffuse ben presto in tutte le istituzioni simili europee.

La *Académie royale des scienses* e la *Royal Society*, iniziarono ad intéssere strettissimi e costanti rapporti: ciò che avvenìva a Parigi era immediatamente comunicato a Londra e viceversa, cogliendo ogni occasione di analisi, critica, progresso, correzione, in una stagione di felice confronto non offuscato, almeno inizialmente, da gelosìe o campanilismi.

In séguito i canali di comunicazione si estesero, formando un sistematico collegamento con tutte le principali Accadémie d'Europa, attraverso la pubblicazione e la diffusione di riviste, saggi, trattati, che così viaggiavano nel continente con crescente rapidità, alimentando il fuoco della curiosità scientifica, sempre più attratta dalla visione meccanicistica di un universo interamente esplorabile ma ancòra in gran parte sconosciuto.

Alla fine del XVII sécolo molte Accadémie videro la luce, spesso su iniziativa di singoli scienziati che ne intuivano la potenza nella comunione delle menti; citiamo l' Accadémia '*Socìetas Regia Scientiarum*', fondata nel 1700 a Berlino ad òpera di Gottfried Wilhelm Leibniz (che in questa Storia giungerà tra poche pagine), poi riorganizzata, nel 1746, dal francese Pierre Louis de Maupertuis (1698 – 1759) in *Koniglische Preussische Akademie der Wisseschaften* (Accademia Reale Prussiana delle Scienze) su modello della *Académie royale des scienses*. Attraverso la più importante Accadémia tedesca, dove il francese era la lingua ufficiale, iniziò un periodo di grande influenza della cultura parigina nell'area germanica.

Molti illustri menti passarono per l'Accademia Reale Prussiana delle Scienze, tra i quali, citando coloro che tra poco compariranno in questa Storia: Jean I Bernoulli, Leonhard Euler, Giuseppe Luigi Lagrange. Oggi troviamo questa illustre istituzione, risorta nel 1946 sulle ceneri dell'ultima umana apocalisse in Terra, con il titolo *Deutsche Akademie zu Berlin*.

Abbiamo citato le poche e più importanti Accadémie nate nel periodo iniziale, nella consapevolezza d'aver fatto qualche torto; gli esempi, certamente più eclatanti ma non più importanti di altri, sono servìti per descrivere sommariamente questo nuovo fenomeno che, d'ora in poi, troverà molti richiami nel racconto.

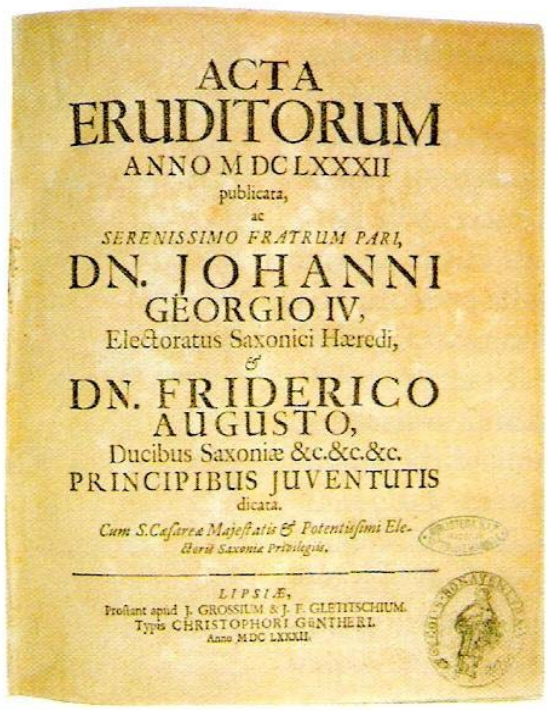
Nelle Accadémie maturarono i principali progressi delle scienze e verso quegli ambienti, quali api al fiore, tendevano coloro che esploravano con successo i segreti della conoscenza, la cui

ampiezza rendeva ormai indispensabile il lavoro del gruppo, la reciproca comunicazione, per condurre ogni esplorazione, partendo dalla méta già da altri raggiunta e così proseguire senza inutili fatiche già da altri sofferte.

Al fianco delle Accadémie si sviluppò, nel XVII sécolo, un altro potentissimo sistema di comunicazione: la rivista scientifica, spesso legàta alle stesse società di scienza delle quali fungevano da rendiconto delle attività in esse realizzate.

Era questo il caso della già ricordata '*Philosophical Transaction of the Royal Society*' e della '*Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*'.

Tra le periòdiche pubblicazioni scientifiche, non collegate ad Accadémie o società di scienza, spicca la rivista '*Acta Eruditorum*', fondata, nel 1682, e pubblicata a Lipsia su iniziativa di Otto Menke, professore di Filosofìa e Morale Politica della locale università.


ACTA
ERUDITORUM
ANNO M DC LXXXII
publicata,
ac
SERENISSIMO FRATRUM PARI,
DN. JOHANNI
GEORGIO IV,
Electoratus Saxonici Hæredi,
&
DN. FRIDERICO
AUGUSTO,
Ducibus Saxoniæ &c.&c.&c.
PRINCIPIBUS JUVENTUTIS
dicata.
Cum S.Cæsareæ Majestatis & Potentissimi Electoris Saxoniæ Privilegiis.
LIPSIÆ,
Prostant apud J. GROSSIUM & J. F. GLEITSCHIUM.
Typis CHRISTOPHORI GÜNTHERI.
Anno MDC LXXXII.

Avviàta come raccolta di recensioni dei libri pubblicàti in Europa, questa pubblicazione periòdica subì una ràpida evoluzione, diventando luogo privilegiato per la pubblicazione, e conseguente diffusione, delle più moderne ed importanti ricerche; divenne, cioè, forse la più importante rivista scientifica del tempo.

In essa comparirono i lavori di molte menti eccelse tra i quali: Leibniz, Newton, i Bernoulli, de l'Hòpital, Varignon . . .

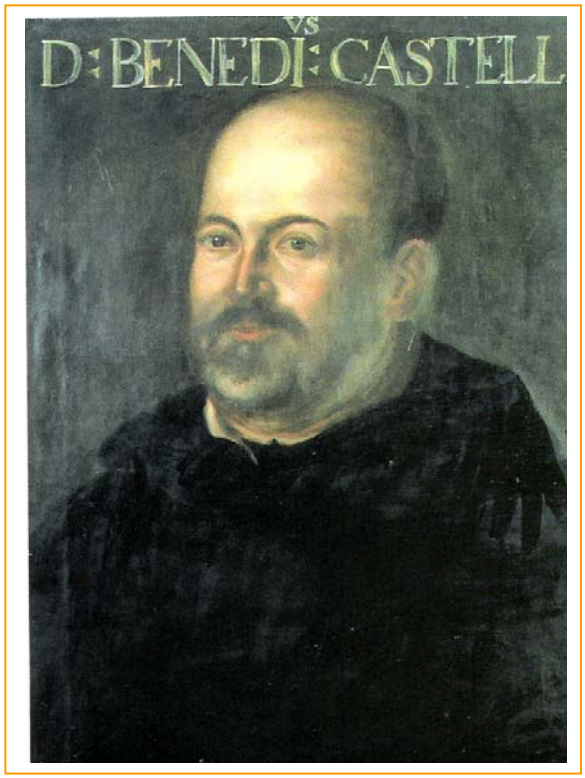
Collaborazione, confronto non disgiunto da sana competizione, comunicazione, informazione, . . . la Scienza tutta conobbe, nel Seicento, una nuova dimensione collettiva, nella quale la diffusione della conoscenza e delle scoperte, anche grazie alle riviste periòdiche, cominciò a muòversi con velocità sino ad allora inimmaginàbili

Senza attendere la pubblicazione di ponderosi volumi, esplicativi dell'integrale pensiero dello scienziato, la più àgile rivista permetteva infatti di pubblicare e diffondere, con immediatezza e grande rapidità, il risultato, anche parziale, di ogni piccolo passo compiuto, rendendo tutti partécipi, protagonisti e responsabili di un lavoro collettivo; stava, in sostanza, nascendo una nuova realtà: la Comunità Scientifica.

* * *

Cap. 9 Il Seicento: prime certezze e nuove frontiere

In Italia, tra il Cinquecento ed il Seicento, attorno al movimento scientifico/culturale che nacque dal lavoro di Galileo Galilei, si può individuare una 'Scuola Italiana di Idraulica', che, nella sua pur breve vita, fu il principale riferimento per gli studiosi d'Europa, molti dei quali ebbero la possibilità di frequentare quell'ambiente, arricchendo la propria esperienza.



In questa 'scuola' troviamo uno dei più prestigiosi allievi di Galileo, che poi fu il suo più vàlido collaboratore: Benedetto Castelli (Brescia 1577 – Roma 1644).

Nato a Brescia, entrò nell'ordine dei Benedettini e insegnò Matemàtica a Pisa ed a Roma.

Il suo maggior lavoro fu il libro "*Della misura delle acque correnti*.", pubblicato nel 1628.

Quest'òpera gli valse il riconoscimento più prestigioso: Benedetto Castelli è considerato il 'padre' della scienza Idraulica.

Il libro contiene le seguenti tre proposizioni:

1. *Sezioni dello stesso fiume portano uguali quantità di acqua nell'eguale tempo, anche se le sezioni stesse sono differenti.*

2. *Date due sezioni di un fiume, la misura della portata che passa nella prima sezione rispetto a quella che passa nella seconda è in proporzione alla dimensione della prima e della seconda sezione e della prima e seconda velocità.*

3. *Date due sezioni diverse attraverso le quali passano uguali quantità di acqua, le sezioni sono reciprocamente proporzionali alle rispettive velocità.*

Quali princìpi della legge di continuità, oggi detta '*Prima Legge dell'Idraulica*' ed a quei tempi ben presto chiamata '*Legge del Castelli*', queste proposizioni non contengono nulla che Leonardo da Vinci non avesse già espresso oltre un sécolo prima, a sua volta preceduto di ben quindici sécoli da Erone di Alessandria. Il frate benedettino, però, si trovò nella fortunata situazione di poter diffondere velocemente il proprio lavoro, associando alla scoperta la necessaria comunicazione. L'òpera di Castelli, tradotta ben presto in francese, uscì dai confini italiani, approdando in paesi dove erano singolarmente frequenti i contatti tra i diversi studiosi.

Castelli seppe assimilare il lavoro dei suoi grandi predecessori e nel contempo si trovò nell'ambiente propizio per diventare la fonte originaria di princìpi in realtà non del tutto nuovi; egli proseguì nello studio di altri aspetti dell'Idraulica, ancòra partendo da precedenti risulttai, come, ad esempio, il problema del moto del fluido che esce da un foro posto nella parete verticale di un contenitore, detto *Problema dell'efflusso*, in questo assimilando le considerazioni di Leonardo da Vinci.

Inoltre, lo scienziato bresciano, assieme a Galileo Galilei, condusse molti esperimenti sul galleggiamento dei corpi ed in particolare del ghiaccio; i due scienziati giunsero alla considerazione che il ghiaccio galleggia per causa del suo minor peso rispetto al peso dell'acqua, per unità di

volume (cioè il *Peso Specìfico*, che si misura in peso/volume, cioè, per esempio, in kg/m^3) e non, come sino ad allora si riteneva, a causa della forma che assume sulle acque d'inverno, generalmente in lastre.

Un mérito singolare, poco riconosciuto e completamente originale di Benedetto Castelli fu l'invenzione del *Pluviòmetro*, del quale progettò il protòtipo mentre era residente nel monastero di San Pietro a Perugia, nel 1639.

Castelli fu così il primo a concepìre di misurare la pioggia, in un certo intervallo di tempo, esprimendola con la misura di un'altezza in millimetri d'acqua caduta sul suolo; informazione di base dell'Idrologìa, della quale, a ben maggior ragione, può essere considerato il fondatore. Questa nuova informazione fu utilizzata dal Castelli nello studio del comportamento del lago Trasiméno, in rapporto ai differenti eventi di pioggia.

La grandezza di Benedetto Castelli rende doveroso il ricordare altre sue scoperte, sebbene non collegate all'Idraulica.

Lavorando con Galileo Galilei trovò ed utilizzò il método per osservare l'evoluzione delle macchie solari, tra l'altro dimostrando il moto di rotazione del Sole, projettandone l'immagine su un foglio di carta, metodo ancor oggi utilizzato.

Ancòr più sensazionale, per l'época, è il fatto che Benedetto Castelli giunse per primo ad ipotizzare l'esistenza del continente australe, non ancòra scoperto, studiando la variazione della luce cinérea del disco lunare. Nella fase di '*Luna Nuova*', l'ùnico satellite del nostro pianéta è illuminato da quella parte della luce del Sole riflessa dalla Terra. Partendo dal princìpio che la superficie del mare ha maggiore capacità di riflessione rispetto alle superficî dei continenti, nel suo trattato "*Sopra il candore della luna*', pubblicato nel 1640, Castelli dimostrò che l'osservata variazione della luce della *Luna Nuova*, detta '*cinérea*' perché 'grigiastra', non poteva che essere collegata ad una grande massa terrestre posta nell'emisfero australe: l'Australia, la cui esistenza fu rivelata, con la necessaria certezza, da James Cook soltanto nel 1771.

È ora il tempo di introdurre un altro grande scienziato italiano, dal quale non ebbe impulso soltanto l'Idraulica ma nacque anche un'altra disciplina scientifica: la Meteorologìa.

Evangelista Torricelli (Roma 1608 – Firenze 1647), nato a Roma il 15 ottobre 1608 da Gaspare e Caterina Angetti, originarî di Faenza, si distinse presto per lo straordinario talento matemàtico. Studiò presso i Gesuìti per diventare, poi, allievo e segretario di Benedetto Castelli, quando questi era già titolare della cattedra di Matemàtica all'Università '*La Sapienza*' di Roma.

Lo stesso Castelli ben presto ammìse la superiorità di Torricelli, sìa nell'apprendimento che nelle realizzazioni pratiche.

Nel 1632 Torricelli scrisse la sua prima lettera a Galileo Galilei, con la quale gli esprimeva tutto il suo entusiasmo per il trattato "*Dialoghi sopra i massimi sistemi del mondo*", òpera della quale iniziò un approfondimento che lo portò a generalizzare l'analisi delle trajettorie del proiettile, dimostrando che si potevano tutte descrivere come curve appartenenti alla famiglia delle parabole, che tra loro si differenziavano solo per il diverso valore della velocità iniziale e dell'inclinazione.

Gli studi di Torricelli sul moto dei gravi furono l'argomento principale del trattato "*De motu gravium naturaliter descentium et proiectorum"*, pubblicato nel 1641, dove egli riconosce apertamente il proprio débito nei confronti del "*Dialoghi . . .*" di Galileo. Questo trattato contiene molte dimostrazioni di princìpi fisici, tra i quali che qualsìasi sistema materiale si trova in una posizione stabilmente in equilibrio, cioè tende a tornare spontaneamente nella posizione stessa se da essa mosso, a condizione che in questa posizione il suo baricentro sìa alla quota minima rispetto al centro della Terra: questa osservazione è chiamata oggi *Princìpio di Torricelli*.

Nel "*De motu gravium naturaliter descentium et proiectorum"* Torricelli giunge ad una osservazione che si rivelerà il primo significativo passo verso la corretta interpretazione della legge fisica, già indagata da Leonardo, da Galileo e da Castelli, che governa l'efflusso di un liquido da un serbatojo attraverso un foro nella parete: il '*Problema dell'efflusso*':

"L*e quantità di acqua che scorrono in tempi uguali attraverso un foro praticàto alla base di un recipiente stanno fra loro come le radici quadrate delle altezze del liquido in esso contenuto."*

Nella successiva "*Opera geometrica*", pubblicata nel 1644, nella parte "*De motu aquarum"*, troviamo il passo successivo che costituisce la *Legge di Torricelli*. Dalla proprozionalità tra le rispettive grandezze (radice quadrata delle altezze e velocità di efflusso) Torricelli giunge a dimostrare il legame tra le stesse in ogni caso studiato: la velocità con cui un liquido esce da una foro in un serbatojo è proporzionale alla radice quadrata dell'altezza dell'acqua nel serbatojo stesso rispetto al centro dell'orifizio, detta, *Carico Idraulico*, usualmente indicato con la lettera *h*.

Ecco quindi, per la prima volta, collegàta la portata che esce da un foro in un recipiente e la radice quadrata dell'altezza del livello dell'acqua, nel recipiente stesso, oggi chiamàta *carico idraulico* o *battente*, usualmente indicàto con h. Dalla quantità d'acqua fluìta attraverso un foro, in un tempo fissato – misurata, ad esempio, colmando un contenitore graduato - si può infatti dedurre il valore di velocità del flusso conoscendo l'area del foro stesso (anche se, per l'effetto del restringimento della sezione liquida – fenòmeno codificato da Newton nel 1713 – l'area effettiva di passaggio dell'acqua è minore dell'area del foro).

Usando il metro (*m*) ed il secondo (*s*):

$$Q \text{ (quantità o } portata\text{)} \quad \frac{m^3}{s} \quad = \quad V \text{ (velocità)} \quad \frac{m}{s} \quad \times \quad A \text{ (area del foro) } m^2$$

Il passo è assai importante, perché per la prima volta suggerisce di indagare il fenòmeno dell'acqua in movimento attraverso la relazione tra altezza *h* d'acqua e velocità *V* nella forma:

$$\sqrt{h} \quad \textit{proporzionale alla velocità} \quad V$$

. . . . nonché alla conseguente:

$$h \quad \textit{proporzionale alla velocità al quadrato} \quad V^2$$

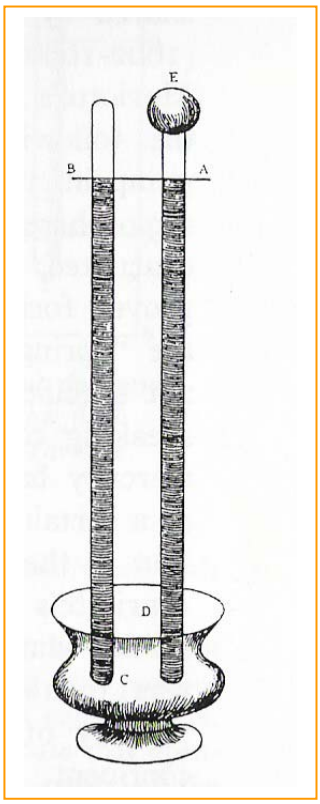
. . . . prospettiva che diverrà, circa cent'anni dopo con Daniel Bernoulli e Lehonard Euler, eco costante nell'Idraulica; ma per giungere a quella conquista il cammino è ancòra lungo.

Evangelista Torricelli però, come fece Galileo per il moto dei gravi (lo abbiamo evidenziato nel Capitolo 7), non riuscì a considerare, nel fenomeno dell'efflusso, alcuna componente legata all'accelerazione di gravità (g), che noi oggi sappiamo partecipare alla determinazione della velocità di efflusso secondo l'espressione: $V = C \cdot \sqrt{2gh}$, dove C è un coefficiente che assume differenti valori a seconda delle diverse situazioni di efflusso.

Non aver introdotto, nel moto dei gravi come nell'efflusso dei fluidi, l'accelerazione di gravità ha impedìto a Galileo Galilei ed ai suoi allievi e successori di valutare i fenòmeni osservàti analizzandone il significato fisico di movimenti provocàti dall'attrazione terrestre; cioè da quell'accelerazione che Isaac Newton, in séguito, dimostrò essere la medésima che muove l'intero universo.

Nei proprî studi, Evangelista Torricelli riconobbe l'interferenza al moto del getto di un fluido causàta dall'aria, osservando che un getto che sgorga dalla base di un bacìno, per quanto grande, se rivolto verso l'alto . . . " . . . *è rotto in minute gocce come una nebbia, e non può salire una metà, forse nemmeno un terzo o una quarta parte della distanza attraverso la quale, parlando teoricamente ed assumendo tutti gli impedimenti al moto rimossi, possiamo aspettarci che esso risalga attraverso la sua originale velocità . . .*"

Evangelista Torricelli si rese conto che l'aria era una sostanza che, come tutte le altre, possiede caratteristiche proprie, in particolare dotata di una tale densità da essere in grado di interagire con gli oggetti ed i fluidi che in essa si muovono. Se l'aria possiede una propria densità è evidente che deve avere un'altra caratteristica, che dalla densità discende: il peso. L'universale fama che Torricelli meritò fu proprio dovuta all'aver dimostrato che l'aria ha un peso proprio, che si manifesta sotto forma di pressione, che potè dimostrare e misurare attraverso uno strumento di sua invenzione: il barómetro. Questa scoperta diede il via ad una nuova scienza: la Meteorologìa, della quale lo scienziato italiano è considerato il fondatore.



La frequentazione dell'ambiente galileiano ha certo favorito Torricelli in questa scoperta, aiutato da osservazioni di altri studiosi di quella scuola, degni di un ricordo: Viviani, Maggiotti e Berti, che furono i primi a fare degli esperimenti sull'argomento.

Tuttavia i risultati furono da Torricelli correttamente interpretàti, come dimostra una sua lettera del 1644 all'amico Ricci; documento che lo accrédita come lo scienziato che completò, in via definitìva, il lungo lavoro di demolizione della nozione aristotelica della non esistenza del vuoto:

" . . . *Abbiamo preso vasi di vetro A e B lunghi due cubiti. Riempiamoli di mercurio e poi, chiudiamo l'estremità con un dito e capovolgiamoli in un recipiente contenente mercurio, sembrerà che comincino a vuotarsi . . . Il livello AD tuttavia rimane sempre pieno sino all'altezza di un cubito ed un quarto ed un pollice in aggiunt . . .*

Questo esperimento è significativo quando il vaso è pieno di mercurio, liquido assai pesante, portato sino al livello AD. La forza che trattiene su il mercurio contro la sua natura di cadere giù è ritenuta fin qui essere una cosa interna al vaso AE, e per essere attribuita al vuoto o a questo materiale (il mercurio) molto rarefatto, ma io ritengo che la forza giunga dall'esterno.

Sulla superficie del liquido che è nel bacino gràvita una massa di aria alta cinque miglia, è così dunque da essere stupefacente se nel vetro EC, dove il mercurio non è attratto né respinto, fino a quando non c'è nulla esso entra

e sale in tale modo sino a che raggiunge un equilibrio con il peso dell'aria che all'esterno preme sul livello del bacino. L'acqua anche, in un similare ma molto più lungo vaso, salirà per almeno otto cubiti che è in proporzione quanto il mercurio pesa più dell'acqua, per ottenere l'equilibrio con la stessa forza che preme ugualmente."

Applicando tale fenomeno al funzionamento delle pompe aspiranti, Torricelli dimostrò perché esse non potessero funzionare se poste più in alto dell'acqua di una misura pari a 10,7 metri.

Con l'osservazione " . . *Sulla superficie del liquido che è nel bacino gràvita una massa di aria alta cinque miglia* . . . ", lo scienziato italiano diede la prima misura della pressione atmosférica, riuscendo anche a dimostrare che essa era variabile nel tempo e con l'altitudine; la Meteorologìa mosse da qui i suoi primi passi.

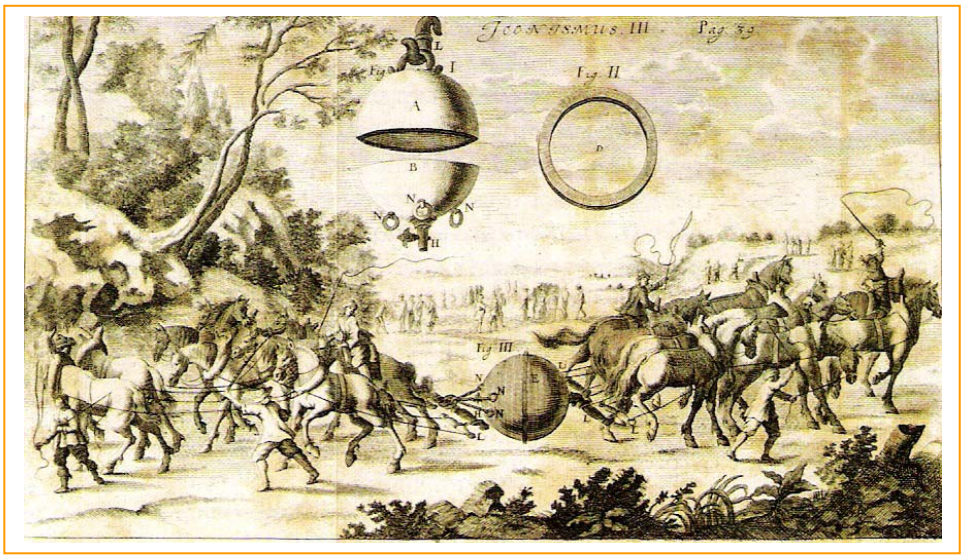
Il primo idraulico del XVII sécolo degno di nota e non appartenente alla scuola italiana fu Edme Mariotte (Digione 1620 – Parigi 1684).

Abate e Priore del monastero di *Saint-Martin-sus-Beaune*, presso Digione, Mariotte fu uno dei primi membri dell' *Académie royale des scienses* di Parigi, quando fu nuovamente fondata, da Colbert, nel 1666 (lo abbiamo visto nel precedente Capitolo 8). Il primo volume delle '*Storie e memorie dell'Accademia*' contiene molte sue memorie che tràttano argomenti diversi: la natura dei colori; il baròmetro; la solubilità dell'aria in acqua; il congelamento dell'acqua; la differenza tra caldo e freddo.

Per la precisione, per l'ampiezza e per la diversificazione dei suoi lavori, Mariotte è considerato il padre del metodo sperimentale in Francia e l'originalità delle sue osservazioni sul moto dei fluidi ne fanno anche il capostipite della scuola degli idraulici francesi, alla pari con i contemporanei in Italia.

Uno dei maggiori interessi di Mariotte fu lo studio della natura elastica dell'aria, stimolàto dalle osservazioni di Torricelli ed in comune con altri scienziati del suo tempo, come il tedesco Otto von Guerick, l'irlandese Robert Boyle e Blaise Pascal, concittadino e collega di Mariotte, di cui sarà detto molto nei successivi Capitoli.

Otto von Guerick (Magdeburgo 1602 – Amburgo 1686), fisico tedesco, coinvolto nella disputa filosòfica sull'esistenza del vuoto, sviluppò una rudimentale ma efficace pompa a vuoto, nel 1650, che poteva raggiungere una depressione pari ad un décimo di atmosfera (oggi abbiamo macchine in grado di raggiungere il miliardesimo della pressione atmosférica).



Con questa sua invenzione lo scienziato tedesco dimostrò la forza della pressione atmosferica, calcolandola e spiegando così l'esperimento delle '*Semisfere di Magdeburgo*',

compiuto a Ratisbona nel 1654, alla presenza dell'imperatore Ferdinando III d'Asburgo: due grandi semisfere che, quando unìte e poste sotto vuoto, non potevano essere separate nonostante gli sforzi di otto cavalli per parte.

Dei suoi studi sul vuoto, Otto von Guerick lasciò l'òpera "*Esperimenta nova (ut vocantur) magdeburgica de vacuo spatio*", pubblicata nel 1672.

Robert Boyle (Lismore 1627 – Londra 1691), iniziò gli studi ad Eton ed in séguito viaggiò a lungo in Europa, soggiornando a Ginevra ed a Firenze, dove frequentò i cìrcoli galileiani.

Stabilìtosi ad Oxford, nel 1654, vi attrezzò un laboratorio e raccolse attorno a sé un gruppo si scienziati antiaristotélici, l' 'I*nvisibile College*', primo embrionale nùcleo della *Royal Society*, come abbiamo già visto nel precedente Capitolo 8.

Boyle perfezionò la pompa a vuoto di von Guerick, utilizzandola in diversi esperimenti sull'origine dell'aria, e nella sua òpera '*New Experiments Physico-Mechanical'* (1662) enunciò la legge sui gas, oggi nota come '*Legge di Boyle-Mariotte*', della quale, nel 1676, Mariotte ne diede questa originale formulazione, nel suo saggio '*Sur la nature de l'air'*:

"*Una legge certa di natura che l'aria è condensata in proporzione al peso con cui è caricata.*"

. . . tradotta in términi oggi usuàli: "*A temperatura costante, il volume di una data quantità di gas è inversamente proporzionale alla pressione alla quale è sottoposto.*"

Nella certezza che i due scienziati operarono indipendentemente l'uno dall'altro, la contesa dell'attribuzione della scoperta si è risolta nel modo migliore: la legge reca il nome di entrambi . . . in rigoroso òrdine alfabético!

Questa è la sede per ricordare che Robert Boyle è il primo ad avere utilizzato la parola 'Idraulica', nella letteratura scientifica, per indicare la scienza della quale qui si traccia la Storia. (Non perdiamo l'occasione per citare nuovamente - lo abbiamo fatto nel Capitolo 2 - il primàto di Ctesibio, scienziato greco vissuto tra il III ed il II sécolo prima di Cristo, che per primo utilizzò l'aggettivo 'idraulico', per indicare l'òrgano ad acqua, strumento musicale da lui stesso ideàto.)

Torniamo ad esaminare, con maggior dettaglio, l'òpera di Edme Mariotte che principalmente interessa in questa storia, il "*Traité du mouvement des eaux",* pubblicàto per la prima volta nel 1686, due anni dopo la sua morte.

Ripetendo ed ampliando le esperienze e le considerazioni di Torricelli, egli cercò in questo lavoro la régola generale che comprendesse il comportamento dei fluidi e dei gas.

L'òpera è divisa in cinque parti.

La prima parte si occupa delle proprietà dei fluidi, con l'orìgine delle sorgenti e la causa dei venti. La seconda tratta dell'equilibrio delle sostanze liquide attraverso il peso, la compressione elastica e l'urto. La terza discute della misura dell'acqua in movimento. La quarta tratta le trajettorie dei liquidi spruzzati. La quinta, la distribuzione dell'acqua e la resistenzaalla pressione delle tubazioni.

Tutte le parti furono basate, per quanto possibile, sulle osservazioni sperimentali dell'autore, che spesso sviluppò tecniche originàli per tradurre i risultati in regole quantitative che fossero espresse con formulazioni matemàtiche a tutti accessibili.

La prima sezione della seconda parte contiene l'analisi di ciò che è conosciuto come il '*Fiasco di Mariotte*' (un contenitore cilindrico chiuso con un orifizio in alto ed un tubo passante nel foro che si prolunga oltre il coperchio del contenitore), usato per illustrare il peso dell'atmosfera.

Fu nella terza sezione di questa parte che Mariotte cercò di ricavare, partendo dalle scoperte di Evangelista Torricelli, il princìpio della dinàmica dei getti di fluido da un orifizio: sulla base delle misure con un dinamometro, che misurava la forza sviluppata dal getto, egli formulò le seguenti cinque regole:

1. i getti non producono urto attraverso l'azione di ogni loro parte come fanno i corpi solidi;
2. l'acqua che è scaricata dall'alto di un serbatoio attraverso un'apertura circolare potrà mantenersi in equilibrio nell'impatto con un peso uguale a quello del cilindro di acqua che ha per base la stessa apertura e per altezza la stessa altezza d'acqua nel recipiente;
3. due getti d'acqua d'uguale larghezza che emergono da piccole aperture alla base di numerose tubazioni piene d'acqua a differenti altezze produrranno equilibrio con i pesi in proporzione alle loro altezze;
4. getti d'acqua di velocità disuguali sosterranno nel loro impatto pesi che sono in proporzione al quadrato di queste velocità;
5. getti della stessa velocità da aperture differenti sosterranno dal loro impatto pesi che sono in proporzione con i quadrati dei diametri delle aperture.

Il primo di questi enunciati, sebbene imperfetto, riconosce il fatto che l'energìa del getto è solo in parte tradotta in forza nell'impatto con una superficie, perché una quota dell'energìa stessa inevitabilmente si disperde.

E' il quarto enunciato di maggior interesse, perché è la prima indicazione, in letteratura, che la forza esercitàta da una corrente d'acqua varia con il quadrato della sua velocità.

Da queste deduzioni sperimentali prese il via lo studio di un problema che, sino ad allora e per millenni, non aveva granché attiràto l'interesse degli studiosi di Idraulica; la forza di un getto d'acqua (ovvero, più in generale, di un fluido, liquido o gassoso) contro una superficie, sebbene vi fossero numerosissimi esempi in tutto il mondo: i mulini, . . . ad acqua o a vento!

Tale argomento sarà oggetto di attenzione nel prossimo Capitolo 10.

Edme Mariotte cercò di includere nella sua analisi le forze esercitate da una corrente d'acqua su una superficie immersa sospesa perpendicolarmente al flusso; concluse, attraverso semplici misure dinamométriche, che la forza della corrente era equivalente al peso di un prisma d'acqua avente un'area di base uguale a quella della superficie, contro la quale la corrente preme. Da qui egli si adoperò per stimare la forza del vento sulle piante e la forza del vento e dell'acqua sulle pale inclinate delle ruote dei mulini a vento ed ad acqua.

Nelle sue régole per la misura della portata di una corrente d'acqua, Mariotte mostrò una conoscenza non solo dell'interdipendenza della velocità e dell'area della sezione trasversale, ma anche l'effetto della non uniformità del flusso, perché, come aveva già osservato Leonardo da Vinci, la velocità del fluido non ha lo stesso valore in tutta la sezione della corrente.

Lo scienziato francese si propose così di definìre la misura della velocità in canali aperti (cioè, come si dice oggi, '*a pelo libero*') attraverso la misura del tempo impiegato da galleggianti a percorrere, nella corrente, una distanza nota, come già avevano tentato Leonardo e Castelli. I

galleggianti erano dotàti di pesi che li mantenevano anche al di sotto del *pelo libero* dell'acqua, dando così la possibilità di valutare le velocità nei diversi punti della sezione, anche in profondità.

I risultàti ottenuti portarono Mariotte a concludere che la velocità normalmente decresce verso l'alto, lungo ciascuna sezione verticale della corrente, ad eccezione dei punti dove la sezione stessa ha un restringimento, caso nel quale può accadere che la velocità invece aumenti nella parte alta della sezione.

Oggi sappiamo, invece, che la velocità dell'acqua, in una sezione regolare, ha un andamento parabòlico lungo la verticale, avvicinandosi a zero in prossimità del fondo; Mariotte quindi non comprese questa corretta distribuzione, ma ad essa molto si avvicinò, intuendo una régola pratica ancòr oggi utilizzata quando si vuol condurre una prima valutazione della portata di una corrente: per ottenere una buona approssimazione egli propose, infatti, di assumere, come valore medio della velocità dell'acqua, in un canàle a sezione regolare, i due terzi del valore della velocità misurata in superficie.

Nel valutare le altezze raggiunte dai getti verticali, Mariotte misurò e codificò in tavole l'altezza della quota alla quale il getto riesce a risalìre, ritenendola dipendente soltanto dal carico iniziale, attribuendo – come fece Torricelli – alla resistenza dell'aria il fatto che il getto verticale non raggiungesse mai la stessa quota del livello d'acqua nel serbatojo che lo alimentava.

La analisi di Edme Mariotte delle trajettorie parabòliche dei getti projettati con differenti inclinazioni si basarono sull'ingegnosa soluzione di Galileo-Torricelli della traiettoria di un proiettile. Egli eseguì i suoi test sulle traiettorie sia con il mercurio che con l'acqua, concludendo, come Torricelli aveva previsto, che l'effetto dell'aria si fa sentire di meno in proporzione alla densità del liquido: più il fluido è denso e maggiore è la distanza della traiettoria.

Mariotte si applicò anche al problema del flusso nelle tubazioni, cioè del moto dei fluidi in pressione. Sulla resistenza alla pressione delle tubazioni e delle giunzioni, egli si limitò ad un'analisi quantitativa, evidenziando la necessità di evitare bruschi cambiamenti di direzione che portavano a notevoli problemi di ancoraggio e tenuta, senza però indagare sulla vera causa. Assumendo che la resistenza della corrente dipendeva soltanto dalla velocità, egli raccomandò di scegliere le tubazioni in modo che la velocità - e quindi, suppose, la pressione – dovesse essere la stessa di quella nei sistemi già noti ed efficienti; considerazione invero ben poco scientifica!

Un contemporaneo di Boyle e Mariotte, l'inglese Robert Hooke (Freshwater 1635 – Londra 1703) qui mèrita almeno una breve citazione; non soltanto diede un decisivo contributo a Boyle nello sviluppo della pompa a vuoto, ma fu tra i fondatori della *Royal Society* (1662), divenendone curatore degli esperimenti e Segretario nel 1677; càrica che mantenne sino al 1682.

Hooke si impegnò in un'ampia gamma di ricerche, delle quali il prodotto più noto è la '*Legge dell'elasticità*', detta '*Legge di Hooke*'; condusse inoltre originali osservazioni nei campi della Meccànica, dell'Ottica, della Meteorologìa e dell'Astronomìa.

Nel 1666, annunciò ai membri della *Royal Society* di aver formulato "*un modello del mondo molto differente da ogni altro già concepìto*". Fu invero differente perché Hooke fu il primo a radicarsi nell'affermazione che tutti i corpi pesanti si attraggono gli uni verso gli altri. Intuì che il moto ellittico dei pianéti fosse dovuto ad una forza di attrazione centrale, proporzionale

all'inverso del quadrato della distanza dal Sole, ma non ne seppe trarre le conseguenze come avvenne poi con Isaac Newton, che però non mancò di ricordarlo.

Lo stesso Hooke ammise di non essere in grado di portare conclusioni più che qualitative sulla legge di gravità. Più tardi, tuttavia, egli e l'astronomo Edmund Halley (Londra 1656 – Greenwich 1742), presumibilmente dalla analogìa con l'intensità della luce, conclusero che la forza attrattiva esercitata da un corpo variava inversamente con il quadrato della distanza da questo.

Di particolare interesse, per questo lavoro, sono i suoi contributi allo studio della propulsione, condotti tra il 1670 ed il 1680. In questo periodo Hooke stava esperimentando diversi dispositivi per indagare il moto relativo dei fluidi e nel 1681 egli lesse un documento, davanti alla *Royal Society*, sull'impennaggio delle pale dei mulini a vento e suggerì che lo stesso tipo di macchina poteva essere usata per l'acqua.

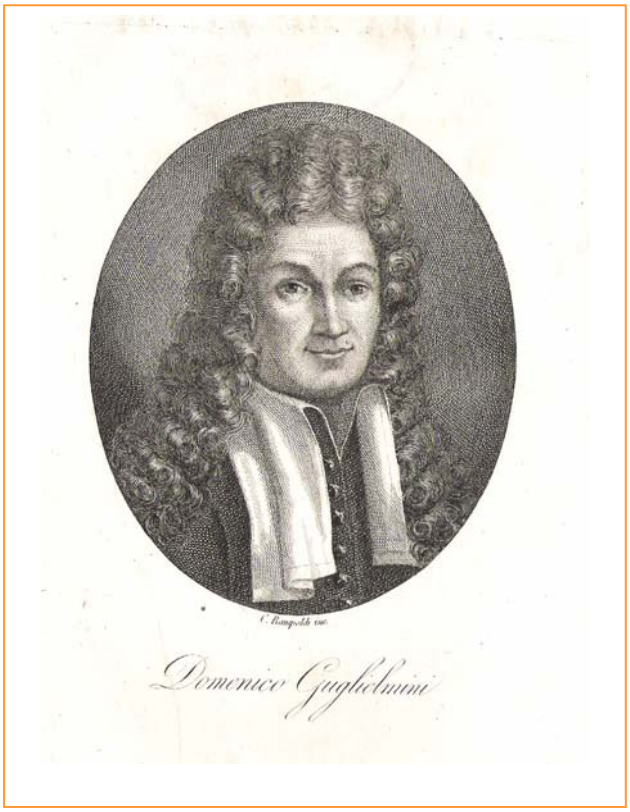
Inoltre i documenti della *Royal Society* segnàlano che nel 1683 Robert Hooke mostrò ai suoi membri un mulinello, regolabile a quattro pale, per misurare la velocità del vento ed una vite da usare nell'acqua come misuratore della velocità delle navi, entrambi applicabili anche alla misura della velocità dell'acqua.

Il suo contributo fu, così, essenziale nello sviluppo dell'anemòmetro, dei misuratori di corrente e dei misuratori di velocità per le navi. Da questi studi ne trasse i primi princìpi della propulsione ad élica, della quale è considerato il padre.

Di Robert Hooke ricordiamo inoltre che, assieme a Christiaan Huygens, ideò il bilanciere a molla, meccanismo che introdusse un assoluto progresso nella tecnica dell'orologerìa, quindi nella misura del tempo.

Torniamo in Italia per parlare di Doménico Gugliemini (Bologna 1655 – Padova 1710), contemporaneo di Edme Mariotte, è considerato l'iniziatore dello studio dell'Idraulica Fluviale, scienza i cui primi accenni, risalenti al VI sécolo prima di Cristo, si devono al greco Ctesias, lo abbiamo incontrato nel Capitolo 2.

Nacque a Bologna dove studiò sia la Matemàtica che la Medicina; scrisse alcune cose di Astronomìa, ma ben presto volse la sua attenzione all'Idraulica. Mentre era professore di Matemàtica all'università di Bologna, egli compilò il suo primo trattato in questo campo "*Aquarum fluentium mensura nova methodo inquisita.*", pubblicato nel 1690.



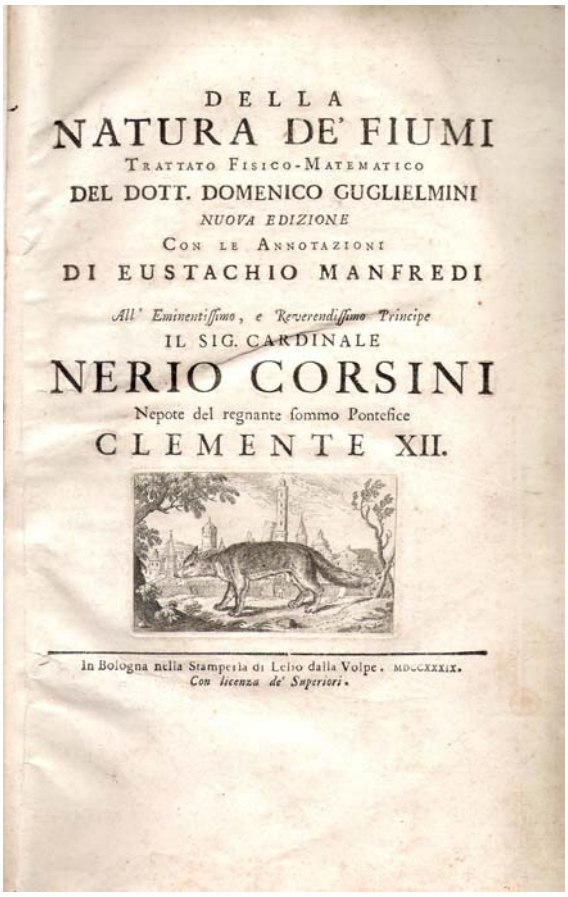
Due anni più tardi fu nominato Soprintendente delle acque per il distretto e professore di Idrometria all'università. In questo periodo Guglielmini si impegnò in studi di Idraulica pratica e nel 1697 pubblicò il suo lavoro più importante "*Della natura dei fiumi.*" che ricevette una vasta diffusione.

L'anno successivo ottenne la cattedra di Matemàtica di Padova, ma fu costretto a praticare l'attività di medico per mantenersi una vita confortevole.

Nel 1701 lasciò l'Idraulica accettando la cattedra di Medicina, argomento delle sue successive sedici

pubblicazioni.

Nello studio dell'Idraulica Fluviale Guglielmini si basò sìa sull'osservazione che sull'esperimento, in in campo ed in laboratorio. Il suo contributo più rilevante fu l'ampia analisi del ruolo giocato dai torrenti e dai fiumi, nell'àmbito del fenòmeno che, per primo, chiamò 'C*iclo idrologico*'. Dal punto di vista scientifico, i concetti di Gugliemini furono un aiuto essenziale nel consolidamento dei princìpî del flusso, tuttavia ancòra imperfetti. La sua òpera "*Della natura dei fiumi*." costituì un assoluta e preziosa novità, tanto che Leibniz, in una lettera indirizzata a Jean I Bernoulli, consigliava di premunirsi delle letture dello scienziato italiano ed in particolare di questa.


DELLA
NATURA DE' FIUMI
TRATTATO FISICO-MATEMATICO
DEL DOTT. DOMENICO GUGLIELMINI
NUOVA EDIZIONE
CON LE ANNOTAZIONI
DI EUSTACHIO MANFREDI
All' Eminentissimo, e Reverendissimo Principe
IL SIG. CARDINALE
NERIO CORSINI
Nepote del regnante sommo Pontefice
CLEMENTE XII.
In Bologna nella Stamperia di Lelio dalla Volpe. MDCCXXXIX.
Con licenza de' Superiori.

Domenico Guglielmini antepose alla teoria – ancòra insufficiente - le osservazioni dirette dei fenomeni "*tenendo sempre di mira la pratica applicazione, il pratico vantaggio*"; così annòta Eustachio Manfredi che curò la pubblicazione dell'edizione del 1804.

Egli fu pienamente d'accordo con le innovative affermazioni di Benedetto Castelli sul princìpio della Legge di Continuità dell'Idraulica; verificò inoltre che la velocità dell'efflusso cambia con la radice quadrata del carico, come affermato da Evangelista Torricelli, ma, come quest'ultimo, ignorò la partecipazione al fenòmeno dell'accelerazione di gravità *g*, che invece considerò, anche se soltanto dal punto di vista qualitativo, nel tentativo di spiegare perché una corrente, *a pelo libero*, in un canale o in un fiume, presentasse velocità differenti nei diversi punti di ogni sezione considerà̀ta (più veloce al centro, lontano dalle sponde e dal fondo; più lenta presso le sponde ed il fondo).

Doménico Guglielmini fu dapprima tentato di accettare l'ipotesi (più tardi ingiustamente a lui attribuita) che la distribuzione della velocità in un fiume, in ogni sezione traversale alla corrente, dovesse essere parabòlica, tuttavia dedusse che questo non era riscontrabile dalle osservazioni; considerò pertanto che la distribuzione parabòlica dovesse essere caratteristica di un fluido 'perfetto'.

L'applicazione di Gugliemini della legge dell'efflusso alle condizioni di flusso da una paratoia parzialmente chiusa o in un tratto di canale inclinato fu il primo passo verso la considerazione che un fluido in movimento, in qualunque situazione si trovi, possiede un contenuto di energìa che ne detérmina le caratteristiche di velocità e pressione, che potévano essere rappresentate attraverso formulazioni matemàtiche.

Guglielmini osservò che la velocità di una corrente a *pelo libero* varia con la radice quadrata della profondità a partire dalla superficie ma, a causa della difficoltà di comprendere la vera relazione tra velocità, pressione e profondità, egli potè soltanto concludere:

"*Nell'acqua corrente, che ha una certa profondità, la parte superiore comprime la parte inferiore con la forza di gravità a crea un movimento verso differenti livelli, che significa in pratica*

che ognuno ha un esatto grado di velocità che può essere acquisito discendendo dalla superficie verso il fondo . . ."

. . . ma giunse soltanto ad intuìre, senza esprimere alcuna teorìa, quale parte avesse, nel moto dei fluidi, la resistenza opposta dal contorno dell'àlveo (sponde e fondo) e quale fosse l'importanza, nello stesso moto, dell'inclinazione del corso d'acqua:

"*L'acqua passante dalla quiete al moto o lasciando un serbatoio . . . acquisisce, mentre discende lungo i fiumi che hanno un piano inclinato sull'orizzontale, qualche grado di velocità, ma questo molto presto si riduce all'uniformità dovuta alla grande resistenza che l'acqua incontra nel suo moto . . . Una volta ridotta all'uniformità, l'acqua deve, tuttavia, mantenere la velocità che ha precedentemente acquisito nel fluire sul piano inclinato e questo è regolarmente più importante quanto è più importante l'inclinazione.*"

Guglielmini fu così il primo ad evidenziare, seppure come semplice indicazione, l'esistenza di uno stato di equilibrio che viene raggiunto da una corrente, a parità di inclinazione, tra la tendenza dell'acqua ad aumentare la propria velocità, per effetto dell'accelerazione di gravità, e l'effetto della resistenza dell'àlveo che si oppone al movimento.

Lo studioso italiano ebbe però meno successo nel tentativo di giungere ad una formulazione quantitativa della resistenza al moto della corrente. Sebbene la precedente sua affermazione porti a dimostrare la diretta proporzionalità tra velocità e pendenza, Guglielmini assunse che la velocità stessa fosse proporzionale alla sola radice quadrata della profondità dell'acqua e, per motivi già indicàti, che il contenuto energetico (carico idraulico) fosse proporzionale alla potenza 3/2 della profondità. Questa indicazione, corretta ma incompléta, lasciò l'argomento nel regno dei princìpî non ancòra dimostrati.

Invece le sue osservazioni qualitative sul comportamento dei sedimenti furono assai corrette:

"*Una corrente con sufficiente velocità scorre nel suo letto e con l'aumento della profondità la inclinazione è minore, e così nel suo moto se essa corre torbida la corrente depositerà i sedimenti nel letto. Così io penso che non c'è altra ragione per cercare quale inclinazione sìa necessaria per una corrente per essere certo che non copra di depositi il proprio letto, oppure, se l'inclinazione è ben maggiore del necessario, che essa eroda in modo eccessivo.*

E' certo che una corrente si allarga e si approfondisce in proporzione alla violenza del moto che erode e porta via la terra che forma le sue sponde ed il fondo; è quindi necessario che la forza di erosione sìa ben più grande della resistenza della terra o degli altri materiali che formano il letto, perché altrimenti se l'una è uguale all'altra non ci sarebbe erosione; ed anche se la resistenza è maggiore della forza. E' sempre necessario dire che il processo di erosione di una corrente d'acqua diminuisce gradualmente oppure la resistenza delle pareti aumenta . . sino ad una raggiunta sorta di equilibrio . . . ".

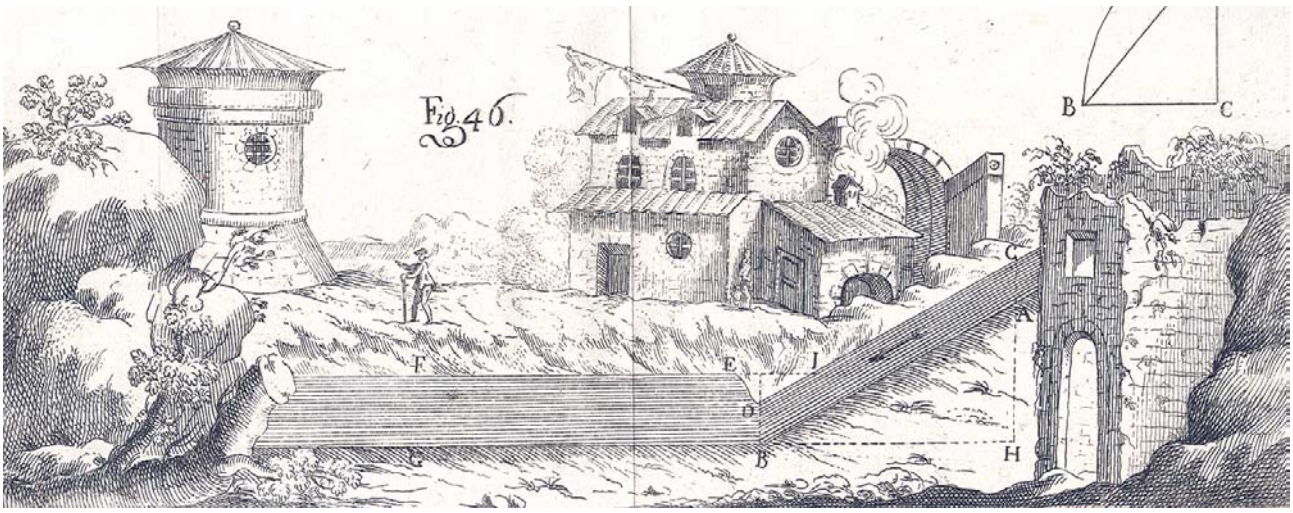
Di Doménico Gugliemini ricordiamo che per primo descrisse il risalto, o salto idraulico, poi rigorosamente trattato da Giorgio Bidone (Casalnocéto 1781-Torino1839) e per questo oggi chiamato '*Salto di Bidone*'. È il fenòmeno che si riscontra quando una corrente a pelo libero, resa veloce da un passaggio stretto, rallenta nuovamente, per esempio incontrando un nuovo allargamento dell'àlveo oppure una brusca diminuzione della pendenza del fondo.

Si forma, così, una sorta di vortice orizzontale, in tutta la larghezza della corrente, che dìssipa l'energìa contenuta nella situazione precedente di maggiore velocità.

Il *Salto di Bidone*, o *risalto*, è molto importante nelle applicazioni delle misure di portata delle correnti a pelo libero.

Ecco come Doménico Guglielmini lo descriveva, avvalendosi di disegni che danno il senso di un modo, antìco ma affascinante, di 'fare scienza':

"*Un non so che di simile s'osserva nelle cadute dell'acque per li canali molto declivi e ristretti, i quali terminano in canali molto meno declivi e più larghi. Sia il canale più declive AB (fig. 46) ed il meno declive BG . . . discenda l'acqua per AB, accelerando il suo moto, ed abbia in B quella velocità che è dovuta alla caduta CH . . . s'osserva . . . che l'acqua per AB non porta la*



sua superficie CD ad unirsi con quella di EF, e l'acqua resta in ED sospesa, conservandosi la superficie dell'acqua corrente in CDEF. . . [L'acqua] *arrivata in D è trasportata con maggiore velocità di quella che le possa essere somministrata, cadendo da E in D, essendo maggiore la velocità della discesa CD di quella dell'altezza DI, perciò è necessario che vi resti il vacuo EDI .*"

Il sécolo immediatamente successivo al Rinascimento contribuì in modo apprezzabile alla créscita dell'ancòra neonata scienza dell'Idraulica.

Almeno una scuola si formò ed un'altra già mostrava segni di un futuro vigore.

Gli esperimenti di laboratorio crebbero in frequenza ed affidabilità ed il campo dell'osservazione iniziò ad accettare come un complemento, se non un aiuto, i *test* a scala ridotta.

Il princìpio dell'efflusso fu unìto a quello della continuità; la pressione atmosferica, il vuoto furono accettàti definitivamente; alcune prime formulazioni dischiusero la porta all'analisi dinàmica e di resistenza del flusso.

Si aprirono nuovi orizzonti della ricerca: l'Idrologìa, la Meteorologìa, l'Idrodinàmica, l'Idrometrìa, l'Idraulica Fluviale . . .

Ma era ancòra una fase iniziale della ricerca teòrica che, quindi, non trovò immediate applicazioni nella pratica, dove si continuò a lavorare sorretti dalla secolare esperienza, che si dimostrava, nei fatti, più affidabile nei risultati attesi, anche se a volte addirittura in contrasto con le nuove scoperte.

La difficoltà della ricerca teòrica nel conquistare la pratica costruttiva sarà il 'clima costante' nel quale si svilupperà il prossimo Capitolo 10, dove affronteremo la storia delle ruote idrauliche, che diedero vita, sin dal lontano passato, ai mulini.

Singolare sarà l'epìlogo: mentre le ruote idrauliche, collegate alle màcine, resteranno sostanzialmente invariate sin quasi ai giorni nostri, il loro studio porterà alla più profonda innovazione della scienza Idraulica: l'analisi energética del flusso.

Il fluido in movimento, cioè, fu interpretato attraverso la nuova prospettiva di analisi dell'energìa in esso contenuta, che nel movimento stessa si manifesta, effettiva o potenziale, giungendo così al passo più rilevante, vero salto nell'Idraulica moderna, del quale tutti ricordano il nome più illustre: Daniel Bernoulli.

* * *

Cap. 10 – Gli studi sulla forza dell'acqua: le ruote idrauliche

Abbiamo visto, nel precedente Capitolo 9, che Edme Mariotte per primo si pose il problema di misurare la forza che l'urto di un getto d'acqua poteva imprimere sulla superficie urtata, traendone le prime corrette indicazioni sulla strada per giungere alla definizione della legge fisica che governa questo fenòmeno.

Dopo di lui, come vedremo, ben presto altri seguirono le sue valutazioni, procedendo nell'analizzare il comportamento della macchina idraulica che, da millenni, rappresentava – perché lo produceva - il pane quotidiano di tutti gli esseri umani: il mulino 'ad acqua'.

L'importanza, che avvertiamo anche quasi affettiva, dei mulini mossi dalle ruote idrauliche ed anche le implicazioni che il loro studio portò, nel XVII sécolo, al cammino della Scienza Idraulica, rendono necessario il dedicarvi questo specifico Capitolo per tracciarne, con gli usuali criteri e modi, la storia.

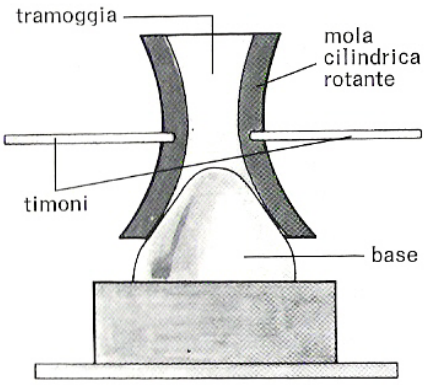
Non sapremo mai quando e dove, meno ancòra ad òpera di chi, si iniziò a sfruttare l'energìa dell'acqua che scorre o che cade per produrre movimento e quindi lavoro; movimento che non poteva che essere rotatorio, continuo, attraverso un'attrezzatura che, per l'appunto, è chiamàta 'ruota idraulica', più comunemente, nell'immaginario di tutti, la 'ruota del mulino ad acqua'.

Il mulino è unanimemente percepìto quale embléma della produzione del pane, ma la sua storia inizia certamente assai dopo la scoperta di questo importantissimo alimento, prodotto dalla cottura della farina impastata con acqua.

La produzione di farina, infatti, per millenni fu condotta con l'ausilio della sola forza muscolare di persone o di animali, ottenuta schiacciando i semi tra due pietre, con movimenti alternati o circolari, oppure in mortai.

Nelle piccole antiche comunità, le donne potevano, ogni giorno, preparare la razione di farina per il pane quotidiano; nei centri più grandi, già novanta sécoli prima di Cristo, in Medio Oriente ed in Asia Minore (come abbiamo visto nel Capitolo 1), la maggior esigenza collettiva poteva essere soddisfatta attraverso le fatiche di animali oppure di prigionieri o di schiavi, . . . questi ultimi ancor più a 'buon mercato'!

Nella Bibbia leggiamo che Sansone, imprigionàto dai Filistei, " . . . *dovette girare la màcina nella prigione*." (Giudici - 16,21).



Il primo cenno ad un mulino mosso dall'acqua è noto nei versi del poeta greco Antìpatro di Tessalònica, databile attorno all'85 a.C., che ci offre una conferma della tesi sopraesposta: il componimento célebra, infatti, le lodi di questa macchina perché solleva le donne dalla fatica di macinare il grano a mano!

Anche lo storico greco Strabone (Amasia, Ponto ca 64 a.C. – 20 d.C), nella sua *Geografia*, riferisce del mulino ad acqua fatto costruire dal re del Ponto, Mitridate VI, nel 65 a.C..

Marco Vitruvio Pollione, attorno al 20 a.C., ci parla di un mulino, mosso dall'acqua, con una descrizione così dettagliata da farci capire che si trattava del tipo *a ruota verticale*, mentre Plinio il Vecchio, nel 75 d.C., parla della grande diffusione di mulini *a ruota orizzontale*.

Possiamo concludere che, al tempo in cui Cristo visse in Terra, le ruote idrauliche, utilizzate per macinare il grano, erano, nei dominî di Roma ma non solo, una realtà la cui diffusione trovava un robusto ostacolo soltanto nella disponibilità di una grande popolazione di schiavi, dai

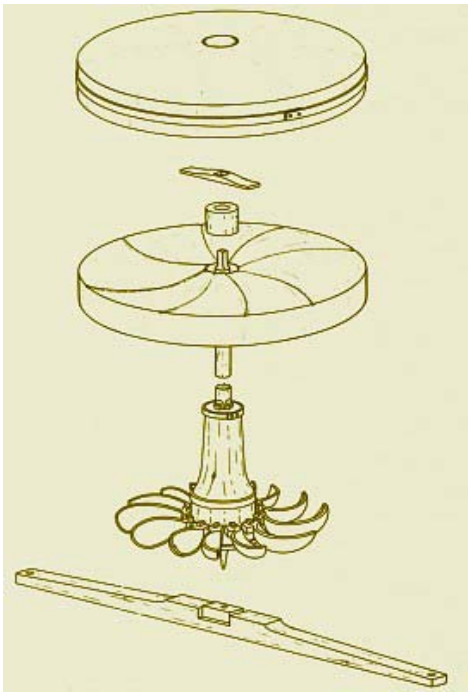
costi particolarmente vantaggiosi, che rendeva quindi inutile realizzare macchine che ne sostituissero le fatiche.

A questo proposito alcuni ritengono che la crisi del IV sécolo, inizio della fine dell'impero di Roma, fu motivo di stìmolo alla realizzazione dei nuovi mulini, in proporzione alla progressiva riduzione di forza lavoro costituìta dai 'forzàti della màcina'.

Concettualmente la ruota idraulica, almeno in apparenza, è quantomai semplice; forse anche per questo ha destato, per sécoli, lo scarso interesse nello studio dei princìpi fisici che ne govérnano il movimento.

Nella sua forma più elementare, e più diffusa (secondo le poche antiche testimonianze citate) attorno al nostro 'anno zero', il mulino era costituìto da una ruota orizzontale, che oggi chiamiamo *ritrécine* (sostantivo maschile, dice il vocabolario, di origine toscana, quindi 'italiano d.o.c.'!), terminante con tante palette, contro il quale era indirizzato un getto d'acqua, attraverso una tubazione o un condotto in lieve pressione.

Il getto provocava la rotazione della ruota solidale ad un àlbero verticale; quest'ultimo si prolungava in un locale soprastante dove, attraversata una pietra fissa, trasmetteva il moto rotatorio ad un'altra pietra anch'essa, come la ruota idraulica, ancoràta all'albero e così costretta a strisciare sulla pietra fissa sottostante: ecco fatto il mulino.

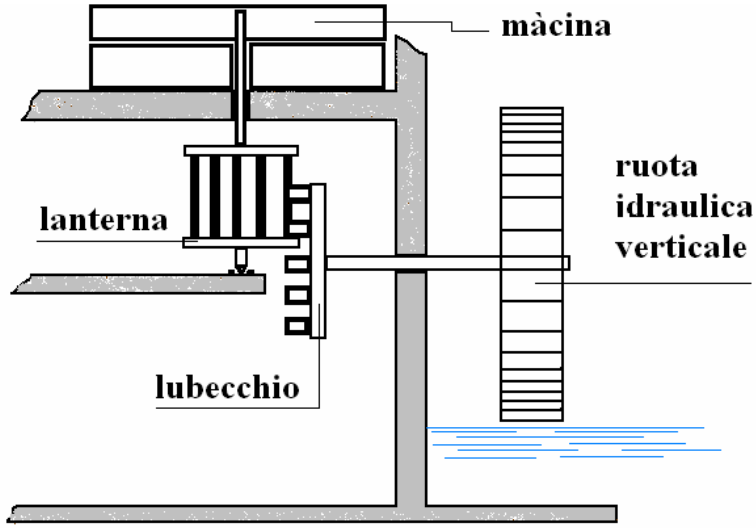


Il grano, fatto cadere tra le due pietre, ne usciva, attraverso il *palmento*, in forma di farina pronta per l'impasto.

La semplicità di questo meccanismo ne provocò la preponderante diffusione.

Accanto al 'mulino a ruota orizzontale', nella stessa época, come riferisce Vitruvio, erano già presenti i 'mulini a ruota verticale', più complessi ma dotati di un vantaggio che, alla lunga (cinque / sei sècoli!), ne avrebbe garantìto il prevalere.

La maggior complicazione tecnica della ruota idraulica verticale era dovuta al fatto che, per ovvia conseguenza, l'albero di rotazione restava orizzontale, mentre la màcina doveva mantenersi ad asse verticale.



La perpendicolarità dell'albero della ruota rispetto all'asse di rotazione della màcina venne risolta con l'introduzione di due ingranaggi: il *lubecchio* e la *lanterna*. Il primo, solidale all'albero della ruota idraulica, era fornito di denti sporgenti che andavano ad inserirsi nei *fuselli* della lanterna, che ruotava secondo un asse verticale. Da quest'ultima partiva un secondo albero solidale con la soprastante màcina.

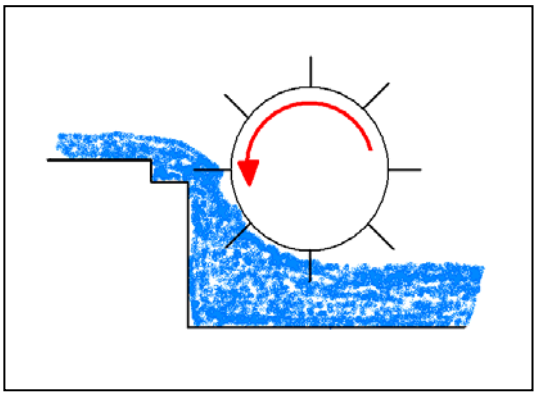
Lubecchio e *lanterna* non soltanto assolsero il compito di deviare di novanta gradi la rotazione, ma anche di fungere da moltiplicatori del numero di giri della màcina rispetto alla velocità di rotazione della ruota idraulica, semplicemente variando le dimensioni dei due ingranaggi ed il numero dei *denti* e dei *fuselli*.

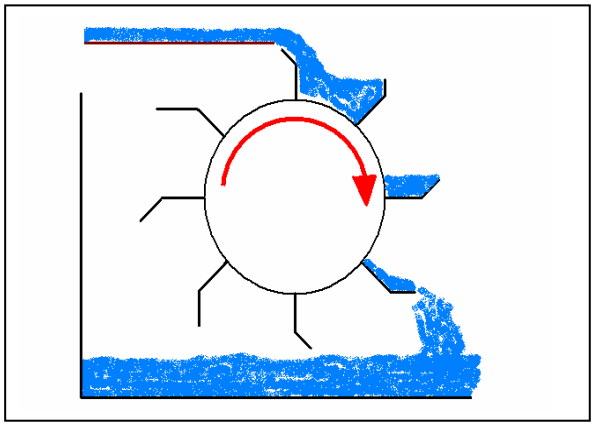
L'aumento della velocità di rotazione della màcina, cosa non applicata al mulino *a ruota orizzontale*, consentiva di migliorare le prestazioni produttive della macchina idraulica, adattando la più adeguata velocità alla massa della màcina, sempre in pietra, non disponendo di una teorìa che la potesse valutare in fase di progetto. L'esperienza dei costruttori suppliva egregiamente.

Per contro, gli ingranaggi, originariamente di legno, costituivano una complicazione aggiuntiva, rispetto al *ritrécine*, con frequenti interventi di riparazione e sostituzione per rottura o per semplice usura; di conseguenza questo tipo di macchina fu caratterizzata da dimensioni maggiori, fornendo un servizio destinato a comunità più consistenti, con evidenti economìe di scala pei maggiori costi di gestione.

Del mulino *a ruota verticale*, se ne svilupparono due versioni:

a ruota verticale per di sotto (o *ruota a impatto*): la ruota idraulica aveva, all'estremità, delle palette che l'acqua urtava quando queste si trovavano, durante la rotazione, nella zona più bassa della ruota stessa, che era, così, investita dalla corrente;





a ruota verticale per di sopra (o '*a gravità*'): la ruota al posto delle palette era dotata di contenitori, detti *cassette*, che ricevevano il getto d'acqua, che così li riempiva, quando si trovavano al punto più alto della rotazione, per poi scaricarsi quando giungevano in prossimità del punto opposto.

Del primo tipo, *per di sotto*, abbiamo una prova diretta della sua esistenza in tempi remòti, prova che ne è così la testimonianza più antìca: nello strato solidificato di cenere e lapilli, a Pompei, prodotto dall'eruzione del 25 agosto del 79 dopo Cristo è stata trovata l'impronta di una ruota di mulino per di sotto, della quale si possono ancòra distinguere molti particolari costruttivi.

Si hanno elementi per ritenere che comunque il mulino alimentato *per di sopra* sìa comparso alcuni sécoli dopo quello *per di sotto*, costituendone una variante migliorata perché in grado di assicurare, secondo l'esperienza, un maggior rendimento; a parità di acqua utilizzata e di dimensioni della ruota, cioè, il *per di sopra* assicurava una maggior potenza, sfruttando oltre all'impatto dell'acqua anche il peso delle cassette che, piene d'acqua nella fase discendente, sbilanciavano la ruota aumentando la spinta di rotazione; ecco perché questo tipo di ruota idraulica è anche chiamata *a gravità*.

Il *per di sopra* però aveva un lìmite territoriale: si doveva portare l'acqua all'altezza della ruota, utilizzando un canale di alimentazione, detto '*gora*', e quindi era necessario disporre di un adeguato dislivello; per i mulini *per di sotto*, invece, il dislivello necessario era minimo ed essi potevano essere realizzati ovunque vi fosse acqua disponibile e corrente, anche in pianura.

Una versione particolare di ruota idraulica *per di sotto* muoveva le màcine nei mulini galleggianti, montati su grosse chiatte ancoràte nel mezzo della corrente di un fiume. Una o più ruote, poste in fianco o all'interno del natante, si immergevano nell'acqua nella loro parte più bassa, ricevendo la spinta dal moto relativo dell'acqua rispetto allo scafo . . . per poi muovere ingranaggi e màcine come . . . sulla terra ferma.

Di mulini galleggianti ci parla lo storico bizantino Procopio di Cesaréa (Cesaréa ? – Costantinòpoli 563 d.C.), nella sua òpera "*Sulle guerre*", riferendone la realizzazione, sul Tevere, da parte del generale Belisario (Tracia ? – Costantinòpoli 565), impegnàto, su comando dell'imperatore Giustiniano, nel tentativo di strappare Roma agli Ostrogoti nel 537.

Un passo importante nello sviluppo dei mulini si registrò nel Medio Evo, sìa nella tecnologìa costruttiva che nella realizzazione di strutture di adeguamento della situazione territoriale, come canali di alimentazione, opere di derivazione dai fiumi, bacini artificiali, sbarramenti e dighe.

In questo non possiamo non immaginare, senza temere d'essere troppo lontani da un'ìpotesi realistica, lo zampino della civiltà dell'Islam, la cui cultura, come abbiamo visto nel Capitolo 5, già si diffondeva, in quel tempo, in tutta Europa.

È infatti nell'Islam che la costruzione di grandi dighe venne finalizzata non soltanto ad immagazzinare e poi distribuìre l'acqua, ma anche allo sfruttamento energético per muovere le ruote idrauliche dei mulini. Oltre alla già ricordata, nel Capitolo 5, diga Band-i Amīr, che serviva ben dieci mulini, possiamo citare, tra le tante, la diga Pūl-i Bulaytī, in Iran sul fiume Karun nei pressi di Shustar, che garantiva l'energìa necessaria a muovere numerosi mulini scavati nella roccia in fianco al canale di derivazione, anch'esso in galleria.

Nella letteratura àraba dell'antico Islam si conoscono numerose citazioni sìa della meccànica di queste macchine, sìa delle istruzioni per la miglior individuazione dei punti del territorio più idònei dove poter sfruttare l'energìa dell'acqua.

Gli Árabi seppero, inoltre, dare un nuovo impulso alla tecnologìa costruttiva, portando in Europa versioni delle ruote idrauliche perfezionate: ruote più leggere, cassette e pale più efficienti, ingranaggi soggetti a minor usura, . . . la ricerca àraba, in questo campo, portò addirittura ad elaborare un nuovo tipo di ruota idraulica, rappresentata in un trattato del IX sécolo, costituìta da una ruota, già assai simile ad un'èlica, inserìta in una tubazione cilindrica che accoglieva l'intero flusso delle acque: la progenitrice delle moderne turbine; una macchina idraulica di tale impostazione fece la sua comparsa in Europa soltanto nel XVIII sécolo.

La tecnica àraba era quantomai evoluta: mentre in Europa i mulini erano ancòra rudimentali opifici a servizio di poche famiglie o piccole comunità, nel X sécolo le grandi e popolose città dell'Islam erano regolarmente rifornite di farina da complessi molitorî mùltipli, a carattere quasi-industriale, capaci di produrre decine di tonnellate al giorno di macinato, lavorando senza sosta, a ciclo continuo.

Come abbiamo visto nel Capitolo 6, molte conoscenze della civiltà àraba giunsero in Europa, se non attraverso i contatti diretti con le terre dell'Islam in Spagna ed in Sicilia, durante l'incontro, violento ma assai coinvolgente, dell'avventura delle Crociate.

Nel campo dello sfruttamento dell' energìa dell'acqua (ed anche del vento) gli Árabi portarono anche una importante novità: l'utilizzo della ruota idraulica per scopi diversi dalla sola molitura.

Nel 751 (anno 134 dell'Ègìra), dopo la battaglia di Atlakh, i prigionieri cinesi realizzarono, nella città àraba di Samarcanda, la fabbricazione della carta con stracci di lino, cotone

e canapa, utilizzando magli mossi da ruote idrauliche. Nel 1044, lo storico al-Bīrūnī riferisce che macchine anàloghe erano utilizzate per macinare le rocce aurifere.

Battere il ferro, follare la lana, segare il legno, tritare la roccia, preparare la carta . . . nell'Islam dell'XI e del XII sécolo divennero lavorazioni realizzate attraverso macchine mosse dalle ruote idrauliche; macchine frequenti anche nella penisola ibérica, quando gli europei la riconquistarono.

Lo sfruttamento dell'energìa dell'acqua si diffuse, così, ovunque, per assolvere a differenti funzioni e, per sécoli, fu la principale forza motrice del sistema produttivo.

Parallelamente, ma, è ovvio, con minor distribuzione territoriale, si diffusero le ruote che utilizzavano l'energìa del vento, penalizzate non solo dalla necessità di disporre di zone adeguatamente battute dal vento ma anche da una tecnologìa costruttiva più complessa.

Sino al XVII sécolo, pèrò, pochi si preoccuparono di studiare il fenomeno con il quale l'acqua riusciva a imprimere l'impulso alla ruota, al fine di conoscerlo e, quindi, migliorare le prestazioni della ruota idraulica che rimase, nelle diverse tipologìe, praticamente immutata per così tanto tempo, in alcuni casi sino al XX sécolo. Ancòra a metà del Novecento, infatti, si ricorda il funzionamento dei 'vecchi mulini', dalla immutata antica fisionomìa, con l'ùnica variante di avere ingranaggi, lubecchio e lanterna in metallo e non più in legno.

Di questo apparente congelamento di una tecnologìa che, invece, in altre applicazioni compì progressi strabilianti (basti pensare all'evoluzione delle turbine idrauliche e dei motori), ce ne si può fare una ragione pensando al lìmite intrìnseco che caratterizzava il mulino con la màcina: la màcina stessa. La pietra rotante, che macinava in farina il grano, non poteva che essere costituìta da un grosso disco di pietra, del peso di alcune centinaja di chilogrammi, che ruotava, strisciando, su un altro disco gemello: la massima velocità alla quale esso poteva girare era già raggiunta nel Medio Evo: aumentarla era impossibile e la ricerca, necessaria per riuscirvi, inutile.

Mentre le altre applicazioni delle ruote idrauliche - magli, folli, sollevamenti, triturazione, impasto - furono 'preda', nella nascente era industriale del XIX sécolo, delle nuove e potenti energìe (vapore, elettricità, combustione interna – il cosìdetto, impropriamente, motore 'a scoppio'), la molitura restò fedele all'energìa dell'acqua sino in epoca assai recente; la màcina, prima 'sposa' della ruota idraulica, ne fu anche la più 'fedele': ancòr oggi persone non anziane ricordano il movimento degli ùltimi mulini, negli anni Cinquanta del sécolo scòrso.

Ma, nella Storia dell'Idraulica, un passo importante, che riguarda proprio lo studio dell'energìa dell'acqua corrente (lo abbiamo visto nel precedente Capitolo 9) si compì con il francese Edme Mariotte, che studiò, per la prima volta, la forza che un getto d'acqua può generare quando urta contro una superficie.

Fu, dunque, l'apertura di un nuovo argomento della scienza dei fluidi.

Nel suo lavoro "*Traité du mouvement des eaux",* dato alle stampe nel 1686, due anni dopo la sua morte, lo scienziato francese detérmina, tra altre considerazioni interessanti già richiamate, due aspetti fondamentali:

- quando un getto d'acqua urta su una superficie, una parte rilevante dell'energìa che il getto stesso 'contiene' di disperde, quindi non partécipa alla forza che la superficie riceve;
- la forza che un getto d'acqua produce quando urta contro una superficie è proporzionale al quadrato della velocità dell'acqua.

Due corrette deduzioni, tratte da numerosi esperimenti nei quali getti di differenti velocità, dimensioni ed anche di differente liquido, erano diretti contro superficî collegate, a mezzo di una leva, ad un contrappeso, dal quale, raggiunto l'equilibrio, si poteva individuare la forza prodotta dall'urto.

Due corrette deduzioni che portano ad altrettante considerazioni:

- esiste una grandezza fisica, caratteristica di qualsìasi massa fluida in movimento, in grado di produrre una forza, ma anche soggetta ad una parziale dispersione; cioè non è interamente utilizzata nella produzione della forza prodotta dall'urto; parte di essa si disperde;
- questa grandezza fisica, espressione della capacità di compiere un lavoro (cioè esprimere una forza che può essere utilizzata), è proporzionale al quadrato della velocità.

Questi primi esperimenti e misurazioni di Edme Mariotte, per valutare la forza trasmessa dall'acqua ad una ruota idraulica, trovarono in Antoine Parent (Parigi 1666 – 1716) lo scienziato che si impegnò sulla medésima strada, riuscendo a condurre un'analisi matemàtica rigorosa.

Di professione médico ma dédito anche alla Matemàtica, membro della *Académie royale des scienses*, Parent compose complesse formule matemàtiche, utilizzando anche il calcolo infinitesimàle (del quale diremo nel prossimo Capitolo 12), sìa nel caso di ruote ad acqua che nello studio delle ruote dei mulini a vento.

Nel discutere le prestazioni delle ruote ad acqua, Parent stabilì:

"*Una ruota mossa da una corrente produce differenti effetti se l'acqua scorre più o meno rapidamente, perché essa non può muoversi con la velocità della corrente ed anche essa incontra resistenza nel produrre una azione e, d'altra parte, l'effetto sarà nullo se essa non ha movimento. Deve esistere tra le velocità della ruota e della corrente un rapporto che corrisponde all'effetto massimo.*"

In altri términi, Parent intuì che il fenòmeno della spinta dell'acqua contro una ruota ad impatto presentava due situazioni estreme:

1. la velocità di rotazione della ruota è tale da generare una velocità delle pale pari alla velocità dell'acqua: in questo caso, quindi, l'acqua non esercita alcuna pressione, non c'è alcuna spinta (impulso zero) ma la velocità di rotazione è massima;
2. la ruota oppone un càrico tale da bilanciare l'urto della corrente: c'è la massima spinta (massimo impulso) ma la velocità di rotazione è nulla.

Tra queste due posizioni deve esisterne una, intermedia, nella quale la spinta e la velocità di rotazione producono la massima potenza trasmessa dall'albero della ruota idraulica.

Per individuare questo punto, che si può chiamare 'di massimo rendimento', Parent aveva a disposizione lo strumento matemàtico adeguàto, appena sviluppato da Leibniz e da Newton: il càlcolo infinitesimàle.

Lo scienziato francese assunse, quale massima energìa producibile dalla corrente, il prodotto tra la forza P, generata dall'urto della corrente contro una superficie ferma, e la velocità V del flusso stesso. Per la ruota, la prestazione era espressa dal prodotto del peso p che la ruota poteva sollevare e la velocità radiale v delle pale della ruota stessa.

Seguendo i risultati di Mariotte, che davano l'impulso P dell'acqua proporzionale al quadrato della velocità V^2 dell'acqua, ed osservando che in realtà la velocità efficace del flusso era

data dalla velocità relativa dell'acqua rispetto alle pale in movimento, cioè (V - v), Parent potè scrivere la relazione:

$$\frac{P}{p} = \frac{V^2}{(V - v)^2}$$

Ricavando, da questa espressione, il prodotto '*pv*', Parent, a mezzo del càlcolo infinitesimàle, potè concludere che l'efficacia di una ruota ad impatto poteva al massimo raggiungere il 15% della potenza '*PV*' della corrente. Questo massimo rendimento si manifestava quando la velocità delle pale fosse stata pari ad 1/3 della velocità della corrente e lo sforzo applicato all'albero pari ai 4/9 della massima forza esprimibile dalla corrente stessa.

Purtroppo questa analisi, sebbene tracciata nella giusta direzione, non ebbe grandi sviluppi, anche perché sostenuta dal nuovo método di càlcolo che, all'inizio, stentò a trovare grande diffusione.

Del lavoro di Antoine Parent, prima che sulle sue sopracitate conclusioni 'scoppiasse la tempesta', dobbiamo ancòra ricordare che, nel 1702, egli pubblicò la prima dettagliata anàlisi matemàtica delle pale mosse dal vento nel trattato "*Sur la position de l'axe des moulins à vent l'egàrd du vent*". La sua più rilevante conclusione, che ebbe, stavolta, molto séguito, fu l'aver individuato l'angolo ottimale che le pale del mulino a vento dovessero avere rispetto al piano di rotazione, pari a 35 gradi; con tale inclinazione l'energìa del vento era trasformata in rotazione per circa cinque tredicesimi. Per quasi mezzo sécolo tale indicazione dominò nella costruzione di queste macchine.

Le difficoltà applicative dell'analisi matemàtica di Parent, sul funzionamento della ruota idraulica, furono superate da Henri Pitot (Aramon, Gard 1695 – Tolosa 1771) - lo incontreremo ancòra nel Capitolo 15 - che, nel 1729, tradusse le formulazioni infinitesimàli di Parent in una più semplice forma algébrica, giungendo alla conclusione che, nelle ruote idrauliche *a impatto* (cioè *per di sotto*) le pale davano il miglior rendimento se restavano radiali, cioè senza alcuna inclinazione'a cucchiaio' rivolto verso il getto; dimostrò inoltre che la distanza ideale tra due pale successive dovesse essere tale per cui, quando una pala era perpendicolare e completamente immersa nella corrente, la successiva iniziasse ad entrare in acqua.

Pitot compilò tabelle paramétriche dei risultati ottenuti, per facilitarne la diffusione e l'applicazione.

Bernard Forest de Bélidor (Parigi 1697 – 1761), realizzando uno dei primi manuali di ingegnerìa, utilizzò i risultati di Parent e di Pitot riportandoli nei primi due volumi del trattato *Architecture Hydraulique*, éditi nel 1737 e nel 1739, che ebbero una grande diffusione nelle scuole francesi. Volendo estendere il método di Parent anche alle ruote *per di sopra*, cioè *a gravità*, Bélidor giunse alla conclusione (che si rivelerà opposta al vero!) che questo tipo di ruota idraulica avesse un rendimento pari ad un sesto di quello delle ruote *per di sotto* o *a impatto*, esprimendo grande meraviglia che, in Francia, le prime fossero così grandemente più diffuse delle seconde . . . . grande era, in quel tempo, la sicurezza dei matemàtici, anche di fronte alla realtà!

Molti altri scienziati condivisero e migliorarono le analisi di Parent e, tra questi, anche Daniel Bernoulli (. . . tra poche pagine farà il suo trionfale ingresso) che, utilizzando il prodotto della massa per la velocità al quadrato, mv^2 detta '*vis viva*', invece che il *PV* di Parent, giunse a risultati pressochè uguali.

Anche Lehonard Euler, altro gigante 'in arrivo' in questa Storia, si occupò del problema, giungendo allo stesse conclusioni.

Ecco, ancòra, Charles Bossut (Tartaras – Saint Ětienne 1730 - Parigi 1814), che si impegnò a tradurre in un'ùnica formula tutte le grandezze che dominavano il fenòmeno: numero delle pale, velocità e impulso variabili in ogni punto della pala, perdita d'acqua ai lati, oltre, naturalmente, a tutte le altre misure variabili dell'acqua in movimento. Ne uscì una formula di tali dimensioni da occupare lo spazio di un'intera pagina . . . praticamente inutilizzabile!

Tutti questi studiosi erano accomunàti da due caratteristiche: i risultati ottenuti, pressochè idéntici, e la mancanza di conferme sperimentali.

Il non aver pensato di verificare, nella realtà, le risultanze dei càlcoli teòrici può essere dovuto a due fattori:

- la grande eleganza dell'analisi matemàtica originaria, elaborata da Parent; eleganza che ai Matemàtici spesso è sufficiente a giustificare la massima fiducia nel risultato;
- lo scarso interesse dei costruttori di mulini, in possesso di una tecnica che dava, come abbiamo già visto, il miglior risultato in términi di massima prestazione della màcina, ed anche di una scarsa preparazione culturale per comprendere . . . le 'analisi matemàtiche perfette'!

In realtà i risultati di Parent erano sbagliati . . . . . così, di conseguenza, anche quelli di coloro che li ottennero per altra via.

Possiamo certo concludere che i costruttori di mulini ben fecero nel continuare sulla loro strada . . . di secolàre pratica esperienza!

Nello stesso periodo che vide Antoine Parent 'risolvere' la ruota idraulica *ad impatto* attraverso la sola anàlisi matemàtica, Christopher Polhem (Visby 1661 – Stoccolma 1751), ingegnere membro dell'Accadémia Svedese delle Scienze, prese la strada opposta, conducendo, assieme ad alcuni collaboratori, tra il 1702 ed il 1704, numerosissime prove sperimentali, in un numero compreso tra 20000 e 30000 (!), grazie ad un modello nel quale poteva variare cinque grandezze: tipo di ruota, velocità, altezza dell'acqua, inclinazione del canale, carico sulla ruota.

Il método seguìto era assai rigoroso, prevedendo il rilevamento sistemàtico, omogeneo ed accuràto di tutti i dati di ogni esperimento.

Lungo questa via soltanto sperimentale Polhem trovò, come Parent sulla strada della sola teorìa, che la ruota idraulica aveva rendimenti diversi, a seconda della configurazione, ma con un ùnico punto nel quale il rendimento assumeva valore massimo.

Purtroppo, come avvenne per Parent, anche lo scienziato svedese aveva, in realtà, ... sbagliato tutto, ma, a differenza del francese, il destino gli riservò la terribile responsabilità di rendersene conto direttamente!

Dopo aver presentato i risultati, nel 1705, li riprese, per riordinarli, cinque anni dopo, rendendosi conto, solo allora, che, nelle oltre ventimila prove, la valutazione del rapporto velocità/rendimento e dell'inclinazione del canale di alimentazione erano stati misurati in modo errato!

"*I nostri esperimenti sono inùtili quanto la quinta ruota del carro*!"; così Christopher Polhem commentò questa amara e sconfortante scoperta ad uno dei suoi più stretti collaboratori!

Le ruote idrauliche sembravano quasi prendersi gioco dei pochi che ne scrutavano i segreti!

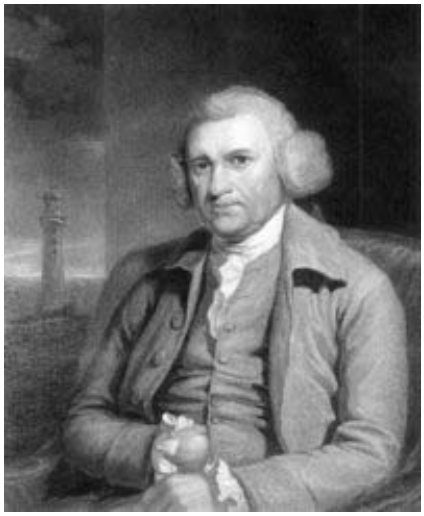
Non tutto il lavoro di Polhem, però, si perse, anche se, ovviamente, i documenti delle sue sperimentazioni non trovarono alcuna forma di pubblicazione definitiva. Egli, quantomeno, attraverso l'Accadémia Svedese delle Scienze, potè diffondere alcune considerazioni in mèrito all'esperienza comunque accumulàta: era ormai dimostrato, senza più dubbi, che le ruote idrauliche *a gravità*, cioè *per di sopra*, erano assai più efficienti di quelle *ad impatto* (o *per di sotto*) e che la velocità ottimale di una ruota ad impatto era pari alla metà della velocità della corrente e non ad un terzo come aveva indicàto Parent.

La via sperimentale, nello studio delle ruote idrauliche, nonostante il disastroso ésito del lavoro di Polhem, fu seguìta anche da coloro che continuarono questa ricerca, evidentemente, e finalmente!, persuasi che la complessità dei fenòmeni in gioco non poteva che trovare dati e verifiche in modelli reali prima che nella teorìa.

Il francese Antoine de Parcieux (Clotet-de-Cessous 1703 – Parigi 1768), convinto che "*Il ragionamento astratto spesso lascia la mente annebbiata*.", e l'inglese John Smeaton (Austhorpe, Leeds 1724 – 1792), condussero, separatamente, esperimenti con modelli a scala ridotta, dimostrando quanto le teorìe conosciute fossero errate.

In particolare de Parcieux potè affermare che l'analisi di Parent non poteva essere estesa alla ruota *a gravità* e che le valutazioni di Henri Pitot sul numero ed inclinazione ideali delle pale erano anch'esse sbagliate.

Nulla di Parent 'si salvò' di fronte alle corrette prove sperimentali: John Smeaton, infatti, demolì la teorìa del francese anche nel caso delle ruote *a impatto*, dimostrandone l'errore.



L'inglese giunse a concludere che:

- il rendimento di una ruota idraulica *per di sotto* poteva variare dal 33% al 50%, e non pari al 15% determinato da Parent;
- la velocità ideale di una ruota *per di sotto* era pari ai 2/5 della velocità del getto d'acqua, ma poteva aumentare sino ad 1/2 nel caso di ruote immerse in corsi d'acqua di grande portata;
- il rendimento di una ruota idraulica *per di sopra* era invece compreso tra il 52% ed il 76%, ma in grado di créscere ancòra in caso di aumento del raggio della ruota e di diminuzione della velocità di rotazione.
-

Dagli studi e soprattutto dagli esperimenti, Smeaton trasse indicazioni progettuali ùtili quali riferimenti

per quanti, da allora, si cimentarono nella costruzione di mulini; la più importante era l'indicazione di preferire, quando possibile, la ruota *per di sopra* a quella *per di sotto*, avendone ormai dimostrato, in modo certo, di quest'ultima il ben più ridotto rendimento.

La memoria "*Una ricerca sperimentale sulla naturale potenza dell'acqua e del vento per muovere i mulini ed altre macchine, dipendenti dal moto circolare*" fu premiata, nel 1759, dalla *Royal Society*; la citeremo ancòra nel prossimo Capitolo 15.

John Smeaton confermò quanto già evidenziato da Christopher Polhem sulla maggior efficacia della ruota idraulica *a gravità*, dando ragione della sua prevalente diffusione che tanta sorpresa aveva destato, come abbiamo visto, in Bernard Forest de Bélidor, fiducioso della sola analisi matemàtica, rivelàtasi completamente errata!

Altri, poi, continuarono a studiare la ruota idraulica, senza ottenere grandi novità ma, piuttosto, confermando i risultati di de Parcieux e di Smeaton e confutando, ogni volta, le iniziali teorìe di Parent, in questo posto in buona compagnìa assieme ad Henri Pitot!

Intorno alla metà del Settecento, vennero condotti nuovi tentativi per conciliare l'analisi teòrica e le prove sperimentali.

Tra i primi a tentare di ottenere questo accordo fu Johann Albrecht Euler (S. Pietroburgo 1734 – Basilea 1800), figlio del grande Leonhard.

J. A. Euler si rese conto che la ruota verticale *a gravità* e quella orizzontale (il *ritrécine*, detto anche *ruota idraulica a reazione*) funzionavano in base a princìpî in tutto differenti da quelli che dominavano la ruota *a impatto*, quindi formulò, per le prime due, nuove espressioni matemàtiche.

Più incisivo nella nuova analisi teòrica, questa volta non disgiunta dai risultati sperimentali, fu l'ingegnere militare Jean-Charles de Borda (Dax, Landes 1733 – Parigi 1799) che limitò ancor più il campo di azione (se mai ne era rimasto!) delle ricerche di Parent ai soli corsi d'acqua di grande ampiezza rispetto alla larghezza della ruota, ovviamente del solo tipo *per di sotto*.

Quando la ruota era alimentata da un canale della stessa larghezza, cioè alimentata 'ad àlveo chiuso', Borda si rese conto che la forza dell'acqua era proporzionale alla velocità e non al suo valore al quadrato . . . povero Parent!

Nella sua òpera '*Memoire sur les roues hydrauliques*', èdita nel 1797, egli dimostrò che si poteva, ottenendo gli stessi risultati, misurare la potenza esprimibile dalla corrente non più con il prodotto della massa per la velocità ('mV') ma con la *vis viva*, pari al prodotto della massa per la metà del quadrato della velocità: $m \cdot \frac{V^2}{2}$.

Wilhelm Leibniz, nel 1686, aveva affermato che questa grandezza meglio rappresentava la forza dei corpi in movimento rispetto a quella, allora usuale, della massa per la velocità.

La *vis viva* scatenò grandi confronti tra sostenitori e contrarî: tra i primi, già lo abbiamo visto, Daniel Bernoulli, che della conservazione della *vis viva* (cioè dell'energìa del movimento) fece la premessa sostanziale della sua ricerca in Idraulica che gli valse una fama imperitura.

Jean-Charles Borda, studiando questa nuova grandezza, si rese conto che non sempre essa si conserva nel moto dei fluidi, come quando, ad esempio, una corrente percorreva una tubazione che, ad un tratto, subiva un allargamento della sezione, con la conseguente riduzione della velocità da V ad un minor valore v. Di conseguenza, in quel punto, la *vis viva* diminuiva della quantità $m \cdot \frac{(V-v)^2}{2}$.

La scoperta che parte della *vis viva* si dissipava, come nell'urto del getto d'acqua contro le pale di una ruota idraulica, fu concettualmente di straordinaria importanza, perché consentiva di 'far tornare i conti' dell'energìa iniziale e finale del fenòmeno, quindi avvicinava grandemente i risultati della teorìa alle prove sperimentali.

Rendiamo il giusto mérito a Edme Mariotte che, come abbiamo visto all'inizio di questo Capitolo, aveva intuìto che una parte rilevante dell'energìa del getto, ma che non riuscì ad esplicitare in alcuna forma, non fosse utilmente trasformata nella forza dell'urto, quindi si perdeva.

Ecco allora che la ricerca sulle ruote azionàte dall'acqua portò ad un risultato fondamentale per tutta l'Idraulica: la nuova prospettiva, nello studio dei fluidi in movimento, rivolta all'anàlisi ed allo studio del relativo contenuto energètico e della sua dispersione o conservazione.

Questo nuovo orizzonte della ricerca aprì le menti di tanti, tra i quali colui che ne fu, ben presto, il campione: Daniel Bernoulli.

Un'ultima notazione su Borda: nel 1791 egli partecipò alla *Commission des poids et des mésures*, incaricata di definìre un sistema di misura standardizzato. La *Commission* scelse, per l'unità di misura delle lunghezze, la decimilionesima parte di un quadrante di meridiano, che Jean-Charles de Borda propose di chiamare *metro* . . . così fu, per sempre!

I risultati raggiunti da Smeaton, de Parcieux e Borda furono ampliati e perfezionati dal francese Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (Nolay 1753 – Magdeburgo 1823), ingegnere militare, generale, uomo politico, matemàtico e fisico.

Carnot proseguì nell'analisi teòrica del moto delle macchine idaruliche e, nella sua òpera di Meccànica "*Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*", édita nel 1783, propose di dimostrare le condizioni ottimali di funzionamento di una qualsìasi macchina introducendo il *Princìpio di continuità*. Secondo tale princìpio la massima efficienza di una macchina idraulica si ottiene quando la potenza viene trasmessa senza urti o turbolenze, ma *per gradi insensibili*, definendo i criteri per trovare il massimo rendimento di qualsìasi ruota idraulica conosciuta.

Pierre-Louis-Georges Du Buat (Tortisambert 1734 – Vieux-Condé 1809), anch'egli ingegnere militare, definì, in modo sistemàtico, i coefficienti correttivi da applicarsi alle formule teòriche, secondo l'esperienza sperimentale condotta con ruote idrauliche a scala reale o con modelli. L'impostanzione dell'attività sperimentale di Du Buat influenzò grandemente, per la metodologìa seguìta e per l'analitica chiarezza, gli esperimenti in Idraulica condotti sino al XIX sécolo.

Anche le pubbliche autorità si interessarono, nella prima metà del XIX sécolo, allo sviluppo delle ruote idrauliche; l'iniziativa più completa fu quella del *Franklin Institute* di Filadelfia USA, che, tra il 1829 ed il 1831, analizzò il funzionamento di quattro ruote idrauliche, con diametro da 1,8 a 6,1 metri, deducendo precise indicazioni su rendimenti, forme e dimensioni.

Proprio mentre le ruote idrauliche stavano subendo un significativo progresso, sìa nella teorìa che nelle pratiche costruttive, giunse la novità che, in tempi brevissimi, le portò ad essere soltanto 'pezzi da museo', velocemente relegàte alla sola funzione di muovere la màcina in pietra dei mulini da grano.

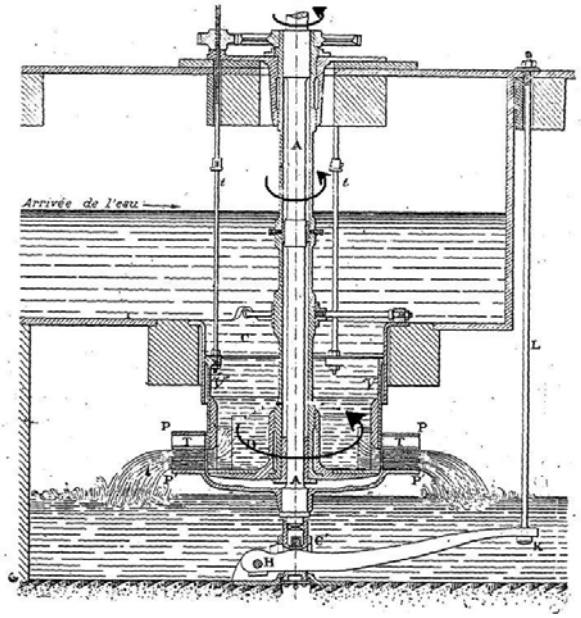
L'ingegnere francese Claude Burdin (Lepin, Savoia 1790- Clermont 1873), professore della *Ecole des Mines* a Saint Ětienne, e Benoit Fourneyron (Saint Ětienne 1802 - Parigi 1867), studente di Burdin, portarono l'attenzione di tutti su un nuovo tipo di macchina idraulica dalle prestazioni sbalorditive.

Nel 1824 Burdin sottopose alla *Académie royale des scienses* la memoria "*Des turbines hydrauliques ou machines rotatoires à grande vitesse"*, che descrive la nuova tipologia di apparecchiatura, che indicò con il términe '*turbina*'; nome divenne sùbito comune nella terminologia dell'ingegneria e di tutta la scienza.

Questo dispositivo, sin dai primi modelli in grado di raggiungere elevate velocità di rotazione, convogliava il flusso in un condotto, costringendolo ad assumere un moto rotatorio, attorno ad un asse verticale, scendendo all'interno di una condotta alla quale era solidale un primo òrdine di palette, che assolvevano alla funzione di imprimere alla corrente un moto rotatorio.

Solidàle all'albero ecco una ruota munìta di pale, già molto sìmile ad un'élica, sagomàte secondo una particolare curvatura ed una piccola inclinazione, calcolate, in via sperimentale, per rendere minimi urti, turbolenze e velocità di uscita dal dispositivo stesso; quindi con un moto che rendesse minimi gli urti e le turbolenze. La memoria di Burdin non fu accolta con il méritato favore, sebbene il suo autore ricevette molti incoraggiamenti nel continuare le ricerche.

Presto la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* (alla quale Burdin aveva sottoposto la propria memoria) offrì un premio al primo " . . *che avesse avuto successo nell'applicare a larga scala in modo soddisfacente, nei mulini e nelle industrie, le turbine idrauliche o le ruote idrauliche con le pale ricurve . . .*". Purtroppo Burdin era tanto predisposto negli studi teorici quanto poco nelle applicazioni pratiche e mai avrebbe avuto successo nella realizzazione di un modello di accettabile fattura ed efficienza.



Benoit Fourneyron, dotato, a differenza del suo professore Claude Burdin, di una grande abilità pratica, proseguì nello sviluppo dell'idea originale di Burdin, sfruttando la sua ampia esperienza in metallurgia e, nel 1827, potè realizzare una prima turbina sperimentale che, a dispetto dell'imperfetto disegno delle palette rotanti in aspirazione, si dimostrò già affidabile ed efficiente; la chiamò '*Ruota a pressione universale e continua*'.

Scrisse di lui Claude Burdin:

"*Perlomeno se io non costruìì buone macchine si potrà dire che almeno abbia costruito un buon costruttore di macchine, che è di ancor più maggior mérito!*"

Le prime realizzazioni di Fourneyron gli vàlsero, nel 1833, il premio offerto, e non ancòra assegnato, dalla *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nazionale*; la sua "*Mémoire sur l'application en grand dans les usines et manifactures, des turbines hydrauliques ou roues à palettes courbes de Bélidor.* », che descrive la teoria generale e la sua applicazione nella realizzazione di tre installazioni, fu pubblicata dalla *Société* nel 1834.

Fourneyron costruì più di cento turbine in varie parti del mondo che divennero così il nuovo ed ùnico mezzo per tradurre l'energìa dell'acqua in forza motrice per le industrie.

Intanto . . . le 'nostre' ruote idrauliche, collegàte alla màcina di pietra, continuarono ad essere costruìte in modo sostanzialmente uguale.

Cambiarono i materiali, dal legno al metallo, ma le grandi ruote continuarono a girare, lente e sicure, al ritmo dell'acqua che ad esse era condotta; plàcide e tranquille, come sagge custodi di un sapere antìco e paziente; un po' sornione e forse, a volte, quasi divertìte nell'assistere all'affanno, in alcuni casi maldestro, di coloro che ne volevano carpire i segreti più profondi.

* * *

Cap. 11 - Il contributo della Fisica nel XVII sécolo: pressione, gravità ed energìa

Le accelerazioni che può subìre la ricerca sono spesso improvvise quanto inattese, come ogni scoperta che ne è, ad ogni evento, il nuovo impulso; a volte un vero 'colpo d'ariete'! Non deve quindi stupìre l'abisso esistente tra l'attuale livello di conoscenza della Fisica rispetto al XVII sécolo, passato da 'soli' trecento anni.

In quel periodo furono molti i 'colpi d'ariete' dati al progresso di questa disciplina.

A loro volta, come sempre accàde tra materie fortemente collegàte, le scoperte dei fenòmeni fisici, alcuni per tanto tempo soltanto osservàti, aprirono anche all'Idraulica nuovi e ben più vasti orizzonti, fornendole gli strumenti per la comprensione di molti aspetti ancòra oscuri.

Il presente capitolo si dedica a quel gruppo di scienziati che contribuì al progresso della Fisica, dando le corrette interpretazioni sìa a fenòmeni idraulici sìa a realtà di più ampia portata ma, comunque, strumentàli anche allo sviluppo della ricerca sul comportamento dei fluidi.

Nella prima metà del XVII sècolo, si giunse alla certezza che l'universo fosse ben altra cosa rispetto alle teorìe sostenute da millenni e che la Terra non ne fosse il centro. Da qui discese l'entusiasmante intuizione dell'esistenza di leggi che govérnavano ogni fenòmeno osservato e che potevano essere alla portata della mente umana.

La scoperta, da parte di Evangelista Torricelli, della pressione atmosférica, dimostrò come fosse possibile, anche con strumenti sémplici, indagare fenòmeni di grandissima portata, come misurare il peso " . . *di una massa di aria alta cinque miglia* . . . ", come scrisse lo scienziato romano all'amico Ricci nel 1644.

Copérnico, Galileo e Kepléro dimostrarono che gli astri si muovevano secondo leggi certe e stabili, che possono essere individuate, interpretate e verificate.

Era ormai chiara l'esistenza di un insieme di règole, scritte da 'qualcuno', Dio per molti, che si offrivano alla mente umana per essere scoperte, sìa nelle infinite grandezza e lontananza del cosmo che nel piccolissimo àmbito del visibile (come allora era definìta la massima capacità di ingrandimento dei primi microscopi).

Non solo; anche gli strumenti ùtili alla ricerca si stavano perfezionando, grazie ai progressi dell'Ottica e ad una Meccànica di precisione in grado di produrre qualsìasi oggetto o dispositivo meccànico fosse necessario: telescopi, microscopi, bilance d'ogni tipo ed uso, eliche, misuratori di distanze, pendoli, . . . misuratori del tempo: orologi e cronòmetri, la cui precisione divenne fondamentale negli esperimenti scientifici.

Nel Settecento, un potente strumento teòrico che diede il più forte impulso a tutte le scienze, non soltanto all'Idraulica, giunse dalla Matemàtica: il càlcolo differenziale o infinitesimale, oppure, come allora chiamàto, il '*Càlcolo Sublìme*'. Tanto rivoluzionaria fu la sua scoperta che qui ne accenneremo soltanto, dedicandogli l'intero prossimo Capitolo.

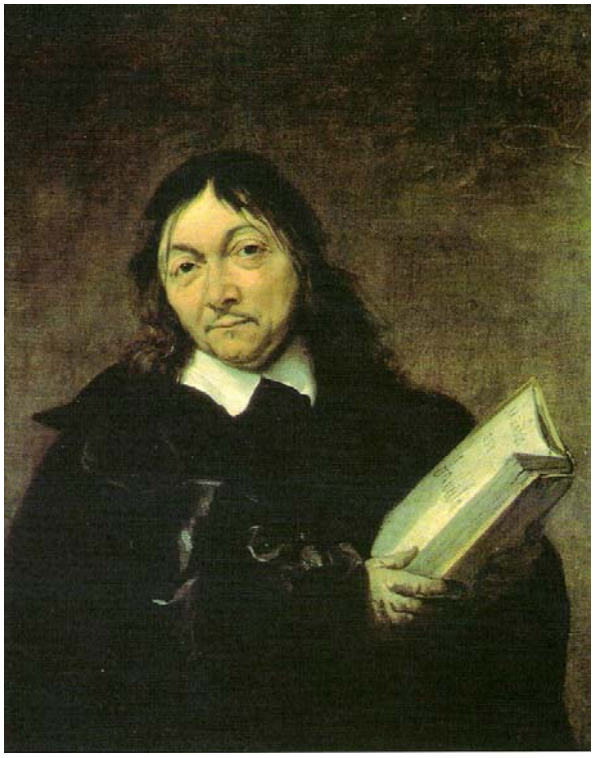
Per quanto possa essere più rilevante per questa Storia dell'Idraulica, possiamo dire che il XVII sécolo si caratterizzò nell'aver consegnato al mondo la corretta interpretazione di tre fondamentali fenòmeni fisici: pressione, gravità ed energìa.

Vedremo, qui, le tappe conclusive del processo che portò alla loro 'conquista'.

Ancòra una volta è doveroso ricordare Marin Mersénne, il cui grande contributo è stato già citato nel Capitoli 8. Mersénne non si limitò a mettere in collegamento gli studiosi del suo tempo, ma fu anch'egli scienziato di valore: contribuì alla teoria dei numeri e si applicò anche a

diversi problemi di Idraulica, conducendo numerosi esperimenti di Idrostatica, di efflusso e di resistenza dei fluidi. Egli fu quindi autorevolmente interessato ai progressi della scuola galileiana nel campo dei fluidi ed in particolare alle scoperte di Torricelli, che visitò in un suo viaggio in Italia, tornando in Francia con un ponderoso bagaglio di novità di estremo interesse.

Mentre, a Pisa, la scuola di Galileo sfioriva, còmplice a prematura morte del Torricelli, i suoi migliori ésiti andarono ad accendere nuove luci in terra di Francia, grazie all'infaticabile padre Mersénne, la cui assidua attività di divulgazione e scambio di conoscenze divenne il principale contributo per i progressi compiuti da almeno due suoi contemporanei e conterranei: Descartes e Pascal.



Il più famoso degli scienziati vicini a Mersénne fu certamente René Descartes (La Haye - Tours 1596 – Stoccolma 1650). Studiò con Mersénne al convento gesuita di La Fléche, e poi - dopo aver combattuto nella guerra dei Trent'anni – ebbe l'ispirazione di fondare una filosofia in tutto rinnovata. Nel 1629 si rifugiò in Olanda, per sfuggire all'Inquisizione, e da lì intrecciò una fittissima corrispondenza con gli studiosi di tutta Europa, grazie alla mediazione di Mersénne.

Recatosi in Svezia dalla regina Cristina per insegnare filosofia, vi morì, nel 1650, per un attacco di polmonìte. La sua salute era sempre stata fragile; passò molto tempo infermo, dedicandosi allo studio ed alla meditazione.

I contributi di Descartes furono moltéplici in numerose materie; ottenne il massimo ed universale riconoscimento in vita dalla teoria vorticosa dell'universo nella quale, riprendendo le ipòtesi di Copérnico, immaginò che tutto lo spazio fosse sempre occupato da una qualche forma di materia in continuo movimento secondo immensi e violenti vòrtici: la materia è ovunque e non può esservi spazio senza materia, quindi il vuoto non può esistere perché coincìde con il nulla che, per definizione, è ciò che non esiste. In questo Descartes si trovava in sintonia con quella Scolastica della quale propugnava l'opposizione.

Soltanto dopo la sua morte emérse chiaramente il grande valore degli altri contributi delle sue scoperte: principale tra questi fu l'introduzione della moderna notazione algebrica e la fondazione della Geometrìa analìtica.

René Descartes sostenne che ogni aspetto della realtà abbia dimensioni esprimibili con unità di misura universalmente vàlide; non solo la lunghezza, la profondità, e l'altezza , ma anche il movimento ed il tempo sono misurabili. Tutto è misurabile e quindi esprimibile attraverso leggi che determinano le dimensioni stesse di ogni fenòmeno.

A Descartes è attribuìto l'onore dell'invenzione del sistema di riferimento detto, appunto, 'Coordinate Cartesiane' o 'Assi Cartesiani'. Vedremo, nel prossimo Capitolo, che la prima proposta del francese non è quella ovunque oggi utilizzata, elaboràta successivamente da De Fermat, partendo, comunque, dall'ìdea originaria di Descartes.

Se tutto è misurabile, allora tutto è esprimibile attraverso relazioni matemàtiche. Questa ìpotesi non potè, ovviamente, essere dimostrata, ma rivela l'inclinazione di Descartes – che fu

anche e soprattutto un grande filosofo – ad affrontare la conoscenza in tutta la sua vastità e non limitandosi a questioni isolàte.

Così scrisse a Marin Mersénne:

" Al posto di spiegare un solo fenomeno, io sono decìso a spiegare tutti i fenomeni della natura.".

A Descartes è attribuìto anche il mérito di aver per primo capìto il '*Principio d'inerzia*' ed il principio della '*Conservazione del momento del moto di un sistema*', cioè la conservazione complessiva del moto di un sistema, formato da più oggetti in movimento, rispetto ad un ùnico punto di riferimento.

Sebbene vero sìa che, nel 1629, egli scrisse a Mersenne quanto segue:

"Io assumo che il movimento una volta impresso su un dato corpo è mantenuto permanente, se non è contrastato da altre cause; cioè, qualunque cosa ha cominciato a muoversi, . . . continuerà a muoversi all'infinito alla stessa velocità."

. . . per rendere compatìbile questo corretto concetto, della conservazione del moto con la propria teorìa dei vòrtici che, secondo la sua convinzione, permettono il moto degli astri, Descartes affermò che il momento dell'universo fosse invece fisso ed invariabile, sin dal tempo della creazione, per volontà di Dio. Prova ne è, per esempio, il seguente passaggio nella sua opera "*Principia Philosophiae*" del 1647:

"Come causa prima di tutto mi sembra evidente che non vi possa essere altro che Dio, che attraverso la sua onnipotenza creò la materia con il moto e la quiete nelle sue parti, che poi conserva nell'universo, attraverso la Sua azione costante, tanto moto e quiete così come li pose nella prima creazione. Questo è tanto vero che il moto è solo un'espressione della materia che è mossa, cioè, per tutto ciò, una quantità che mai cresce né diminuisce, benchè ve ne sìa a volte in misura maggiore o minore nelle diverse parti dello spazio; è per questa ragione che quando una parte di materia si muove due volte più rapidamente di un'altra e questa altra parte è grande due volte rispetto alla prima, noi abbiamo ragione di credere che vi sia più moto nel corpo piccolo che in quello più grande, e in ogni istante se un moto in qualche parte diminuisce in qualche altra parte un altro aumenta in proporzione."

Per Descartes, quindi, il *momento* di un corpo, o di un insieme di corpi, in movimento era esprimibile attraverso un valore dato dal prodotto della massa complessiva per la velocità; grandezza che si conservava fino a quando non fosse contrastata "*da altre cause*".

Il prodotto '*massa* x *velocità*' (cioè: $m \cdot v$) divenne così, sino a Leibniz, quindi comprendendo anche Newton, l'espressione del cosiddetto '*Momento del moto di un sistema*', con il significato di rappresentare la caratteristica dinàmica del movimento. Fu lo scienziato tedesco, come vedremo, che approdò per primo alla nozione di energìa di un sistema in movimento e della conseguente capacità di trasformare questa energìa in lavoro, quantificandone il valore nella più corretta forma '*massa* x *velocità alla seconda potenza*', cioè:

$$m \cdot v^2$$

. . . poi, in séguito, resa nella forma attuale:

$$E = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

. . . che oggi chiamiamo *Energìa Cinética*, caratteristica di ogni moto; energìa che si conserva sino a quando non intervengano forze esterne.

Descartes non potè proporre tali vaste ipòtesi, che coinvolgevano Dio, l'universo e la scienza, senza incappare nelle critiche del clero. La sua costante sensibilità verso le opinioni della chiesa si mostrò nella propria difesa della pubblicazione del suo maggior lavoro, "*Trattato sul mondo*", avendo avuto notizia della forzata ritrattazione di Galileo.

Fu Marin Mersénne che incoraggiò Descartes e lo difese molto energicamente contro i suoi critici. Fu ancòra l'inesaurìbile Abate francescano che per primo portò in Francia la notizia degli esperimenti italiani con il baròmetro, dei quali apprese direttamente da Evangelista Torricelli, a Firenze, dove si recò nel 1644 proprio per incontrarlo, dopo aver letto la lettera che lo scienziato romano aveva scritto, nello stesso anno, all'amico Ricci.

Ancòra Mersénne si schierò con decisione a sostegno delle scoperte di Torricelli, contestate da Gilles P. Roberval (Île-de-France 1602 – Parigi 1675) - secondo il quale la risalìta del mercurio, nell'esperimento ideàto dallo scienziato italiano, non era da attribuirsi alla pressione atmosférica sul bacìno sottostante bensì alla mutua attrazione di tutti i corpi.

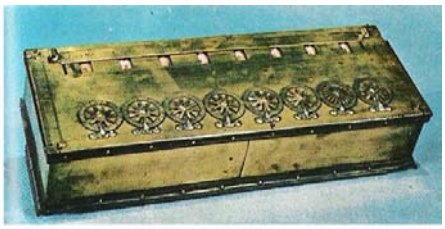
Per giungere alla misura della densità dell'aria, a maggior conferma della scoperta di Torricelli, René Descartes suggerì a Marin Mersénne l'idea di condurre le misure barométriche a diverse altitudini, intuendo che, se la pressione fosse stata veramente espressione del peso della colonna d'aria sovrastante, a quote sensibilmente differenti – come avviene alla base ed alla cima di un monte – tale differenza sarebbe stata evidenziata dallo strumento di Torricelli. Questa verifica, tuttavia, non fù portata a compimento con successo né da Mersénne né da Descartes, bensì da un loro contemporaneo: Pascal.

Blaise Pascal (Clermont Ferrand 1632 – Parigi 1662) ricevette la sua prima educazione da suo padre Étienne, Consigliere di Stato e matemàtico di valore (studiò la concoide della circonferenza che oggi è chiamata '*Lumàca di Pascal*' o meglio: '*Lumàca di Etienne Pascal*'!).

Dopo la scomparsa del padre e della madre, fu allevato da due sorelle, cresciute nella stretta influenza religiosa dei Giansenisti. Pascal stesso alla fine divenne un convertito e l'ultima parte della sua breve vita fu caratterizzata da un ascetismo estremo; fu devòto così intensamente alla religione come nei suoi primi anni lo fu alla Scienza.

Prevalente, tra i suoi contributi matemàtici, fu l'inizio dello studio della possibilità di giungere al càlcolo infinitesimale.

Come Mersénne, Pascal operò scoperte che aiutarono lo sviluppo della teoria dei numeri; inoltre inventò la prima macchina calcolatrice, che chiamò "*Pascaline*": un calcolatore aritmético, a funzionamento meccànico, del quale costruì cinque modelli, che brevettò, ottenendo l'esclusiva della costruzione di qualunque macchina di calcolo.



Il più diretto contributo in Idraulica che dobbiamo a Pascal fu il perfezionamento della teoria dell'Idrostàtica, aiutàto dalle informazioni che Mersénne portò in Francia sugli esperimenti di Torricelli sulla pressione atmosférica.

Nel lavoro intitolato '*Nouvellese expèriences touchant le vide fait dans les tuyaux avec diverses liqueurs*', che Pascal diffuse attraverso l'Europa nel 1647, egli descrisse numerosi esperimenti condotti con sifoni, siringhe, màntici, e tubazioni di diversi tipo, lunghezza e forma, riempiendoli con diversi liquidi come: mercurio, acqua, vino, olio, aria ed altri ancòra.

Fu notevole il miglioramento rispetto agli esperimenti precedenti di Torricelli, dai quali lo scienziato francese era partito. Torricelli, ad esempio, aveva affermato, in una seconda lettera a Ricci, che una diminuzione della pressione esterna avrebbe dovuto ridurre l'altezza della colonna di mercurio nel tubo del suo primo barometro; altezza che poteva annullarsi se sul pelo libero del mercurio nel catino si fosse eliminata la pressione atmosferica, cioè si fosse prodotto il vuoto.

Utilizzando due colonne barométriche, una inserita nell'altra, Pascal dimostrò sperimentalmente questa affermazione; inoltre così ragionò: se il peso dell'atmosfera, che preme sul mercurio nel catino, è veramente la causa della risalìta del mercurio nel tubo, allora l'altezza della colonna di mercurio dovrebbe mutare se varia l'aria sopra di essa.

In una lettera del 1647 Pascal quindi pregò il suo cognato, Pèrier, di condurre un esperimento simile a quello che Descartes suggerì a Mersénne: eseguire misure barométriche a differenti altitudini terrestri:

"*Per compiere l'esperimento del vuoto numerose volte al giorno, con lo stesso tubo e con lo stesso mercurio, qualche volta alla base e qualche volta alla sommità di una montagna alta almeno cinque o seicento braccia, allo scopo di accertare se l'altezza del mercurio raggiungerà un valore uguale o differente nelle due situazioni. Avviene che l'altezza del mercurio è minore in cima alla montagna e maggiore alla sua base; ne consegue la necessità che il peso e la pressione dell'aria sono la sola causa dell'altezza del mercurio e non l'inesistenza del vuoto; è evidente così che c'è più pressione d'aria alla base della montagna che alla sua sommità e nessuno può dire che la natura rifiuti maggiormente il vuoto ai piedi del monte che non alla sua cima. . . . Sono molto più incline ad attribuire tutti questi effetti al peso ed alla pressione dell'aria perché li considero soltanto casi particolari dell'universale principio dell'equilibrio dei fluidi, che è l'argomento principale del trattato che ho promesso.*"

Questi esperimenti furono condotti scrupolosamente da Pèrier sul monte Puy de Dome, una montagna, alta 1220 metri sul mare, vicina alla città di Clermont Ferrand. Le aspettative di Pascal furono pienamente confermàte.

Il trattato promesso, del quale scrive Pascal, contiene il completamento della sua teorìa sull'Idrostàtica e fu pubblicato soltanto nel 1663, un anno dopo la sua morte, sotto il titolo "*Trattato sull'equilibrio dei liquidi*." In esso Pascal espose le analisi di Simon Stevin del paradosso idrostatico (citàto nel Capitolo 7), che egli afferma di aver dimostrato sperimentalmente, concludendo:

" *Tutti questi esempi mòstrano che un sottile filo d'acqua può bilanciare un grande peso. Resta da dimostrare questa tale moltiplicazione della forza.*"

Questo effetto venne dimostrato dallo scienziato francese attraverso l'esperimento noto come '*La botte di Pascal*': una botte di legno, piena d'acqua, con innestato un piccolo tubo che si eleva su di essa per una notevole altezza. Facendo salire, in questo piccolo tubo, il livello dell'acqua, ad un certo punto la botte 'esplode', sotto la pressione che si esercita sulle sue pareti, nonostante il peso dell'acqua versata nel tubo sìa assai modesto.

La dimostrazione del fenòmeno fu motivo, per Blaise Pascal, di dedurre il principio della pressa idraulica, che egli chiamò "*La macchina per moltiplicare le forze*":

"*E' rimarchevole che questa nuova macchina mostri la stessa costante relazione che è caratteristica di tutte le macchine vecchie, come la leva, la ruota, l'asse, la vite senza fine ed altre, dove la forza cresce in proporzione alla distanza. Perché è ovvio che se da una di queste aperture, cento volte larga rispetto alle altre, un uomo pressa un piccolo pistone per una distanza di un pollice potrebbe muovere l'altro pistone per una distanza di un centesimo. E' la continuità dell'acqua tra i pistoni che rende impossibile muovere l'uno senza muovere l'altro. E' chiaro che se il pistone piccolo si muove di un pollice l'acqua si muove a pressare l'altro pistone e siccome l'apertura di questo è cento volte più grande esso si muoverà soltanto un centesimo di altezza. Così le distanze sono moltiplicate nello stesso modo delle forze. . . . Per meglio capìre si può aggiungere che l'acqua è ugualmente compressa all'interno dei due pistoni; mentre uno di essi è cento volte più pesante dell'altro, ovvero è in contatto con una superficie cento volte più grande. Conseguentemente la pressione sui due è la stessa ed essi restano immobili; non c'è infatti alcuna ragione che uno prevalga sull'altro . . .* "

Con questi commenti, Pascal, giunse ad un'altra prova ". . . *che rivolgerò solo ai geòmetri e che potrà essere ignorata dagli altri* . . ", implicitamente derivata dal princìpio di Torricelli: "*un corpo mai muove il proprio peso se il suo centro di gravità non discende*".

Pascal così mostrò che il comune centro di gravità dei due pistoni deve rimanere allo stesso livello relativamente alla loro reciproca posizione, e così essi restano in equilibrio. Il suo approccio ricorda i tentativi di Leonardo da Vinci, di Benedetto Castelli ed anche dello stesso Marin Mersénne, per provare lo stesso princìpio.

Fu però Pascal che alla fine ebbe successo, ed in questo stabilì l'assioma finale dell'Idrostàtica: "*In un fluido in quiete la pressione è trasmessa equamente in tutte le direzioni*".

Nòto come il '*Princìpio di Pascal*', fu probabilmente la sua più grande scoperta (sebbene non fu sùbito accettata dai suoi contemporanei), che portò a compimento il lavoro, di Archimede, di Stevin e di Torricelli, nell'elaborare la statica dei liquidi e dei gas, determinando inoltre un collegamento essenziale tra la Dinàmica dei corpi rigidi e la Dinàmica dei fluidi.

Un terzo studioso che, nel XVII secolo, trasse gran profitto dalla diffusione della conoscenza e delle scoperte, ad opera di Mersénne, fu il tedesco Christiaan Huygens (L'Aia 1629 – 1695). Figlio del poéta e diplomàtico olandese Costantijn, ricevette un'eccellente educazione in Matemàtica ed in Medicina a Leyden, da un allievo di Descartes che lo avvicinò, ancòra in giovane età, agli scritti del filosofo e scienziato francese, con il quale ebbe anche contatti diretti.

Per tutta la vita Huygens subì l'influenza del pensiero di Descartes, mai liberandosi completamente della teoria semimetafisica dei moti vorticosi che muovono l'universo.

Nel periodo in cui molti scienziati francesi si stabilivano in Olanda per sfuggire alla persecuzione religiosa, condotta dal re Luigi XIV contro i protestanti

francesi (gli Ugonotti), che annoveravano numerose personalità culturali e scientifiche di prim'ordine, Huygens, nonostante fosse egli stesso protestante, trascorse gran parte della sua vita in Francia, dove si stabilì nel 1666, giocando un ruolo dominante nella nuova cattedra della *Accadémie Royale des Sciences*, della quale fu il primo Direttore, per poi abbandonarla, come abbiamo già visto nel Capitolo 8, a causa delle continue ingerenze dell'onnipresente re Sole.

Huygens, nei suoi studi sulla caduta dei corpi, concluse – come fece il suo amico Mariotte circa nello stesso periodo – che la resistenza dell'aria aumenta con il quadrato della velocità e non con una proporzionalità diretta (esponente pari a due e non pari ad uno).

Contribuì in modo rilevante al progresso in ottica; sviluppò una tecnologia per molare le lenti, costruendo un nuovo modello di oculare che aumentò la potenza del cannocchiale. Con questo, nel 1655, individuò gli anelli di Saturno ed il suo satellite Titan ed inoltre scoprì la nebulosa di Orione.

I suoi sviluppi matemàtici, considerati minori, furono molti e varî.

Nel campo della Meccànica, enunciò il *Princìpio della Forza Centrìfuga* e la legge del moto oscillatorio, che usò non solo per una preciso segnale di regolazione degli orologi astronòmici ma anche per determinare la forza di gravità nelle diverse parti della Terra. Due dei tredici teoremi sulla forza centrifuga, contenuti nel suo "*Horologium Oscillatorium*" (1673), sono esempi tìpici delle sue formulazioni:

"*Se un corpo che si muove viaggia su una circonferenza con una velocità pari a quella che acquisirebbe cadendo da una altezza uguale ad un quarto del diametro, egli subisce una forza centrifuga pari al proprio peso; così esso tende la corda che lo trattiene come se fosse ad essa sospeso.*

Se un pendolo che oscilla intorno ad un cono descrive straordinari piccoli circuiti; il tempo per descrivere uno di questi ha lo stesso valore del tempo di caduta da una altezza pari a due volte la lunghezza del pendolo come la circonferenza di un cerchio che ha lo stesso diametro; ed inoltre sarà uguale al tempo di due oscillazioni laterali dello stesso pendolo se esse saranno molto piccole."

Ad Huygens, a volte, è anche attribuìto il *Principio di conservazione della forza viva* (oggi detto dell'Energìa Cinética), tuttavia limitato alla proposizione (non molto differente da una precedente di Torricelli):

"*Un corpo o un sistema di corpi non può raggiungere un livello superiore a quello dal quale è partito, muovendosi sotto l'azione della sola gravità.*"

Sebbene in nessuna parte delle sue analisi si possa trovare una esplìcita formulazione, i calcoli di Christiaan Huygens dimòstrano che seppe percepìre l'interrelazione tra il peso e la massa, oggi nota come *fattore g*: ogni corpo, dotato di massa, ha un peso pari al valore della massa stessa moltiplicato per il valore dell'accelerazione di gravità, indicàta con la lettera *g*.

Huygens non si spinse più in là di questa intuizione, influenzàto dalle teorìe di Descartes, alle quali fu avvicinàto negli studi giovanìli, tant'è che non fu neppure in grado di accettare pienamente il concetto della gravitazione universale, già proposto da Hooke ed applicato da Newton.

La collaborazione con Robert Hooke portò all'invenzione del bilanciere a molla, già ricordato nel Capitolo 9, che consentì un importantissimo progresso della tecnica orologiaja e, quindi, nella misura del tempo.

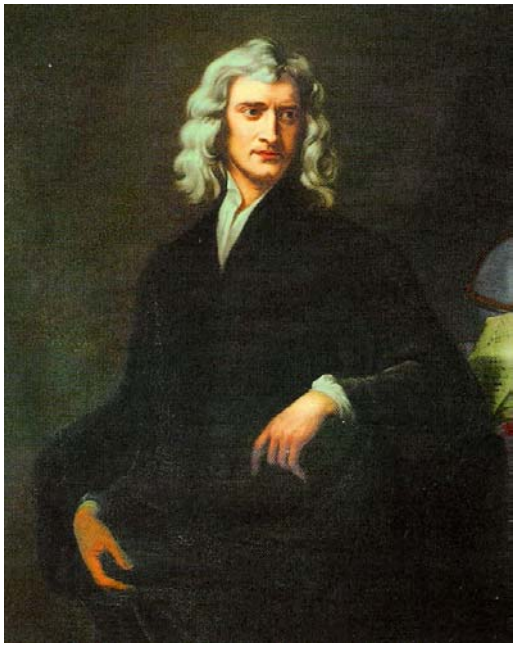
John Wallis (Ashford 1616 – Oxford 1703), stretto amico di Huygens, iniziàto alla carriera ecclesiastica nel 1640, fece parte di quella schiera di scienziati inglesi che ispirarono un nuovo corso del movimento scientifico, che culminò con la fondazione della *Royal Society*.

Dotàto di grandi capacità matemàtiche, Wallis diede un sostanziale sviluppo alla ricerca nel campo dello sviluppo del càlcolo differenziale, partendo dalle scoperte di Bonaventura Cavalieri (Milano 1598 – Bologna 1647), matemàtico gesuita, allievo ed amico di Benedetto Castelli e di Galileo Galilei, considerato il precursore di questo nuovo metodo di calcolo.

Wallis, inoltre, definì il più approssimàto valore di π, impostò la teoria delle equazioni e per primo rappresentò graficamente i numeri immaginari.

Ma, in quel tempo, il primàto in molte scienze, prima di tutto in Matemàtica ed in Fisica non può non essere riconosciuto a Isaac Newton.

Isaac Newton (Woolsthorpe 1642 – Kensigton Londra 1728) fu il primo scienziato inglese a mettere in ombra i suoi contemporanei continentali. Nato a Woolsthorpe, nel Lincolnshire, studiò al Trinity College a Cambridge. Tra i trattati che giocarono una parte importante nella sua educazione vi fu quello di John Wallis "*Arithmetica Infinitorum*" e diversi scritti di Descartes.



È certo che nell'ànimo di Newton risuonasse la teorìa metafisica dell'universo, proclamata da Descartes, avvertendone, in modo sempre più evidente, l'assoluta estraneità alla propria sensibilità matemàtica e poi alla realtà della Fisica.

Possiamo comunque affermare che sia Wallis che Descartes, sebbene in modo differente, influenzarono il cammino scientifico di Newton.

Òrfano di madre e di padre, così affidàto ai nonni, per interesse di uno zio fu ammesso, con mansioni di inserviente, al Trinity College di Cambridge nel 1661. Conciliando il lavoro e lo studio, ottenne il titolo accadémico di Bachelor.

Tra il 1665 ed il 1667 si ritirò a Woolsthorpe per sfuggire ad una tremenda epidemìa di peste. Questo periodo di forzato isolamento fu il più creativo della sua vita.

Il suo maggior risultato fu l'enunciazione della '*Legge della Gravitazione Universale*', per questo oggi detta anche '*Legge di Newton*'. La sua prima intuizione, sèmplice nella forma ma stravolgente nella sostanza, portava alla conclusione che la forza responsabile della caduta degli oggetti era la medèsima che governava il moto dei pianéti, già prevista da Giovanni Keplero, quale energìa attrattiva che si riduce con la distanza dal sole (è in questo tempo della sua vita che si racconta dell'episodio della mela che gli cadde in testa, facendogli nascere la fulminea intuizione).

Newton seppe calcolare tale forza; la piccola differenza che trovò, tra i proprî càlcoli e le osservazioni del moto dei pianéti, lo rese a tal punto insoddisfatto da portarlo ad attendere molti anni prima di dare alle stampe il suo studio. La mancanza della certezza assoluta frenava Newton nel rendere pubblici i proprî risultati; questo aspetto del suo carattere giuocò un ruolo importante nella dìsputa con Leibniz sull'attribuzione dell'invenzione del càlcolo differenziale.

Fu proprio durante la permanenza a Woolsthorpe che Isaac Newton portò a compimento il lavoro di Cavalieri e di Wallis, dando veste defintiva alla propria scoperta del càlcolo differenziale, che chiamò '*Metodo delle flussioni*'; ma gli elementi di questo método, concepìti nel 1666 e discussi in numerose lettere ai suoi contemporanei dal 1669, furono finalmente dati alle stampe soltanto nel 1686 nell'òpera "*Philosophiae naturalis principia mathematica*.".

In quell'anno Newton fu in qualche modo costretto alla pubblicazione del lavoro, anche se il suo perfezionismo lo avrebbe forse costretto ad attendere ancòra: due anni prima, sulla rivista *Acta Eruditorum*, Gottfried Wilhelm Leibniz (Lipsia 1646 – Hannover 1716) aveva dato alle stampe il proprio trattato di càlcolo differenziale "*Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illis calculi genus*.", che stava avendo un crescente successo; l'inglese non poteva più aspettare!

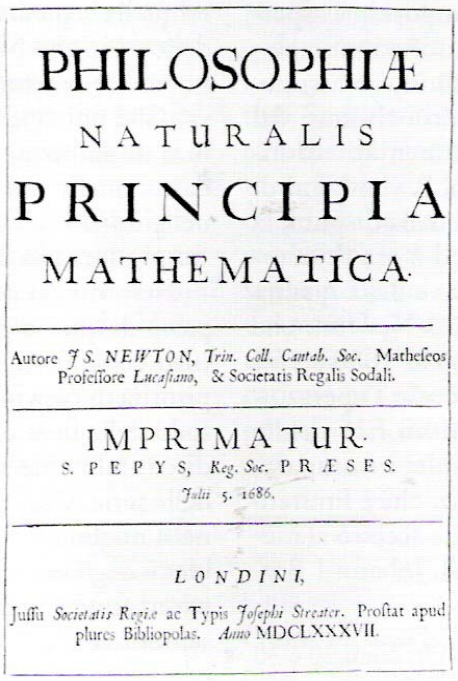
Sebbene i due mètodi fossero sìmili ma comunque differenti, nessuno poté impedire che nascesse una lunghissima disputa sulla primazìa della scoperta, che vide opposti, per molti decenni, i tedeschi, assieme ai 'continentali' e, sull'altra sponda (è proprio il caso di usare questo términe!), gli scienziati inglesi.

Questo nuovo strumento matemàtico, la cui evoluzione vedremo con maggior dettaglio nel prossimo Capitolo, procedendo per intervalli infinitamente piccoli, consentiva, come tutt'oggi consente, di trattare con espressioni matemàtiche qualunque tipo di curva che, a sua volta, può rappresentare la quasi totalità dei fenòmeni fisici, nonché la loro variazione, nel tempo e nello spazio, ed anche i relativi valori istantanéi, nel tempo e nello spazio: le òrbite dei pianéti, la traiettoria dei proiettili, le linee di flusso di un fluido in movimento, la velocità, l'accelerazione; in un términe, ùnico e generale: 'il continuo'.

Isaac Newton, nel 1669, divenne professore lucasiano di Matemàtica a Cambridge, al posto del defunto suo insegnate ed amico Isaac Barrow, e nel 1672 fu eletto *Fellow* alla *Royal Society*, dove annunciò la teoria corpuscolare della luce nel 1675.

Tra gli associati della *Royal Society* a lui più vicini vi furono Edmund Halley, Robert Hooke (già incontrati nel Capitolo 9), e Chrisopher Wren (East Knoyle 1632 – Hampton Court 1723), notissimo matemàtico ed architetto (progettò la ricostruzione di 52 chiese di Londra dopo l'incendio del 1666), che lo spinse a scrivere le sue prime conclusioni sul moto planetario.

I risultati, nell'òpera "*Pincipia Mathematica Philosophiae Naturalis*", furono pubblicati nel 1686 a cura di Halley, che ne pagò personalmente le spese di stampa. Questo trattato, in origine intitolato '*De motu corporum*', contiene tutti i maggior contributi di Newton alla Meccànica, alla Matemàtica ed all'Astronomìa e gli valse il riconoscimento quale scienziato più importante del suo tempo.


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Nei tre libri che compongono il '*Pincipia Mathematica Philosophiae Naturalis'* vi è una lunga premessa che enuncia la definizione delle principali grandezze della Fisica (come, ad esempio: massa, quantità di moto, forza . .) ed i concetti di spazio e di tempo assoluti, fondamentali per la definizione del moto, individuato dai tre Pincìpi della Dinàmica, dai quali Newton dedusse la '*Legge della Gravitazione Universale*':

"*Tutti i corpi si attraggono con una forza che è proporzionale alla loro massa ed inversamente proporzionale al quadrato della reciproca distanza*."

Con essa si potevano finalmente spiegare le leggi di Keplero, il moto dei pianéti, la precessione degli equinozi, le irregolarità del moto della Luna (già note da sécoli), le maree, ecc. .

L'òpera '*Pincipia Mathematica Philosophiae Naturalis*' fu l'apogéo ma anche il suggello del términe del lavoro scientifico di Isaac Newton.

Nel 1689 fu eletto Deputato in Parlamento, quale rappresentante dell'Università; nel 1692 ebbe un forte esaurimento nervoso che lo costrinse a una vita solitaria per due anni. Nel 1695 si dimise dalla cattedra di Cambridge e si trasferì a Londra, come Ispettore e poi Governatore della Zecca, impegnandosi in una difficile riforma monetaria.

Nel 1700 fu eletto alla *Acadèmie des Sciences* di Parigi.

La *Royal Society* lo scelse come Presidente nel 1703, un incarico che conservò sino alla fine della sua vita terrena; la Regina Anna lo nominò Cavaliere nel 1705.

Nel 1704 pubblicò l'ultima sua grande òpera '*Optics: or a Treatise on the Reflection, Refration, Iflexions of Colours of Light'* nel quale dimostrò la composizione della luce nei sette colori fondamentali dell'arcobaleno ed espose la teorìa corpuscolare del raggio luminoso.

I suoi ultimi anni furono dedicàti alla misura del tempo ed alla teologìa.

Come scienziato Newton provò avversione per le controversie, ma non fece concessioni false davanti alle critiche; di sé diceva:

"*Se ho visto più lontano è perché sono stato sulle spalle dei giganti*."

Mentre Descartes – ed Huygens in minor grado – avevano esaminàto la Scienza dal punto di vista filosòfico, l'approccio di Newton fu originalmente matemàtico; riteneva sufficiente esprimere la legge senza cercarne, ad ogni costo la causa:

"*Fin qui abbiamo spiegato i fenomeni dei cieli e del nostro mare attraverso la potenza della gravità . . . Ma fin qui non sono stato in grado di scoprire la causa di queste proprietà della gravità da questi fenomeni, e non ho composto alcuna ipotesi; perché qualunque cosa che non è dedotta dai fenomeni è chiamata ipotesi; e le ipotesi, sia metafisiche che fisiche, sia dalle proprietà nascoste o meccaniche, non hanno posto nella filosofia sperimentale. In questa filosofia proposizioni particolari sono dedotte dai fenomeni., oppure rese generali dalle osservazioni. . . .*"

Suo il motto: "*Hypotheses non fingo*."

Il maggior contributo di Newton in Meccànica è la scoperta delle tre leggi del moto, la prima delle quali fu esplicitamente espressa da Descartes; lo stesso Newton notò che tutte e tre erano già state usate da Wallis, da Huygens e da Wren, nella loro formulazione delle leggi dell'impatto.

Il suo contributo sostanziale è posto nella definizione di massa, di momento, di inerzia e di forza, nella combinazione di queste con il teorema di Huygens della forza centrifuga e con la

legge di Hooke ed Halley dell'attrazione gravitazionale inversamente proporzionale al quadrato della distanza; da qui egli giunse alla generale analisi di tutto il moto nel sistema solare.

Nel corso delle sue analisi Newton individuò un modo per misurare direttamente l'attrazione della massa, ma non ebbe a disposizione la tecnologìa necessaria per dimostrarla; nonostante ciò, seppe definìre l'accelerazione di gravità media della Terra, della Luna e del Sole.

La ricerca approfondita che Newton condusse sull'argomento della resistenza dei fluidi raggiunse la mèta – ed è corretto citarla – di confutare le ipotesi scolastiche e cartesiane che tutto lo spazio fosse pieno di materia, rendendo incompatibile il suo modello dell'universo.

La parte sperimentale della ricerca si sviluppò nell'analisi del graduale smorzamento del moto del péndolo. Newton utilizzò diversi materiali della massa oscillante e differenti fluidi nei quali essa si muoveva: aria, acqua e mercurio. Condusse anche osservazioni sulla libera caduta di sfere, di differente densità, attraverso l'aria e l'acqua; inoltre rivolse l'attenzione al moto dell'efflusso di acqua da un foro posto nella base di un contenitore.

I numerosi risultati furono, per quel periodo, straordinari ma per Newton assunsero l'importanza relativa al solo fine di elaborare la teoria generale della legge di gravità.

Da tali risultati, lo scienziato inglese seppe comunque giungere alla conclusione che la resistenza al moto che si manifesta tra un liquido ed un solido, tra loro in movimento relativo, dipende da una di queste quattro distinte cause, anche concomitanti: coesione del fluido, elasticità, capacità di lubrificazione ed inerzia, giudicando le prime due di scarsa importanza.

Della 'capacità di lubrificazione' ipotizzò che:

"*La resistenza manifestantesi dalla necessità di lubrificazione nelle parti di un fluido, è, mantenendo uguali le altre cause, proporzionale alla velocità con la quale le parti del fluido sono tra loro separate.*"

Ecco per la prima volta evidenziato il principio della viscosità di un fluido: in un fluido viscoso lo sforzo che tende ad opporsi al movimento è proporzionale alla velocità relativa fra zone adiacenti della massa fluida.

Newton poi procedette nel mostrare che un cilindro di lunghezza infinita, immerso in un fluido, ruotando attorno al proprio asse a velocità angolare costante, produce nel fluido che lo circonda una velocità che varia in modo inverso alla distanza radiale da esso; cioè: il fluido si mette in movimento rotatorio con una velocità angolare che in prossimità della parete del tubo assume lo stesso valore di rotazione della parete stessa e si riduce man mano che ci si allontana da essa; la teoria 'dei vortici' di Descartes appariva così incompatibile con questa esperienza.

Sulla quarta causa, l'inerzia, Newton correttamente considerò che:

"*Supponendo le stesse cose, io dico che la maggior parte dei sistemi sono caratterizzati da fenomeni di resistenza in ragione del quadrato della loro velocità e nella semplice proporzionalità con la densità del sistema.*"

Altrettanto correttamente enunciò il *Principio di reciprocità*, che forma la base della moderna ricerca nelle 'gallerie del vento' e nei modelli delle correnti fluide:

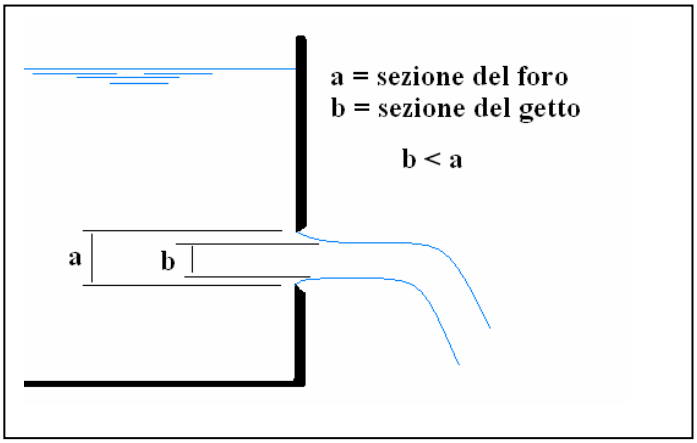
"*Poiché l'azione del mezzo è la stessa su ogni corpo . . . se un corpo si muove in un mezzo in quiete oppure se le particelle del mezzo si spostano con la stessa velocità attorno ad un*

corpo in quiete possiamo considerare il corpo come se fosse in quiete ed osservare con quale forza esso sia soggetto dal movimento del mezzo."

Egli assunse questa forza come uguale alla quantità di variazione del momento che viene prodotto quando un fluido viene deviato dalla sua direzione di moto a causa della sagoma di un corpo; in questo, a causa della approssimazione della sua analisi e perché i suoi esperimenti erano limitati alle sfere, egli concluse che nei fluidi in pressione ed anelastici la forza dipendeva soltanto dal massimo dell'area della sezione trasversale dell'ostacolo, ignorando, quindi, la forma del corpo:

"*Se un cilindro, una sfera ed uno sferoide di uguale larghezza vengono posti in successione in mezzo ad un canale cilindrico, cossicchè i loro assi coincidano con l'asse del canale, questi corpi ostacoleranno il passaggio dell'acqua nel canale secondo la stessa misura."*

Per giustificare queste errate conclusioni, Newton si rivolse al problema dell'efflusso da un orifizio alla base di un recipiente. Egli immaginò il liquido contenuto nel recipiente come diviso in due zone: una centrale, che chiamò '*cataratta*', il cui diametro varia inversamente con la quarta potenza della distanza da una linea superiore di riferimento in accordo con la legge della caduta libera e la legge della continuità; l'altra zona attorno alla cataratta, che affermò poter essere sìa liquida sìa congelata, avendo contributo nullo al moto della corrente.



Nell'elaborare questa teorìa, che si rivelò in séguito errata, Newton, come scrisse nell'edizione del 1686 dei suo "*Principia Mathematica Philosophiae Naturalis'* del 1686, si rese conto che, dopo essere uscito dall'orifizio, il getto d'acqua subìva una contrazione. La sezione effettiva di passaggio dell'acqua, cioè, non era quella del foro (**a**) ma era più piccola, pari all'area della *Sezione Contratta* (**b**), collocata dopo i màrgini del foro stesso. Ecco perché, concluse lo scienziato inglese, la portata (m^3/s) calcolata quale prodotto della velocità di efflusso (m/s) per l'area del foro (m^2) era sempre maggiore di quella reale. Nell'edizione dei "*Principia* . ." del 1713, riferendo delle prove effettuate, Newton concluse che la contrazione era pari al valore 0,707 (pari a $\frac{1}{\sqrt{2}}$), cioè **b** = 0,707 **a**.

L'introduzione, da parte di Newton, di un coefficiente di contrazione fu un importante passo in avanti; non lo fu invece la sua teoria della cataratta (. . . anche i geni più grandi sono esseri umani!).

Tuttavia egli raggiunse un apparente accordo tra la teoria e gli esperimenti per indicare che la zona attorno alla cataratta poteva essere veramente considerata come ininfluente al moto dell'efflusso e dunque una simile zona stagnante doveva essere considerata presente attorno ad ogni corpo immerso. Da qui dedusse che la resistenza di un oggetto al moto in un fluido (o viceversa per il principio di reciprocità) dipendeva soltanto dal valore dell'area della sezione trasversale e non anche dalla forma e volume complessivo dell'oggetto stesso.

E' interessante notare, tuttavia, che Newton considerò la forma trascurabile soltanto nel caso dei corpi completamente immersi in fluidi anelastici, intuendo gli effetti prodotti in corpi galleggianti e nel caso di fluidi elastici.

"*I corpi che galleggiano su un fluido, quando procedono in linea retta, a causa del fluido che sale sulla loro parte anteriore e di abbassa sulla loro parte posteriore, specialmente se essi hanno una forma ottusa e così essi incontrano con poca più resistenza che se essi fossero acuti dall'inizio alla fine. E i corpi che si muovono in fluidi elastici, se essi sono di forma ottusa davanti e dietro, il liquido si concentra un poco sulle loro parti davanti lo stesso si rilassa sulle loro parti dietro e così incontrano anche un poco più di resistenza che essi fossero acuti dalla testa alla coda. Ma in questi lemni e proposizioni noi non stiamo trattando di fluidi elastici o anelastici; non di corpi flottanti sulla superficie ma profondamente immersi in essa.*"

Nonostante queste escursioni nelle fasi della resistenza completamente estranee al moto dei pianeti, le sue generali conclusioni furono applicate al moto dei pianéti:

" . . . *gli spazi del cielo - attraverso i quali i pianeti, le stelle e le comete si muovono continuamente in ogni direzione, con estrema libertà, e senza la sensibile piccola diminuzione del loro moto - devono essere assolutamente vuoti da ogni corporeo fluido, ad eccezione, forse, di qualche vapore estremamente raro ed i raggi di luce.*"

Tre altri risultati delle indagini di Newton sul moto dei fluidi, più attinenti a questa Storia dell'Idraulica, méritano una menzione.

La prima: "*Se l'acqua ascende e discende alternativamente in un condotto eretto . . . di un canale o di un tubo ed un pendolo fosse costruito con lunghezza tra il punto di sospensione ed il centro dell'oscillazione, uguale alla metà della lunghezza dell'acqua nel canale, io dico che l'acqua sale e scende nello stesso tempo delle oscillazioni del pendolo.*"

La seconda, relativa al fatto che la velocità della superficie delle onde varia con la radice quadrata della lunghezza dell'onda; a questo principio egli accostò l'importante osservazione che:

"*Queste cose sono vere nelle supposizione che le parti dell'acqua scendono e salgono in una linea retta; ma in verità che salga o scenda avviene piuttosto secondo un cerchio; e così io do il tempo definito da questa proposizione come solo approssimato.*"

La terza fu la formulazione della velocità del suono nell'aria.

Come già ricordato, contemporaneamente all'attività di Newton, agiva in Germania il filosofo e scienziato tedesco barone Gottrfied Wilhelm Von Leibniz (Lipsia 1646 – Hannover 1716), che, in via autonoma dal Newton, sviluppò il calcolo infinitesimale durante il suo soggiorno, come diplomàtico, a Parigi, tra il 1672 ed il 1676, dove potè frequentare gli ambienti culturali francesi ed anche accostarsi al lavoro di Huygens, che lo introdusse negli ambienti dell'Accadémia di Francia.

Come vedremo nel prossimo Capitolo, il càlcolo scoperto dallo scienziato tedesco non procede per infinitésime differenze temporali, come quello di Newton.

Il método di Leibniz, alla fine, si rivelò quello vincente, dirimendo 'sul campo' le aspre contese che si svilupparono tra i due ed il relativi opposti schieramenti; così è che del tedesco resta maggior traccia nell'attuale simbologia, oggi utilizzata sia per il calcolo differenziale che per gli integrali, essenzialmente identica all'originale.

Leibniz ebbe certamente accesso alla corrispondenza di Newton a Huygens ed anche ne intrattenne personalmente con lo scienziato inglese nel 1677; nonostante ciò il tedesco accusò il

collega d'oltremànica di plagio, allorquando quegli pubblicò i suoi '*Principia Mathematica Philosophiae Naturalis'*, concepìti prima dall'inglese ma pubblicati successivamente all'òpera del tedesco.

Oggi sappiamo che non vi fu alcun plagio d'ambo le parti; ma, in quel tempo, la difesa di Newton da parte della scienza inglese contro gli attacchi di molti matemàtici europei produsse un contenzioso che si protrasse per decenni.

Sull'importanza della paternità di ogni scoperta, diventa caratterizzante leggere queste righe dello stesso Leibniz:

"*E' estremamente cosa utile avere conoscenza delle vere origini delle scoperte memoràbili, specialmente quelle che non sono state trovate accidentalmente ma attraverso la forza del ragionamento. Non è così molta storia che in tal modo può essere attribuita ad ogni uomo ed alle sue proprie scoperte ed altre potevano essere incoraggiate per guadagnare come raccomandazioni come che l'arte di fare scoperte può essere estesa considerando ragguardevoli esempi di essa.*"

Di Leibniz è certo il mérito d'aver impostato una rigorosa versione del càlcolo combinatorio, con notazioni che, in questo, permettevano di esprimere – secondo il tedesco – ogni cosa in una unìvoca e rigorosa simbologìa.

Giunto a conoscenza della macchina calcolatrice 'Pascaline' di Pascal, Leibniz ne sviluppò un'altra di maggiore complessità.

Sfortunatamente il suo più importante contributo alla Meccànica, il *Principio dell'energia*, diede avvìo ad un'altra controversia.

Nella rivista "*Acta Eruditorum*", nel 1686, Leibniz evidenziò un difetto nel princìpio del momento, formulato da Descartes ed anche utilizzato da Newton, attraverso la seguente "D*imostrazione del notevole errore fatto da Descartes e da altri in che essi affermano esserci una legge di natura che sempre la stessa quantità di moto è conservata da Dio; legge della quale essi fanno un uso improprio nelle applicazioni di meccanica*".

In essa leggiamo:

"*Molti matematici credono . . . delle cinque potenze meccaniche, che velocità e massa sìano mutualmente compensate e generalmente stimano la ragione della forza con la quantità di moto oppure attraverso il prodotto della massa del corpo per la sua velocità. Ma io posso mostrare come ci sia grande differenza tra queste due idee; assumo, per primo, che un corpo che cade da una certa altezza acquista una forza sufficiente per risalire alla stessa altezza data, giusta la direzione e se non interferiscono forze esterne . . . .*

Secondariamente, se una certa forza è necessaria per far risalire un corpo A pesante una libbra all'altezza di quattro braccia altrettanto lo è per fare salire un corpo B pesante quattro libbre ad una altezza di un braccio . . . così segue che il corpo A lasciato cadere dall'altezza di

quattro braccia acquista esattamente la stessa forza del corpo B lasciato cadere dall'altezza di un braccio.

Ora guardiamo la quantità di moto che pare essere di entrambi.

E' stato dimostrato, da Galileo, che la velocità acquisita dalla caduta del corpo A è doppia di quella acquisìta dal corpo B . . . perciò, al tèrmine della caduta di entrambi, la quantità di moto del corpo A è metà di quella del corpo B e tuttavia appena ora le forze di entrambi questi corpi sono state dichiarate essere uguali . . . Da questo appare in quale modo le forze dovrebbero essere valutate, cioè dalla quantità dell'effetto che sono in grado di produrre . . .".

Leibniz introdusse così il concetto di *vis viva,* o forza viva (in contrapposizione alle forze 'morte' come pressione e peso) per indicare ciò che egli chiamò la *quantità di moto* ma che oggi è nota come energìa cinética.

Come il *Momento del moto di un sistema* di Descartes e di Newton, la *vis viva* varia direttamente con la massa del corpo, tuttavia dal *Momento* differisce nell'essere proporzionale alla seconda potenza della velocità invece che alla prima. La *vis viva* di un corpo in movimento è quindi pari al prodotto della sua massa per il quadrato delle velocità e costituisce l'energìa che il moto stesso conferisce al corpo. Oggi sappiamo che questa energìa, detta Energìa Cinética, è invece pari al prodotto della massa per il quadrato delle velocità diviso due; ciò non toglie importanza alla scoperta dello scienziato tedesco.

Il nuovo concetto di energìa di ogni oggetto in movimento, fu da princìpio accettato soltanto da chi vedeva in Leibniz il genio indiscutibile ed ineguagliabile; ma, anche per la disputa aspra con Newton sulla paternità del càlcolo sublìme, non pochi erano coloro che avevano motivi, non soltanto dalla ragione mossi, per ostacolare le teorìe del tedesco.

In questa contrastata scoperta, perché era in effetti una vàlida conquista, riveste un posto di rilievo la figura della scienziata francese Gabrielle-Émilie Le Tonnellier de Breteuil, marchesa de Châtelet (Parigi 1706 – Lunéville 1749), spesso ricordata come nobildonna di profonda cultura, letterata, donna appassionata di letteratura e scienze.

Noi la vogliamo ricordare innanzitutto come scienziata, poiché lo fu veramente, ma anche per onorare la donna che seppe farsi largo tra una Comunità Scientifica in tutto ancòra radicata nella convinzione che la Scienza, o, come allora si diceva, le *scienze esatte* fossero di esclusivo appannaggio maschile.

La discriminazione delle donne, negli studi scientifici, non si attenuava neppure di fronte all'alto rango nobiliare della marchesa de Châtelet, costretta, così si racconta, a travestirsi in àbiti maschili per frequentare gli stimolanti circoli culturali della capitale.

L'incontro con Voltaire, nel 1633, fu determinante nel liberare da ogni vìncolo sociale la sua passione scientifica (. . . ed anche sentimentale). Lasciata Parigi, si ritirò con il grande filosofo-scrittore, nella propria residenza a Carey, nella Lorena, dove allestì una grande biblioteca ed un

laboratorio. Quel luogo divenne ben presto il punto di riferimento per quegli scienziati francesi che avessero desiderato avvicinarsi ed approfondire la nuova Fisica newtoniana, della quale la marchesa de Châtelet era strenua sostenitrice.

Nel 1740, la scienziata francese pubblicò *Institutions de physique*, dove esaminò i tèrmini della contesa sulla teorìa leibniziana della *vis viva*, sostenendola con convinzione e proponendone lìmpide interpretazioni anche attraverso dati sperimentali, a volte da lei stessa prodotti.

Sua fu la prima traduzione in francese dell'òpera di Newton *Pincipia Mathematica Philosophiae Naturalis*, conclusa nel 1749, poco prima della prematura morte *post partum*, e pubblicata dieci anni dopo da Alexis-Claude Clairaut, che aveva collaborato alla stesura di alcune osservazioni matemàtiche ma che poi ne trasse ogni mérito.

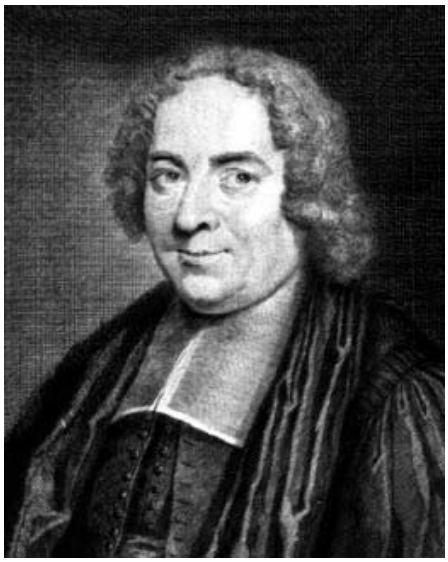
A Gabrielle-Émilie de Châtelet deve invece essere destinato il riconoscimento d'aver introdotto quest'òpera rivoluzionaria nella Francia del XVIII sécolo e, quindi, nel travolgente movimento culturale/intellettuale dell'*Illuminismo*. Tale fu la qualità della traduzione e dei commenti ad essa acclusi che questo lavoro, per due sècoli, diventò la principale versione della Fisica di Newton circolante in Francia.

La qualità del testo certo è in parte dovuta all'assidua, quotidiana frequentazione di Voltaire, il cui legame con la marchesa fu non solo culturale . . . ecco un versetto che Voltaire le dedicò:

Sans doute vous serez célèbre
Par les grands calculs de l'algèbre
Où votre esprit est absorbé
J'oserais m'y livrer moi-même;
Mais Hélas ! A + B – D
N'est pas = à Je vous aime

(Non v'è dubbio che celebre sarete / per i grandi càlcoli dell'àlgebra / dai quali il vostro spirito è assorbìto / agognerei anch'io in essi avventurarmi / ma, ahimé!, A + B – D non è uguale a 'Io vi amo'.)

. . . . torniamo alla non meno poètica, almeno per noi, Storia dell'Idraulica . . .



Buon ùltimo, qui ricordiamo il fisico matemàtico francese, Pierre Varignon (Caen 1654 – Parigi 1722), docente di meccanica al Collegio reale e membro della *Académie royale des scienses*, oltre a dare un contributo significativo allo sviluppo del càlcolo infinitesimale, concluse importanti successi in Fisica ed in Idraulica.

Mentre molti suoi contemporanei svelavano sìngoli aspetti del momento delle forze, fu Varignon che enunciò la teoria generale dei momenti e le leggi sulla composizione dei sistemi di forze, presentate, solo tre anni dopo la sua morte, nel 1725, nel suo trattato '*Nouvelle mécanique ou statique'*. La composizione dei Momenti Stàtici (cioè di un sistema di forze applicate ad un gruppo di corpi in punti a ciascuno non baricéntrico), che consente di ridurre il problema allo studio di un ùnico momento risultante, è detto *Teoréma di Varignon*.

Nello stesso anno 1725 fu data alle stampe anche la sua ùnica òpera che tratta del moto dei fluidi, '*Traité du mouvement ed de la measure des eaux coulantes et jailissantes*.", nella quale le

conclusioni raggiunte assumono ancòr oggi una certa validità. In questo testo, anche Pierre Varignon si confrontò, come tanti accanto alla marchesa de Châtelet, nella dìsputa sulla diversa natura del *Momento* dei corpi in movimento (diremmo: Momento Dinàmico) e della loro *Energìa*.

Il *Momento* di masse in movimento fu utilizzato da Varignon nel tentativo di analizzare, sotto questo punto di vista, il *Problema dell'efflusso* esposto da Evangelista Torricelli. Assumendo che il *Momento* del liquido scaturente dall'orifizio fosse prodotto dal peso della colonna di liquido posta direttamente sopra la stessa apertura, il francese giunse a calcolare una velocità dell'efflusso ben maggiore al fattore 'radice quadrata di *h*', compiendo un errore comparabile a quello di Newton nella prima edizione dei "*Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*", pur provenendo da cause assolutamente differenti. Nulla osservò Varignon, a differenza di Newton, sul fenòmeno della contrazione del getto nell'efflusso.

Seguendo la storia, ci 'spostiamo' ora in Svizzera, a Basiléa, dove operarono due matemàtici che non possono essere mai dimenticàti, in questo testo come in tantissimi altri.

Basiléa, nel 1460, divenne città universitaria e ben presto anche centro di una evoluta attività di stampa che attirò tanti scrittori e ricercatori del Rinascimento come lo scrittore ed umanista Erasmo da Rotterdam (Rotterdam ca 1466 – Basiléa 1536) ed il médico e filosofo Paracelso, al sécolo Philipp Theophrast von Hohenheim (Einsiedel 1493 – Salisburgo 1541).

Città lìbera in una Confederazione Svizzera indipendente, dai connotàti già simili agli attuali, Basiléa, posta sul confine di Francia e Germania, fu tra le méte 'preferìte' per gli Ugonotti fuggiti alla reazione cattolica della Francia e della Spagna, che, così, si privarono, a favore delle nazioni di accoglienza, di molti esponenti delle categorie emergenti, forze vive e vivàci tra le quali il credo calvinista aveva ottenuto vasti consensi.

Quante volte la Storia dell'umanità ha registràto, e tutt'ora registra, migrazioni 'della disperazione e del dolore', spesso provocàte dall'uso aberrante della fede religiosa!

Nella città svizzera, tra questi emigranti, perseguitàti nella loro patria, c'era anche il capostìpite di una famiglia il cui nome riecheggerà, con suono altissimo, nella Matemàtica e nell'Idràulica: i Bernoulli. Di questo eccezionale fenòmeno di 'genialità famigliare' vedremo alcuni aspetti nei prossimi Capitoli.

Tra Galileo Galilei e la famiglia Bernoulli (accomunando tutti i membri di questa straordinaria genìa di ottimi scienziati e studiosi) si ebbero tali e tanti progressi nella Fisica e nella Matemàtica da segnare di fatto una nuova era, della quali ancòr oggi sentiamo i benéfici effetti.

Tra il Seicento ed il Settecento, in poche decìne di anni, alcuni fenòmeni, particolarmente significativi anche per il comportamento dei fluidi, furono adeguatamente indagàti ed interpretati: la pressione, la gravità, l'energìa. Essi disegnarono un nuovo sfondo nel quale orientare la ricerca in Idraulica, secondo prospettive più efficaci nel risolvere i problemi sino ad allora apparsi insuperabili.

I sécoli che precedettero questo sbalorditivo periodo furono comunque essenziali, perché la cultura dell'umanità procede nutrendosi ad ogni passo, piccolo o grande che sìa, portato da coloro che si impegnano ad indagare ciò che ancòra non è nòto. Questo cammino non si interrompe mai, ma procede a velocità differenti, a volte anche soltanto apparentemente diverse.

All'inizio del Seicento l'Idraulica si presentava ancòra come un'arte prevalentemente empirica; alla fine di questo sècolo ad essa, come a tante altre discipline, furono messi a disposizione numerose nuove scoperte e potenti strumenti; tra questi ùltimi, certamente, il più importante fu il '*Càlcolo Sublìme*'.

* * *

Cap. 12 – Il Càlcolo Sublìme

Non appena la nascente 'Scienza dei numeri' mostrò l'utilità delle prime pràtiche applicazioni, si manifestò un'esigenza pienamente soddisfatta soltanto nel XVII sécolo: descrivere, con i numeri, *il continuo* e la sua più intuitìva manifestazione, il *movimento*.

Lo scorrere dell'acqua è certamente un embléma della continuità del movimento e la sua interpretazione matemàtica, avvenuta nel '*Sécolo del lumi*', ha costituìto per l'Idraulica il momento cruciale del passaggio dalla conoscenza ancòra empirica-sperimentale alla trattazione matemàtica rigorosa dei fenòmeni osservàti.

Prima di affrontare questo nuovo balzo culturale della Storia dell'Idraulica, forse il vero discrìmine tra 'antico' e 'moderno', abbiamo voluto inserìre un Capitolo che tratti dell'evoluzione di quella parte della scienza matemàtica che ha sviluppato il càlcolo in grado di interpretare il continuo, il movimento; un càlcolo dalle caratteristiche talmente complesse, concettuali e strutturali, e dai successi così stupefacenti, rimuovendo ostàcoli in alcuni casi per millenni apparsi invalicàbili, da meritare l'originario appellativo di: *Càlcolo Sublìme*.

Nòto oggi come *Càlcolo Infinitesimàle*, questo potentissimo strumento matemàtico deve le proprie origini ad un problema che restò costante e presente sino al términe della sua evoluzione nel XIX sécolo: la 'quadratura' delle figure curve, cioè la capacità di misurare, o meglio di 'tradurre in numeri', una linea curva, prima fra tutte la circonferenza (o il cerchio), che delle curve è la regìna.

Nel quinto sécolo avanti Cristo il greco Ippòcrate di Chìo si pose, per primo, il problema della quadratura di linee curve, in particolare delle lùnule; ed ancòra nel XVII sécolo, di " . . . *quadratura del cerchio . . e . . di altre curve*" scrisse Jaques I Bernoulli, in una lettera a Gottfried Wilhelm Leibniz del 15 dicembre 1687, chiedendo lumi al matemàtico tedesco sulla sua " . . . *matemàtica più sublìme che finora non sono riuscito ancòra a penetrare* . . . ".

Duemila e duecento anni di ricerca per giungere al completo dominio delle linee curve!

In realtà i risvolti del Càlcolo Infinitesimàle furono, ovviamente, più ampî, ma resta il fatto che il primo ragionamento, che ad esso possiamo ricondurre come primo passo, si riferìva al problema di comprendere (in modo matemàtico) le linee curve; anche a questo scopo l'ésito finàle rese un perfetto servizio.

Ecco allora che ridurre la storia del Càlcolo Infinitesimàle con l'evoluzione della quadratura delle curve è, per certi aspetti, un azzardo; lo riteniamo però non privo di validità e di coerenza per chi, come noi, intende stendere un racconto comunque divulgativo per i non specialisti.

Sperare nell'indulgenza dei matemàtici è una risorsa da giocare ora!

Costruiremo il filo principale del nostro racconto, quindi, seguendo l'evoluzione dei sistemi, prima geométrici poi matemàtici, per la quadratura delle curve.

Esiste un'affinità, prima di tutto intuitìva, tra una qualunque linea curva ed il concetto di continuità: la curva, continua - cioè senza lìmite - oppure chiusa, una circonferenza o un'ellisse, ben rappresenta l'immagine di un percorso, senza interruzioni od ostacoli, lungo il quale possiamo immaginare di 'stendere' lo svolgersi di un fenomeno, di un movimento: lo scorrere dell'acqua, un flusso finanziario, . . . il consumarsi del tempo, il moto di un oggetto, la pressione del sangue, ...

Sin dall'inizio e sino al término dell'ultima scoperta, ogni anàlisi si è rivolta ad un modello apparentemente sémplice: per conoscere le caratteristiche di una linea curva il modo più diretto, diremmo migliore, è riuscire ad approssimarla secondo una successione di segmenti rettilinei; più questi sono numerosi, e quindi di minor lunghezza, maggiore è l'approssimazione, cioè più ci si avvicina al valore esatto della curva indagata. Aumentando il numero dei segmenti che, seguendone il percorso, appròssimano la curva, minore è l'errore. Procedendo in tale direzione si può raggiungere il grado di approssimazione minore immaginabile, cioè accettabile per affermare di aver 'risolto' la curva e con essa avere la possibilità di 'trattarla' in modo matemàtico, che vuol dire non soltanto misurarla ma: trovarne il raggio di curvatura, la tangente, l'area racchiusa, la proporzionalità con altre figure, ...

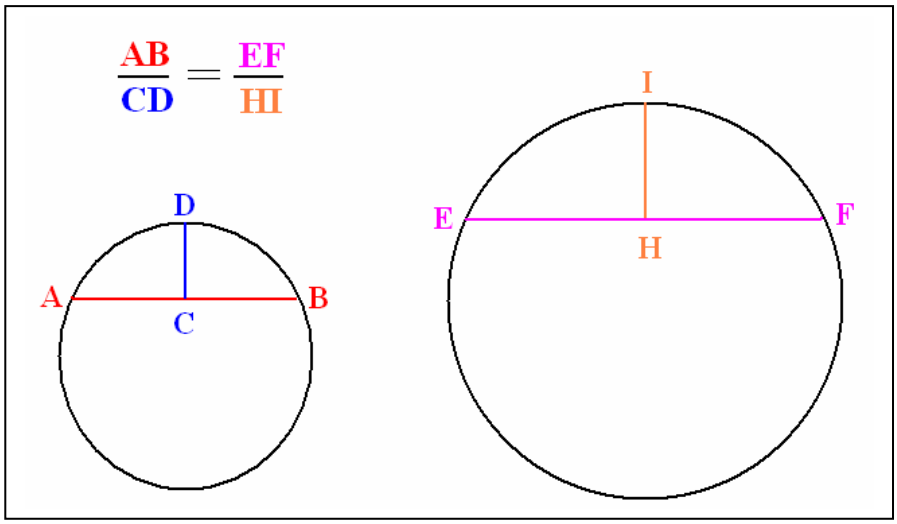
Il percorso inizia nella seconda metà del quinto sècolo a.C., naturalmente in Grecia,dove troviamo il primo studioso che risulta essersi impegnato nello studio delle linee curve: Ippocrate di Chìo (che non deve essere confuso con il suo contemporàneo Ippocrate di Coo, al quale molto deve la Medicina e che ogni médico ricorda nel pronunciarne, all'inizio della carriera, il giuramento).

Di Ippòcrate di Chìo non possediamo alcun testo; sappiamo che scrisse un trattato "*Elementi di geometrìa*", che probabilmente anticipava alcuni concetti poi resi universali da Euclìde nel suo "*Elementi*".

Del lavoro di Ippòcrate abbiamo una testimonianza indiretta dallo stòrico Simplìcio, vissuto nel quinto sècolo dopo Cristo, che afferma d'aver trascritto il testo "*Storia della Geometrìa e dell'Aritmética*" di Eudémo di Rodi, filosofo, allievo di Aristòtele, vissuto nel IV sécolo a.C..

In questo libro, Eudémo attribuisce a Ippòcrate di Chìo la scoperta di questo teòrema:

"*Segmenti di cerchio sìmili stanno tra loro come i quadrati costruìti sulle loro corde.*"



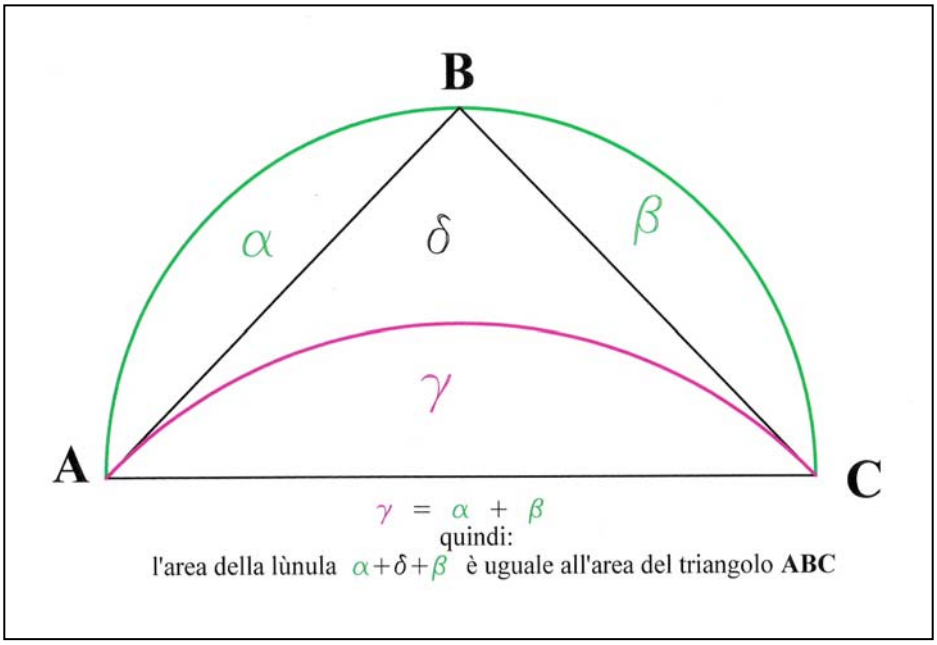
Ecco un primo passaggio da chiarìre: per *segmenti di cerchio sìmili* sono da intendere, come indicato nella figura a lato, segmenti che hanno lo stesso rapporto tra la freccia (**CD** e **HI**) e le rispettive corde (**AB** e **EF**).

Eudémo non dice come Ippòcrate seppe giustificare il fatto che le aree dei quadrati costruìti sulle corde **AB** e **EF**, che ne sono i lati di base, hanno il medésimo rapporto delle superfici dei due segmenti di cerchio **ADBC** e **EIFH**; la dimostrazione fu condotta successivamente, ad òpera di Eudosso di Cnido (408? – 355 ? a.C.) e poi di Euclìde nel libro XII del suo "*Elementi*".

Il fatto è comunque importante perché, partendo da questo teòrema, Ippòcrate di Chìo giunge alla prima quadratura di una classe di figure curvilinee: le lùnule.

Una lùnula è una figura limìtata da due segmenti di cerchio in cui il minore sìa contenuto nel maggiore.

La prima e più semplice lùnula, della quale Ippòcrate rende la misura, è quella (che indichiamo, nel disegno a fianco, come formata da **α** + δ + **β**) ottenuta in un semicerchio nel quale sìa inscritto un triangolo isoscele rettangolo **ABC** (che è la metà del quadrato inscritto nel corrispondente cerchio). I due catéti, **AB** e **BC**, uguali del triangolo, indivìduano due segmenti di cerchio altrettanto uguali: **α** e **β**.

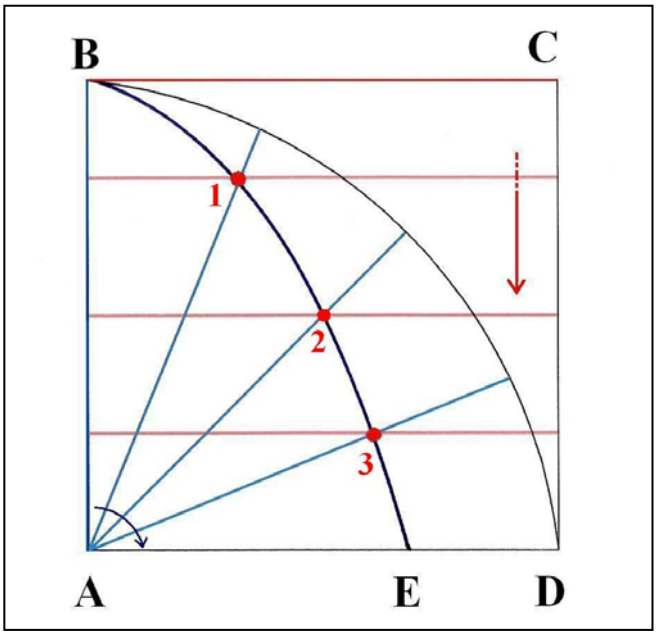


Sull'ipotenusa del triangolo, che è anche il diàmetro del semicerchio, Ippòcrate traccia un nuovo segmento di cerchio, **γ**, sìmile ai due staccati sui catéti.

Sfruttando la proporzione del teòrema suddetto, Ippòcrate dimostra che l'àrea della lùnula **α** + **δ** + **β** (cioè della figura compresa tra semicirconferenza del semicerchio e contorno del segmento costruìto sul diàmetro) è uguale all'area del triangolo **ABC**: ecco la prima 'quadratura di una figura curva", cioè l'aver dimostrato che l'area di una figura curva è uguale all'area di una figura 'rettilinea', perfettamente misurabile.

Entra ora in scena Ippia di Élìde, contemporàneo di Ippòcrate ed anch'egli attivo ad Atene, del quale, pur non disponendo di lavori originali, sappiamo molto perché oggetto di numerosi commentatori, tra i quali lo stesso Platone.

Ippia introduce, nella geometrìa greca, una novità, certo per quel tempo stravolgente: una nuova curva, diversa dalla circonferenza, ùnica consideràta sino ad allora, necessaria per risolvere un altro problema caro agli studiosi: la divisione in tre parti uguali di un àngolo, detta '*Trisecazione dell'àngolo*'.

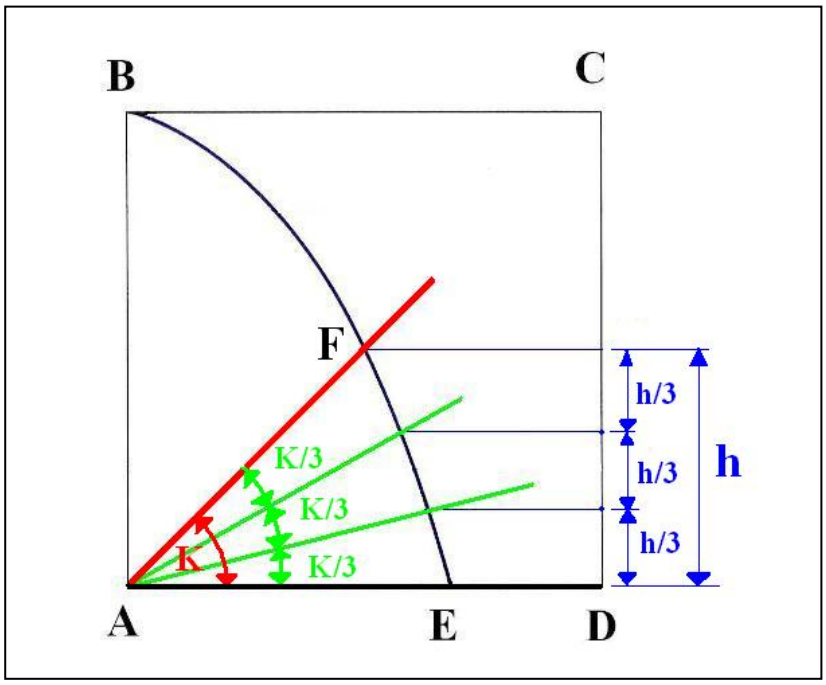


Per costruire questa curva, per l'appunto chiamata "*Trisettrice di Ippia*", si deve immaginare di traslàre verso la base **AD** il lato superiore **BC** del quadrato e, contemporaneamente, far ruotare, sul vértice inferiore **A**, il lato verticale **AB**, alla stessa velocità, ovvero: il lato che trasla e quello che ruota giungono insieme a coincidere con la base.

Mentre questo dùplice movimento si compie, i due lati individuano diversi punti di intersezione (**1**, **2** e **3**) che, unìti, fòrmano la curva **BE**: la *Trisettrice di Ippia*.

Per dividere in tre parti uguali un àngolo **K** è così sufficiente dividere in tre parti uguali la parte **h** del lato del quadrato individuata dal punto di intersezione **F** del lato dell'àngolo con la curva trisettrice.

I due punti sul lato, projettati sulla trisettrice medésima, individuano gli àngoli, ciascuno terza parte dell'àngolo dato (**K/3**).



'Chiudiamo il cerchio', è proprio il caso di dirlo!, con Dinòstrato (IV Sécolo a.C.), allievo di Eudosso, che scopre un'importantissima applicazione della curva *Trisettrice di Ippia*: il lato del 'quadrato di Ippia', **AB**, è medio proporzionale tra l'arco del quarto di cerchio **BD**, inscritto nel quadrato stesso, ed il segmento che la curva Trisettrice stacca alla base del quadrato.

Con riferimento al disegno qui sotto riportato, possiamo quindi scrivere:

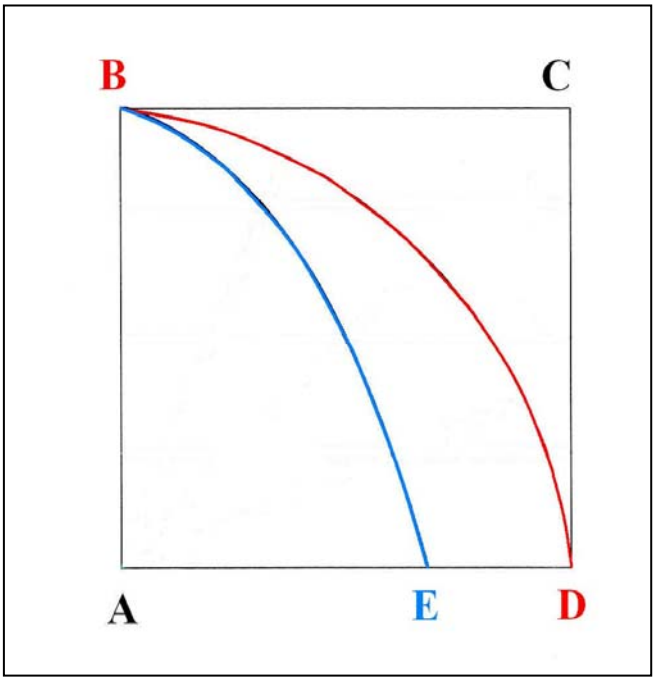
$$BD : AB = AB : AE$$

Cioè

$$\frac{BD}{AB} = \frac{AB}{AE}$$

quindi

$$BD = \frac{AB^2}{AE}$$



Ecco, così, ottenersi la misura della quarta parte, **BD**, della circonferenza, quindi la misura della circonferenza: **BD** x 4.

Inoltre Dinòstrato dimostrò che il doppio di questa misura (quindi la metà della circonferenza) moltiplicato per il raggio dà la superficie del cerchio: eccoci giunti alla soluzione del problema di quadratura, per via geométrica, del cerchio.

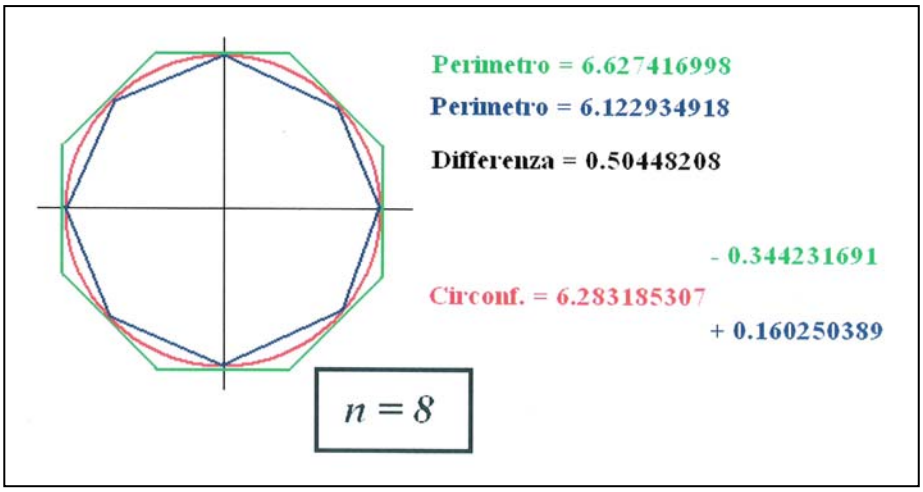
Prima Eudosso di Cnìdo e poi Archiméde di Siracusa (Siracusa 287–212 a.C.), giunsero per altra via alla quadratura del cerchio; una via matemàtica che già anticipava concetti e métodi di stupefacente modernità.

"*Considerata una qualsìasi grandezza, se da questa se ne sottrae una parte che sìa superiore alla metà si ottiene una nuova grandezza, minore della metà della precedente. Se da quest'ultima si sottrae nuovamente una parte superiore alla sua metà e così si procede quante volte si vuole, al términe delle sottrazioni si otterrà una grandezza che è sicuramente inferiore a qualunque delle grandezze precedentemente ottenute*."

Secondo questo enunciato è possibile giungere alla quadratura del cerchio.

È infatti sufficiente considerare il cerchio assieme a due poligoni regolari (che hanno quindi tutti gli àngoli ed i lati uguali tra loro), uno circoscritto e l'altro inscritto. Raddoppiando più volte il numero dei lati dei poligoni, la differenza delle aree tende ad essere sempre più piccola, sino a differìre di una quantità piccola quanto si vuole, che costituisce l'approssimazione con la quale è misurata l'area dello stesso cerchio.

Si 'comprime' cioè il cerchio, che è una lìnea curva, tra due polìgoni regolari, perfettamente misurabili, sino a quando la differenza delle loro aree diventa tanto piccola da potersi considerare insignificante; duemila anni dopo si dirà: *infinitesimàle*.



Con tale método si potevano così risolvere, certo non senza notevoli complicazioni, tutte le figure limitàte da lìnee o da supeficî curve.

Utilizzando due ottagoni, come nel disegno a fianco, che 'schiacciano' la **circonferenza** di raggio uguale ad uno, si ottiene una differenza tra le rispettive superficii pari a 0,50448208. Conoscendo, oggi, la misura della circonferenza, compresa tra i due ottagoni, vediamo che l'**ottagono circoscritto** ha un perimetro maggiore di 0,344231691, mentre l'**ottagono inscritto** ha un perimetro minore di 0,160250389; con poligoni di soli otto lati . . . l'approssimazione è assai grossolana!

Nel trattato '*Misura del cerchio*', Archiméde, 'schiacciando' la circonferenza con due polìgoni regolari (uno circoscritto e l'altro inscritto) di 96 lati, determinò il valore del rapporto tra circonferenza e diàmetro, oggi chiamàto π ('p greca') che doveva essere compreso tra i valori: 3 + 10/71 e 3 + 1/7, cioè tra 3,14085 e 3,14286, con un màrgine di errore compreso tra 0,00074 e 0,00127.

Apollonio, già citato, giunse ad una migliore approssimazione: 3,1416, con un errore dell'ordine di 0,00001.

Nel XVII sècolo questo procedimento fu chiamato *Método di esaustione*', per significare che si procede approssimando gradualmente la curva rendendo minima la differenza tra le aree del poligono circoscritto e di quelllo inscritto; tale differenza, quindi, si '*esaurisce*', cioè se ne compie l' '*esaustione*'. Archiméde, invece, utilizzava il términe di '*Schiacciamento della curva*' tra i due polìgoni che, aumentandone i lati, gradualmente la 'comprimono' sempre più, sino a giungere a differenze minime, . . . infinitesimàli.

Risolto il problema della quadratura del cerchio, quindi 'vinta' la regìna di tutte le curve, la geometrìa dell'antica Grecia cominciò ad inventare e risolvere innumerevoli altri tipi di curve, cominciando da: ellisse, parabola, iperbole, secondo i nomi dati da Apollonio di Pérge, o di Pérgamo (ca 262 – ca 180 a.C.).

Ossitòma, *orthotòma*, *amblitòma*: questa era la denominazione precedente, che pare doversi attribuire ad Euclìde, derivata dal pensiero comune che queste tre curve potessero essere ricavate soltanto dall'intersezione di un piano secante perpendicolarmente tre coni retti, tra loro distinti per il rispettivo differente àngolo al vértice (da ciò discende il genérico tèrmine di *Còniche*): angolo acùto → *ossitòma* (ellisse); angolo retto → *orthotòma* (paràbola); angolo ottuso → *amblitòma* (ipérbole).

Apollonio, probabilmente su suggerimento di Archiméde, coniò i términi che ancòr oggi utilizziamo, dimostrando che le tre curve potevano essere ottenute da qualsìasi tipo di cono, variando semplicemente l'inclinazione del piano che lo intérseca.

Archiméde di Siracusa fu senza dubbio il più rilevante protagonista delle prime 'esplorazioni del mondo delle curve', come testimòniano molte sue òpere ed in particolare: '*Della sfera e del cilindro*', '*Conòidi e sferòidi*', '*Sulle spiràli*' e la già citata '*Misura del cerchio*'.

Lo scienziato siracusano risolse con completezza la sfera, definendone non solo tutte le caratteristiche spaziali (volume, superficie, suddivisione in parti predefinite, ...) ma anche i rapporti tra questa ed i sòlidi ad essa inscritti o circoscritti.

Con Apollonio la grandezza della Geometrìa della Grecia antìca si compléta, ma di lui sono andate perdute quasi tutte le òpere, compreso '*Il tesoro dell'Analisi*', un testo enciclopédico per coloro che, assimilàti gli *Elementi* di Euclìde, avessero desideràto acquisire la capacità di risolvere le curve. Gran parte della sua òpera più importante, '*Còniche*', è giunta sino a noi attraverso la versione in àrabo dei fratelli Banū Mūsā (Muhammad, Ahmad e al-Hasan), priva, purtroppo, dell'ultimo libro, l'ottavo, irrimediabilmente perduto.

Nel trattato '*Còniche*', ed in particolare nel libro V, lo stesso Apollonio sembra credere d'aver raggiunto il completamento della conoscenza di ogni possibile tipo di linea curva, soffermandosi a definirne ogni possibile proporzione, combinazione, attributo, ivi compresa la 'retta minima', ovvero il segmento più corto che collega un qualsìasi punto ad una curva, senza peraltro definìre il concetto di perpendicolarità ad una curva.

Dobbiamo ora compiere un 'salto' di cinquecento anni per trovare un nuovo passo in avanti nello studio delle curve, o, meglio, delle *còniche*.

Pappo di Alessandria, vissuto nel IV sécolo dopo Cristo, deve la propria fama all'òpera '*Collezione*', nella quale ci tramanda molte parti degli studi di matemàtici antichi (Archiméde, Euclìde, Apollonio, Toloméo), aggiungendo suoi originali contributi.

Nel libro VII della '*Collezione*', viene posto il cosiddetto '*Problema di Pappo*', la cui più generale soluzione doveva giungere, millequattrocento anni dopo, ad òpera di René Descartes.

Pappo introduce un nuovo *luogo geométrico*, insieme di punti nel piano o nello spazio che hanno una medésima caratteristica, generàto da punti che possono essere individuati da prefissate condizioni di distanza e di recìproche proporzioni rispetto ad un gruppo di rette, inizialmente in numero di quattro. Pappo, oltre ad affermare che questo nuovo luogo geométrico si

può concepìre anche con più di sei rette, senza però riuscire a dimostrarlo, si rende conto che esso è in realtà una curva, una nuova curva in tutto diversa da quelle conosciute prima nel mondo greco, sempre concepìte secondo concetti geométrici (intersezioni di figure e di sòlidi), o cinemàtiche (raffigurazioni dei tracciati di punti o figure in movimento).

Il '*Luogo di Pappo*' è un nuovo tipo di curva, direttamente definìta da soli rapporti matemàtici e che, come questi ultimi, può concepirsi in numero infinìto.

Con Pappo di Alessandria, la 'famiglia delle còniche' si espande così senza lìmiti nella sterminàta 'famiglia delle curve', della quale la prima si dimostra essere soltanto una piccola particolarità.

Conosciute matematicamente, nell'antica Grecia, le curve che, per molti motivi, possiamo chiamare 'classiche', Pappo di Alessandria apre così un nuovo assai più vasto panorama di 'curve possibili', la cui compléta risoluzione, come già detto, attenderà più di un millennio.

Lo studio delle curve subisce una nuova interruzione, per riprendere di fatto nell'undicesimo sécolo, grazie ai matemàtici àrabi.

Abbiamo già visto come gli studiosi dell'Islam tradussero molte òpere greche e, tra queste, *Elementi* di Euclìde e *Còniche* di Apollonio. Dei lavori di Archiméde gli àrabi conobbero soltanto *La misura del cerchio* e *Della sfera e del cilindro*. I trattati che approfondivano il metodo di esaustione, sino a particolarità vicine alla geometrìa infinitesimàle, non furono tradotti in àrabo, probabilmente perché non giunsero nelle terre dell'Islam.

I matemàtici àrabi, quindi, svilupparono in modo indipendente ed originale teorìe di geometrìa infinitesimale, in questo aiutàti dal potente linguaggio dell' Álgebra di al-Hwārizmi, che permetteva un'astrazione ben superiore alla Aritmética ed alla Geometrìa greche.

La prima òpera àraba di sviluppo della geometrìa di Archiméde la dobbiamo ai fratelli Banū Mūsā: Muhammad, Ahmad e al-Hasan, che scrissero il libro "*Kitāb Ma'rifat misāhat al-aškāl al-basīta wa-'l-kuriyya*" ('*Libro per conoscere l'area delle figure piane e sferiche*'). In esso troviamo trattazioni complete dei seguenti argomenti: la misura del cerchio, della superficie e del volume della sfera, la dimostrazione delle formula di Eròne per il triangolo rettangolo, la trisezione dell'angolo e la definizione del medio proporzionale.

Diventa sostanziale leggere l'ultimo periodo del trattato: "*Tutto ciò che abbiamo descritto nel nostro libro è òpera nostra, eccetto la conoscenza della circonferenza a partire dal diametro, che è dovuta ad Archiméde, e la conoscenza della posizione di due grandezze tra altre due grandezze affinchè* [tutte e quattro] *si susseguano secondo lo stesso rapporto, che si deve a Menelao . . .* ".

Disponendo delle sole due òpere archimedee, *La misura del cerchio* e *Della sfera e del cilindro*, i fratelli Banū Mūsā ripercorsero quindi autonomamente la via del grande scienziato siracusano, giungendo ai medèsimi risultati secondo métodi perfezionàti.

Archiméde non era giunto sulla più alta 'vetta' dell'antìca *Geometrìa*!

Il trattato *Libro per conoscere l'area delle figure piane e sferiche*, dei Banū Mūsā, tradotto da Gerardo da Cremona, e la *Misura del Cerchio*, di Archiméde, saranno i testi di riferimento nella ricerca geometrico/matemàtica europea del Rinascimento.

Un collaboratore dei Banū Mūsā, Tābit ibn-Qurra (826 – 901), raggiunse un livello che poi, per altri sécoli, non fu più raggiunto da altri. Utilizzando le proprietà delle proporzioni dei segmenti e le successioni di rapporti, riuscì a dimostrare il teorema che pone l'area del segmento di parabola pari a due terzi del rettangolo ad esso circoscritto.

Procedendo nell'analisi della parabole, Tābit ibn-Qurra introdusse la suddivisione della curva in parti sempre più piccole, dimostrando che l'area poteva essere espressa come la somma delle aree di tutte le parti, piccole a piacere cioè infinitesime, nelle quali la curva era divisa.

L'anticipazione del càlcolo infinitesimale è ormai evidente.

Seguirono altri matemàtici eccelsi, sino alla metà dell'undicesimo sécolo, poi la Matemàtica àraba si arrestò e soltanto parte di essa venne tramandata alla nascente Europa. Gli sviluppi più 'ardìti' restarono relegàti nelle traduzioni latine, senza che da essi alcuno continuasse la strada interrotta; probabilmente era la sòlita 'fuga in avanti', arrestatasi per la scarsa adeguatezza degli strumenti del linguaggio matemàtico.

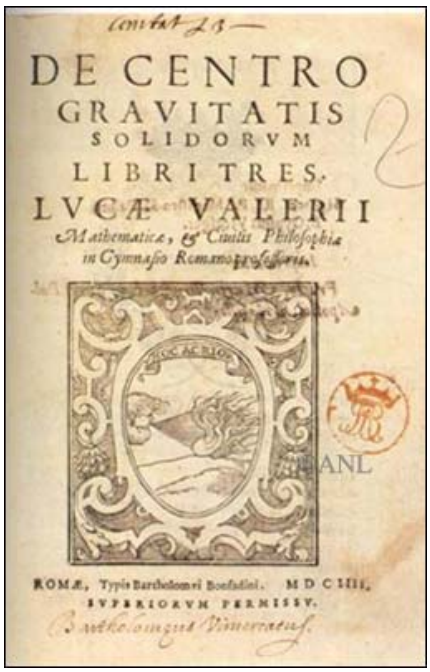
Ecco un altro salto temporale, nel quale si consuma l'ultimo e decisivo periodo di 'attesa' nel percorso verso il *Càlcolo Sublìme*.

Dobbiamo infatti giungere sino al XVI sècolo, periodo di numerose 'rivoluzioni' culturali, per incontrare i matemàtici che, attraverso contributi diversi ed a volte contrastanti, imposteranno, in forma definitiva, il càlcolo infinitesimale.

Il primo di questi, che 'riavvia', in modo significativo, la ricerca in questo campo, fu Luca Valerio (Corfù 1553 – Roma 1618). Entrato, a diciassette anni, nella Compagnìa di Gesù, nel 1601 ottenne – dopo aver frequentato potenti famiglie romane – la cattedra di Matemàtica alla Sapienza. Ammesso, nel 1612, all'Accadémia dei Lincei, fu amìco e discepolo di Galileo ma di questa vicinanza fece motivo, durante lo stato d'accusa subìto dal toscano, per allontanarsi anche dall'Accadémia nel 1616.

Possiamo dire che Valerio riprese il lavoro dove Pappo di Alessandria lo aveva lasciato mille anni prima: la curva non è solo una figura geométrica, come la intende la geometrìa archimedea della Grecia antìca; la curva è un 'luogo di punti' che hanno proprietà comuni, che appartengono ad una stessa legge matemàtica.

La dizione è, ora, assolutamente più generale, ancor più del 'Luogo di Pappo'.


DE CENTRO
GRAVITATIS
SOLIDORVM
LIBRI TRES.
LVCÆ VALERII
Mathematicæ, & Civilis Philosophiæ
in Gymnasio Romano professoris.
ROMÆ, Typis Bartholomæi Bonfadini. MDCIIII.
SVPERIORVM PERMISSV.

Le infinìte curve che Luca Valerio definisce posseggono una proprietà assolutamente generale: " . . . *circa diametrum et circa axim in alteram partem deficientes* . . ."; sono cioè figure, piane o sòlide, nelle quali si può individuare un diametro, o un asse, lungo il quale riducono la propria dimensione ad esso perpendicolare.

Tali sono le figure geométriche della tradizione Greca, di Euclìde e di Archimède, ma tali sono anche infinìte altre curve, che potremmo dire 'nuove'.

Luca Valerio sfrutta questa definizione per risolvere, con uno stesso método, qualunque tipo di curva, allo scopo di determinarne il centro di gravità, aspetto che aveva suscitato grande interesse a partire dalla seconda metà del Cinquecento. Nell'òpera '*De centro gravitatis solidorum*' (1604) sono individuati, con sorprendente unicità di metodologìa, i centri di gravità di tutte le còniche 'classiche' ma anche di tutte le figure, definìte da linee curve, purchè digradanti '*circa diametrum et circa axim*'.

Galileo Galilei fu profondamente impressionàto dalla lettura del '*De centro gravitatis solidorum*' ritenendolo un lavoro che ormai aveva esaurito, con soluzioni generali, il problema della definizione dei centri di gravità delle figure, sòlide e piane; questa convizione spinse lo scienziato toscano ad abbandonare questo tipo di studî, ritenendolo

infatti ormai esaurìto, giungendo ad affermare che Luca Valerio meritasse d'essere indicato quale ' . . . *nuovo Archiméde dell'età nostra*'.

Ecco la strabiliante novità, che può far parlare di una svolta epocale nella Geometrìa: si possono individuare métodi ùnici per risolvere tutte le figure curve, purchè di esse sìa individuata una comune proprietà. La scoperta fu tanto 'rivoluzionaria' che lo stesso suo scopritore, al tèrmine del '*De centro gravitatis solidorum*', cerca di 'salvare' la geometrìa euclidéa dimostrando che si potevano raggiungere gli stessi risultati seguendo anche una '*via magis naturalis*', assai sìmile alla tradizione di Archiméde; ma ormai . . . il dado è tratto!

I frutti del grande lavoro di Luca Valerio e di studi ed osservazioni di Galilei e di Keplero, furono colti dal maggior matemàtico dell'era che con lui stesso si concluse: Bonaventura Cavalieri (Milano 1598 – Bologna 1647). Religioso, dal 1615 frate nell'ordine monàstico dei Gesuàti (fondato da S. Girolamo nel 1360 e soppresso nel 1668 da papa Clemente IX – quindi da non confondere con l'òrdine dei Gesuìti, ancòr oggi attivo), venne trasferìto a Pisa, nel 1616, dove studiò con Benedetto Castelli, alla scuola di Galileo ed allo stesso segnalàto per le sue eccezionali doti di matemàtico. Richiamàto a Milano, nel 1620, intrattenne una corrispondenza con la scuola pisana, dalla quale si può seguìre l'evoluzione del suo pensiero che lo portò, nel 1627, a completare la prima versione dell'òpera sua più importante: "*Geometrìa indivisibilibus continuorum nova quadam ratione promota*", pubblicata soltanto nel 1635 a Bologna dove, dal 1629, riuscì ad ottenere una cattedra di 'lettura di Matemàtica', còmplice l'appoggio dello stesso Galileo.

Bonaventura Cavalieri non poteva immaginare che l'ìdea che sta alla base della sua scoperta era . . . vecchia di circa 1850 anni!; questa notizia, infatti, giunse soltanto nel 1906. In quell'anno, uno studioso tedesco, J. L. Heiberg, scoprì, nella bibliotéca Gerosolimitana di Istambul (un tempo Costantinòpoli e poi Bisanzio) una trascrizione di alcune parti delle òpere di Archiméde, tra le quali una lettera che lo scienziato siracusano aveva inviàto a Eratòstene, direttore del Museo di Alessandria, dove aveva sede la famosa Bibliotéca. In questo documento, Archiméde sostiene che le figure piane, per quanto complesse, si possono dividere in fili 'pesanti', e le figure sòlide in piani, che si possono poi ricomporre a formare altre figure più sémplici, facilmente risolvibili. L'indicazione è, in Archiméde, restata un'intuizione senza séguito, ma fa di lui certo la più grande mente matemàtica di tutti i tempi.

Ecco cosa codìfica Bonaventura Cavalieri: un método che consente di scomporre qualsìasi figura, piana o sòlida, in linee o piani paralleli, con i quali condurre analisi di proporzionalità e di similitudine, al fine di poter assimilare l'oggetto esaminàto ad altri dei quali è già nota la soluzione (cioè se ne conoscono gli attributi: superficie, baricentro, simmetrìe, centri, volumi, . . .).

Questi elementi, nei quali ogni oggetto geométrico può essere scomposto, sono, per Cavalieri, le sue parti elementari, perciò indivisibili, che chiama '*Tutte le linee*' e '*Tutti i piani*', a seconda che formino una figura piana o un sòlido.

Mentre Luca Valerio individua classi di curve con una comune caratteristica, " . . . *circa diametrum et circa axim in alteram partem deficientes* . . .", per risalìre alla definizione del loro centro di gravità, il frate gesuàto milanese definisce un método generale per risolvere, in ogni aspetto, qualsìasi forma o figura.

Siamo all'épilogo della 'conquista' di 'tutte le curve'?

No, siamo 'semplicemente' all'épilogo del modo antìco di affrontare questo problema ed alla conseguente apertura della nuova prospettiva.

Ora è dimostrato che esistono classi generàli ed infinìte di figure geométriche, piane o sòlide, e quindi si possono trovare i mètodi, altrettanto generàli e generalizzabili, per la loro risoluzione.

Dopo Cavalieri, la ricerca non partirà più dall'origine geométrica del problema, cioè non sarà più la figura geométrica il punto di partenza; si sta ormai avvicinando il momento nel quale anche la Geometrìa sarà risolta con un linguaggio puramente matemàtico.

Una prospettiva in tutto nuova e certo 'rivoluzionaria'.

Protagonisti di questo cambiamento epocàle sono i matemàtici francesi, quasi che la scuola italiana di Galileo si fosse spenta prematuramente con la morte di Cavalieri e di Torricelli; quest'ultimo, che mostrava capacità tali da far presagire che stesse avvicinandosi alla scoperta conclusiva del Càlcolo Sublìme, che poi fù d'altri, aveva soltanto trentanove anni.

François Viète (Fontenay-le-Comte 1540 – Parigi 1603), René Descartes (La Haye 1596 – Stoccolma 1650) e Pierre de-Fermat (Beaumont de-Lomagne 1601 – Castres 1665), furono senz'altro i principàli, ma non gli ùnici, artèfici di questo nuovo mondo matemàtico, che preparò il 'terreno' per l'ultimo atto di questo capitolo.

Tra la morente scuola galileiana e la vivacissima comunità matemàtica francese, teneva i collegamenti e suscitava gli interessi e le collaborazioni un personaggio che abbiamo già incontrato, la cui importanza non sarà mai sufficientemente celebrata: Marin Mersénne. Spesso, nei libri che parlano di quest'época, risuona l'eco della sua voce e soprattutto l'azione infaticàbile della sua corrispondenza.

Viéte riordinò la notazione algébrica, utilizzando, nelle equazioni, le lettere dell'alfabéto con una règola costante: le vocali per indicare le incognite e le consonanti per le grandezze note o per i paràmetri costanti. Con tale mètodo Viéte fu in grado di definìre una serie di régole algébriche, sino ad allora già applicàte ma mai enunciate nella loro generalità, come ad esempio: la proprietà distributiva del prodotto o l'elevamento a potenza di un binomio, . . .

Viéte iniziò a cercare le soluzioni (*radici*) delle equazioni attraverso costruzioni geométriche, precedendo, su questa strada, Descartes (in Italia, italianizzato in Cartesio, in modo certo poco appropriato, giacchè il suo cognome originale era Des Cartes), frate gesuìta, filosofo e scienziato, uomo di spicco del XVII sécolo.

La sua òpera filosofica più grande, '*Discours de la méthode*', pubblicata a Leida nel 1637, contiene tre appéndici: '*La dioptrique*', '*Les metéores*' e '*La Géométrie*', tutte impostate sulla prima régola del método cartesiano:

"*Non ammettere come vero nulla che non si sia riconosciuto con evidenza per tale . . .* ".

Complétano il método di Descartes altre tre régole, che devono essere seguìte in ogni processo della mente:

- *anàlisi*: dividere ogni problema nel maggior numero possibile di parti minori e più semplici;
- *sìntesi*: ricomporre gli elementi sémplici servendosi di connessioni di per sé evidenti;
- *enumeràzione*: rivedere ogni passaggio fino a giungere alla certezza dell'esattezza di ciascuno, senza l'òmbra del dubbio.

L'applicazione del método alla scienza matemàtica è evidente!

'*La Géométrie*', sebbene pensata quale appendìce ad un'òpera filosofica, diverrà ben presto il riferimento per la nuova Geométrìa, ormai affrancata dalle residue rigidità dei cànoni della tradizione risalente all'antìca Grecia.

In quest'òpera, Descartes àpplica il proprio método per ridurre i problemi geométrici in espressioni algèbriche, le equazioni, le cui soluzioni (radici) si trovano attraverso l'uso di figure geométriche di complessità crescente, in proporzione alla complessità del problema posto.

Per esemplificare non c'è di meglio che sottolineare che nelle prime pagine de '*La Géométrie*' è spiegàto che le operazioni, che stanno alla base della Matemàtica, l'addizione, la sottrazione, la moltiplicazione, la divisione e l'estrazione di radice, possono essere risolte attraverso costruzioni geométriche di segmenti e circonferenze, che sono le figure geométriche più semplici.

La Geometrìa, quindi, è lo strumento che fornisce i mezzi, le figure geométriche, necessarî per individuare le radici delle equazioni algébriche e Descartes si impegna nel classificarle secondo la loro crescente complessità, dando òrigine alla Geometrìa Analìtica.

Ecco, per la prima volta, il processo risolutivo che nasce dall'associazione geométria-equazione-curve-soluzione. È un passo importante, anche se l'espressione matemàtica è ancòra associata ad una curva non come sua espressione ma in modo subordinato, quale mezzo 'di passaggio' tra il problema e la sua soluzione.

Di Descartes è doveroso citare l'uso di assi di riferimento, sui quali individuava le grandezze e la direzione del loro sviluppo. Anche se il sistema di coordinate oggi universale è detto appunto '*Cartesiano*', quello elaborato da Descartes ne è una versione assai grossolana: gli assi, infatti, non erano assunti tra loro perpendicolari né si protraevano verso i valori negativi; con notazione moderna diremmo che era limitato al primo quadrante.

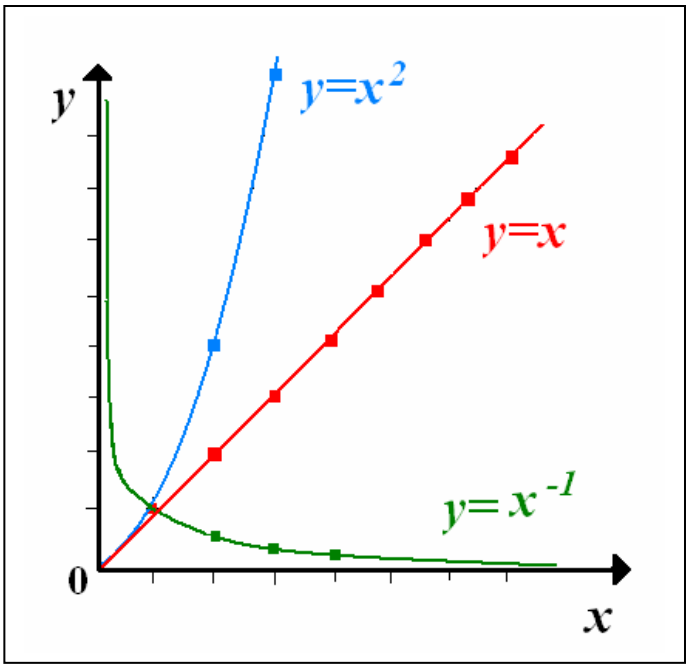
Fù Pierre de-Fermat a 'raddrizzare' gli assi cartesiani, imponendo che fossero sempre tra loro perpendicolari, e li utilizzò, per primo, anche secondo le tre dimensioni spaziali, ma non solo: lavorando nello stesso periodo di Descartes, ma in modo indipendente, iniziò ad associare alle figure geométriche le espressioni matemàtiche, non in modo cartesiano, ma dimostrando che le seconde erano, in realtà, la traduzione matematica delle prime.

Le curve, tutte le curve, potevano quindi essere classificate secondo forma e grado delle espressioni matemàtiche ad esse associate o delle quali esse erano lo sviluppo nel piano o nello spazio '*cartesiani*', che altro non sono se non il piano e lo spazio nei quali sono disegnate, rispettivamente, due o tre rette (chiamàte, nel piano, *asse delle x o delle ascisse* ed asse *delle y* o

delle ordinate), tra loro perpendicolari ed intersecantisi in un punto, detto *orìgine*. Ogni punto di ciascuna retta rappresenta la *coordinata cartesiana*, secondo *x* o *y* o *z*, di qualsìasi punto nel piano o nello spazio.

De-Fermat dimostra, così, che un'equazione nella quale le coordinate variabili *x* ed *y* compaiono al primo grado di potenza(es.: $y = x$), rappresenta sempre una linea retta; se il grado è inferiore (es.: $y = x^{-1}$) o superiore ad uno (es.: $y = x^2$), allora l'espressione matemàtica è sempre associata ad una curva.

La conseguenza di queste conclusioni è straordinaria: la corrispondenza *equazione* ⇔ *curva* rende il problema delle curve come risolvibile attraverso un método semplicemente matemàtico. Di questo lo stesso de-Fermat è il pioniere, definendo il método per individuare i punti di massimo e di minimo di una curva.



È l'ultima porta che si apre per consentìre l'ingresso nella 'stanza' del Càlcolo Sublìme.

Presa un'espressione matemàtica associata ad una curva, de-Fermat dimostra il método per individuare i punti che rappresentano un massimo o un minimo rispetto ai valori assunti nel riferimento cartesiano.

Il problema è concettualmente sémplice: un'equazione, almeno di secondo grado in *x* o in *y* (nella quale, cioè, *x* o *y*, o entrambi, compàiono con esponente almeno pari a 2), rappresenta una curva, che chiamiamo f(*x*) o f(*y*) (in linguaggio matemàtico si legge '*funzione di x*' oppure '*funzione di y*', o semplicemente: '*f di x*'). Questa curva disegna, sul piano cartesiano, un tracciato nel quale possiamo distinguere punti di massimo o di minimo, rispetto all'asse della variabile *x* o *y*.

Per individuare, dall'espressione matemàtica, questi particolari punti, Pierre de-Fermat dimostra che è necessario procedere all'esame del valore della funzione che essa assume, in corrispondenza di un valore *x*, della variàbile, e di un successivo valore ottenuto aggiungendo ad *x* una quantità piccola a piacere (infinitesimale?), che chiameremo ε.

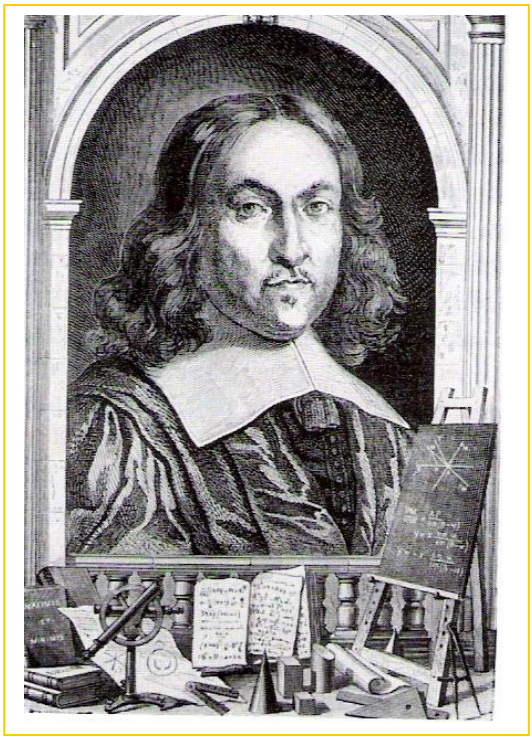
È evidente che sino a quando la funzione cresce o decresce la differenza tra i corrispondenti due suoi valori, $[f(x) - f(x + \varepsilon)]$, per quanto essi sìano vicini, vicinissimi, non è mai nulla. Diventa nulla soltanto nel caso in cui la loro estrema vicinanza coincìde con il punto in cui la curva ha un massimo o un minimo, perché, in quel particolare punto, essa 'cambia verso': nel caso del massimo, da ascendente diventa discendente, viceversa nel caso del minimo.

Per ogni valore di *x* per il quale si giunge ad annullare la differenza $[f(x) - f(x + \varepsilon)]$, possiamo concludere che in quel punto *x* ci troviamo di fronte ad un massimo oppure ad un minimo.

Ecco l'originalità dell'ìdea di Pierre de-Fermat: se la funzione è continua, cerchiàmone i punti caratteristici, procedendo per differenze le più piccole possibili, infinitesime.

Nella stanza del càlcolo infinitesimale ora si è anche accesa la prima luce!

Sulla strada aperta da Pierre de-Fermat seguirono altri suoi contemporànei, nel percorso che trovò, alla méta, i due 'campioni': Leibniz e Newton.



Di Pierre de-Fermat vogliamo ancòra ricordare un particolare della sua straordinaria ed originale personalità. Fu sempre assai ritroso nel pubblicare i suoi lavori; quando, nel 1637, fu pubblicata la *Géométrie* di Descartes, de-Fermat aveva già da tempo elaboràto il suo método dei massimi e dei minimi, dimostrandone l'ùtilità anche nel determinare le tangenti ad una curva, ma limitandosi a comunicare l'ésito dei suoi risultati ad una ristretta cerchia di amici e colleghi.

Rendendosi conto che il lavoro di Descartes si dimostrava 'in competizione' con il proprio e che proponeva un método per la determinazione delle tangenti meno efficace, de-Fermat decise, nello stesso 1637, di pubblicare l'òpera '*Ad locos planos et solidos isagoge*', ma non in una edizione stampata, bensì attaverso la produzione di un limitàto numero di opuscoli manoscritti.

La riservatezza della sua genialità ne fa un personaggio 'all'antìca', non coinvolto nella modernità del suo tempo, fatta sì di ricerca ma strettamente projettata verso la condivisione e la comunicazione.

Bisogna attendere ben quattordici anni dopo la sua morte per veder data alle stampe, a Tolosa nel 1679, una prima raccolta dei suoi lavori, rendendo al mondo la sua grandezza, fatta anche di teorémi, spesso senza dimostrazioni compléte, che si riveleranno esatti anche a distanza di sécoli, come, ad esempio, il problema detto '*Equazione di Fermat*':

"L'equazione $x^n + y^n = z^n$ non ha soluzioni intere per n maggiore di due", la cui dimostrazione giunse, dal matemàtico inglese Andrew Wiles, soltanto nel 1993.

Siamo giunti ora al punto di introdurre ciò che è nel titolo di questo Capitolo: "*Il Càlcolo Sublìme*".

Quanto sinora scritto è, sebbene non sembri!, l'estrema sìntesi dell'evoluzione di quella parte della 'Scienza dei numeri' che, da questo momento, vivrà una vita in tutto nuova, dalle potenzialità e prospettive inaspettate ed inaspettabili, diremmo: infinìte. È curioso sottolineare che, di fatto, il Càlcolo Sublìme o, come oggi diciamo, Càlcolo Infinitesimàle, ponendo l'attenzione su oggetti infinitamente piccoli (infinitésimi, appunto) abbia creàto lo strumento per tradurre l'intero universo in linguaggio matemàtico.

Per coerenza con il titolo, e devozione verso i suoi scopritori, continueremo ad utilizzare il nome 'Càlcolo Sublìme'. Siamo in questo anche spinti dal considerare che ancòr oggi non sembra esservi una terminologìa unìvoca. L'interpretazione che ci appare la più diffusa identìfica il Càlcolo Infinitesimale come formàto dal Càlcolo Differenziale e dal Càlcolo Integrale, che sono, in buona sostanza, processi matemàtici l'uno inverso dell'altro (per nostra fortuna, non siamo chiamàti, né qui né altrove, a dare una definitiva régola!, né saremmo in grado di assolvere un così àrduo còmpito).

Il primàto di una scoperta, lo abbiamo visto alcune volte anche in questa Storia dell'Idraulica, dovrebbe essere sempre riconosciuto a colui che, per primo, raggiunge la méta; coloro che, come noi, séguono il fluìre del progresso del sapere umano, dovrebbero sempre rispettare questa régola.

Per la storia del Càlcolo Sublìme la questione non è di poco conto; il primàto, infatti, è stato oggetto di asperrime contese già tra i due protagonisti, i loro rispettivi sostenitori, le Accadémie, le Riviste Scientifiche, sino a raggiungere una dimensione quasi transnazionale, con un confronto durato decenni, se non addirittura sécoli, e che crediamo mai completamente sopìto. Parlarne, ogni volta, è cosa, quantomeno, delicatissima.

Il Càlcolo Sublìme nasce, ufficialmente, nel 1684, quando Gottfried Wilhelm Leibniz (Lipsia 1646 – Hannover 1716) pubblicò, sulla rivista '*Acta Eruditorum*' (che abbiamo già incontrato nel Capitolo 8), l'òpera:

"*Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illis calculi genus*."

L'inglese Isaac Newton (Woolsthorpe 1642 – Kensigton Londra 1728) pubblicò il suo trattato di Càlcolo Sublìme, nel 1686:

"*Philosophiae naturalis principia mathematica*."

Questi sono i riferimenti che scandiscono i tempi della pubblicazione dei trattati che, in entrambe i casi, erano maturati già da anni nella eccezionale mente dei due scienziati/filosofi.

E' certo che ambedue mantennero una fitta corrispondenza, diretta o attraverso la circolazione della Comunità Scientifica (la cui nàscita è ricordata nel Capitolo 8), e che pertanto entrambi ebbero modo di cogliere, dall'altro, idee, ispirazioni, spunti, opportunità.

Non sìa mai che noi ci si esprima sulla questione, ma, assai più modestamente, ci limitiamo ad osservare che forse non è neppure una questione.

Sia Leibniz che Newton, infatti, elaboràrono un método, su base infinitesimale (cioè considerando variazioni infinitesime di quantità geometrico/matemàtiche/temporali), giungendo, per vie differenti, alla stessa méta: 'per vie differenti', perché, Leibniz e Newton elaboràrono métodi diversi, anche se in alcuni passaggi sìmili, come del resto fecero alcuni altri loro predecessori, che alla stessa méta non giunsero, ma che senz'altro hanno concorso alla nàscita dell'ìdea vincente.

Da quando il riferimento della Scienza divenne la plateà della Comunità Scientifica, il 'Primàto assoluto', inteso come 'primo originàle istante di tempo matemàtico', assunse contorni sempre più incerti!

Non possiamo però esimerci dal 'scoprire le nostre carte e prendere una posizione', non foss'altro perché costretti a dover procedere con l'òrdine che vedrà, per secondo, colui che ha poi ottenuto il maggior séguito, che diventa così, in questo caso, maggior riconoscimento.

Isaac Newton imposta il proprio ragionamento considerando le equazioni, con le incognite x ed y, come una relazione che decrive una realtà in movimento, essendo x ed y le

coordinàte di un punto che, per ogni valore delle stesse, si sposta nel piano disegnando, così, una trajettoria; ecco perché egli chiama *x* ed *y* con il términe '*Fluenti*'.

La trajettoria, disegnata dal punto mentre le sue coordinate *x* ed *y* 'fluìscono', nel tempo, secondo l'equazione data, può essere un qualsìasi 'oggetto geométrico': una retta, una curva o un altro disegno, anche di natura non ancòra conosciuta, ma sempre caratterizzato dal 'movimento' del punto, secondo la legge espressa dall'equazione.

Ecco che ora Newton introduce due nuove grandezze: *xpunto* ed *ypunto*, che rappresentano le variazioni, in un intervallo di tempo infinitesimale, della trajettoria in quel punto, cioè la velocità con la quale le *Fluenti*, *x* ed *y*, mùtano valore; per questo Newton le chiamerà '*Flussioni*'.

Il rapporto *xpunto*/*ypunto* diventa così espressione della 'velocità' con la quale il punto 'disegna' la curva, velocità che, in quanto tale, rappresenta anche l'inclinazione della retta tangente alla trajettoria in quel punto, detta *coefficiente angolare*. In ogni punto della curva, corrispondente ai valori assunti di *x* ed *y* lungo gli assi cartesiani, si possono quindi calcolare le *Flussioni* ed il loro recìproco rapporto che rappresenta il *coefficiente angolare* della retta tangente, così individuata nella relativa espressione matemàtica.

Al contrario, una qualsìasi equazione può essere considerata una *Flussione* di una *Fluente* incògnita. La soluzione della *Flussione*, come Newton dimostra, consente di individuare l'equazione delle relative *Fluenti*, calcolandone la quadratura, cioè l'àrea che essa definisce nel piano, e tutti gli altri attributi matemàtici e geométrici.

Per determinare, data un'equazione in *x* ed in *y*, le rispettive *xpunto* ed *ypunto*, cioè per definìre le *Flussioni* di un'equazione, Newton procede secondo un'analisi infinitesimale, considerando l'intervallo compreso, per la Flussione *xpunto*, tra una *x* data ed il valore che la stessa assume dopo un tempo infinitesimo *o* (si legge: ' o piccolo'), quindi quando il punto della curva ha assunto una coordinata, sull'asse delle *x*, pari a ($x + o \cdot xpunto$).

Lo scienziato inglese formulerà le espressioni matemàtiche per le Flussioni di ogni possibile operazione (somma, differenza, moltiplicazione, potenza, radice . . .) eliminando i fattori infinitesimi di esponente (grado) superiore ad uno (cioè, per intenderci meglio dove figuri *o* elevato a potenze superiori ad uno). I risultati che otterrà saranno identici alle derivate calcolate da Leibniz, per altra via.

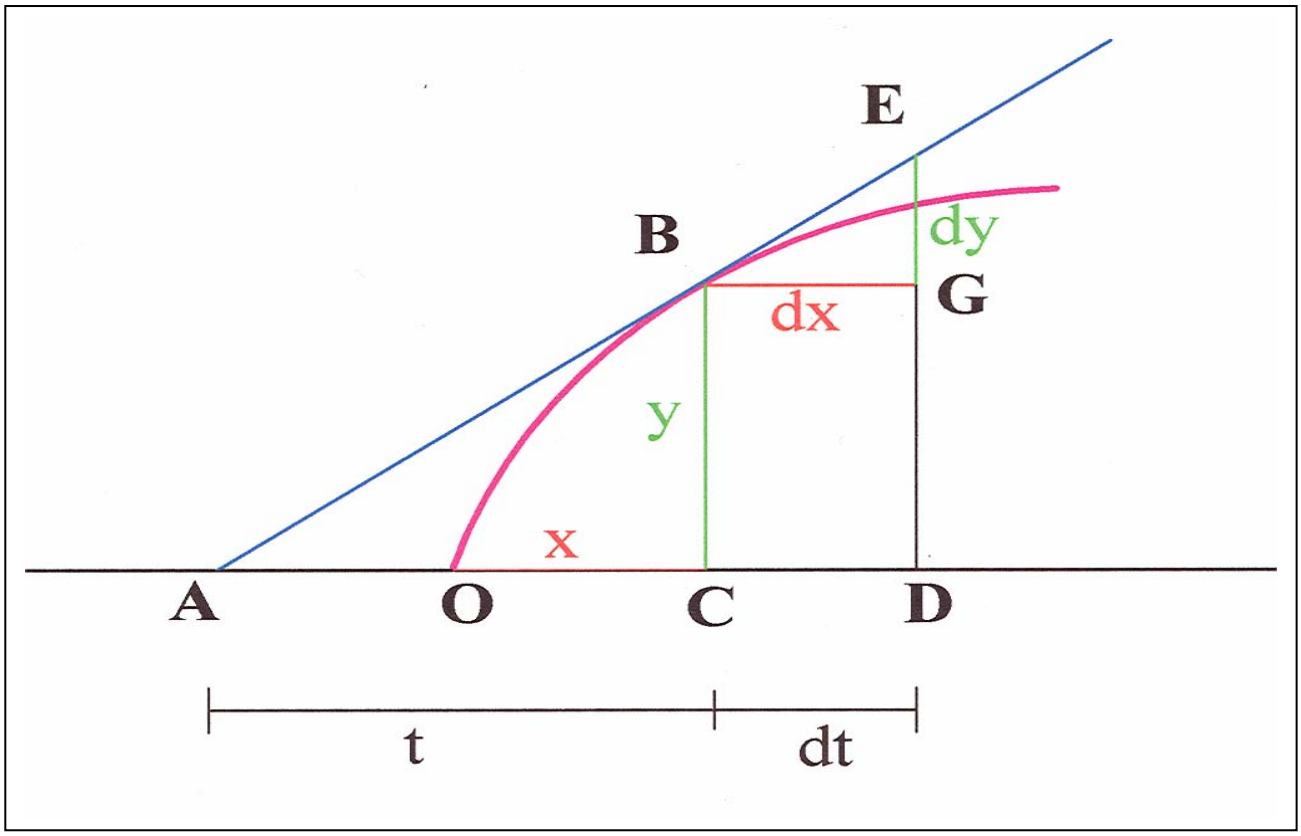
Una volta scritta la *Flussione* di un'equazione di qualsìasi forma essa sìa, quindi corrispondente a qualsivoglia figura geométrica, Newton dimostra che la risoluzione delle *Flussioni*, attraverso lo Sviluppo in serie, consente di giungere alla definizione delle caratteristiche della curva associata: area, baricentro tangenti . . .

Trasformare le espressioni algébriche, per quanto complesse, in sviluppi in serie consentiva infatti di ridurre qualsiasi livello di complessità in espressioni matemàtiche 'sémplici' costituìte da polinòmi.

La semplicità giocò, in un primo periodo, a favore di Newton, anche perché la prospettiva del collega tedesco era ben più rivoluzionaria, quindi difficile da comprendersi anche dal punto di vista 'psicologico/filosofico'.

Gottfried Wilhelm Leibniz si muoverà, infatti, secondo un approccio in tutto nuovo.

Esaminando un'equazione in *x* ed in *y* che, al variare delle coordinate *x* ed *y*, disegna una **curva** nel piano, il tedesco prende in considerazione i valori dell'equazione assunti per le differenze di due valori di ***x***, e corrispondentemente di ***y***, che differiscono tra loro per quantità infinitesime, quindi valori tra loro assai vicini, quasi coincidenti; chiamerà questi valori ***dx*** e ***dy***.



Questo passaggio fu il più difficile, dal punto di vista concettuale, quindi il più geniàle ma anche soggetto alle maggiori critiche. Leibniz, cioè, esàmina l'aumento delle grandezze per quantità tanto infinitésime da non potersi comprendere con concetti descrivibili ma, nello stesso tempo, tratta la curva continua come fosse in realtà composta da una successione di scalini, per quanto infinitesimi.

Mentre Newton si basa sul tempo infinitésimo, Leibniz riduce, diremmo per esaustione, lo spazio.

Il rapporto $\frac{dx}{dy}$ è calcolato attraverso le formule di differenziazione dell'equazione, dallo stesso Leibniz elaboràte per tutte le possibili operazioni: moltiplicazione, divisione, somma, potenza, estrazione di radice, . . .

Qualunque espressione matemàtica, di qualsivoglia complessità, poteva così essere 'differenziata', cioè di essa si poteva calcolare, usando una terminologìa moderna, la '*Derivata prima*' che corrispondeva, in ogni punto della curva, al calcolare il valore del *coefficiente angolare*, cioè dell'inclinazione, della **retta tangente** in quel punto.

Il processo può anche non fermarsi qui, ma procedere per successive 'differenziazioni': la Derivata seconda, terza . . . sino alla derivata n-esima, tutte in grado di dare nuove informazioni sull'indagata espressione di partenza.

Ma la differenziazione di un'equazione algébrica porta ad una conseguenza ancòr più 'dirompente': man mano che lo sviluppo del método di Leibniz schiudeva un universo sempre più vasto, senza lìmiti matemàtici, divenne evidente che l'operazione inversa della differenziazione consentiva di calcolare l'area della curva, in un intervallo dato, risolvendo, contemporaneamente, l'equazione di partenza, che è un'equazione differenziale.

Avviene che gran parte dei problemi di Meccanica, di Fisica, di Idraulica, di ogni scienza che tratta 'cose che si muovono nel tempo', sono matematicamente descrivibili attraverso equazioni differenziali, che 'ossérvano' lo stato del fenòmeno in intervalli infinitesimi di tempo *dt*. La risoluzione di tali equazioni differenziali costituisce la soluzione dell'interpretazione matemàtica del fenòmeno osservato. E' questo lo sviluppo certo più rilevante della scoperta di Leibniz.

Newton e Leibniz, in altre e speriamo più esemplificative parole, riuscirono finalmente a risolvere il problema che ha aperto questo Capitolo: descrivere, con i numeri, *il continuo* e la sua più intuitìva manifestazione, il *movimento*.

Chi di loro fu il più grande?

È importante stabilìre se una 'gigante' è più grande di un altro 'gigante'?

Newton, certamente, ha il 'vantaggio' d'esser stato grande in molto altro, al punto che da molti non è neppure considerato un matematico puro, bensì un fisico con attitudine alla Matemàtica. Come non ricordare, tra le sue conquiste: la Legge della gravitazione universale, le tre leggi fondamentali della dinàmica, la composizione cromàtica della luce della quale enuncia la natura corpuscolare, il telescopio a riflessione, ...

Anche di Leibniz possiamo dire qualcosa di 'curioso': fu prima filosofo (in senso moderno!) che matemàtico.

Entrambi rappresentano massime espressioni delle altezze alle quali può giungere la mente dell'uomo; persone eccezionali tra le eccezionali, la cui energìa intellettuale è tale da proiettare, in balzo prodigioso, l'intero mondo della conoscenza umana.

Persone eccezionali tra le eccezionali che la Scienza ha incontrato nel suo cammino, quasi sempre tra loro separate nello spazio e nel tempo: menti geniali a volte addirittura in grado di caratterizzare lo stesso periodo nel quale sono vissute.

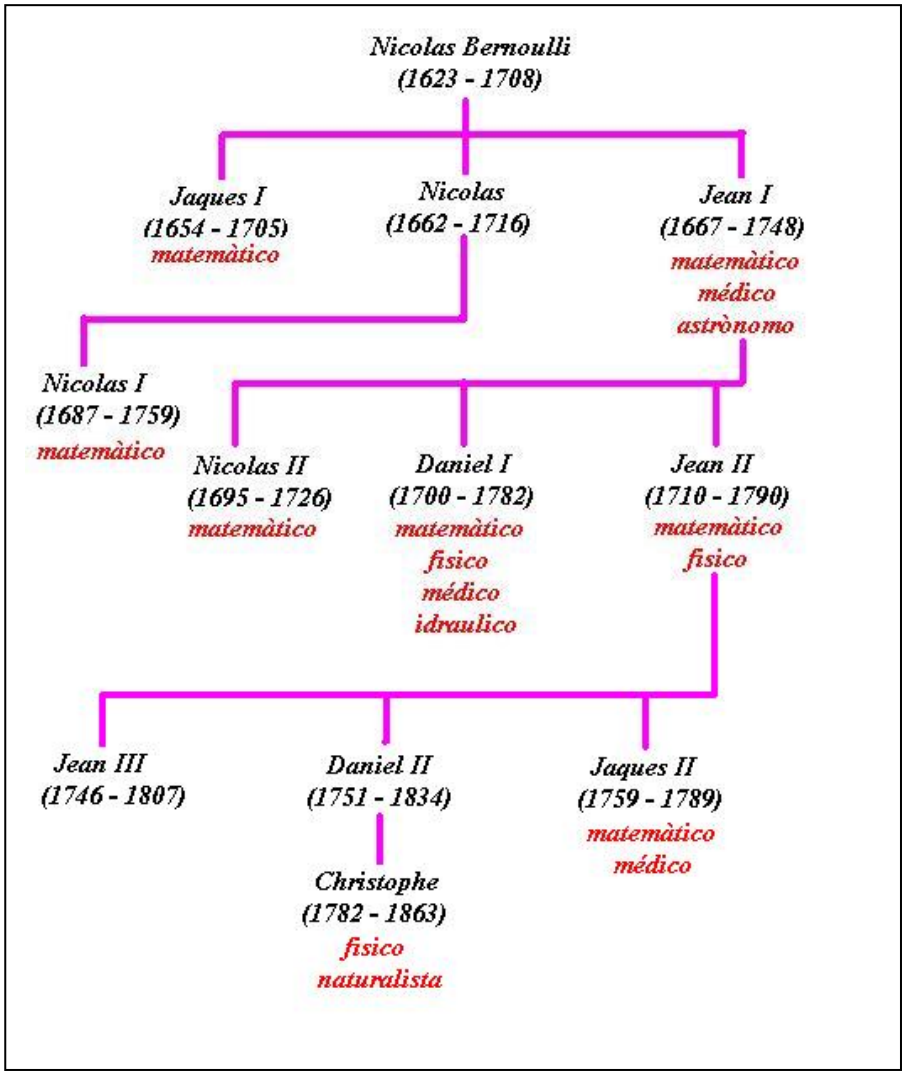
Al términe di questo Capitolo, e sulla scìa del vincente mètodo leibniziano, incontriamo però una singolarissima eccezione, nella strabiliante concentrazione di genialità nell'àmbito di una stessa famiglia, una vera dinastìa che produsse menti eccelse 'di generazione in generazione' e che molti, erroneamente, ne riconoscono la grandezza per uno solo di loro (sìmbolo certo più noto di tutta l'Idraulica): la famiglia Bernoulli.

Nulla è più esemplificativo dell'immagine di questa genealogìa:

Come abbiamo visto nel Capitolo 10, Basiléa fu una delle città dove trovarono rifugio molti cristiani protestanti francesi ed olandesi, perséguitàti nella fase cruenta della reazione cattòlica: gli Ugonotti.

Uno di loro, originario di Anversa, si rifugiò nella grande città sulle rive del Reno nella prima metà del XVII sécolo; si chiamava Nicolas Bernoulli (Anversa 1623 – Basiléa 1708). Era

mercante e si stabilì nella città svizzera, crescendo i suoi tre figli: Jacques I (1654 – 1705), Nicolas (1662 – 1716) e Jean I (1667 – 1748).



Jacques I, matemàtico e professore di Fisica all'università cittadina, ne divenne poi Rettore. Anche il fratello minore, Jean I, fu, al séguito del fratello primogénito, un àbile matemàtico ma si applicò anche nella professione médica e nell'astronomìa; lavorò con il matemàtico francese L'Hopital a Parigi; insegnò matematica per dieci anni a Groninger, in Olanda, e poi successe a suo fratello Jacques nella cattedra di Fisica a Basiléa.

Jean I ebbe tre figli: Nicolas II (1695 – 1726), matematico; Daniel I (1700 – 1782), matematico, fisico, médico e idràulico, del quale molto diremo nel prosieguo di questo racconto; Jean II (1710 – 1790), matemàtico e fisico.

Nicolas I (1687 – 1759) matemàtico, figlio di Nicolas, Jacques II (1759 – 1789) matemàtico e médico, figlio di Jean II, e Christophe (1782 – 1863), fisico e naturalista, figlio di Daniel II, fratello di Jaques II, complétano l'elenco di quella genìa, orignàtasi da Nicolas Bernoulli, i cui membri eccelsero in molte discipline scientifiche, evidentemente ispiràti a ben diverse inclinàzioni rispetto alla professione di mercante del capostìpite.

Abbiamo già ricordàto, all'inizio di questo Capitolo, una corrispondenza di Jaques I Bernoulli a Leibniz, del 1687, con la quale lo svizzero chiedeva lumi al matemàtico tedesco sulla sua " . . . *matemàtica più sublìme che finora non sono riuscito ancòra a penetrare* . . . ".

Sebbene questo aiuto non giunse, Leibniz era lontano da Hannover e vi tornerà soltanto nel 1690, Jaques I, con l'aiuto del fratello minore Jean I, riuscì a comprendere ed applicare il càlcolo leibniziano, pubblicando i risultati su '*Acta Eruditorum*'.

I due fratelli Bernoulli non solo dimostrarono la potenza del nuovo Càlcolo, risolvendo con sbalorditiva semplicità problemi assi complessi, ma perfezionarono il método, ampliandone le potenzialità. Lo stesso Leibniz riconobbe questo nuovo sviluppo, scrivendo a Jaques I, nel 1694: "*Vestra enim non minus haec methodus, quam mea est*."

Quantunque la dìsputa sulla primazìa della scoperta del Càlcolo Sublìme durerà a lungo, saranno le differenze tra i due métodi il motivo della conferma, nei fatti, che il tedesco era sulla

strada migliore. Del resto, di strada aperta su *un nuovo mondo* parla lo stesso Leibniz concludendo la prima pubblicazione del 1684:

"*Questi, invero, sono soltanto gli inìzi di una geometrìa molto più sublìme, che si estende a qualunque dei problemi più difficili e più belli anche della Matemàtica mista, che senza il nostro càlcolo differenziale o uno sìmile, nessuno tratterà con pari facilità*."

Risolvendo un problema posto da Leibniz, Jaques I Bernoulli utilizzò per primo il términe '*Integrale*' per indicare l'operazione inversa del càlcolo differenziale, così come, per primo nel 1694, trovò e risolse l'equazione della curva elastica, cioè della forma che assume una struttura lineare (per esempio, una trave) quando è caricata di un peso; il suo '*Curvatura laminae elasticae*' è la prima anàlisi teorico/matemàtica del fenòmeno dell'elasticità, princìpio base della 'Scienza delle costruzioni'.

Vinse, 'sul campo', il Càlcolo Sublìme di Leibniz; le parole di Jean I Bernoulli, che nel 1713 ancòra scrisse per sostenerne le superiori capacità, sono eloquenti: " . . . *le cose che abbiamo pubblicato*, ... *come le Catenarie, le Velarie, le Isòcrone Paracentriche, le Brachistocrone, le nuove proprietà della Ciclòide ed i suoi innumerevoli segmenti quadrabili, il Càlcolo degli Esponenziali ed il método di differenziarli, la misura delle Coevolute* . . . "; quanta strada compiùta dalle prime Lùnule di Ippòcrate di Chìo!

La diffusione del nuovo método di càlcolo iniziò ad òpera dei due fratelli Bernoulli, poiché Leibniz non realizzò mai il suo propòsito di pubblicare un trattato, orgànico e didattico, del quale concepì soltanto il tìtolo: '*Scientia infiniti*'.

Sotto la guida dei fratelli Jaques I e Jean I Bernoulli, troviamo il nipote Nicolas I, figlio del loro fratello 'di mezzo' Nicolas, Daniel I e Nicolas II, figli di Jean I, ma non possiamo tacere la presenza di altri eccelsi matemàtici, che incontreremo presto in questa Storia: Leonhard Euler, Alexis-Claude Clairaut, Pierre-Louis Moreau de Mapertuis e Guillaume-François de l'Hôpital marchese di Saint-Mesme e conte di Autremont (Parigi 1661 – 1704), ben più semplicemente noto come l'Hôpital.

Tutti costoro ebbero un comune centro di riferimento e confronto nell' '*Oratoire*', sòrta di cìrcolo scientifico voluto dal filosofo Nicolas Malebranche, membro – dal 1699 – dell' *Académie des Sciences*, che considerava di grande importanza diffondere il pensiero filosofico e matemàtico di Descartes.

Presso l'Oratoire, nel 1691, si incontrarono il giovane Jean I Bernoulli ed il marchese de l'Hôpital, già nòto per la sua attività di matemàtico, sebbene ancòra a digiuno di ogni nozione sul Càlcolo Sublìme.

Jean, riferendo dell'incontro, pose al marchese un problema relativo alla determinazione del raggio del cerchio osculatore di una particolare curva.

L'Hôpital giunse a soluzione in un'ora.

"*Gli assicurai* – scrive il Bernoulli – *che il problema di determinare il raggio dell'evoluta di ogni tipo di curva, sia algébrica sia trascendente, sia nei vertici, sia in altri punti, per noi* [leibniziani] *non era che un gioco da ragazzi e che potevamo dare una formula generale, con cui trovare questo raggio in un numero di minuti pari al numero di quarti d'ora da lui impiegati. Curioso di assistere a questa prova, a sua volta mi sottopose un esempio di curva più complicata di quella che gli avevo proposto. Immediatamente gli fornii il valore del raggio nel vértice e ciò lo stupì e sorprese a tal punto che da quell'istante si appassionò alla nuova analisi infinitesimale e nacque in lui un forte desiderio di impararla da me*. . . . ".

Il marchese de l'Hôpital chiese ed ottenne sistemàtiche lezioni dal matemàtico svizzero, acquisendo tale dimestichezza del nuovo método da giungere alla composizione, in collaborazione

con lo stesso Jean I Bernoulli, del testo '*Analyse des infiniment petits*', del 1696, che fu la principale òpera di diffusione in Europa del càlcolo infinitesimàle.

La potenza del Càlcolo Sublìme ed il débito dovuto a Leibniz e soprattutto al proprio più giovane maestro, fu dichiarato dall'autore sin dalla premessa:

"*L'estensione di questo càlcolo è immensa: si adatta alle curve meccaniche ed a quelle geométriche . . . . di là nàsce un'infinità di scoperte sorprendenti nei confronti delle tangenti, . . . sui problemi dei massimi e dei minimi, sui punti di flesso e di regresso delle curve, sulle evolute, sulle càustiche per riflessione o per rifrazione, . . . Riconosco di dover molto ai lumi dei signori Bernoulli, soprattutto al giovane attualmente professore a Groninga. Mi sono servìto alle loro scoperte ed a quelle di Leibniz. Per questo acconsento che rivendicihino tutto ciò che a loro piacerà, accontentandomi di quello che vorranno lasciarmi*.".

Quanto mérito mérita chi riesce a diffondere la Scienza altrui?

L'esposizione sistemàtica, diremmo conclusivamente completa, del calcolo infinitesimale ad òpera di Guillaume-Francoise-Antoine de l'Hopital, contenuta nel testo '*Analyse des infiniment petits*', ricomprende anche un'originale scoperta che oggi porta il suo nome: la régola per calcolare i lìmiti di alcune forme indeterminate.

Il Càlcolo Sublìme schiude le porte alla complèta anàlisi e soluzione di tutte le curve, esprimìbili con una equazione matemàtica, permettendo di calcolarne: la misura dello sviluppo, la direzione, i lìmiti, le aree racchiuse, le tangenti, le velocità di variazione, ... Questo nuovo método diventa così lo strumento essenziale, sino ad allora 'introvàbile', nello studio dei più importanti fenòmeni naturali, che avvengono con leggi rappresentabili da linee curve: le òrbite dei pianéti, la traiettoria dei proiettili, le deformazioni elàstiche, le linee del flusso di liquidi in movimento . . .).

Per dare un'ìdea di quale nuova potenza matemàtica potévano disporre coloro che studiavano i fenòmeni fisici, anticipiamo un passaggio, per l'Idraulica fondamentale: le '*Equazioni di Euler*'.

Riportare ora questo esempio è, invero, azzardato, ma resterà comunque ostico per molti anche quando comparirà 'al momento giusto'; lo proponiamo per far riecheggiare, anche in questo capitolo solo matemàtico, l'eco dell'Idraulica; la citazione, speriamo, è proposta anche perché si possa meglio comprendere, in términi squisitamente di sola percezione, le grandi possibilità che portò questo nuovo método di càlcolo.

Euler, cercando di dare espressione matemàtica al moto vario di un fluido causato da una forza esterna allo stesso fluido applicata, scompose tale forza nelle tre componenti spaziali, secondo il sistema cartesiano, P_x , Q_y, e R_z.

Il fluido in movimento è anche soggetto ad una forza interna, costituìta dalla pressione idrostatica, che può essere scomposta in p_x, p_y e p_z , tutte divise per la densità ρ.

Anche il movimento del fluido può essere espresso nelle tre componenti della velocità: u, v e w, sempre secondo le tre direzioni x, y e z..

Poiché la velocità, nel moto vario, cambia continuamente nel tempo, i valori dell'accelerazione non sono altro che la derivata della velocità nel tempo.

Applicando le régole della differenziazione, Euler individua le equazioni che rappresentano l'equilibrio dinàmico di un fluido in movimento, uguagliando le forze applicate e le conseguenti accelerazioni, secondo le tre direzioni cartesiane:

$$P_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta p_x}{\delta x} = \frac{\delta u}{\delta t} + u \cdot \frac{\delta u}{\delta x} + v \cdot \frac{\delta u}{\delta y} + w \cdot \frac{\delta u}{\delta z}$$

$$Q_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta p_y}{\delta y} = \frac{\delta v}{\delta t} + u \cdot \frac{\delta v}{dx} + v \cdot \frac{\delta v}{\delta y} + w \cdot \frac{\delta v}{\delta z}$$

$$R_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta p_z}{\delta t} = \frac{\delta w}{\delta t} + u \cdot \frac{\delta w}{\delta x} + v \cdot \frac{\delta w}{\delta y} + w \cdot \frac{\delta w}{\delta z}$$

Sostituendo, ad ogni sìmbolo, l'espressione matemàtica di velocità, pressione e forza, in ogni caso studiato, ecco come il Càlcolo Sublìme lega le componenti dell'equilibrio dinàmico di un fluido in movimento.

Ora il problema è 'semplicemente' il descrivere ogni fenòmeno in linguaggio matemàtico, poi . . . il Càlcolo Sublìme darà vita ad ogni sua possibile interpretazione.

* * *

Prima di giungere alla definitiva stesura di questo Capitolo, ho voluto sottoporlo al giudizio di due miei cari amici, esperti nella materia, ottenendone suggerimenti e confortanti pareri.
Antìcipo, quindi, il ringraziamento a:

- Luisa Soteragno, professoressa di Matemàtica dell'Istituto di Istruzione Superiore '*Vittorio Bachelet*' di Abbiategrasso, Milano;
- Franco Bufàno, professore di Matemàtica all'Istituto Comprensivo '*Ubaldo Ferrari*' di Castelverde, Cremona.

Quanto resta di criticabile nel testo è da attribuìre alla sola mia responsabilità . . . i pareri sono sempre gradìti . . . ma non sempre e non tutti seguìti!

Stefano G. Loffi

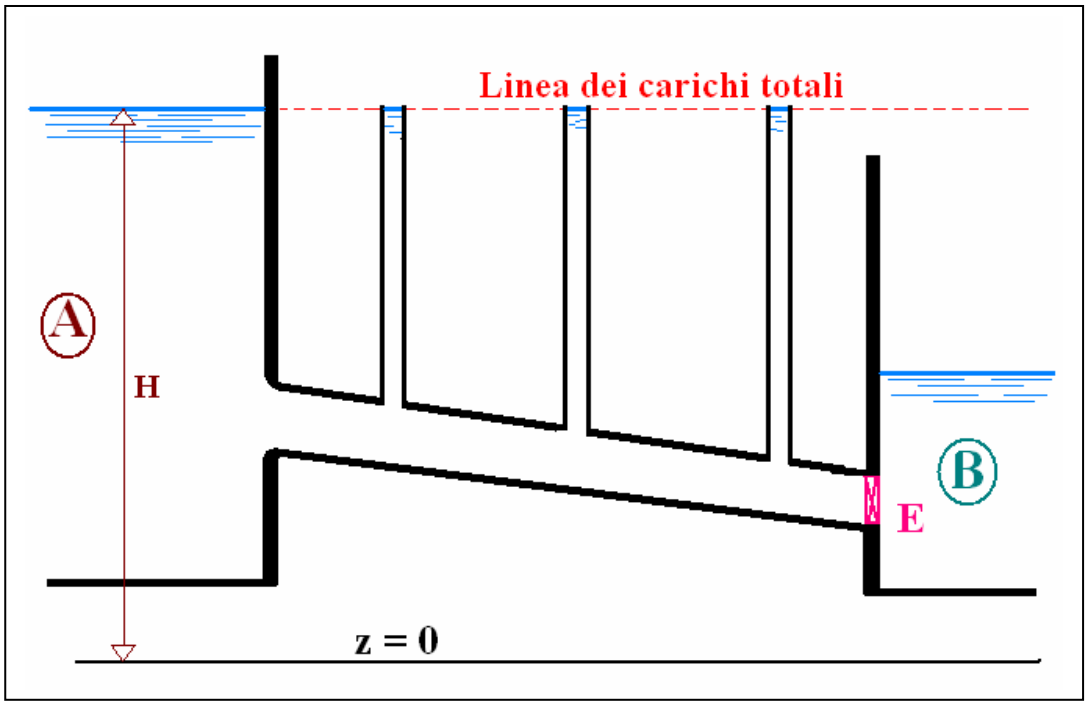
* * *

Cap. 13 – L'avvento dell'Idrodinàmica

La nascita dell'Idrodinàmica, parte della scienza Idraulica che studia il comportamento di fluidi in movimento, è collocata nel XVIII sècolo, sempre considerando tale riferimento quale frutto di un'inevitàbile schematizzazione della storia dell'umanità che, al contrario, è una successione di eventi strettamente collegati ed interdipendenti: un *continuus* perfetto, come il tempo. In tale significato schematico, quindi, parliamo di fondazione dell'Idrodinàmica e dei suoi protagonisti, esponenti di grande valore della Matemàtica del Settecento: gli svizzeri Daniel I Bernoulli e Leonhard Euler, stretto collaboratore ed amico del primo, ed i francesi Alexis Claude Clairaut e Jean le Rond d'Alembert.

Cominciamo questo Capitolo in modo insòlito, riassumendo, in due schemi, l'inizio e la fine di ciò che poi racconteremo nel dettaglio.

Immaginiamo di disporre di due serbatoî, **A** e **B**, nei quali l'acqua sìa a livelli differenti: in **B** a quota inferiore che in **A**.



I due serbatoî sono collegati da una tubazione, alla quale sono applicati tre tubi verticali, i *piezòmetri*, che si innàlzano sino ad una quota superiore alla quota dell'acqua contenuta nel serbatoio **A**. Per il *Princìpio dei vasi comunicanti*, che (vedi al Capitolo 2) potrebbe chiamarsi '*Princìpio di Erone*', quando la saracinesca **E** è chiusa, i due serbatoî non sono in comunicazione, ed il livello nei tre piezòmetri raggiunge la stessa altezza dell'acqua nel serbatojo **A**.

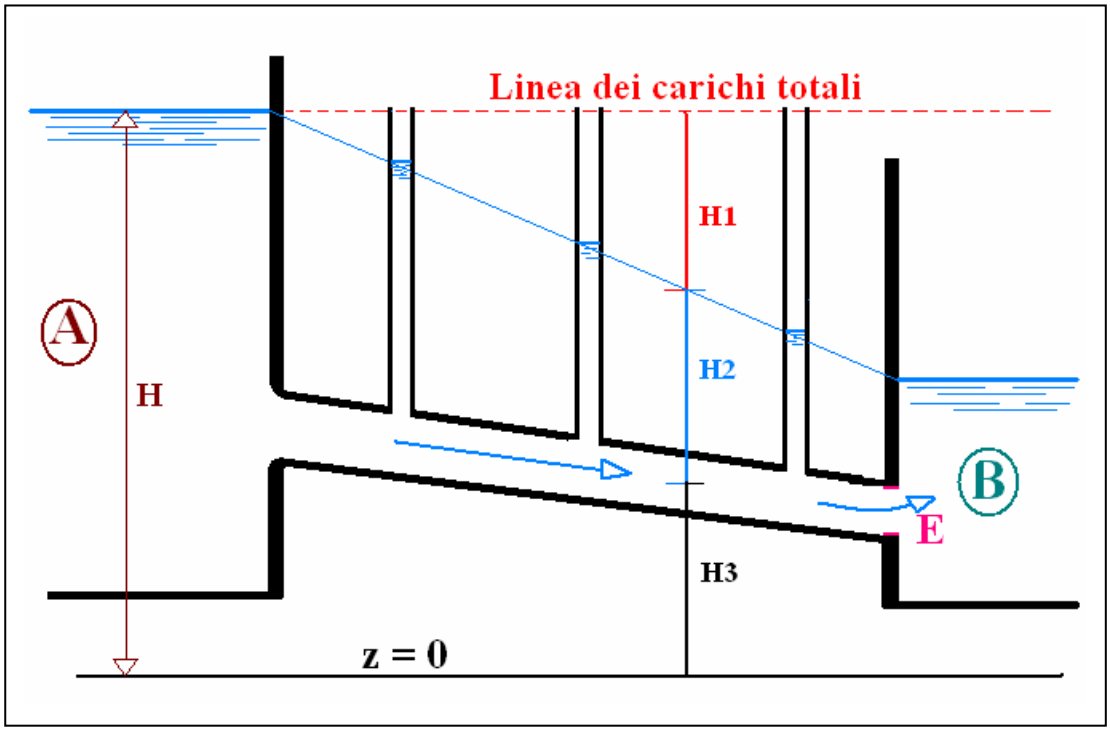
L'energìa complessiva dell'acqua contenuta nel serbatojo **A**, rispetto al piano **z = 0**, è esclusivamente di tipo potenziale, cioè latente (la massa d'acqua è ferma), e può essere indicata con l'altezza **H** dell'acqua rispetto a detto piano, scelto come riferimento. L'altezza **H** individua la **Linea dei càrichi totali**, che, nel nostro sistema, corrisponde alla massima energìa, espressa come altezza rispetto a **z = 0**, posseduta dall'acqua nel serbatojo **A** .

Che accade quando la saracinesca **E** viene aperta?

È evidente che l'acqua fluirà dal sebatojo **A** al serbatojo **B**, posto a quota inferiore, ma con quale velocità, quindi con quale portata?

Quali pressioni troveremo nella tubazione che collega i due serbatoî?

A quale altezza si porterà l'acqua nei tre piezòmetri?



Sebbene possa sembrare semplicistico, diremo che l'Idrodinàmica prende l'avvìo, attraverso il lavoro dei quattro scienziati che qui ricorderemo, proprio dando le corrette risposte a queste domande.

Dal loro lavoro, si scoprì che l'energìa complessiva dell'acqua, rispetto al piano **Z = 0**, che chiamiamo carico **H**, si trasforma - nel moto all'interno del tubo, generàto dall'apertura della saracinesca **E** e dopo il tempo necessario a rendere costante la velocità in ogni punto del condotto (cioè in *moto permanente*) - nelle tre componenti, **H1**, **H2** ed **H3**, che rappresentano le tre forme di energìa nelle quali si è trasformata l'iniziale ed ùnica energìa potenziale.

Come fecero i quattro scienziati, dei quali diremo, seguiamo l'ipòtesi iniziale di lavorare con un fluido cosidetto 'perfetto', cioè di un fluido che non disperde alcuna frazione di energìa nel movimento.

È una perfezione irreale ma ùtile per affrontare il problema nel modo più semplice.

Ecco le tre frazioni nelle quali si divide l'iniziale energìa potenziale **H**:

- $H1 = \dfrac{V^2}{2g}$ è l'energìa cinética del fluido, pari al quadrato della velocità media del flusso diviso due volte l'accelerazione di gravità.

- $H2 = \frac{p}{\gamma}$ è l'energìa 'di pressione', data dal rapporto tra la pressione ed il peso specifico;
- $H3 = z$ è l'energìa potenziale residua, o *altezza geodética*, distanza della mezzerìa del tubo, quindi del flusso, rispetto al piano $z = 0$.

Così come sono state scritte, queste tre energìe, da riferirsi all'unità di peso del fluido, hanno la particolarità d'essere espresse con la medésima unità di misura: il metro; infatti:

$$H1 = \frac{V^2}{2g} \rightarrow \frac{m^2}{s^2} \cdot \frac{1}{\frac{m}{s^2}} = \frac{m^2}{s^2} \cdot \frac{s^2}{m} = m$$

$$H2 = \frac{p}{\gamma} \rightarrow \frac{\frac{kg}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{kg}{m^2} \cdot \frac{m^3}{kg} = m$$

La conclusione del lavoro che presentiamo in questo Capitolo, universalmente attribuìta al solo Daniel I Bernoulli anche se questi non giunse a concepìre tale formula, è la seguente, nòta al mondo intero quale espressione del *Teorema di Bernoulli*:

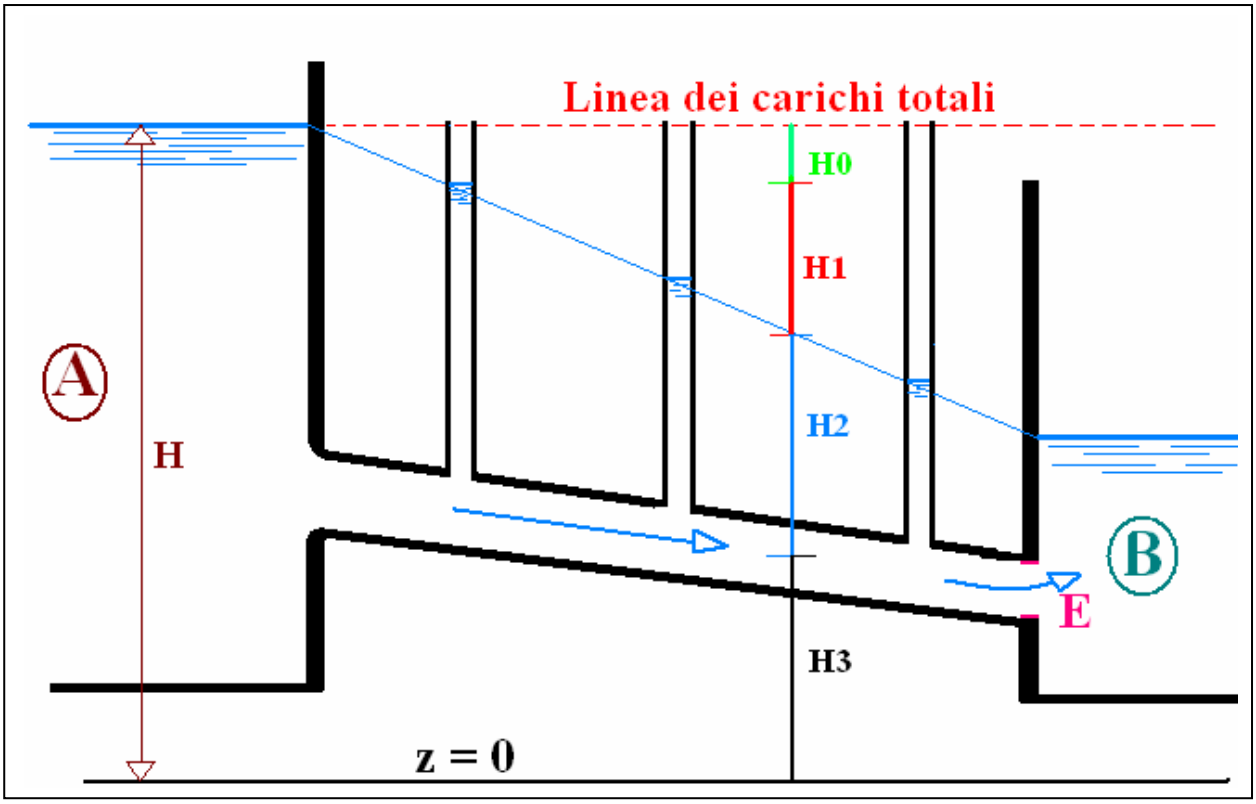
$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{costante}$$

Cioè: *nel moto permanente di un fluido perfetto, pesante ed incomprimibile, il carico totale si mantiene costante lungo ogni trajettoria*.

Nel caso di fluido reale, cioè non perfetto, l'energìa totale iniziale in parte viene dissipata, perché non appena il fluido si mette in movimento su di esso si manifèstano fenòmeni che tendono ad ostacolare il movimento stesso; la velocità, cioè, porta con sé il fenòmeno della resistenza al moto, dovuta alla viscosità del fluido, all'attrito contro le pareti del condotto ed alle eventuali irregolarità lungo il percorso.

Parte dell'energìa complessiva **H**, posseduta dal liquido nel serbatojo **A**, non si trasforma quindi in energìa 'di movimento' o 'di pressione', ma viene dissipata per vincere questa resistenza; così è che nel fluido reale l'energìa cinética, quindi la velocità e, di conseguenza, la portata è inferiore rispetto al caso ideàle del fluido perfetto.

Nel caso del fluido reale, il nostro schemàtico disegno così si modifica:



Le frazioni di energìa nelle quali si divide il carico complessivo iniziale **H** sono ora quattro: alle prime tre, nel caso di fluido perfetto, si aggiunge **H0**, che rappresenta l'energìa persa per le resistenze incontrate sino a quel punto, detta, per l'appunto, ***Pérdita di carico***.

Molte possono essere le cause per questa dissipazione, presente in ogni situazione dove vi sìa fluido in movimento. La teorìa e la conseguente quantificazione di questi fenòmeni di dissipazione dell'energìa, che riducono l'efficienza del moto di qualsìasi fluido (liquido o gassoso) ma anche di qualsivoglia oggetto che si muova in esso, òccupa, dal XVIII sécolo, ed ancòra occuperà gli studiosi di Idrodinàmica di ogni paese e di ogni tempo.

Ecco, quindi, uno dei più semplici problemi al quale si sono rivolte le eccezionali menti di Daniel I Bernoulli, Leonhard Euler, Alexis Claude Clairaut e Jean le Rond d'Alembert, forti di tutti i progressi già còlti e conosciuti nella giovane Comunità Scientifica, per capìre come l'energìa di un fluido, generàta dall'accelerazione di gravità, si distribuisse in differenti componenti quando si generi il movimento del fluido stesso.

Daniel Bernoulli (Groningen 1700 – Basiléa 1782) nacque a Groningen, a metà del decennio che vide in quella città il padre, Jean I, professore di Matemàtica (la straordinaria genealogìa svizzera dei Bernoulli, che iniziò con Nicolas (1623 – 1708) è illustrata nel precedente Capitolo 12 – in essa, Daniel è indicato con Daniel I, per distinguerlo dal nipote Daniel II).

Il Bernoulli che qui seguiamo studiò con il padre, rientrato a Basiléa ad occupare la cattedra lasciata vacante dalla morte del fratello Jakob, zio di Daniel. Tra il 1725 ed il 1733 Daniel fu professore di Matemàtica a San Pietroburgo, durante un periodo segnato dall'improvvisa morte del suo fratello maggiore Nicolas II, anch'egli matemàtico.

Ecléttica fu l'attività di Daniel: si occupò di Càlcolo delle probabilità, di Economìa, di Astronomìa, di Medicina, di Fisica, di Fluidodinàmica dei gas e dei liquidi; per quest'ultimo aspetto giunse alle conclusioni che qui più interessano. A Daniel, singolarmente o unìto ad altri, furono riconosciuti dieci premi dalla *Académie royale des scienses*, per la soluzione di problemi dalla stessa istituzione proposti ai migliori matemàtici. Il primo di questi, ricevuto all'età di ventiquattro anni, sviluppava il disegno di una clessidra in grado di misurare il tempo su un naviglio nonostante le continue oscillazioni. Il terzo premio, condiviso con Euler e con il matemàtico scozzese Colin Maclaurin (Kilmodan 1698 – Edimburgo 1746), fu motivato dalla redazione di una dettagliata carta delle correnti marine. Un altro, che divise con suo padre, trattò dell'inclinazione delle orbite dei pianeti. In ciascuno di essi Daniel Bernoulli mostrò considerevoli abilità matemàtiche, una acùta percezione fisica e l'ingegnosità nel giungere alle soluzioni senza seguire un método predefinìto.

Molti degli scritti di Daniel Bernoulli trattarono della statica e della dinàmica dei fluidi, ma fu il suo "*Hydrodinamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii.*", scritto a S. Pietroburgo verso i trent'anni e pubblicato a Strasburgo nel 1738, che gli diede maggior fama.

La pubblicazione di questo lavoro e la vasta eco che ottenne acuìrono a tal punto il sentimento di competizione con il padre Jean I, che Daniel fu portato a pubblicare quasi con urgenza anche il trattato "*Nouvelle hydrauliche*", dove, contrariamente al padre, espresse grande ammirazione nei confronti di Newton. Daniel non si sposò, interrompendo, nel suo ramo, la 'produzione' di menti eccelse della famiglia Bernoulli.

Leonhard Euler (Basiléa 1707 – S. Pietroburgo1783) nacque a Basilea, figlio di un pastore luterano che era stato uno studente di Jaques I Bernoulli ed anch'egli un buon matematico.

Leonard studiò Matemàtica sotto Jean I Bernoulli, applicandosi, nel contempo, in Teologìa, Lingue Orientali e Medicìna, e fu un amico stretto dei figli di Jean I, Nicolas II e di Daniel I. Fu quest'ultimo, infatti, che lo raccomandò presso Caterina I di Russia che lo accolse a S. Pietroburgo, dove fu professore di Fisica alla locale Accadémia, nella quale succedette allo stesso Daniel I Bernoulli nell'insegnamento della Matemàtica, quando l'amico rientrò a Basiléa.

Euler passò sedici anni in Russia, durante i quali il clima e lo studio intenso gli causarono la cecità da un occhio (. . . cosa che gli riduceva le distrazioni dallo studio – così commentava questa menomazione fisica!).

Il potere sempre più dispòtico della zarina gli venne progressivamente in uggia e, nel 1741, accettò l'invito dell'imperatore Federico il Grande di trasferirsi all'Accademia *Socìetas Regia Scientiarum*, di Berlino che divenne, come già ricordato nel Capitolo 8, nel 1746 *Koniglische Preussische Akademie der Wisseschaften* (Accademia Reale Prussiana delle Scienze).

Euler non interruppe mai i contatti con l'Accademia di S. Pietroburgo, trasmettendo tutti i risultati dei proprî studi; vi tornò poi nel 1766, su esplìcita richiesta di Caterina II, e colà rimase sino alla fine della sua vita terrena.

Nonostante l'aggravarsi della vista, che poi si risolse nell'assoluta cecità, lo scienziato svizzero mai interruppe la fecondità del suo lavoro, grazie ad una memoria prodigiosa, con la quale, ormai privo della vista, seppe dettare le proprie analisi matematiche ad uno dei suoi figli e ad altri studenti.

Alcuni hanno criticato l'attività di Lehonard Euler giudicandola troppo 'limitata' alla pura Matemàtica, senza rapporti con la Fisica, per la quale, a quel tempo, l'interesse era assai vivo; miglior smentita di questa 'accusa' venne dall'elogio funebre del grande scienziato: un documento di ben cinque intere pagine dedicàte al solo elenco dei tìtoli dei suoi scritti in svariate materie: l'Álgebra (la convergenza delle serie infinite), la Geometrìa Analitica, la Trigonometrìa, il Càlcolo Infinitesimàle (includendo il primo completo trattato su questa materia), l'Ottica, la Meccànica, l'Idrodinàmica, le Macchine Idrauliche e, soprattutto, la Meccànica Celeste. In questa intensa attività, Leonhard Euler non trovò limitazione nel matrimonio né dai suoi tredici figli.

Alexis Claude Clairaut (Parigi 1713 – 1765), avviato agli studi matematici dal padre, scrisse il suo primo lavoro a soli tredici anni, sulla scoperta di quattro curve dalle quali poi compose il trattato delle curve a doppia curvatura che gli valse l'ammissione alla *Académie royale des scienses* a soli diciassette anni, divenendo così il membro più giovane nella storia di quella istituzione. I successivi studi di Clairaut, condotti assieme al matematico Pierre Louis de Maupertuis, stimolarono il suo interesse sul problema della forma geométrica del globo terrestre, tanto che nel 1736 tutti e due parteciparono ad una spedizione in Lapponia, con il proposito di determinare l'eccentricità della Terra dovuta allo schiacciamento ai poli.

Da elementi raccolti in questa spedizione Clairaut pubblicò, a Parigi nel 1743, un trattato di grande interesse per questa storia dell'Idraulica: "*Théorie de la figure de la Terre tirée des principes de l'hydrodynamique.*"

Inoltre, lo scienziato francese formulò le equazioni del moto della Luna, che gli valsero un premio dall'Accademia di S. Pietroburgo nel 1750, e calcolò l'effetto perturbativo di Saturno e di Giove sulla trajettoria dell'òrbita della cométa di Halley, prevedendone il ritorno al perielio nell'aprile del 1759. Contribuì notevolmente alla teorìa delle equazioni differenziali, dimostrando, tra l'altro, l'esistenza di un integrale singolare per l'equazione che porta il suo nome.

Jean-Baptise Le Rond d'Alembert, detto d'Alembert, (Parigi 1717 – 1783), nacque dalla nobildonna Madame de Tencin e dal cavaliere Destouche, generale di artiglierìa, ma da questi abbandonato sul sagrato della cappella di Saint Jean Le Rond, donde il suo nome.

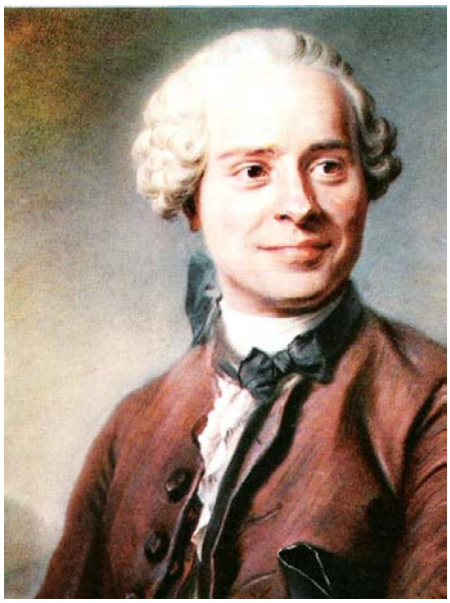
Fu allevato da una famiglia di vetrai parigini, con l'aiuto di una piccola réndita garantita dal padre naturale. Potè così iscriversi al *Colléges des Quatre Nations*, fondato dal Cardinale Mazarìno, dove si dedicò allo studio del Diritto e della Teologìa che però abbandonò ben presto in favore della più congeniale Matemàtica, tornando a vivere presso i suoi amatissimi genitori di adozione.

Ammesso, a soli ventiquattro anni, alla *Académie royale des scienses*, della quale fu Segretario dal 1722, pubblicò nel 1743 un "*Traité de dinamique*" nel quale cercò di riconciliare il principio del momento e quello dell'energìa e propose la forma del principio del momento che oggi porta il suo nome:

"*Le equazioni del movimento di un sistema materiale (equazioni dinàmiche) si ottengono sostituendo, nelle relazioni che traducono l'equilibrio statico del sistema, alle forze attive la somma delle forze attive e delle forze di inerzia*."

Il suo successivo lavoro, del 1744, "*Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides",* è un passo fondamentale nello sviluppo dell'Idrodinàmica.

Nel 1750 l'Accademia di Berlino promosse una competizione sulla teorìa del fenòmeno della dissipazione dell'energìa nei fluidi in movimento; d'Alembert fu tra quelli che inviarono la propria soluzione, ma l'Accademia decise di sospendere la decisione sino a quando i partecipanti non avessero dimostrato sperimentalmente le loro teorie. D'Alembert non si ritenne in grado di condurre questo còmpito addizionale, ma usò il suo documento come base al suo secondo trattato sul moto dei fluidi "*Essai d'une nouvelle théorie sur la résistance des fluides.*", che egli pubblicò nel 1752; questo lavoro riporta il nòto '*Paradosso di d'Alembert*':



"*La risultante delle azioni dinàmiche su un corpo in movimento in un fluido perfetto è nulla*."

L'aspetto paradossale di questo teorèma nasce dall'esperienza comune: una nave deve essere continuamente spinta per poter procedere; ma l'esperienza, comune esclude, per la sua stessa natura, che il fluido, nel quale la nave procede, sìa perfetto, quindi non reale; infatti, il risultato delle equazioni del moto risolte dal d'Alembert si basa sul fatto che il fluido sìa perfetto, cioè privo di alcuna forza di resistenza al moto e quindi di qualsivoglia pérdita dell'energìa iniziale. Sembra, in questo, ricordare i *moti vorticosi* perpetui che, secondo Descartes, muovevano i pianéti.

Altre sorprendenti méte raggiunse Jean-Baptise Le Rond d'Alembert: condusse l'analisi matemàtica del moto del vento, utilizzando un sistema di equazioni differenziali, presentato nel lavoro '*Théorie des vents'* (1745); studiò i fenomeni delle vibrazioni e del suono; risolse il problema della precessione degli equinozi.

In tanto lavoro il francese trovò molti motivi di soddisfazione nel ricevere, rifiutandole, allettanti offerte da entrambi i regnanti di Russia e di Prussia.

D'Alembert, assieme a Diderot, fu coeditore della "*Enciclopedia o Dizionario ragionato delle scienze, delle arti e dei mestieri.*", una stupenda rassegna (17 volumi oltre 18 tavole, con supplementi ed illustrazioni) della conoscenza umana, vista dalla cultura francese della metà del XVIII sécolo. Il contributo di D'Alembert non fu solo nelle scienze e nella cultura; fu anche un grande filòsofo, tra i più importanti esponenti dell'Illuminismo francese ed uno dei padri ispiratori della Rivoluzione Francese.

Ecco di quali 'grossi càlibri' ci dobbiamo ora occupare!

L'orìgine dell'Idrodinàmica fu attribuita a Daniel I Bernoulli, per la quale egli utilizzò per primo il términe latino *"Hydrodinamica"*, nel suo trattato del 1738 "*Hydrodinamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii."*, trovandosi, in questo, in disaccordo con il d'Alembert che, nella sua "*Enciclopedia*", sostenne che '*Idrodinamica*' non differisse da '*Idraulica*'.

Tuttavia Bernoulli sembra essere stato il primo ad aver ricondotto le leggi del movimento dei fluidi in princìpi sicuri e non arbitrari, cosa che nessun autore in Idraulica aveva fatto prima. Sebbene il trattato '*Hydrodinamica* . . ." appaja più vicino alla tradizionale Idraulica

che alla moderna Idrodinàmica, dando così un po' di crèdito al giudizio di d'Alembert, sicuramente esso differì assai dai precedenti testi, tant'è che oggi gli è riconosciuto il carattere di prima òpera di questo nuovo capitolo dell'Idraulica.

Nonostante l'importanza di quest'òpera e la fama oggi celebrata del uso autore, chiunque vada cercando in quelle pagine l'esplìcita formulazione del *Teorema di Bernoulli*, come l'abbiamo già introdotta, cercherebbe invano.

L'analisi di questo libro è comunque indispensabile.

Dopo un lungo capitolo di introduzione, che riassume i precedenti lavori ed il contenuto del libro stesso, venti capitoli trattano dei seguenti temi:

- equilibrio dei fluidi in quiete;
- velocità dell'efflusso;
- misura del tempo;
- efflusso sotto un carico costante;
- oscillazioni nei fluidi;
- conservazione dell'energìa;
- perdita dell'energìa;
- macchine idrauliche;
- moto dell'aria e di altri fluidi;
- vòrtici e liquidi in moto in contenitori;
- statica idraulica;
- reazione dei fluidi.

Nell'affrontare questi diversi argomenti, Daniel Bernoulli introdusse molti concetti che costituirono allora novità assolute ma che oggi sono difficilmente associati al suo nome; per esempio:

- fu il primo ad utilizzare il piezometro aperto nella parete delle condotte per la misura della pressione (nell'àmbito dell'Idraulica statica);
- per primo presentò le soluzioni per la forma della superficie libera e delle superfici in pressione costante in contenitori soggetti ad accelerazione e a rotazione;
- generalizzò il problema, introdotto da Newton ed esteso dal padre Jean I Bernoulli, dell'oscillazione dell'acqua in tubi comunicanti, tenendo il periodo del pendolo semplice come riferimento temporale;
- per primo discusse della graduale stabilizzazione del flusso in una tubazione lunga;
- per primo fece accenno alla possibilità della propulsione a getto delle navi, sebbene l'efficacia di questo concetto fu piuttosto limitato avendolo ipotizzato soltanto in términi della reazione prodotta dal flusso di acqua che usciva a getto da un serbatoio.

Daniel Bernoulli dimostrò d'aver pienamente esperimentato l'evidenza delle sue analisi, dichiarando con orgoglio che i *test* erano stati eseguiti con rigore e ripetutamente e, prima d'essere annunciati, verificati nella loro corrispondenza alla teorìa.

Resta qui di maggior interesse la vicenda legata alla scoperta di ciò che oggi è chiamato '*Teorema di Bernoulli'*; egli partì dal princìpio della conservazione dell'energia di Huygens e di Leibniz, la *vis viva*, assumendo il fluido come fosse costituìto da una serie di elementi discreti, distribuìti attraverso la sezione della corrente; così scrisse:

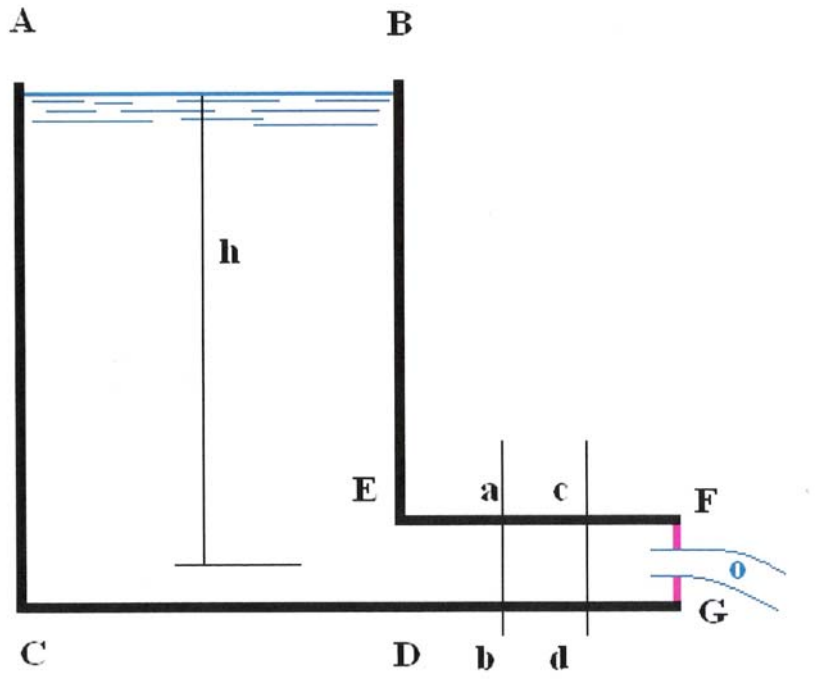
" . . . ma ora noi possiamo finalmente giustificare i princìpi che abbiamo così spesso menzionato. Il primo è quello della ***conservazione delle forze vive, . . .*** *dobbiamo aggiungere un'altra ipotesi: immaginiamo il fluido essere diviso in strati perpendicolari alla corrente; noi assumiamo che ogni particella di ogni strato si muova con la stessa velocità, così che ovunque la*

velocità del fluido è inversamente proporzionale alla dimensione della sezione. Questa ipotesi è stata spesso usata, anche se è stato dimostrato in un altro contesto che il movimento del fluido è un poco più lento lungo le sponde che in mezzerìa; questo risulta a causa dell'attrito, ma qualcuno potrebbe portare altre eccezioni; tuttavia un errore evidente può emergere soltanto in rarissimi casi da questa approssimazione."

Sebbene Leibniz avesse mostrato la "*forza viva*" essere proporzionale alla massa ed al quadrato della velocità, il fattore ½ non era ancora introdotto nel término oggi conosciuto come *energia cinética* $\frac{V^2}{2g}$; questo necessariamente portò ad ambiguità nei calcoli del Bernoulli; egli, però, ebbe lìdea geniale di aggirare queste difficoltà, come si vede dalla sua valutazione della pressione in un condotto chiuso, che riportiamo integralmente in quanto in essa si assiste alla nàscita dell'ìdea che poi, grazie al contributo d'altri, rese a lui solo la più gran fama eterna:

"*Assumiamo un vaso di assai grande sezione* **ACDB**, *che è mantenuto costantemente pieno di acqua, collegato, alla base, da un tubo* **EFGD**. *All'estremità del tubo è posto un orifizio* **o**, *attraverso il quale il fluido esce con una costante velocità. Ricerchiamo la pressione esercitata sulla parete del tubo* **EFGD**.

Sia **h** *l'altezza dell'acqua della superficie libera* **AB** *del vaso sopra l'orifizio* **o**. *La velocità di efflusso dell'acqua, una volta che il flusso si è stabilizzato, è costante ed uguale alla radice quadrata di* **h**, *finchè noi assumiamo che il vaso rimanga sempre a livello costante. Se* **n** *è il rapporto tra la sezione del tubo e quella dell'orifizio* **o**, *la velocità dell'acqua nel tubo sarà pari al rapporto* $\frac{\sqrt{\mathbf{h}}}{\mathbf{n}}$.



Se il tubo, nel punto **FG**, *non avesse alcun restringimento, la velocità dell'acqua nel tubo sarebbe pari a* $\sqrt{\mathbf{h}}$, *che è maggiore di* $\frac{\sqrt{\mathbf{h}}}{\mathbf{n}}$.

Così l'acqua nel tubo tende a una maggiore velocità ma essa è impedita dal restringimento dovuto all'orifizio **o**. *Qui risalta la pressione che è trasmessa sulla parete del tubo* **EFGD**.

La pressione sulla parete è così proporzionale all'accelerazione che il fluido subirebbe se l'ostacolo scomparisse istantaneamente, lasciando la sezione terminale esposta alla sola pressione atmosferica. Ogni cosa prende posto come se, durante il flusso verso l'orifizio **o**, *il tubo*

fosse tagliato istantaneamente e si determinassero le accelerazioni che la porzione **abcd** *riceverebbe . . . . Così noi possiamo considerare il vaso* **ABEabDC** *e trovare, con il suo aiuto, l'accelerazione che la particella, avente la velocità pari a* $\frac{\sqrt{h}}{n}$ *avrebbe ricevuto* [dall'istantànea rimozione del restringimento in **o**].

Prendiamo **v** *quale velocità variabile dell'acqua nel tubo* **ED**, **n** *la sezione del tubo,* **l** *la sua lunghezza =* **Ec**, **dx** *la lunghezza di* **ac**. *L'acqua avanza nel tubo in* **ED** *ma, allo stesso momento, una parte di fluido attraversa lo spazio* **abcd**.

L'acqua in **ED**, *la cui massa è* **n dx**, *acquista la velocità* **v** *che è pari alla forza viva* $\mathbf{nv^2dx}$, *che è generata nella sua interezza.*

In effetti, assunta assai grande la sezione del vaso **AB**, *la goccia in* **ED** *non possiede alcuna velocità prima di entrate nella tubazione.*

Per questo alla forza viva $\mathbf{nv^2dx}$ *deve essere aggiunto l'aumento della forza viva che l'acqua riceve tra* **ED** *e* **ab,** *che è* **2nlv dv**. *La somma è uguale al* ***reale carico* h *che*** *è quindi:*

$$\mathbf{nv^2dx} + \mathbf{2ncv}\, dv = \mathbf{nh\, dx}$$

oppure

$$\mathbf{v} \cdot \frac{\mathbf{dv}}{\mathbf{dx}} = \frac{\mathbf{h - v^2}}{\mathbf{2l}}$$

Durante il moto, l'aumento **dv** *della velocità è proporzionale alla pressione prodotta nel tempo* $\frac{\mathbf{dx}}{\mathbf{v}}$. *Dunque, in questo caso, la pressione su ogni elemento di fluido è proporzionale alla quantità* $\mathbf{v} \cdot \frac{\mathbf{dv}}{\mathbf{dx}}$, *che è pari a* $\frac{\mathbf{h - v^2}}{\mathbf{2l}}$.

All'istante in cui il tubo viene tagliato, la velocità è $\mathbf{v} = \frac{\sqrt{\mathbf{h}}}{\mathbf{n}}$ *oppure,* [elevando i términi alla seconda potenza] $\mathbf{v^2} = \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{n^2}}$. [Utilizzando $\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{n^2}}$ al posto di $\mathbf{v^2}$, esso] *può essere sostituito nell'espressione* $\frac{\mathbf{h - v^2}}{\mathbf{2l}}$ *che diventa* $(\mathbf{n^2} - 1) \cdot \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{2n^2l}}$, [nuova espressione del fattore al quale è proporzionale la pressione].

Se l'orifizio fosse infinitamente piccolo, oppure **n** *infinitamente grande . . . , è evidente che l'acqua eserciterebbe integralmente la pressione corrispondente all'altezza* **h** . . .

Ma poi **1** *svanisce in rapporto a* $\mathbf{n^2}$ *e la quantità alla quale la pressione è proporzionale diventa* $\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{2l}}$ *. . . . Se la quantità* $\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{2l}}$ *corrisponde alla pressione* **h**, *la pressione corrispondente alla quantità* $(\mathbf{n^2} - 1) \cdot \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{2n^2l}}$ *sarà* $(\mathbf{n^2} - 1) \cdot \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{n^2}}$, *una quantità che è indipendente da* **l**, *c.v.d..*"

Con parole nostre, Daniel Bernoulli dimostra così che la pressione di un fluido in movimento all'interno di una tubazione dipende dal suo diametro a dal carico idraulico ma non dalla lunghezza del tubo stesso; quindi, velocità e pressione dipendono entrambi da queste due sole comuni grandezze.

Questa è la base analìtica di partenza che porterà a quello che oggi è chiamato, ingiustamente, *Teorema di Bernoulli*.

Siamo infatti ancòra da esso distanti: innanzitutto lo scienziato svizzero evidenziò la sola proporzionalità delle grandezze in gioco nel moto di un fluido e non la loro esatta misura (omettendo l'accelerazione di gravità ***g*** nonché, come già abbiamo visto, il fattore ½ nel valore dell'energìa cinética). Inoltre, in nessuna circostanza Daniel Bernoulli ipotizzò la costanza della somma dei tre termini associati nella formula

$$\mathbf{H} = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \textbf{costante}$$

. . . . che oggi porta il suo nome.

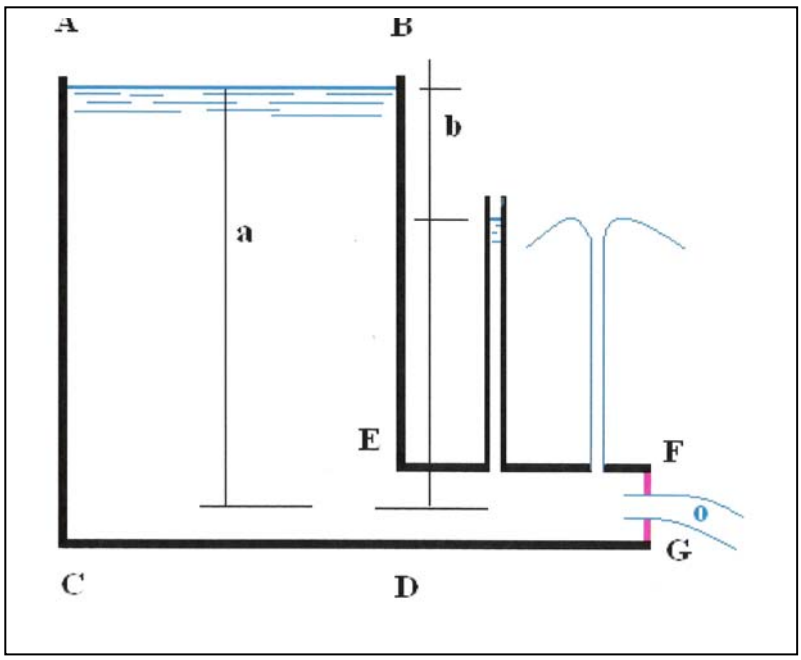
Infatti il princìpio che Daniel Bernoulli utilizzò comprese solo i due términi di velocità e di posizione, mentre la pressione poteva essere valutata soltanto attraverso l'ingegnoso sotterfugio fisico-matemàtico che abbiamo ricordato.

In realtà, Bernoulli assunse, come Huygens e come Leibniz avevano fatto con i corpi che cadono sotto l'azione gravitazionale, che la somma di ciò che oggi noi chiamiamo energia potenziale ed energia cinética rimanesse costante, ma non era ancora disponibile il princìpio che, in un fluido in moto, il lavoro è realizzato ovunque dalle variazioni della pressione in coincidenza con la variazioni dell'energia potenziale e dell'energia cinética.

Così la vera ragione del suo artificio di immaginare il tubo istantaneamente tagliato, dipendeva dalla necessità di formulare (per la prima volta) l'equazione differenziale dell'accelerazione per valutare la pressione esercitata su un elemento fluido.

Daniel Bernoulli proseguì nella sua analisi con alcune conclusioni che ne dimostrano la mancanza di completezza:

"*Per calcolare l'azione dell'acqua in modo generale, chiamiamo* **v** *la velocità dell'acqua in un punto ed in un tempo nei quali si desidera conoscere l'azione; se si assume che la velocità corrisponde con l'altezza* **b**, *la pressione sarà* **(a-b)**.



Così . . . è possibile definire la pressione che si ottiene in ogni istante.

Da questo non è difficile predire le leggi dell'idraulica-statica, assumendo ogni forma del vaso ed ogni velocità ovunque. La pressione dell'acqua sarà sempre uguale alla quantità **(a-b)**, *dove* **a** *è l'altezza corrispondente alla velocità con la quale l'acqua emergerebbe da una apertura verticale dopo un infinito tempo, il vaso rimanendo pieno, e la velocità corrisponde all'effettiva velocità. È veramente curioso che una così semplice legge di natura sia stata ignorata sino ad oggi . . .*"

Evidentemente era errata l'ipòtesi che il livello nel piezometro indicasse il valore della quota che il getto d'acqua avrebbe raggiunta togliendo il manometro e lasciando l'orifizio aperto; tuttavia l'idea era nuova e corretta; inoltre, Daniel Bernoulli era anche consapevole dell'effetto della perdita di energìa nel moto dei fluidi, alla quale diede l'interpretazione di trasferimento di energìa ad un '*sottile materiale*':

"*. . . Questo è esattamente ciò che uno trova quando studia il movimento dell'acqua, caso nel quale è evidente che una parte del* ***potenziale ascendente*** *è persa continuamente; questo fatto deve sempre essere tenuto in considerazione . . . Perciò non è senza precauzione che io uso il nostro princìpio, ed in questa maniera si scopriranno molte cose sconosciute, non solo circa il movimento dei fluidi ma anche circa le loro pressioni, che possono sembrare stupefacenti ma che nessuno potrebbe facilmente aver predetto o anticipato . . . se le analisi non fossero state sviluppate come lo sono ora. Ma da quando è chiaro che, attraverso la natura delle cose, l'intero* ***potenziale ascendente*** *non è conservato, e sino a quando nessuno potrà definìre quanta parte di esso sarà dissipata, non si potrà determinare il movimento dei fluidi con sufficiente precisione . . . così io credo che il lettore sarà prudente nel dedurre i corollari dalla nostra teorìa . . .*"

Dell'applicazione di Daniel Bernoulli del princìpio della conservazione dell'energia, d'Alembèrt ebbe a scrivere:

"*Daniel Bernoulli . . . non da alcuna prova della conservazione della forza viva dei fluidi, sebbene abbia considerato il fluido come un aggregato di piccole particelle elastiche che si premono reciprocamente, cosicchè la conservazione delle forze vive sìa valida, come ciascuno sa, nell'impatto di un tale sistema di corpi. Mi sembra che una tale prova possa essere stimata avendo una grande costanza; anche l'autore non sembra aver dato tale prova eccetto una sola induzione. Mi è quindi sembrato che era necessariamente da provare in una più chiara ed esatta maniera il principio così come applicato ai fluidi.*"

Questo princìpio, soltanto impostato da Daniel Bernoulli, partì dalla percezione che in un sistema di corpi in movimento, come può essere considerato un fluido costituito da " . . . *piccole particelle elastiche* . . .", agisce una forza prodotto della massa per la sua accelerazione complessiva (o, meglio, per l'accelerazione del baricentro del sistema, come insegnò Pierre Varignon).

Cosicchè il movimento è il risultato della somma tra tutte le forze applicate al sistema, sìa interne che esterne; se le forze interne sono in equilibrio fra loro, la forza effettiva corrisponde alla sola forza esterna.

Nel caso dei fluidi, oggi sappiamo, l'accelerazione di gravità (forza esterna) prevale e genera il moto quando e nella misura in cui essa sùpera le forze che rappresentano la resistenza al movimento, che è una forza interna.

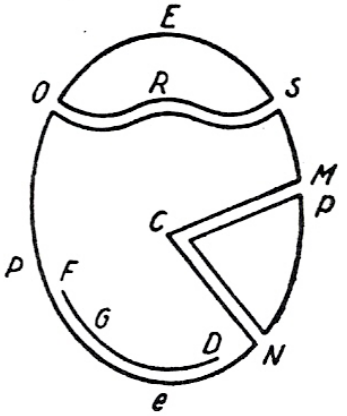
Oggi, questo *Principio di d'Alembert* è ricondotto al generale problema dell'equilibrio statico tra le forze esterne e le forze interne alle prime opposte (sforzi), ma è una méta non raggiunta dal francese, che stimò il suo princìpio solo dinàmico, con il quale cercò semplicemente di trattare la proprietà della conservazione della forza d'inerzia delle masse in movimento in rapporto alle altre forze dalla prima indipendenti.

D'Alembert affermò di aver provato questo Princìpio e di aver verificato la sua applicabilità all'efflusso da un contenitore nel suo "*Traité de dynamique*".

La dimostrazione fu ripetuta nel suo "*Traité de l'equilibré et du mouvement des fluides*", ma come corollario del suo generale princìpio della dinàmica; in ogni caso egli condivise l'ipòtesi di Daniel Bernoulli di considerare il fluido come suddiviso in piccoli strati, tranne che nel caso di bruschi cambi di sezione.

"*Devo ammettere che i risultati delle mie soluzioni sono in accordo con quelli di Daniel Bernoulli. Tuttavia in un piccolo numero di problemi esiste l' eccezione, come nel caso in cui un capace geometra utilizzi il princìpio della conservazione della forza viva per determinare il movimento di un fluido nel quale ci sono punti nei quali la velocità aumenta istantaneamente da una quantità finita* [come, ad esempio, in un brusco cambio di sezione]."

Nello stesso anno nel quale il trattato di d'Alembert sulla Dinàmica venne pubblicato, Alexis Claude Clairaut presentò lo studio della forma della Terra, che contribuì allo sviluppo dell'Idrodinàmica, perché la sua analisi si sviluppò trattando il globo terrestre come un corpo rotante ancòra allo stato liquido, soggetto a rotazione, prima di diventare sòlido; in tal caso . . . :

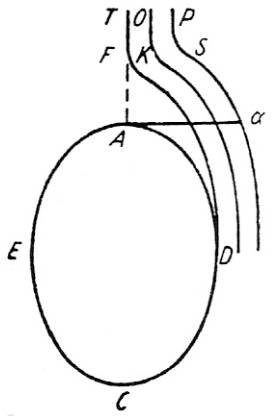


"*Fino a che l'intera massa è considerata in equilibrio, ogni porzione del fluido può diventare solida senza che la parte rimanente cambi la sua condizione. Supponiamo che l'intera massa solidifichi ad eccezione di quella parte fluida necessaria a formare il canale ORS: questo canale sarà quindi in equilibrio; ma questo potrebbe accadere soltanto se la tendenza per OR di muoversi verso RS fosse uguale a quella di SR di muoversi verso R O.*"

Clairaut mostrò inoltre che le stesse considerazioni precludevano la formazione di correnti all'interno di un canale avente la forma di un circuito chiuso, a dispetto delle sola gravità o della combinazione di gravità e forza centrifuga prese assieme.

Attraverso il càlcolo infinitesimàle, egli dimostrò che la forza gravitazionale poteva essere scomposta in tre direzioni, secondo un riferimento cartesiano, la cui variazione, nello spazio, era esprimibile utilizzando equazioni differenziali. Queste ultime erano la via per dimostrare che la forma della Terra, un'ellissoide, costituìva il sòlido di riferimento per l'equilibrio di una massa fluida in rotazione.

Nel suo "*Essai d'une nouvelle théorie sur la résistance des fluides.*" d'Alembert cercò di adattare l'analisi di Clairaut al moto generale dei fluidi. Egli per primo considerò i fluidi come fossero composti da un gran numero di particelle in movimento libero l'una rispetto all'altra ma – come in un equilibrio statico – in grado di trasmettere uguale la pressione in tutte le direzioni, secondo il *Princìpio di Pascal* (vedi al Capitolo 11). Ammettendo l'impossibilità di prevedere il dettaglio della distribuzione delle particelle, al fine di potere ad esse applicare il proprio princìpio della Dinàmica, le considerò come se costituissero un corpo solido.



D'Alembert così procedette alla valutazione di dettaglio delle forze esercitate sopra un corpo, di forma ovale, immerso nella corrente fluida, valutando l'accelerazione e la decelerazione che l'ostacolo provocava nelle particelle.

Lo scienziato francese fu il primo ad introdurre concetti come: le componenti della velocità e dell'accelerazione del fluido; i differenziali che esprimono la continuità; i numeri complessi, essenziali per la moderna analisi del problema.

Come Newton fece per il moto dell'efflusso da un orifizio (vedi Capitolo 11), d'Alembert erroneamente assunse che nella zona frontale di un corpo immerso in un flusso ci fosse una zona di fluido fermo, che évitava, altrimenti, una variazione della direzione della

velocità che riteneva eccessiva. Diversamente da Newton, tuttavia, egli considerò le condizioni del fluido nella parte posteriore del corpo immerso indipendenti da quanto succedeva nella zona frontale. Nonostante ciò, d'Alembert si rese conto d'essere giunto alla irragionevole conclusione che la somma delle pressioni elementari esercitate su ogni parte della superficie del corpo fosse nulla. Ecco come manifestò la propria perplessità:

"*Così io non vedo, lo ammetto, come si possa soddisfacentemente spiegare, attraverso la teoria, la resistenza dei fluidi; al contrario mi pare che la teoria, con tutti i rigori, dìa in molti casi resistenza nulla; un singolare paradosso che lascio, per la sua risoluzione, ai futuri geometri.*"

Jean-Baptise Le Rond d'Alembert stava dando vita ad una nuova scienza: l'Aerodinàmica.

Egli, infatti, continuò la sua ricerca sul problema della resistenza incontrata dagli oggetti in movimento in un fluido, erroneamente assumendo che il flusso intorno ad un corpo, che si muove ad una velocità variabile, potesse essere considerato come successione di tempi nei quali la velocità fosse costante; di conseguenza concluse che gli effetti di inerzia del flusso potevano, in alcune circostanze, svilupparsi con la seconda potenza della velocità, come fosse essenzialmente semplice variazione dell'energìa cinética; inoltre assunse che la "*superficie di scorrimento*" potesse invariabilmente essere proporzionale alla stessa velocità ed anche ipotizzò una caratteristica del fluido, che chiamò "*tenacità*", come costante e quindi indipendente dalla velocità.

Enérgìa cinética, *Superficie di scorrimento* e *Tenacità* erano, per d'Alembert, le tre grandezze nella quali si manifestava la resistenza al moto degli oggetti nei fluidi, proporzionali, rispettivamente, alle potenze 2, 1 e 0 del valore della velocità relativa.

Gli aspetti di Idrodinàmica analizzati dal d'Alembert restano di particolare interesse, a causa della nuova prospettiva sul problema, già indagato con Daniel Bernoulli, circa la pressione esercitata da un liquido fluente sulla parete di un condotto in rapporto alla velocità del flusso.

Daniel Bernoulli aveva dimostrato, sia analiticamente che sperimentalmente, che la pressione potesse diventare negativa se la velocità si incrementava localmente di una quantità adeguata; d'Alembert sostenne, al contrario, che la pressione non poteva che essere sempre positiva anche se, in qualche punto del condotto, la presenza dell'acqua diventasse intermittente..

Il disaccordo era soltanto apparente: Bernoulli, infatti, stava parlando in términi di pressione relativa e d'Alembert, invece, di pressione assoluta. Quando quest'ultimo si consultò sull'argomento con Euler, ricevette la seguente diplomàtica (tuttavia perspicace) replica:

"*Io credo che le tue ragioni siano fondate come quelle di Bernoulli . . . Se il condotto è posto in uno spazio vuoto (senza aria), non c'è dubbio che l'acqua possa perdere la sua continuità quando la pressione diventa negativa. La tua teoria sarà così vera quando il condotto è posto nel vuoto e quella di D. Bernoulli è altrettanto equivalente quando il condotto è all'aria aperta.*"

I lavori di d'Alembert sul moto dei fluidi avrebbero senza dubbio ricevuto il plauso che meritavano se Euler non avesse, a sua volta, pubblicato nel 1755, appena tre anni dopo l'apparizione dell' "*Essai d'une nouvelle théorie sur la résistance des fluides.*" di d'Alembert, una serie di analisi che contemplava, ma in una forma molto più elegante, quasi tutto ciò che d'Alembert e Daniel I Bernoulli avevano definito.

La certezza che Leonhard Euler abbia potuto raggiungere tale successo senza beneficiare degli sforzi di Bernoulli, Clairaut e d'Alembert, è questione che può essere oggetto di sole congetture; tuttavia è certo che fu la sua òpera a fissare in modo conclusivo i princìpi della scienza Idrodinàmica, tanto è vero che le equazioni del moto dei fluidi oggi utilizzate differiscono poco da quelle che egli allora presentò.

Leonhard Euler, come d'Alembert, prese spunto dalla legge di Pascal:

"*L'uniforme propagazione della pressione attraverso l'intera massa del corpo del fluido . . ., dovuta al fatto che tutte le particelle sono soggette alla stessa pressione durante la fase di equilibrio, non è solo un fenomeno notevole, ma accerta l'unicità della caratteristica proprietà dei fluidi, che esiste in ogni momento nei fluidi mentre non esiste nei corpi solidi.*

Una delle principali ragioni, tuttavia, perché questa proprietà sìa considerata così importante, è che tutte le leggi dell'equilibrio e del moto dei fluidi possono essere derivate da essa in modo molto convincente, così che si giustifica il ritenere che ogni sostanza che ha quella proprietà debba necessariamente seguire queste leggi, sia essa in equilibrio oppure in movimento.

Il fatto che tutta la Statica e tutta la Meccànica dei fluidi possa essere fondata così solidamente su questa proprietà giustìfica l'accettazione della particolare natura dei fluidi.

Un'altra serie di spiegazioni sulla natura dei fluidi – per esempio l'estrema piccolezza e mobilità relativa delle loro particelle dovute alla mancanza di coesione – costituivano solo ipotesi, la verità delle quali non venne decisa dall'esperienza o dalla sperimentazione, perché essa consegue alla stessa interna natura dei fluidi . . ."

Euler così evitò tutte le speculazioni inerenti la struttura dei fluidi e la sua relazione del loro comportamento, riconoscendo soltanto le caratteristiche di pressione isotropica (Princìpio di Pascal) e conservazione della massa.

Di séguito procedette nell'investigare il moto di un fluido sotto una forza esterna con le componenti $\mathbf{P_x}$, $\mathbf{Q_y}$ ed $\mathbf{R_z}$ per unità di massa, ciascuna funzione delle coordinate spaziali (x, y e z) e temporale (t), mentre considerò la pressione isotropica tra le particelle come una funzione del solo spazio (x, y e z); la velocità del fluido, in ogni punto, era scomposta nelle sue tre componenti **u**, **v**, **w**, anch'esse riferire rispettivamente agli assi x, y e z.

Considerato un elemento di fluido, a forma di parallelepipedo, Euler definì le espressioni matemàtiche che rappresentavano le componenti della forza esterna e la pressione del fluido per unità di massa su due facce opposte dell'elemento stesso; poi eguagliò queste forze con le espressioni delle corrispondenti componenti dell'accelerazione, che sono le variazioni, nel tempo e nello spazio, delle componenti della velocità; egli così giunse alle tre equazioni chiamate *Equazioni di Euler*, che costituiscono l'espressione dell'equilibrio dinàmico di un fluido in movimento:

$$P_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta p_x}{\delta x} = \frac{\delta u}{\delta t} + u \cdot \frac{\delta u}{\delta x} + v \cdot \frac{\delta u}{\delta y} + w \cdot \frac{\delta u}{\delta z}$$

$$Q_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta p_y}{\delta y} = \frac{\delta v}{\delta t} + u \cdot \frac{\delta v}{dx} + v \cdot \frac{\delta v}{\delta y} + w \cdot \frac{\delta v}{\delta z}$$

$$R_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta p_z}{\delta t} = \frac{\delta w}{\delta t} + u \cdot \frac{\delta w}{\delta x} + v \cdot \frac{\delta w}{\delta y} + w \cdot \frac{\delta w}{\delta z}$$

Euler anche generalizzò le equazioni differenziali di continuità, formulate dal d'Alembert, nella forma attualmente accettata per fluidi comprimibili, con particolare riguardo ai gas:

$$\frac{\delta p}{\delta t} = \frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho V)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w)}{\delta z}$$

. . . cioè: la variazione, nel tempo, della densità è uguale alla variazione della velocità, moltiplicata per la densità stessa, secondo le tre componenti cartesiane x, y e z.

Euler si rese conto sia della corretta impostazione di base della sua analisi ma anche dei suoi lìmiti, riconoscendo i méritì degli altri tre studiosi . . . :

"*. . . tuttavia sublìmi sono le ricerche sui fluidi per le quali noi siamo debitori ai signori Bernoulli, Clairaut e d'Alembert, che seguono così naturalmente dalle nostre due formule generali che non si può ammirare sufficientemente questo accordo tra le loro profonde meditazioni e la semplicità dei principî dai quali io derivai le mie due equazioni ed ai quali io mi riferii per i primi assiomi della Meccànica.*

Se noi non siamo capaci di ottenere una più completa conoscenza delle leggi del moto dei fluidi, non è per causa della Meccànica e la sufficienza dei princìpî ma solo perché l'analisi ci abbandona a questo punto . . . "

A dispetto della difficoltà della loro generale applicazione, Euler fu capace di dare alle sue equazioni una essenziale e vitale funzione: la rigorosa derivazione dell'equazione di Daniel Bernoulli.

Egli per primo assunse:

- il fluido incomprimibile, quindi con densità costante. Diventa così uguale a zero qualunque término che esprima la variazione della densità nel tempo;
- il flusso in moto permanente, con la conseguenza che la velocità subisce variazioni solo nello spazio, cosicchè quelle nel tempo sono nulle;
- le quantità $Pdx + Qdy + Rdz$ e $udx + vdy + wdz$ essere differenziali esatti.

Euler giunse così a dimostrare che le sue tre equazioni dell'equilibrio dinàmico di un fluido in movimento potevano essere combinate nell'àmbito di una sola relazione:

$$\frac{p}{\rho} = \Omega - \frac{1}{2}v^2 - C$$

Esprimendo la forza potenziale $\mathbf{\Omega}$ quale prodotto negativo tra l'accelerazione di gravità $\boldsymbol{g}$ e la quota $\boldsymbol{z}$ e dividendo tutti i termini per $\mathbf{g} = \frac{\mathbf{y}}{\rho}$, Lehonard Euler giungerà alla notissima forma, invece, quindi ingiustamente, attribuìta al solo Daniel I Bernoulli:

$$\mathbf{H} = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \mathbf{costante}$$

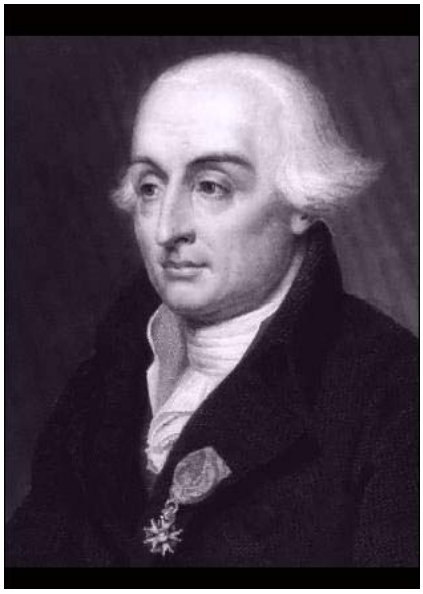
Un grande contributo all'estensione delle ricerche di Leonhard Euler fu assicurato dai grandi matematici Giuseppe Luigi Lagrange e Pierre Simon de Laplace.

Il primo, G.L. Lagrange, (Torino 1736 – Parigi 1813), nato a Torino da genitori francesi, colà educato nella tradizione classica e poi addentratosi negli studi matematici come autodidatta, fu docente di Matemàtica alla Scuola di Artiglieria del capoluogo piemontese dove fondò, assieme a G. Saluzzo e G. Cigna, una società di ricerca scientifica dalla quale ebbe origine l'Accademia Reale delle Scienze di Torino.

Dopo aver formulato la teoria dei massimi e dei minimi, dal quale prese origine il calcolo delle variazioni, nel 1766, su proposta di Leonhard Euler e di d'Alembert, fu chiamato da Federico II a dirigere l'Accademia di Berlino, dove trascorse vent'anni caratterizzati dalla fase più feconda della sua ricerca scientifica e matematica. Alla morte dell'imperatore tedesco accettò l'invito di re Luigi XVI di trasferirsi a Parigi, dove rimase sino alla fine.

Nella capitale francese G.L. Lagrange acquistò tale prestigio da prendere il posto di Lehonard Euler, alla morte di questi, quale matematico di riferimento per l'intero mondo scientifico. La sua fama gli valse l'indenne passaggio attraverso la Rivoluzione Francese e la Restaurazione, conservando inalteràti sìa le cariche che gli emolumenti. Presiedette la Commissione per l'introduzione del Sistema Metrico Decimale e, nel 1797, divenne professore all' Ecole Polytecnique, fondata in quell'anno. Anche lo stato napoleonico lo riconobbe quale persona di valore assoluto, nominandolo senatore, gran ufficiale della Legion d'Onore e conte dell'Impero; le sue spoglie mortali giacciono al Pantheon, tra i grandi di Francia.

La più importante òpera di Lagrange, "*Mécanique analytique*", fu pubblicata nel 1788; in essa furono completamente generalizzati sia il principio di d'Alembert sulla forza effettiva, sìa l'analisi di Leonhard Euler sull'accelerazione nei fluidi. Con riguardo al secondo problema, è interessante notare che, sebbene i due metodi alternativi di approccio proposti per la prima volta da Euler fossero stati entrambi perfezionati da Lagrange, l'analisi degli eventi osservati da un punto di riferimento fisso è generalmente chiamata '*Metodo di Euler*', mentre l'analisi del moto di un fluido considerando singole particelle è detta oggi '*Metodo di Lagrange*'.



Nel corso della sua analisi sul moto dei fluidi, Lagrange introdusse sia la *Velocità Potenziale* Φ sia la *Funzione della corrente* Ψ, concetti che diventarono di fondamentale importanza nel descrivere il modello di flusso, ma, come L. Euler, G.L. Lagrange riconobbe pienamente le limitazioni nelle relazioni matematiche allora disponibili:

"*Queste equazioni sono così complesse, proprio a causa della natura della materia, che la loro completa soluzione forse avverrà attraverso la potenza dell'analisi; oggi ci sono soltanto casi di sìngoli infiniti piccoli movimenti che sono suscettibili di un rigoroso calcolo.*"

Uno degli ultimi casi che G.L. Lagrange trattò fu il movimento di un'onda singola di altezza infinitesima in un canale a profondità finita **h**. Il suo nome è ancòr oggi associato con l'espressione, risultante della velocità di propagazione **v** di questo tipo di onda, detta anche '*Formula di Lagrange delle piccole perturbazioni*':

$$v = \sqrt{g \cdot h}$$

Relazione che possiamo così enunciare: le piccole perturbazioni del pelo lìbero in una corrente (onde), percorrono la superficie dell'acqua ad una velocità che è pari alla radice quadrata del prodotto dell'accelerazione di gravità ***g*** per la profondità dell'acqua stessa **h** (detta *Carico Idraulico* o, più frequentemente, *Battente*).

Pierre Simon Laplace (Beaumont-en-Auge1749-Parigi 1827) non fu da meno del suo contemporaneo G.L. Lagrange.

Nato in Normandia da genitori contadini, mentre era ancòra giovane fu notato dal d'Alembert per la sua precoce abilità di analisi. Grazie all'aiuto di questi, divenne nel 1767, quindi appena diciottenne, professore di Matemàtica alla Scuola Militare di Parigi e, nel 1773, fu ammesso alla *Académie royale des sciense*; in questo stesso anno ottenne la cattedra di Matemàtica all'*Ecòle normale Supérieure*, dove fu collega di G.L. Lagrange. Come quest'ultimo, anche Laplace passò indenne, per la sua chiara ed universale fama, attraverso travolgenti eventi che sconvolsero la Francia tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX sécolo; a differenza di Lagrange, però, non si astenne dall'attività politica, con costante successo nonostante l'alternarsi dei poteri che si succedettero: amìco e consigliere di Napoleone, che lo volle Ministro degli Interni (nel 1799) Senatore e Cancelliere del Senato (1803) e conte dell'Impero (1806), seppe 'recuperare' fiducia presso il re Luigi XVIII, dopo la Restaurazione, che lo fece Marchese e Pari di Francia nel 1814.

Nonostante i numerosi incarichi, è doveroso ricordare il giudizio che trasse di lui Napoleone: "*Matematico di primo ordine, Laplace rapidamente si rivelò un mediocre amministratore; egli portò nell'amministrazione lo spirito dell'infinitamente piccolo*."

Laplace pubblicò, nel 1796, l' '*Exposition du systhéme du monde'*, òpera di Astronomìa nella quale è enunciata la famosa sua ipòtesi, poi rivelatasi corretta, che il sistema solare si fosse formato da una primordiale nebulosa. Tra il 1799 ed il 1825 pubblicò i cinque volumi della sua celebrata "*Mécanique céleste.*", sorta di *summa* del sapere del tempo in Fisica ed in Meccànica, nella quale Laplace cercò di ricondurre ogni fenomeno nell'àmbito della teoria della Gravitazione Universale di Newton. Quest'òpera costituì il più significativo cambiamento di prospettiva portato alla scienza sin dai tempi di Cartesio, non tralasciando, nella trattazione scientifica, aspetti sino ad allora considerati squisitamente metafisici; a Napoleone, che gli rimproverava d'aver menzionato Dio Creatore soltanto una volta, Laplace replicò: "*Sire, non avevo bisogno di quell'ipòtesi*."

Laplace fu prezioso per l'Idrodinàmica, sviluppando potenti strumenti del càlcolo differenziale; importante, inoltre, il suo contributo nello studio delle onde, delle maree e delle forze capillari.

Ecco quindi nascere, nel XVIII sécolo, l'Idrodinàmica, branca dell'Idraulica che studia le forze in gioco nel moto dei fluidi, liquidi o gassosi.

Le applicazioni dei risultati di questa nuova disciplina, lo abbiamo visto nel caso delle ruote idrauliche, trovarono iniziali resistenze; pioniere di queste applicazioni pratiche fu Franz Josef Gerstner (Komotau, Boemia 1756-1832), ingegnere idraulico di notevole reputazione. Figlio di un pellaio, iniziò la carriera tecnica come assistente all'Osservatorio di Praga, dove avevano lavorato, tra molti, Tycho Brahe e Giovanni Keplero.

Gerstner insegnò Matemàtica all'Università di Praga; fondò l'Istituto Tecnico di Praga (del quale rimase direttore sino alla sua morte); infine operò come consulente nei maggiori progetti di canalizzazione allora realizzati in Europa. Scrisse su numerosi argomenti: Meccànica, macchine idrauliche, progettazione di dighe, moto delle onde.

Una delle ultime opere fu "*Theorie der Wellen*", pubblicata nel 1804, che contiene argomenti di nostro interesse; in essa, infatti, F. J. Gerstner indagò il moto dell'acqua nel caso di acque profonde, dimostrando che le particelle, nelle quali può essere scomposta la massa liquida in movimento, si muovono anche in profondità secondo un moto ondoso che riflette le oscillazioni della superficie; le trajettorie di ogni singola particella erano, infatti, circolari, decrescenti in diametro e con la profondità; la velocità di propagazione v, necessariamente comune a ogni famiglia di onde, era della forma:

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

. . . dove λ è la lunghezza d'onda, cioè la distanza tra due punti di massimo, o di minimo nell'oscillazione.

La soluzione di Gerstern, prima applicazione dei nuovi strumenti matematici disponibili, sebbene criticata fu comunque una soluzione rigorosa, sìa per le ingegnose condizioni assunte sìa per l'ottima approssimazione raggiunta.

Se Lagrange mérita l'aver associato il proprio nome allo studio delle piccole onde in acque poco profonde, Gerstner sicuramente mérita altrettanto riconoscimento nell'aver enunciato la teoria delle onde elementari nell'acqua profonda.

L'applicazione della nuova scienza dell'Idrodinàmica ai problemi pratici del moto del fluido fu né fàcile né immediata, come del resto gli stessi Leonhard Euler e Giuseppe Luigi Lagrange avevano previsto e come, del resto, paventava d'Alembert:

"*La geometria, che dovrebbe obbedire solo alla fisica, quando unìta a quest'ultima a volte la domina. Avviene così che in una questione che noi stimiamo essere troppo complicata da permettere a tutti i suoi elementi di entrare nella relazione analitica che noi desideriamo costituire, noi rimuoviamo gli elementi più sconvenienti, li sostituiamo con altri elementi meno problematici, ma anche meno reali, e poi siamo sorpresi di arrivare, malgrado tutto, non senza un lavoro sofferto, ad un risultato contraddetto dalla natura; come se dopo averlo travestito, accorciato, tagliato, un puro meccanismo meccanico dovesse obbedire a noi stessi.*"

D'Alembert stesso dichiarò di aver evitato questa trappola, ma fu proprio il suo paradosso che diede orìgine alla tendenza di considerare poco le teorie della Meccanica dei Fluidi, separandosi così la schiera degli idraulici in due categorie: una costantemente dédita ad

approfondire ed applicare rigorosamente la disciplina matematica e l'altra che privilegiava l'arte ingegneristica, applicando le teorie con assoluta 'parsimonia' se non con riluttanza; si generò quindi una frattura sempre più profonda tra gli scienziati (principalmente matematici e fisici) e i 'periti d'acqua', gli ingegneri.

Su questo aspetto prese posizione Bernard F. Bélidor (Parigi 1697 – 1761), nella sua '*Architecture hydraulique',* pubblicata a Parigi, in diverse edizioni, tra il 1737 ed il 1753, nella quale stilò una sintesi provvisoria delle conquiste raggiunte in Idraulica a quel tempo (lo abbiamo già incontrato nel Capitolo 10).

Contro il costume "*d'exalter la pratique au mépris des la théorie*", Bélidor prende nettamente posizione, affermando con decisione la necessità di far discendere da princìpi matematici i metodi "*pour opérer sûrement dans la pratique*".

In questo non fu meno categorico Antonio Lecchi (Milano 1702 – 1776) che rifiutava l'opinione 'volgare' secondo la quale ". . . *nell'affare dell'acque e de' fiumi la pratica è di gran lunga superiore alla teorica: che i soli pratici dovrebbero ascoltarsi senza intromettere i matematici, nati fatti alle sole astratte speculazioni di nessun pro l'umana Repubblica. Cotesta è una ràncida antichissima cantiléna, la quale si va rinnovellando ogni volta, che vi ricorrono le stesse circostanze, o d'ignoranza, o d'interesse, o d'emulazione, o di partito.*" ; così si esprimeva il gesuita nel suo '*Piano della separazione, inalveazione e sfogo de' tre torrenti di Tradate, Gardaluso e del Bozzente'* , pubblicato a Milano nel 1762.

Proprio questo contrasto tra teòrici e pratici fu uno dei motivi dominanti dell'Idraulica italiana del Settecento, pur non priva di notevoli contributi allo sviluppo della scienza dei fluidi, quasi a ristoro dell'improvvisa interruzione, avvenuta il sécolo precedente, della scuola italiana nata con Galileo.

* * *

Cap. 14 – Intermezzo

Gli ultimi tre Capitoli hanno raccontato degli altrettanti fondamentali passi della scienza dei fluidi verso un àmbito ormai 'moderno', se, con tale términe, si voglia intendere la conoscenza consolidata dei pincìpi che stanno alla base di ogni fenòmeno osservato.

Le scoperte:

- degli effetti della pressione, della gravità e dell'energìa (Capitolo 11);
- del càlcolo infinitesimàle (Capitolo 12);
- dell'interpretazione fisico/matemàtica dell'equilibrio dei fluidi in movimento (Capitolo 13), . . .

. . . consegnarono infatti alla Comunità Scientifica la capacità di indagine di tutto ciò che dei fluidi potesse essere oggetto di studio e di anàlisi, salvo, ovviamente, la costruzione del crescente ma illimitàto bagaglio di esperienze ad òpera di tutti coloro che seppero trarre le opportunità di queste nuove conquiste.

L'Idraulica, così, si trovò ormai in una sede propria ed adeguatamente definìta; in essa la ricerca si orientò in moltéplici direzioni, ma tutte riconducibili alla medésima scienza, anche se, in alcuni casi, possa sembrare di distinguervi differenze sostanziali.

D'ora innanzi, quindi, ci troveremo a raccontare di uomini ed organizzazioni che si rivolsero a questioni d'Idraulica che possono essere così sintetizzate:

1. resistenza al movimento dei liquidi: la viscosità dei liquidi gioca il ruolo di protagonista: l'analisi e l'interpretazione di questa caratteristica trova ancòr oggi 'territorî inesplorati';
2. resistenza al movimento dei gas: argomento dominàto anch'esso dalla viscosità, secondo il newtoniano *Princìpio di reciprocità*, questo filone portò ben presto alla nàscita della Aerodinàmica, che affronta il problema degli oggetti che si muovono nei fluidi gassosi, ed in particolare nell'atmosfera, ad alte se non altissime velocità;
3. lo studio delle singolarità nel moto dei fluidi, dove si concentra una pérdita o un accumulo di energìa;
4. la cessione o la produzione di energìa;
5. il trasporto, nei liquidi, di energìa senza spostamento della massa: si manifesta attraverso la propagazione delle onde: nelle correnti in pressione sotto forma di onde di pressione; nel caso di superfici *a pelo libero*, nella più comune natura di oscillazioni del livello, che non portano allo spostamento di massa " . . *proprio come il grano in un campo, che resta fissato al terreno ed assume, sotto l'impulso del vento, la forma di onde che corrono attraverso la campagna.* . . . " . . . per usare un'immàgine di Leonardo da Vinci;
6. differenti tipologìe del moto nei fluidi: laminare, turbolento, uniforme, vario, . . ;
7. moti di filtrazione: il movimento dei liquidi attraverso materiali porosi e, in particolare, dell'acqua nel sottosuolo;
8. il movimento dell'acqua nel territorio: comprende lo studio del comportamento idrologico dei bacini idrografici e dei fiumi correlato, in particolare alle precipitazioni; in questo campo, una parte sempre più importante rivestirà, gradualmente, lo studio del *Trasporto Sòlido*.

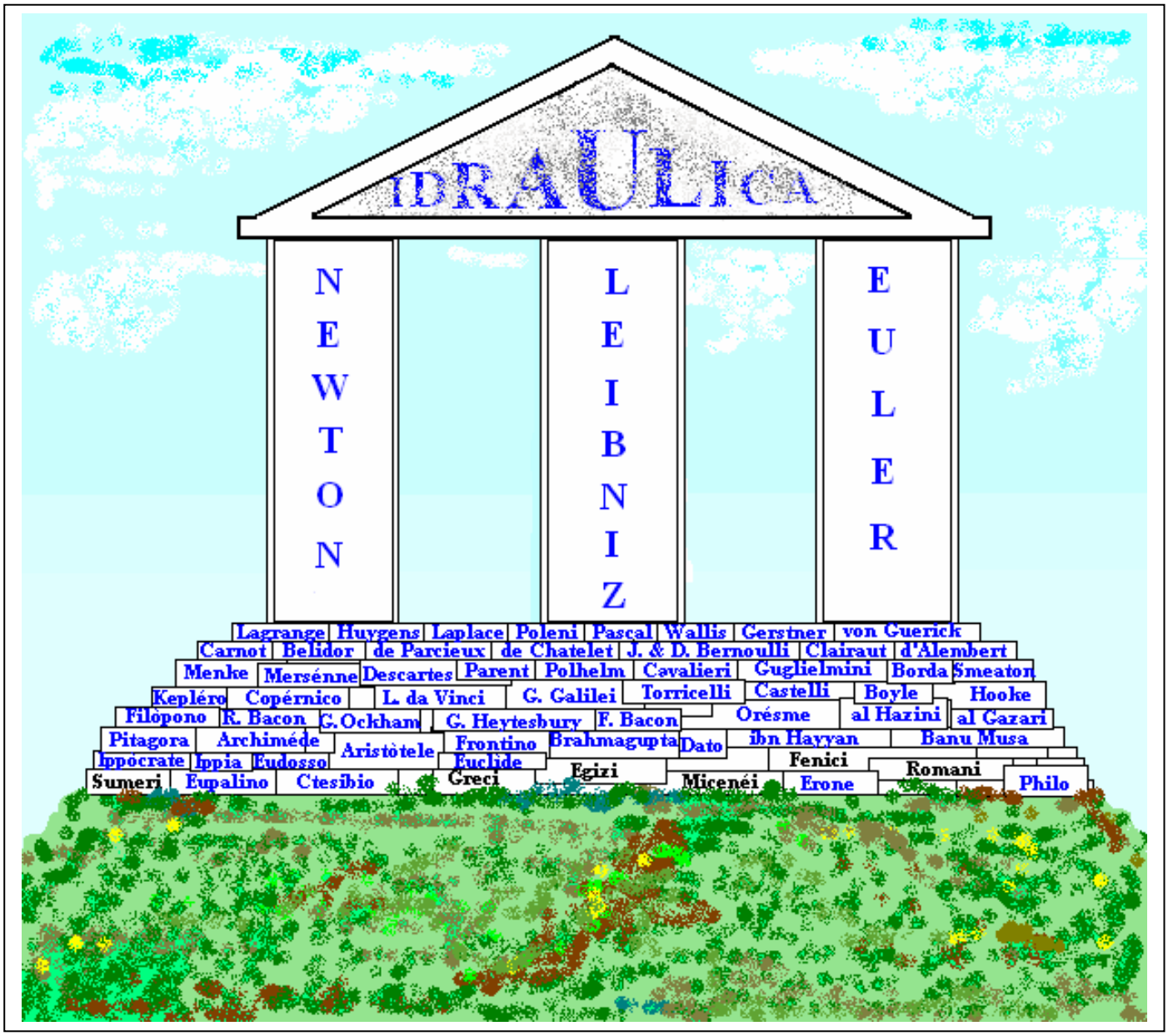
A partire dalla seconda metà del XVIII sécolo, accanto a questa molteplicità di argomenti, spesso vere e proprie discipline idrauliche, troviamo un altrettanto crescente numero di

studiosi che ad essi si applicarono con una produzione documentale che inevitabilmente iniziò ad assumere dimensioni colossali.

L'Idraulica, come le altre scienze, diventò uno dei tanti campi nei quali i sempre più numerosi ricercatori impegnarono la propria mente, la propria vita. Raccontare di costoro senza produrre qualche torto è impossibile.

Prima di riprendere il cammino del nostro racconto, vogliamo proporre al lettore un breve intermezzo; una pausa per alcune considerazioni nella speranza che possano essere fonte di una personale riflessione.

Il disegno che segue sintetizza il filo lògico delle considerazioni esposte in questo Capitolo.



In un tempo che abbraccia non meno di quaranta sécoli, abbiamo sin qui raccontato di **popoli** e di **individui** che hanno dato, ciascuno, un contributo allo sviluppo dell'Idraulica.

Ognuno, in diversi modo e misura, ha posto una pietra nella costruzione di una immaginaria *Casa della conoscenza*, nella quale, con altrettanta gradualità, prende forma l'obiettivo comune, ùnico.

Nessuno di questi protagonisti poteva però sapere se e quando questo obiettivo si sarebbe potuto considerare raggiunto, né se e quanto il proprio apporto avrebbe contribuìto alla costruzione dell'edificio.

Nella consapevolezza d'esporre un pensiero che potrebbe non essere condiviso, anche in misura non limitata, qui vogliamo affermare che quei mattoni, posti con fatica e in così tanto tempo, raggiunsero un piano dal quale si innalzarono tre colonne, a rappresentare i contributi di altrettanti scienziati che, distinguendosi da tutti coloro che li precedettero ma partìti e sostenuti dagli sforzi di questi, raggiunsero, in un sol balzo, il livello ùltimo dell'Idraulica che oggi noi conosciamo: Newton, Leibniz ed Euler.

Anche la mancanza di un solo mattone non avrebbe consentìto di porre una o più di queste colonne, . . . senza una sola di queste colonne, l'Idraulica moderna non avrebbe avuto una base sulla quale sostenersi: non vogliamo certo affermare la maggior importanza di 'un mattone' o di 'una colonna'; i contributi di ciascuno furono sicuramente di differente rilievo ma tutti necessarî.

Con Leibniz, Newton ed Euler, la scienza dei fluidi giunse a ciò che abbiamo poc'anzi chiamata *sede propria ed adeguatamente definìta*. Il disegno, proposto nella pagina precedente, rappresenta questa *sede* come fosse il tìmpano, sorretto dalle tre colonne, nel quale più non è scritto il nome di alcuno, neppure dei principali protagonisti che, come tali, incontreremo nel prosieguo di questo racconto.

Compare la sola parola **Idraulica**, dai contorni sfumati, quasi fosse avvolta da una tenue nebbia, a significare una o, più verosimilmente, la combinazione delle seguenti situazioni:

- il numero, ormai grandioso, di coloro che interverranno 'sulla scena', ma non certo in questa Storia (!), sino al giorno d'oggi;
- il destino di ogni scienza, destinata a non vedere mai colmo il vaso della conoscenza, nella consapevolezza dell'irraggiungibile Sapere Assoluto;
- l'eccessiva produzione di studi e di ricerche, che hanno portato, soprattutto in quella parte che riguarda il fluido più importante, l'acqua, un tale volume di documentazione da far dubitare, spesso ed a volte sino alla certezza, di un insufficiente rigore scientifico.

La terza si farà spazio sempre più, rispetto alle prime due, nello scorrere del tempo che, in questa Storia e da questo punto, ancòra ci sepàra dai giorni nostri.

L'ùltimo Capitolo affronterà, in modo diretto, questo problema che, forse ed almeno per l'acqua, è il guaio maggiore!

Dal prossimo Capitolo, che ùltimo non è, racconteremo dello sviluppo dell'Idraulica moderna, cioè la parte che abbiamo simbolicamente immaginato sorretta dalle tre colonne; si svolgerà il racconto di quei progressi che, d'ora innanzi, saranno sempre più frequentemente passi definitivi, senza più arretramenti o errori di direzione: le menti più eccelse, ormai 'armate' di strumenti adeguàti, non 'daranno scampo' alle leggi della Natura!

Ecco allora che, proseguendo da questo punto del racconto, si noterà un più frequente alternarsi di argomenti, a volte tra loro assai differenti, ed un maggiore 'disordine temporale', con un minore rigore, cioè, nel rispettare la cronologìa degli eventi e dei personaggi.

Ovviamente sarà privilegiata la parte che riguarda i liquidi, restando ad un livello di maggior superficialità il racconto delle scoperte relative allo studio dei gas, soprattutto in quella parte dell'Idraulica ormai considerata, da molti ma a torto, una scienza a sé stante: l'Aerodinàmica.

Dedicando maggior attenzione, in modo pertanto più esposto alle critiche, all'àmbito dei liquidi, si noterà senz'altro la prevalenza degli sviluppi nella conoscenza della regina di tutti i liquidi: l'acqua.

Se, giocoforza, si deve contenere il racconto nelle sue linee essenziali, ad evitare che diventi di dimensioni ciclòpiche, quindi non più coerente con i nostri fini, ci è sembrata una scelta quasi obbligata il dedicarci in particolare allo studio di quella sostanza che, sin 'dal princìpio', l'umanità ha sempre 'inseguìto', per governarla e per domarla alle proprie necessità, purtroppo non sempre, oggi quasi mai!, nel migliore dei modi.

L'acqua, inoltre, presenta in natura tali e tante manifestazioni da essere una fonte inesauribile di informazioni, di problemi, di ricerche, . . . : è la regina dei liquidi ma anche un universo infinìto da esplorare continuamente, senza mai giungere alla sua compléta e perfetta conoscenza.

Nei lìmiti e con le considerazioni sin qui esposti, possiamo affermare che nel sécolo XVIII, grazie agli strumenti ed alle conoscenze ormai disponibili, la ricerca in Idraulica si diffuse rapidamente ed in ogni parte del mondo, seguendo, però, temàtiche che possono ricondursi, in estrema sìntesi, a due questioni principali, riferìte all'acqua:

- tutto ciò che in qualche modo dipende dalla viscosità del liquido;
- il comportamento dell'acqua nel territorio; 'in Natura' si diceva un tempo; oggi si può ancòra usare, e si usa, questa espressione, ma sembra risuonare quale nòta stonàta almeno in quella parte del mondo tanto 'civilizzata' d'aver reso ormai equivocàbile la stessa ìdea di Natura!

Cos'è la *viscosità* in un fluido?

Con nostre parole possiamo dire che essa rappresenti l'effetto del continuo recìproco cozzare delle particelle, le molécole, che compongono il fluido stesso in movimento; continui urti, strisciamenti, rimbalzi, tra un elevatissimo numero di molécole, che pròvocano la dissipazione di una parte dell'energìa posseduta dalla corrente.

In ogni evento, la parte di energìa dissipata da un sistema migra verso un altro: l'energìa cioè, come la materia (perché è materia!), si scambia, si sposta, mai si distrugge. Nel caso dei fluidi in movimento, la pérdita di càrico del flusso può produrre: minor velocità media (quindi minore portata), riduzione di pressione, turbolenze, . . . tutti interessanti problemi per l'Idraulica, poiché consentono di giungere alla pratica applicazione dei generàli princìpî sin qui incontrati.

Gli effetti della viscosità furono indagati con un processo lentissimo; molti che ne intuirono l'esistenza si limitarono a constatare l'estrema difficoltà dell'indagine, senza in questa procedere.

Come già detto, negli ùltimi tre Capitoli abbiamo visto che l'Idraulica, nel XVIII sécolo, giunse ormai "*in una sede propria ed adeguatamente definìta*"; ma le espressioni matemàtiche, che avevano raggiunto lo scopo di ben individuare le grandezze fisiche in gioco e come ed in che misura le stesse partecipavano a ciascun fenòmeno, alla luce dei fatti non poterono superare la necessità di utilizzare spesso fattori correttivi (*coefficienti*), per raggiungere una buona corrispondenza con i risultati reali.

Newton, lo abbiamo visto nel Capitolo 9, aveva scoperto che il flusso che esce da un foro in un serbatojo pieno di liquido, subiva un restringimento che si formava nel getto stesso

addirittura al di fuori dello spessore della parete, se questo era abbastanza sottile: l'area di passaggio del getto d'acqua, nel punto in cui la velocità era pari al valore determinato dalla *Formula dell'efflusso*, era inferiore all'area del foro, per una quantità che l'inglese determinò nel valore di 0,707. Vedremo che il Poleni e poi Kirchoff diedero a questo coefficiente una miglior approssimazione, riducendolo all'incirca di un altro décimo di punto. Così è che per conoscere la quantità d'acqua fluente attraverso quel foro, alla precisione della teorìa Fisico/sperimentale, che ci consegna una formula rigorosa, bisogna aggiungere un coefficiente numérico senza il quale si compierebbe un errore di circa il 40%!

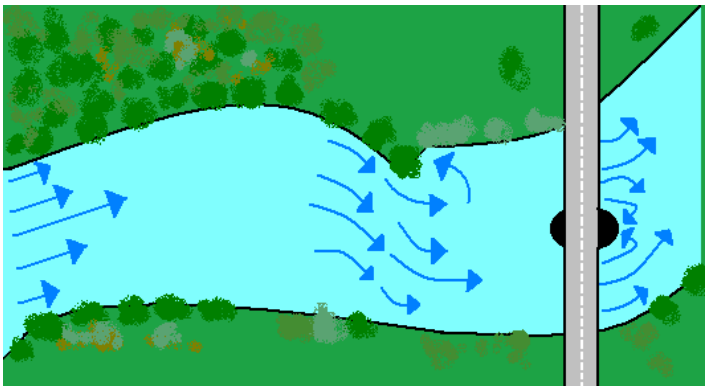
Così avviene per molte altre situazioni come, ad esempio, ovunque una corrente subisca repentine e dràstiche variazioni di velocità e pressione. Molti coefficienti, nelle formule indispensabili, conserveranno, ad imperitura memoria, il nome di coloro che li definirono, addirittura verificandosi spesso casi nei quali si elaborarono coefficienti diversi per fenomeni . . . sìmili se non uguali!

La necessità e la natura di questi coefficienti sono, per maggior parte, il prodotto della *viscosità*, che sarà, nei suoi effetti, come già detto, il tema dominante di uno dei due filoni principali dell'Idraulica degli ùltimi tre sècoli, prima di questo.

Vediamo come nacque la consapevolezza di questa così importante caratteristica fisica dei fluidi, ricordando coloro che già sono apparsi in questo racconto.

Già Leonardo da Vinci e poi Edme Mariotte avevano condotto le prime osservazioni su un macroscòpico effetto della viscosità: la differente distribuzione della velocità nelle correnti di fiumi e canali.

Il Guglielmini ebbe modo di osservare come, nei fiumi, la corrente assumeva moti vorticosi fin'anche, in alcuni punti, a risalire la pendenza dell'àlveo, soprattutto in corrispondenza di ostàcoli, quali le pile di un ponte.



Isaac Newton, nella ricerca dei segreti della Gravità, identificò quattro grandezze che, a suo giudizio, erano causa del graduale smorzamento del moto del péndolo, così come della resistenza al moto relativo tra sòlido e fluido; le chiamò: *coesione*, *elasticità*, *capacità di lubrificazione* ed *inerzia*.

Della *capacità di lubrificazione*, forse il concetto che più si avvicina a quello attuale di *viscosità*, l'inglese scrisse: " . . . *è proporzionale alla velocità con la quale le parti del fluido sono tra loro separate* [dall'oggetto che scorre nel fluido, o viceversa] . . . "

Un primo punto fisso: ogni fluido tende ad opporsi al moto (disperdendo parte della propria energìa) con un'intensità che dipende anche dalla sua velocità.

Daniel I Bernoulli si rese conto dell'importanza che la dissipazione dell'energìa, oggi attribuìta alla viscosità, poteva rivestire nel moto dei fluidi: " . . . *da quando è chiaro che, attraverso la natura delle cose, l'intero potenziale ascendente non è conservato, sino a quando alcuno potrà definìre quanta parte di esso sarà dissipata, non si potrà determinare il movimento dei fluidi con suffciiente precisione* . . .": una pesante presa di coscienza, frutto della percezione del grandissimo orizzonte della ricerca in Idraulica che appariva ancòra tutto da esplorare.

Anche Jean-Baptise Le Rond d'Alembert ebbe una medésima intuizione: ". . . *io non vedo, lo ammetto, come si possa soddisfacentemente spiegare, attraverso la teorìa, la resistenza dei fluidi;* . . . ", lasciando la risoluzione del problema ai " . . . *futuri geometri*.".

Lehonard Euler addirittura si limitò a riconoscere ai fluidi una *particolare interna natura*, celàta alla possibilità d'indagine, tanto da giustificarsi nel non ammetterla all'interno delle proprie, peraltro straordinarie, schematizzazioni matemàtiche.

Questi ùltimi tre scienziati, che seppero risolvere problemi di difficoltà assoluta, sembrano quasi 'cedere le armi' di fronte al problema della resistenza al moto dei fluidi; di fronte alla viscosità!

La ricerca in Idraulica-, d'ora innanzi, si concentrerà su questo problema, la cui risoluzione non poteva più essere rimandata se si volevano conseguìre nuovi progressi.
La natura interna dei fluidi era l'ùltima sfida, la più difficile.

Dal XVIII sécolo, ogni moderna scienza, in ciascuno dei proprî filoni di ricerca, sempre più frequentemente esigeva di non più ignorare ogni questione, anche la più complessa: i *futuri geòmetri* fanno già parte di questa Storia!

D'ora in poi, l'argomento costantemente sullo sfondo di questo racconto, per quanto riguarda la *particolare interna natura dei fluidi*, sarà quindi lo studio del manifestarsi della viscosità; sebbene essa produca effetti sotto moltéplici forme, il suo studio renderà il racconto più monòtono, spesso tendente all'elencazione della sequenza di fatti e di persone che si impegnarono con massimo impegno a volte 'soltanto' per definìre la miglior formulazione di . . . un coefficiente.
Un esempio per tutti: poiché la resistenza al moto, quindi la riduzione di velocità, è una parte significativa dovuta a ciò che possiamo definìre 'attrito contro le paréti lungo le quali l'acqua scorre', detto *Scabrezza*, sarà lunga la serie degli studiosi che ad essa dedicheranno attenzione ed attribuiranno valutazioni differenti, elaborando fòrmule e coefficienti che avranno poi un successo anche caratterizzato da una particolare e parziale distribuzione geografica; potremo cioè incontrare frasi come: ". . . *nei paesi anglosàssoni, questa formula ebbe maggior diffusione* . . . ".
Non per questo può essere giustificato un eccesso di stupore: molte sono le variàbili che dòminano il mondo dei fluidi ed i genî che abbiamo appena citàto, probabilmente, già intuìvano che la conoscenza non avrebbe mai potuto raggiungere la perfezione: il principio di indeterminazione (con Heidelberg) o di incompletezza (con Gödel) regna anche . . . 'sulle acque'!

Un esempio: ecco cosa possiamo trovare nel Manuale di Idraulica, curato dall'ing. Edgardo Zeni, édito da Hoepli-Milano nel 1911, in tema di formule allora conosciute, e chiamate 'formole', per definìre la velocità dell'acqua che scorre in un canale, nel caso più semplice (!) in cui si possa supporre il moto *uniforme* (términe che incontreremo più avanti):

indicando, per tutte, con:

- U =la velocità media della corrente che si vuole ottenere, quindi la portata, moltiplicando la stessa velocità per la sezione del flusso;
- i = la pendenza del fondo;
- R_m = Raggio Idraulico della sezione, dato dal rapporto tra l'area, della sezione del flusso, ω ed il contorno bagnato c . . .

. . . abbiamo una prima *formola*, oggi chiamata 'di Chézy' e tra le più frequentemente utilizzate, che ha una generale espressione: $U = \chi\sqrt{R_m i}$, ma il coefficiente χ, che dipende dalle caratteristiche fisico-geométriche dell'àlveo, può assumere valori differenti, ai quali corrispondono altrettante *formole*:

1. χ = 50, secondo Tadini;
2. χ = 50,93, secondo Etelwein;
3. χ, secondo Stevenson, è compreso tra 100 e 94, a seconda dei valori della velocità media (quindi da definìre per tentativi) e della natura del corso d'acqua (*grande fiume, fiume ordinario, fiume piccolo, fiume stabile, canale in muratura, canale in terra*, ecc.) . . .

. . . ecco altre *formole* che, partendo dalla precedente, a causa dell'espressione del coefficiente raggiungeranno aspetti a volte assai differenti:

4. $U = \sqrt{0{,}005161 + 3228 R_m i}$, definìta da Prony;

5. $U = \sqrt{0{,}00110158 + 2735 R_m i} - 0{,}07184$; ancòra di Etelwein;

6. $U = \sqrt[n]{\dfrac{R_m i}{m}}$ di De Saint Venant, con m = 0,00040120 e n = $\dfrac{21}{11}$;

7. $U = \dfrac{i R_m l}{0{,}024 h} - 0{,}025 + \sqrt{2780 R_m i + 0{,}00062}$, di Dupuit;

8. $U = 4{,}90 R_m \sqrt[3]{i}$, per i canali e $U = 3{,}34\sqrt{R_m}\sqrt[5]{i}$, secondo Hagen;

9. $U = (\sqrt{(0{,}0025m + \sqrt{68{,}72 r\sqrt{i}}) - 0{,}05\sqrt{m}})^2$, di Humphreys ed Abbot, dove: $m = \dfrac{0{,}933}{\sqrt{R_m + 0{,}475}}$; $r = \dfrac{\omega}{c}$; $r = \dfrac{\omega}{c + l}$ (Raggio Principale); l = larghezza in superficie;

10. $U = \psi\sqrt{R_m}\sqrt[4]{i}$, ancòra attribuìta a Humphreys ed Abbot detta 'abbreviata', con il coefficiente ψ che varia da 0,40 a 8,00 a seconda della profondità;

11. $U = \alpha^2 \sqrt[3]{R_m{}^2}\sqrt{i}$, di Gauchler;

12. $U = \sqrt{0{,}25 + 8047 R_m i} - 0{,}50$, di Girard;

13. $U = (y\sqrt[3]{R_m}\sqrt[5]{i})^4$, definìta da Bornemann, nella quale il coefficiente y può assumere valori compresi tra 0,000090 (canali rivestiti) a 0,0030 (fiumi naturali);

14. $U = \frac{1}{\omega}\frac{\alpha i^{\frac{1}{2}}\alpha^{\frac{3}{2}}}{c^{\frac{1}{2}}}$, dal Tadini, con α compreso 51,01, come definìto dal Turazza, nel campo di velocità compreso tra 1,50 e 2,00 m/s;

15. $U = \frac{1}{\omega\sqrt{b}}\sqrt{\frac{i\omega^3}{c}}$, del Turazza, con b = 0,000382, per velocità superiori a 2,00 m/s;

16. $U = \frac{1}{\omega}100\sqrt{h^3} - 3{,}2\sqrt{h^5}$, di Lombardini, elaborata specificatamente per il fiume Adda, con h pari alla profondità media;

17. $U = \frac{1}{\omega}223(y_0 + 0{,}52)^{\frac{3}{2}}$, che Elìa Lombardini elaborò per il fiume Ticino, dove y_0 era il livello dell'acqua all'idròmetro di Sesto Calende;

18. $U = \frac{1}{\omega}\alpha H^{\frac{3}{2}}\sqrt{\beta + \gamma i^2}$, è una terza *formola* attribuìta allo stesso scienziato cremonese Lombardini, elaborata per il fiume Po, nella quale: H rappresenta la profondità media del fiume, α = 765; β = 0,115; γ = 0,00069;

19. $U = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \frac{\beta}{R_m}}}\sqrt{R_m i}$, di Darcy e Bazin, con α e β che variano, rispettivamente, da 0,00015 - 0,0000045 e 0,00046-0,00086, a seconda delle asperità delle pareti, da minime a massime;

20. $U = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0{,}00155}{i}}{1 + (23 + \frac{0{,}00155}{i})\frac{n}{\sqrt{R_m}}}\sqrt{R_m i}$, di Ganguillet e Kutter, con n coefficiente di scabrezza delle pareti, distinto in dodici classi, dalla più levigata (n = 0,12) alla più 'tormentata' (n = 2,44);

21. $U = \dfrac{100\sqrt{R_m}}{m+\sqrt{R_m}}\sqrt{R_m i}$, di Ganguillet e Kutter, detta 'abbreviata', con m sempre variabile in 12 categorìe, da 0,12 a 2,50;

22. $U = \dfrac{87}{1+\dfrac{\gamma}{\sqrt{R_m}}}\sqrt{R_m i}$, detta 'nuova di Bazin', con γcoefficiente che va da 0,06 a 1,75;

23. $U = c\sqrt[6]{R_m}\sqrt{R_m i}$, di Manning, derivata da quella di Gauchler.

. . . se si volessero consultare altri manuali, l'elenco si allungherebbe! Forse nessuno ha mai calcolato il numero delle *formole* elaborate, su tale ùnico problema di Idraulica, da quando essa ormai giunse nella *sede propria ed adeguatamente definìta*; qui possiamo soltanto dare certezza . . . all'imbarazzo della scelta!

Certamente si tratta di una impressionante proliferazione di espressioni matemàtiche, ad interpretazione di uno stesso fenòmeno fisico, che trova pochi altri esempi fuori dall'Idraulica, ma molti altri in altrettanti problemi dell'Idraulica stessa, che si dimostra così essere una scienza che unìsce semplicità ad assoluta complicazione.

Questo elenco di formule possono essere, per il lettore, il segnale che, d'ora in poi, il racconto si avvolga di una pesante noja, diventi più monòtono (ovvero, a nostro giudizio: meno divertente, meno interessante, meno stimolante!); ci prendiamo però la non leggera responsabilità di garantìre che questo non avverrà (resterà, cioè, il medésimo 'livello di gradimento!), confidando in un alleato d'eccezione: l'acqua! . . . non solo regina dei fluidi ma anche sede delle più belle avventure della mente.

Resta, comunque, un fatto: a questo punto, nàsce per noi una nuova sfida, *in itìnere*!

Se i fenòmeni legati alla natura interna dei fluidi pone alcune difficoltà in più nell'impegno di mantenere la medésima 'tensione' che il racconto ha avuto sino ad ora, non altrettanto si può prevedere (così la nuova sfida sùbito diventa meno impegnativa!), per la seconda delle due strade principali lungo le quali, dal XVIII sècolo e tuttora, continua e progredisce la ricerca in Idraulica: il comportamento dell'acqua nel territorio.

E' certamente il tema che più di tutti gli altri ha contribuìto a formare quella nebbia nella quale, oggi, vediamo un'**Idraulica** dai contorni fin troppo sfumàti.

Il problema è indubbiamente complesso e, quel che è peggio, coinvolge e spesso travolge (!) la pubblica opinione. E' un fatto: 'acqua e territorio' è un binomio sempre più associato al disastro, al dramma; situazioni nelle quali anche la scienza più pura si concede a sconti . . . in molti sensi!

Il problema è complesso, esageratamente complesso! Ad esso inferiscono innumerévoli discipline, riconducibili a molte Scienze; ecco un elenco, non certo esaustivo:

- l' Idraulica: qui, ora, non ha certo bisogno di presentazione!;
- la Meteorologìa: lo studio dei fenòmeni che portano l'acqua sul territorio: la pioggia, la neve e la gràndine;

- l'Idrologìa: figlia delle prime due ma anche della Statistica (tre madri = nessuna offesa!);
- la Geologìa: lo studio della crosta terrestre, della sua formazione e del suo comportamento. L'interazione tra l'acqua ed il territorio è, in particolare, sviluppata dall'Idrogeologìa, che non consideriamo una disciplina a sé stante, non foss'altro per non moltiplicare a dismisura questo elenco, attraverso la sémplice combinazione di ogni coppia di términi che sono, tra loro, tutti 'accoppiabili'!;
- la Biologìa: in questa vogliamo includere quella congerie di tèrmini, oggi assai di moda, che si richiamano, spesso in forme assai genériche, agli obiettivi piuttosto che alla scienza di riferimento: protezione dell'ambiente, tutela della fauna, conservazione della 'naturalità', . . .;
- la Botànica: idem, come sopra;
- l'Urbanistica: la scienza che trasforma il territorio per le necessità della comunità umana: l'errore, dove errore c'è (quasi ovunque), è nella definizione di queste necessità; la trasformazione, di fatto, ne è l'inevitabile conseguenza;
- l'Idraulica Fluviale: disciplina nata in Italia ma non per questo qui indicàta distinta dall'Idraulica. Lo studio del comportamento delle acque quando, nel territorio, già giungono a formare un fiume non attiene soltanto alle leggi dei fluidi, ma è *summa* di molti aspetti e settori di tutte le precedenti discipline. È l'Idraulica Fluviale che meglio rappresenta l'essenza del problema principale, diventando per questo disciplina distinta dall'Idraulica: il dominio delle acque territoriali.

Forse qualcuno potrebbe obiettare che siffatta materia non sìa più neppure parte dell'Idraulica; ma in essa, a volte anche soltanto 'sullo sfondo', dòmina sempre la presenza dell'acqua, che incombe e pròvoca tutti i fenòmeni studiati in questo campo; li léga indissolubilmente.

L'acqua si muove secondo le leggi dell'Idraulica ma, nel territorio, produce effetti e situazioni nelle quali le componenti 'non idrauliche' assumono una posizione prevalente.

Nel prosieguo del racconto vedremo pertanto il susseguirsi di esperienze e di fatti legàti a questo aspetto che ancòra riveste importanti conseguenze nella nostra vita di tutti i giorni, a volte all'improvviso, senza preavviso.

Pur sapendo di compiere una notevole forzatura, nell'Idraulica Fluviale comprendiamo, come disciplina appartenente a questo secondo filone principale, anche lo studio del movimento delle acque nel sottosuolo, con un ragionamento che non è privo di lògica: l'acqua tutta, mossa dalla gravità, tende a raggiungere, per la più breve via, il punto più basso, solitamente il mare. Il cammino non avviene soltanto nell'àlveo del fiume ma anche attraverso i moti sotterranei, di filtrazione o di scorrimento, nascosti alla vista ma altrettanto importanti ed intimamente collegati ed a volte conseguenti allo scorrere delle acque di superficie. Moti sotterranei che altro non sono, quindi, che una frazione del più generale movimento delle acque, identificabili non tanto secondo i corsi d'acqua bensì per lìmite di bacìno idrografico: porzione di territorio nel quale le acque tutte, superficiali e sotterranee, scorrono verso il medésimo finàle recàpito.

Sìa che l'acqua scorra sul territorio od in profondità, l'osservazione diretta e sistemàtica del suo comportamento costituisce l'elemento prevalente in questo àmbito della ricerca, ma il concorso di tante altre discipline, così reciprocamente differenti, spesso ne fa dimenticare le origini idrauliche, inducendo ad un errore esiziale che la stessa acqua provvederà a 'segnalare' con i modi che le sono proprî e, per l'umanità, troppo spesso dolorosissimi!

Proprio a quest'ùltimo aspetto dobbiamo imputare la sempre maggiore pasticciata configurazione di questa parte dell'Idraulica, perché è e dovrebbe restare parte innanzitutto dell'Idraulica mentre rimane sempre più invischiata e contagiata da altre discipline, che tendono alla sopraffazione piuttosto che alla convivenza.

'Acqua e Territorio', in questo mondo moderno, è un binomio che assume, purtroppo, un connotato politico prima che tecnico/scientifico.

Scelte errate possono essere pesanti da sopportare, prima in àmbito politico e poi, con estrema prontezza, in quello tecnico/scientifico; tant'è che oggi, in molte parti del mondo e senz'altro in Italia, pare preferirsi la soluzione meno rischiosa: la 'non scelta'!

Sì, oggi è assai più frequente assistere all'interessamento scientifico della ricerca nel 'dopo disastro', piuttosto che nell'ostinàta insistenza del 'necessario oggi'.

È raro imbattersi in coraggiose anàlisi delle criticità, che evidenzìno difetti e rimédi.

Dopo una grande attività intellettuale, che ha portato ad altrettante significative realizzazioni sino agli anni Settanta del sécolo scorso, lo studio del comportamento dell'acqua nel territorio sembra essersi ritirato in disparte, non più reclamando la priorità del proprio pensiero di fronte ad altri approcci, tra l'altro non tutti corroboràti da rigore scientifico, ma sostenùti da una male interpretata esigenza di sostenibilità.

Risuonerà di un sapore ben più antìco di quanto non sìa in realtà il racconto di uomini che seppero domare i grandi fiumi, rendere sicuri vasti territorî, dominare le acque del mare. Ricordarli è, per questo, anche un dovere nei confronti della collettività.

Viscosità e territorio: troppa sìntesi nel definìre gli universi della ricerca in Idraulica degli ùltimi tre sécoli?

* * *

Cap. 15 – L'Idraulica italiana del secolo XVIII, tra scienza, conoscenza ed empirismo

Gli sviluppi dell'Idraulica nel Settecento rendevano evidente la possibilità di indagare ed interpretare fenòmeni che, sino a poco tempo addietro, sembravano destinàti alla sola conoscenza empirica.

In particolare in Italia, qui considerata come unità culturale non essendolo per nulla dal punto di vista geo-politico, furono prodotti numerosi studi, tanto da far pensare alla rinàscita della Scuola Italiana di Idraulica, la cui storia si era bruscamente interrotta con la morte prematura di Evangelista Torricelli, ad appena 35 anni, dopo aver raggiunto fama internazionale nello sviluppo degli studi in precedenza avviàti dai grandi del Rinascimento e, probabilmente, ad un passo dall'avviare gli sviluppi del Càlcolo Sublìme, con alcuni decenni di antìcipo.

Molto del progresso italiano, in questo periodo, appartiene alla diretta pratica idraulica degli ingegneri (o '*perìti d'acqua*'); approccio paventàto e criticato, come abbiamo visto nel precedente Capitolo 13, da Jean-Baptise Le Rond Alembert, da Antonio Lecchi e da Bernard Forest de Bélidor, ma assai ùtile per rendere con maggior immediatezza alla società i primi benefìci delle conoscenze sino ad allora raggiunte.

NUOVA
RACCOLTA
D'AUTORI ITALIANI
CHE TRATTANO
DEL MOTO DELL' ACQUE
TOMO I.
BOLOGNA · MDCCCXXIII
DALLA TIPOGRAFIA DI JACOPO MARSIGLI.

Un'idea assai completa delle caratteristiche prevalentemente pratiche degli studi italiani nel Settecento è ben presentata dall'òpera, pubblicata per la prima volta a Firenze nel 1765, '*Raccolta d'autori italiani che trattano del moto delle acque*", la cui quarta edizione comparve a Bologna nel 1823, a cura del conte Francesco Mengotti. In essa si possono trovare i lavori di molti autori come Guido Grandi (Cremona 1671 – Pisa 1742), il gesuìta Antonio Lecchi (Milano 1702 – 1776), Paolo Frisi (Melegnano 1728 – Milano 1784), il barnabìta Francesco Maria de' Regi (Milano 1720 – 1794), il gesuìta Giuseppe Mari (Cannéto sull'Oglio 1730 - ?) e Bernardino Zendrini (Saviore-Brescia 1679 – Venezia 1747), quest'ultimo noto per aver ideato i '*murazzi*', sbarramenti per difendere la laguna di Venezia dalla forza del moto ondoso marino.

Questi scritti contengono poco di ciò che non fosse già conosciuto, con il conseguente prevalere, nella ricerca, delle altre scuole europee e poi americane, ma con un'originale sviluppo, prevalentemente nella parte settentrionale della penisola italica, di studi ed esperienze attorno a due problemi che, in quelle aree, erano sostanziali per la tutela, la crèscita, se non, a volte, per la sopravvivenza di intere comunità: l'Idraulica dell'Irrigazione e l'Idraulica Fluviale.

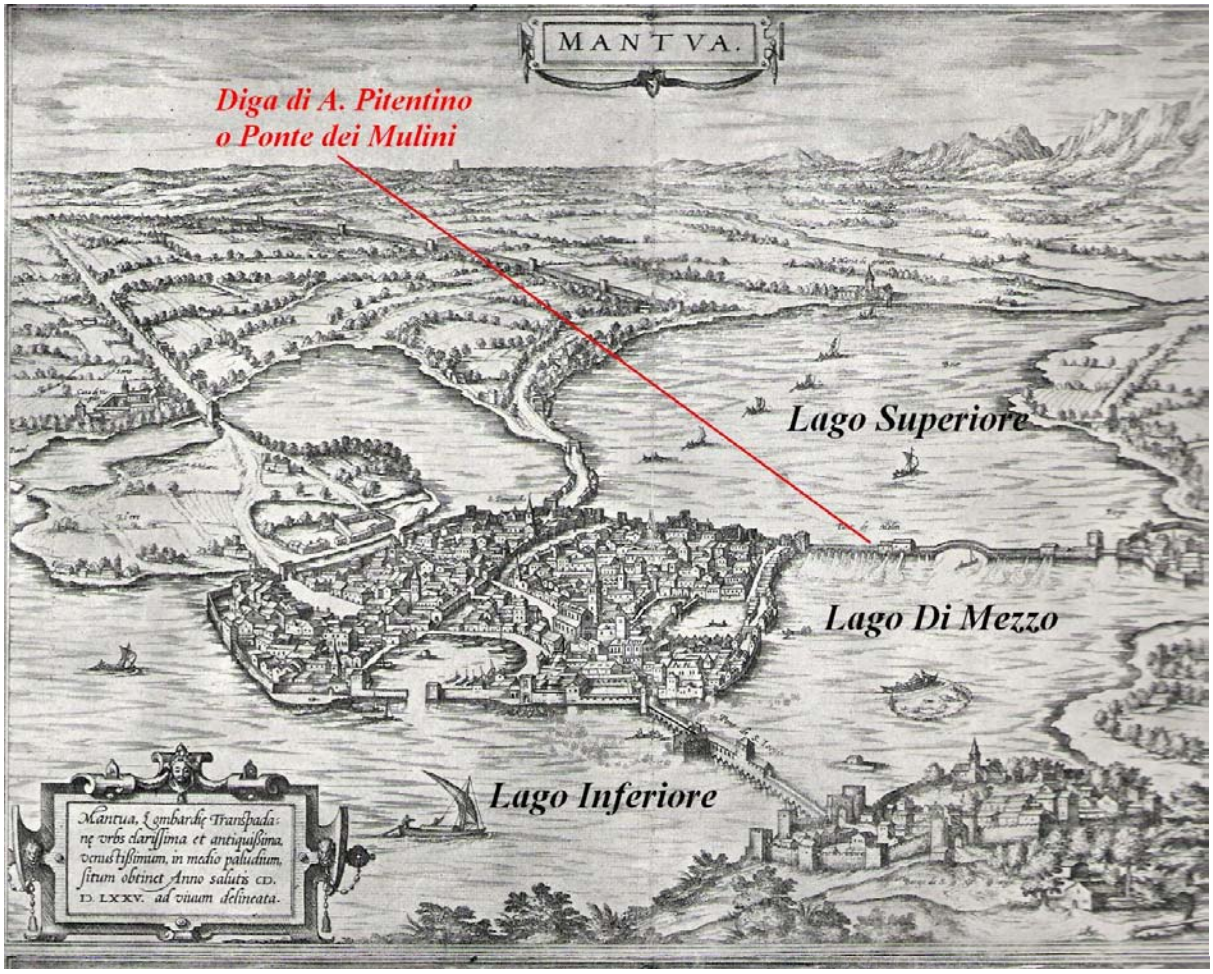
Prima di esaminare questi due àmbiti, oggetto di grande attenzione nell'Italia del Settecento, si deve proporre una figura, qui inserita perché significativa nel fluire di questa Storia che mai si interrompe: Alberto Pitentino.

Non è infatti possibile parlare dell'Idraulica italiana del Settecento, così orientata alle pratiche applicazioni, senza fare un salto all'indietro di sei sècoli, ancor prima delle conquiste del Rinascimento, di Leonardo da Vinci, di Galileo Galilei, . . .; senza cioè ricordare una figura di ingegnere idraulico caratterizzata da una dùplice grandezza: aver concepìto e poi realizzato òpere

grandiose in pieno Medio Evo; òpere che hanno senz'altro influenzato molti di coloro che poi seguìrono nello studio dell'Idraulica.

Di Alberto Pitentino sappiamo soltanto che nacque a Bergamo e che raggiunse Mantova, nel 1187, al séguito di Attone Pagàno, chiamato nella città di Virgilio ad assumere la carica di Podestà.

Mantova, in quel tempo, soffriva pel regìme irregolare del fiume Mincio, che provocava inondazioni anche allo stesso centro abitato. Alberto Pitentino, già noto per la sua abilità in òpere di regimazione delle acque, progettò un grandioso sistema di controllo del fiume che ancòr oggi svolge egregiamente la propria funzione. Sbarrò il fiume nei pressi della città, con una diga in terra e muratura, dotata di dodici luci di regolazione, che formò stabilmente il lago oggi detto *Superiore*, così vasto d'essere in grado di attutire l'effetto delle piene. A valle dello sbarramento si scavò un secondo bacìno, oggi diviso in due laghi, *Di mezzo* ed *Inferiore*.



Dal lago Superiore, Alberto Pitentino fece costruire inoltre un canale, il *Rio*, che, sfruttando il dislivello creato dallo sbarramento, garantiva acqua corrente e regolata per gli usi cittadini, primo fra tutti la difesa, costituendo la fossa che delimitava Mantova dalla parte opposta dei due laghi.

L'òpera, certo grandiosa per il periodo nel quale essa fu concepìta e per gli effetti che ottenne, venne costruìta in dieci anni, tra il 1188 ed il 1199.

Nel 1229 in corrispondenza delle dodici bocche di regolazione del deflusso, volute dal progettista bergamasco, furono costruìti altrettanti mulini che sfruttavano il dislivello di quattro metri tra i due laghi.

La testimonianza della grandezza di Alberto Pitentino si compléta nel sapere, come molti storici ritengono, che fu lui il primo a concepìre lo sbarramento di Govérnolo, presso la foce in Po del fiume Mincio, al fine di arrestare il rigurgito del più grande fiume italiano durante le

piene; la prima struttura, in quel punto, venne realizzata dai Gonzaga, signori di Mantova, nel XIV sécolo.

In Italia, quindi, ben prima del Rinascimento, operarono ingegneri idraulici di grande ingegno e notevoli capacità, sebbene privi delle conoscenze teoriche di Idraulica, a testimonianza di un'attitudine, forse specialmente italiana, di costruire, armàti delle sole costanza, abilità e fiducia (il "*patientia, virtus et spes*" di *librator* Nonio Dato . . . che abbiamo ricordato nel Capitolo 4)..

L'apparente isolamento académico dell'Idraulica italiana del Settecento rende ora doveroso il citare Paolo Frisi (Melegnano 1728 – Milano 1784), matemàtico ed astrònomo, protagonista di un'affermazione che fece scalpore ovunque, suscitando posizioni a volte contrastanti, ma che dava per la prima volta un'identità alla scienza Idraulica: egli infatti dichiarò l'assurdità d'esplorare i fenomeni in Idraulica attraverso l'analisi matemàtica, prima d'averli interpretati con le conoscenze della Fisica, perché di quest'ultima l'Idraulica è parte.

Paolo Frisi, barnabìta, insegnante alle scuole Palatine di Milano nella cattedra, per lui stesso istituìta, di Matemàtica e Meccanica, che tenne sino alla morte, fu uno degli esponenti di spicco dell'Illuminismo milanese e lombardo ed appartenne a quella schiera di ingegneri idraulici che, attraverso la realizzazione di grandi òpere, soprattutto canalizzazioni, proseguirono concretamente negli sforzi costruttivi, tesi non tanto alla speculazione scientifica ma soprattutto al miglioramento dello sviluppo sociale. Dal nostro punto di vista, in quel periodo si procedeva secondo l'approccio tipico della Scuola Italiana di Idraulica del Rinascimento, applicata ed a volte assai empirica, al séguito della tradizione originata, in particolare, da Leonardo da Vinci e da Galileo Galilei, ma, come abbiamo visto, iniziata ancòr prima di questi illustri personaggi; possiamo dire 'da sécoli e sécoli'.

Nel 1753 Paolo Frisi venne eletto Membro Corrispondente della ***Académie royale des scienses*** di Parigi; nel 1757 fu associato all'Accadémia di San Pietroburgo ed accolto nella *Royal Society*; nel 1758 entrò nell'Accadémia di Berlino; fu nel 1766 il suo ingresso nell'Accadémia di Stoccolma; nel 1770 venne la volta delle Accadémie di Copenhagen e di Berna. Lo scienziato italiano, inoltre, ricevette numerosi attestati e riconoscimenti dai sovrani europei: Maria Teresa d'Austria gli concesse un vitalizio annuo di cento zecchini; il granduca di Toscana, nel 1756, lo nominò professore di Matemàtica all'Università di Pisa; nel 1764 approdò alle Scuole Palatine di Milano.

Il suo impegno non fu solo scientifico: Paolo Frisi brillò, infatti, anche nella Letteratura, nella Morale, nella Filosofìa . . . alcuni lo definirono 'Il d'Alembert italiano'.

Il suo impegno sociale si rafforzò quando, nel 1764, ottenne da Papa Pio VI lo scioglimento dalla giurisdizione ecclesiastica e la riduzione allo stato laicale, seppure nell'àmbito della Chiesa. Divenne così uno dei massimi esponenti dell'Illuminismo nella città di Milano.

Nell'àmbito dell'Idraulica è importante ricordare che fu di Paolo Frisi il definitivo progetto per il canale navigabile detto '*Naviglio di Pavia*', per collegare, come tutt'oggi collega, la dàrsena di Milano con il Ticino e, da qui - a quel tempo e con i 'bastimenti' di quell'época - attraverso il fiume Po, con il mare. Quest'opera, già ideata nel 1579 da Giuseppe Meda, fu portata a compimento, su progetto del Frisi, soltanto nel 1819, sotto la direzione di Vincenzo Brunacci (Firenze 1768 – Pavia 1818) e poi di Carlo Parea, allora Ingegnere Capo del Dipartimento del fiume Olona.

Accanto a Paolo Frisi, Antonio Lecchi, Giuseppe Mari e Francesco Maria de' Regi, contribuirono a ridare vigore e prestigio alla Scuola Idraulica Lombarda, più attraverso le òpere e le osservazioni che per nuove teorie e scoperte.

Un problema che assillava gli studiosi di Idraulica dell'Italia settentrionale era la misura delle acque correnti, questione che assunse sempre più rilevanza man mano che la rete delle canalizzazioni artificiali abbandonava le sue funzioni originali (difesa, igiene, trasporto, irrigazione) in favore della sola Irrigazione, attività residuale, rispetto alle orìgini della rete, ma di costante attualità e crescente interesse, poiché garanzìa di raccolti non solo abbondanti ma anche più sicuri, cioè meno esposti ai capricci stagionali.

La società, non solo in Italia, stava accelerando nella ricchezza della popolazione e nella popolazione stessa, la quale, inevitabilmente, accresceva in proporzione le proprie esigenze di consumo, di derrate alimentari innanzitutto. Solo l'Irrigazione, in una terra fértile ma caratterizzata dalla concomitanza della stagione estiva con i minimi di piovosità, poteva garantire la sicurezza del raccolto, soddisfare la domanda di alimentazione della popolazione, aumentare il reddito rurale e garantire lo sviluppo della zootecnìa e della conseguente filiera produttiva di derivati: latte, latticini, uova, carne.

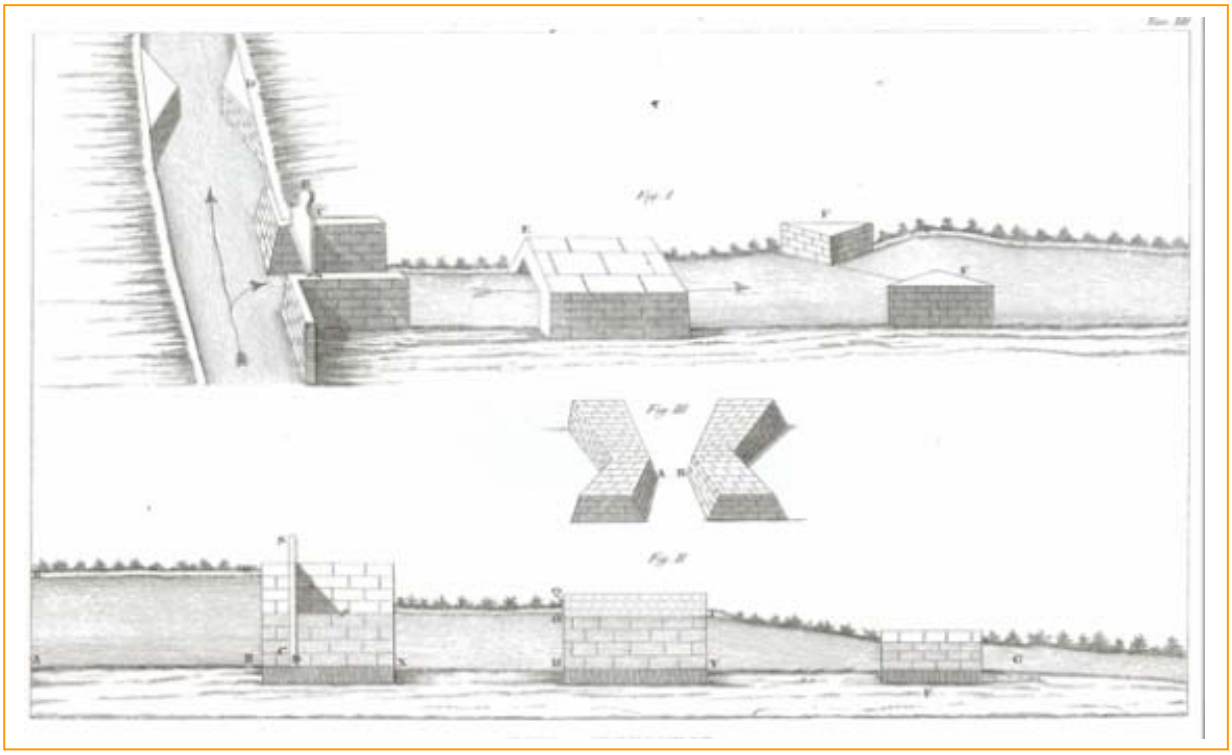
L'acqua resa disponibile nei canali, non illimitata e sempre più richiesta, rendeva questione assai seria il problema della sua misura nella distribuzione ai canali secondari di irrigazione.

Già alla fine del XVI sécolo, la rete dei Navigli milanesi, realizzati - il nome non è casuale - per garantire il trasporto via acqua ma gradualmente divenuti fonte di vita per l'agricoltura lombarda, soffriva di una tale riduzione di livello, nella stagione irrigua, da rendere impossibile la navigazione per . . . mancanza d'acqua! Misurare con precisione quanta acqua fosse estratta da ogni luce o bocca non era solo un problema fiscale, tanto caro alla dominazione spagnola del Seicento, ma una necessità, per garantire la continuità di un servizio di trasporto ancòra essenziale per la città di Milano. Il problema non era solo del milanese, né della sola navigazione lungo la rete idrografica artificiale.

La definizione di metodi di misura delle acque dispensate alle bocche dei canali di irrigazione trovò il terreno più fèrtile nelle aree dove la misura era questione di aspre contese, se non addirittura di sopravvivenza; in aree cioè dove l'acqua era né troppo abbondante, perché della misura precisa se ne potesse fare a meno, né tanto scarsa da non essere risorsa preziosa alla quale tanti potessero ambìre. Così fatta era la campagna cremonese. Proprio in questo territorio, non coincidente con l'attuale provincia, la

misura delle acque distribuite per l'irrigazione era stata materia di studi e sperimentazioni che portarono, nel XVI sécolo, alla definizione di un sistema di misura, che sarà poi conosciuto come '*Bocca alla cremonese*' o '*Bocca Cremonese*', sviluppato dai tecnici del '*Condominio Pallavicino*', una sorta di istituto a partecipazione azionaria, fondato da Adalberto Pallavicino († 1570) che, nelle disposizioni testamentarie, volle così trasmettere la proprietà della grande rete irrigua '*in stirpes et non in càpita*', evitando in tal modo il pericolo che si disperdesse lungo l'asse ereditario della grande nobile famiglia; rete che così si sviluppò sino al 1893, allorquando venne ceduta al Consorzio Irrigazioni Cremonesi.

Tale era la precisione della *Bocca Cremonese* che, nel 1570, un ingegnere del Collegio di Milano, Jacopo Soldati, convinse il Magistrato del Naviglio Grande milanese ad applicare questo misuratore alle bocche irrigue che, in quel tempo, estraevano acque dallo stesso Naviglio in tale incontrollata quantità da rendere impossibile la navigazione durante la stagione delle irrigazioni.



Altrettanto fecero, con determinazione 1 giugno 1584, i Deputati del Naviglio della città di Cremona, affinché con l'adozione della Bocca Cremonese " . . . *si partiranno le acque ugualmente che non si è fatto sin dora* . . .".

Possiamo quindi parlare di una Scuola Cremonese che, ancòr priva delle conoscenze idrauliche teoriche sul moto dell'efflusso, aveva sviluppato un sistema di misura, seppur empirico e soltanto sperimentale, talmente soddisfacente da essere esportato laddove sulla misura nascessero serissimi problemi, altrimenti irrisolvibili.

Imporre o quantomeno rendere più precisa la misura delle acque erogate per l'Irrigazione comportava l'incisione di interessi allora forti, in particolare dei proprietari terrieri, latifondisti, spesso costituenti, se non solo influenti, la pubblica amministrazione che, attraverso il miglior controllo, poteva imporre adeguate imposte sull'uso dell'acqua. Mentre a Cremona il Naviglio Civico fu attrezzato con i misuratori ideati dai tecnici del Condominio Pallavicino, non raggiunse il medésimo obiettivo il Magistrato del Naviglio Grande di Milano; emblemàtica la lettera che l'ing. Jacopo Soldati inviò al detto Magistrato, Danese Filiodoni, nel giugno del 1573:

"*Jacopo Soldati Servitore delle Signorìe Vostre illustrissime prima ch'egli si occupasse ne la moderazione del Naviglio Grande, era talmente ricercato da particolari nel mestier suo che quattro Ingegneri non haveriano potuto supplire al tutto; et guadagnava molto più in quelle estati di quello ch'egli habbi guadagnato in queste de la moderazione detta; oltre che alhora egli guadagnava altritanti l'inverno quanti l'estate; et ora è talmente desviato per causa della moderazione passata, per la qualo gli è convenuto lasciare tutte le altre imprese, che l'inverno passato ed l'altro, con tutto che sìano stati molto temperati, non è mai stato ricercato neanche per un solo giorno*."

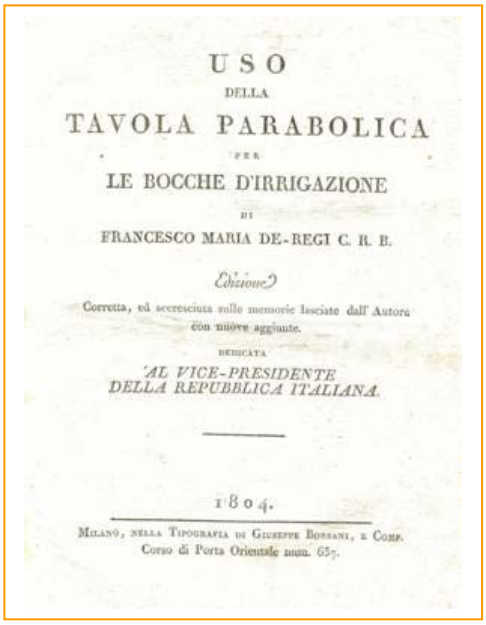
L'incàrico di rendere misurabile l'acqua si trovava, tra i principali oppositori, i proprietarî fondiarî, che avevano interesse acché misurata non fosse. Poiché chi vantava la proprietà dei latifondi costituiva la categorìa dominante, sìa in economìa che 'in politica', il còmpito ricevuto costava all'ing. Soldati la perdita di commesse ed incarichi: è questo il segnale più eloquente dell'insuccesso dell'impresa, interrotta definitivamente nel 1576. L'episodio è significativo di un problema che non deve stupìre d'incontrare ancòr oggi e che allora poneva un freno alle applicazioni pratiche e nessuno stimolo alla ricerca; oggi rallenta altri processi di sviluppo e di ammodernamento dei sistemi, a causa di tensioni molto simili a quelle di cinque sécoli fa!

La misura delle acque erogate per l'irrigazione, cioè la corretta misura delle acque correnti, trovò defintiva soluzione nel XIX sécolo, ma alla fine del sècolo precedente trovò una codifica che ottenne un grande successo, ritenuta dagli interessati la soluzione del problema.

Francesco Maria de-Regi (Milano 1720 – 1794) padre Barnabìta, a ventiquattro anni assunse la cattedra di Matemàtica, per lui appositamente creata, nella scuola presso il Collegio di S. Alessandro in Milano, annoverando tra i suoi allievi il confratello Paolo Frisi, del quale abbiamo già detto.

Esperto non solo di Matemàtica ma anche di Geometrìa e Trigonometria, il de-Regi si applicò con passione allo studio dell'Idraulica ed in particolare delle questioni legate all'irrigazione ed ai fiumi.

Nel 1765, risolta brillantemente una vertenza sull'uso irriguo delle acque del fiume Tartaro, che vedeva coinvolti direttamente – tanta era l'importanza della materia – la Repubblica di Venezia e la Casa d'Austria, per le quali il corso d'acqua era il comune confine, lo scienziato milanese venne nominato, dall'Imperatrice asburgica Maria Teresa, *Regio Matematico ed Idraulico* " *. . . con assegno annuo di lire due mille Mantovane . . .* ", con l'ingiunzione di sorvegliare di persona l'andamento delle irrigazioni in quelle terre " *. . . nel tempo in cui si da l'acqua ai risi . . .*".


USO
DELLA
TAVOLA PARABOLICA
PER
LE BOCCHE D'IRRIGAZIONE
DI
FRANCESCO MARIA DE-REGI C. R. B.
Edizione
Corretta, ed accresciuta sulle memorie lasciate dall'Autore con nuove aggiunte.
DEDICATA
AL VICE-PRESIDENTE
DELLA REPUBBLICA ITALIANA.
1804.
MILANO, NELLA TIPOGRAFIA DI GIUSEPPE BOSSANI, E COMP.
Corso di Porta Orientale num. 657.

Dopo tale nomina, il Plenipotenziario austrìaco in Lombardìa, ancora nel 1765, gli ordinò di pubblicare senza indugio il suo metodo per misurare le acque destinate all'Irrigazione.

L'òrdine fu tanto pressante che Francesco Maria de-Regi, in breve tempo " *. . . a penna corrente . . .* ", compilò e pubblicò, nello stesso anno ed a spese del governo austrìaco, il suo manuale "*Uso della Tavola Parabolica per le Bocche di Irrigazione*", che venne ristampato, nella "*Edizione corretta ed accresciuta sulle memorie lasciate dall'Autore con nuove aggiunte*", nel 1804, perché l'òpera " *. . . fu tanto applaudìta, che in breve tempo divenne rarissima; ed è già lunga serie d'anni, che il Pubblico ne desiderava in vano una nuova*

edizione . . . ".

Nel testo, il matematico Barnabìta, partendo dalla considerazione che "*Il Torricelli, il Mariotte, il Guglielmini, ed altri, per quella analogìa che passa tra l'acqua, che esce da un foro fatto nelle pareti laterali d'un vaso, e l'acqua, che scorre da una bocca, o sezione, hanno giudicato che la velocità dell'acqua corrente debba calcolarsi nello stesso modo, nel quale si computano le velocità dell'acqua uscenti da' fori laterali, e premute da diverse altezze d'acque sovrastanti* . . . . [che sono] . . . *in ragione . . . come le radici quadrate di quest'altezze medésime . . .*" definisce un processo geométrico che permette di calcolare la portata derivata dal canale principale attraverso l'uso di una tabella, la *Tavola Parabolica*, costituìta da tre colonne, nelle quali la seconda riporta il valore della radice quadrata, approssimata alla quinta cifra decimale, del numero intero presente nella prima (da 1 a 2000), mentre, nella terza colonna, è segnato il valore del prodotto dei primi due numeri.

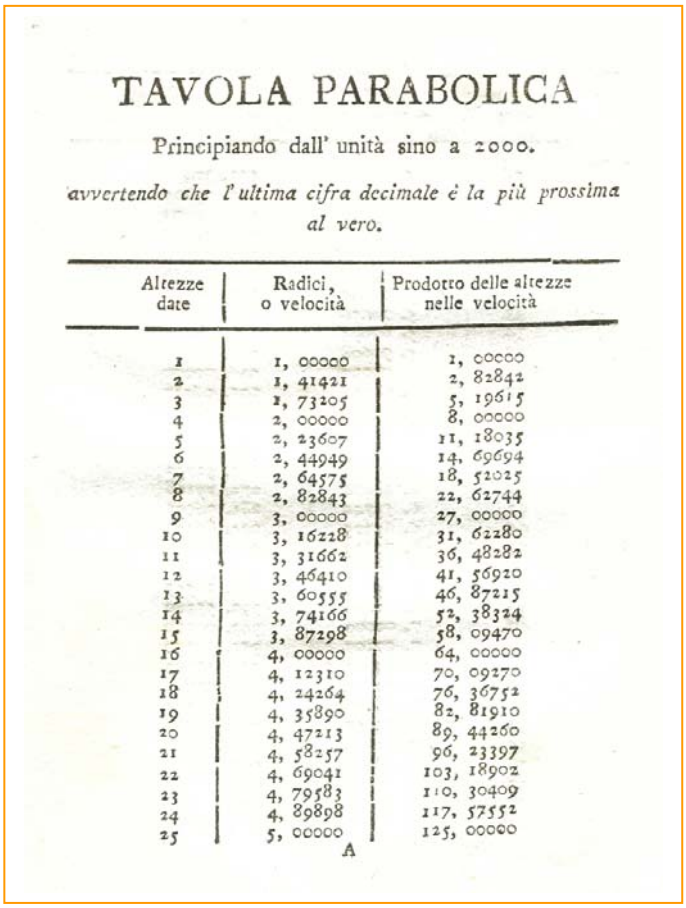


TAVOLA PARABOLICA

Principiando dall' unità sino a 2000.

avvertendo che l'ultima cifra decimale è la più prossima al vero.

Altezze date	Radici, o velocità	Prodotto delle altezze nelle velocità
1	1, 00000	1, 00000
2	1, 41421	2, 82842
3	1, 73205	5, 19615
4	2, 00000	8, 00000
5	2, 23607	11, 18035
6	2, 44949	14, 69694
7	2, 64575	18, 52025
8	2, 82843	22, 62744
9	3, 00000	27, 00000
10	3, 16228	31, 62280
11	3, 31662	36, 48282
12	3, 46410	41, 56920
13	3, 60555	46, 87215
14	3, 74166	52, 38324
15	3, 87298	58, 09470
16	4, 00000	64, 00000
17	4, 12310	70, 09270
18	4, 24264	76, 36752
19	4, 35890	82, 81910
20	4, 47213	89, 44260
21	4, 58257	96, 23397
22	4, 69041	103, 18902
23	4, 79583	110, 30409
24	4, 89898	117, 57552
25	5, 00000	125, 00000

A

Oltre alla Tabella, Francesco Maria de' Regi, nel suo manuale, esàmina tutte le casistiche che si possono incontrare nella pratica, dispiegando il metodo per risolvere ogni questione di misura.

La completezza del manuale sta nel riportare le unità di misura in voga in gran parte dell'Italia centro- settentrionale, così da poter applicare il mètodo in ogni luogo di quella parte della penìsola.

Il metodo ed i risultati non erano certo corretti, mancando di alcune conoscenze ancòra non raggiunte, ma la *Tavola Parabòlica* ebbe comunque un grande successo poiché rendeva disponibile un sistema comune di misura, per quanto inesatta, che per primo si avvicinava alla realtà e consentiva così di calcolare le portate derivate, cioè fare i primi conti, sempre uguali e dimostrabili; poco importava se ciascuna misura fosse errata nel calcolo del valore della portata.

L'utilizzo di fattori senz'altro proporzionali alla portata – la radice quadrata del carico idraulico e la superficie dell'area di passaggio del flusso – produceva valutazioni omogénee che consentivano il controllo del bilancio idrico tra le acque disponibili nel canale principale e le acque dallo stesso estratte per l'Irrigazione; al primo si consentiva così di non vedere l'acqua ridursi sino a rendere impraticabile qualunque altro uso (la navigazione, per esempio, o la pulizia delle fosse urbane, . . .), alle seconde – le bocche irrigue – si garantìva una distribuzione equànime.

Era un passo avanti, nella pratica del controllo delle reti di distribuzione, rispetto alle *fistulae* ed alle *quinariae* di Sesto Giulio Frontino che, diciassette sécoli prima, valutava la sola area di passaggio dell'acqua, senza alcuna considerazione della velocità del flusso.

Mentre i Matemàtici, i Fisici e, in uno con questi, gli studiosi di Idraulica penetravano sempre più le leggi di questa stessa scienza, in Italia, tanta era la necessità di giungere a misure 'usàbili', che si usò ciò che già era noto per produrre quella risposta che fosse, per quei tempi, soddisfacente.

Le popolazioni della Pianura Padana erano, lo sono tuttora, sempre impegnate in un difficile rapporto con le abbondanti acque, così preziose per gli usi delle comunità, così pericolose nelle piene dei fiumi, così malsane nelle aree paludose.

Non stupisce il fatto che in queste terre si consolidasse un'esperienza pratica di governo delle acque che applicava, con prontezza quasi àvida, ogni nuova conoscenza ed ogni studio sul moto delle acque.

L'Idraulica Fluviale trovò qui la sua culla, per mano, come si è già detto, di Doménico Guglielmini (Bologna 1655 – Padova 1710) che studiò, nel suo "*Della natura de' fiumi*" (Bologna, 1697), il comportamento dei fiumi e, in questi, delle correnti, dei depositi, delle erosioni, delle alluvioni, ed inoltre delle òpere di difesa e prevenzione, àrgini, pennelli, rettifiche, nuove inalveazioni; elaborando teorie ed indicazioni sui rimedi possibili ad evitar danni. L'aspetto più rilevante di questo lavoro è senz'altro l'aver introdotto l'Idraulica Fluviale quale materia di studio, ma anche strumento pratico di azione nell'attività di manutenzione del corso dei fiumi, dando indicazioni sulle azioni che possono essere intraprese per evitare i fenomeni ai quali, sino ad allora, le comunità non riuscivano ad altro se non ad opporre deboli e precarî rimédi.

Árgini, difese, deviazioni della corrente (i cosiddetti '*pennelli*'), rettifica dell'àlveo, canali di drenaggio, prosciugamento delle paludi, . . . erano opere di grande impegno ma che portavano ad un proporzionale vantaggio per intere comunità.

Cresce così la sete di conoscenza e la premura di trovar rimedio: sulla scìa del Guglielmini, ecco comparìre un altro studio "*Architettura d'acque*", prima edizione - Piacenza 1699, a cura di Giovan Battista Barattieri, ingegnere idraulico a servizio del Duca di Parma, che, a differenza del Guglielmini, affronta prevalentemente problemi di Idraulica Fluviale.

Ecco alcuni argomenti:

- *Nascimento delle acque, origine de' Fiumi, effetti del Mare, de' Laghi, e delle Paludi, e Pantani.*
- *Corrosione dì fiumi, e Fabbriche in essi per impedire le rovine.*
- *Alluvione d' Fiumi, e sue divisioni tra' Concorrenti.*
- *Isole fatte da' Fiumi, come li dividono a' legitimi padroni.*
- *Come si facciano mutare di letto li Fiumi Reali, per allontanarli dalle parti importanti, che offendono.*
- . . .
- *Innondazione de' Fiumi, e sue cause più probabili.*
- *Argini da fabbricarsi a' Fiumi, per difendere dale loro Innondazioni le Province soggette.*

ARCHITETTVRA
D' ACQVE
DI
GIO. BATTISTA BARATTIERI
INGEGNERE,
PARTE PRIMA
Diuisa in Otto Libri, che contengono:

I. Nascimento delle Acque, origine de' Fiumi, effetti del Mare, de' Laghi, e delle Paludi, e Pantani.
II. Corrosione de' Fiumi, e Fabbriche in essi per impedir le rouine.
III. Alluuione de' Fiumi, e sue diuisioni tra' Concorrenti.
IV. Isole fatte da' Fiumi, come si diuidano a' legitimi Padroni.
V. Come si facciano mutare di letto li Fiumi Reali, per allontanarli dalle parti importanti, che offendono.
VI. Del moto, ouero velocità delle Acque correnti, pendenze necessarie de' suoi Canali, perche possano liberamente andare, & altri effetti circa le medesime velocità.
VII. Innondazione de' Fiumi, e sue cause più probabili.
VIII. Argini da fabbricarsi a' Fiumi, per difendere dalle loro Innondazioni le Prouincie soggette.

Con le Figure ad ogni Capo de' sudetti; Aggiunta, e correzione.

Opera vtile, e necessaria non solo à quelli, che vogliono attendere alla medesima Architettura, ma eziandio à que' Dottori, e Procuratori, che auranno Cause dipendenti dalle cose in essi contenute.

ALL' ILLVSTRISSIMO SIG.
FERDINANDO SANTI
Nobile di Pontremoli, Presidente della Serenis. Duc. Cam. e Consegliere dell' Eccelso Ducal Consegliio di Piacenza.

PIACENZA
Nella Stampa Ducale di Lealdo Leandro Bazachi. Con lic. de' Super. Ad istanza di Natale Fincio Libraro. 1699.

Anche Giovanni Poleni (Venezia 1683 – Padova 1761) si distinse nell'esplorazione dell'Idraulica Fluviale per la quale giunse ad abbandonare gli studi teòrici d'Idraulica, nei quali dimostrava altrettanta capacità.

Due le òpere sue più importanti in questa materia: *De motu aquae mixto* (1717) e *De Castellis per quae derivantur fluviorum aquae habentibus latera convergentia liber* (1718), nelle quali affronta problemi pratici, come l'accumulo di sedimenti nella laguna di Venezia e il problema

delle inondazioni, conducendo, per la loro risoluzione, prove sperimentali; in questo, lo vedremo nel prossimo Capitolo, è considerato il miglior esponente italiano della nascente Idraulica Sperimentale.

Principale di tutti i fiumi della Pianura Padana, il Po era anche il maggior portatore di ricchezza ma anche di disgrazie e rovine. Nel solo sécolo XVIII si hanno testimonianze certe di numerose piene disastrose: 1705 (un disastro mai visto '*a memoria d'uomini*'), 1712, 1728, 1755, 1772, 1778, 1781 . . . ed altre ancòra. Dopo ogni piena il còrso del grande fiume cambiava aspetto ed a volte anche direzione.

Ormai l'idea di dominare anche il più grande dei fiumi italiani, così terribile nelle sue piene, diventò argomento di dissertazione ma anche di progettazione e realizzazione, secondo cànoni in qualche modo codificati.

È del 1758 il progetto di deviazione del corso del Po, pericolosamente avvicinàtosi alle mura della città di Cremona, "*Del riparo dei pennelli alle rive del Po di Cremona*", per mano dell'idraulico Abate Antonio Lecchi (Milano 1702 – 1776). Gesuìta, dopo essersi occupato di insegnamento in materie umanistiche, Lecchi si dedicò alla Matemàtica ed all'Idraulica, realizzando studi sulle sistemazioni di tratti di fiumi e canali.

L'imperatrice Maria Teresa d'Austria lo volle quale Matemàtico ed Idrografo imperiale, poi preteso da Papa Clemente XIII, anch'egli Gesuìta, che lo nominò Direttore delle òpere di Idraulica nei territorî pontifici.

Porre mano ai grandi fiumi non è tuttora cosa da poco, eppure le conoscenze di Idraulica Fluviale di quel tempo già furono efficàci nel produrre grandi vantaggi ai territorî pei quali si costruirono le òpere, soprattutto di difesa e regìmazione, senza però poter controllarne gli effetti riflessi in altre zone dello stesso còrso, spesso diviso tra mille piccoli domìni, soprattutto il fiume Po.

Ma porre mano a problemi che coinvolgevano vasti territorî, senza poterli indagare e comprendere nella loro compléta dimensione spaziale, per giunta disponendo di un'Idraulica Fluviale ancòra ai primi passi, portò ad conseguìre successi ma anche a provocare nuovi disastri, tanto da far affermare, ad Elìa Lombardini (La Brogne - Alsazia 1794 – Milano 1878): "*Le grandi e ripetute sventure che hanno scosso le menti, le quali spesso sopra malcerte supposizioni sono andate divisandosi vasti progetti di pubblica sicurezza, senza dimandarsi sin dove il rigore della scienza li possa accettare*".

Sebbene già uomo del XIX sécolo, a completamento di questo Capitolo, ci soffermiamo su questo grande cremonese, essendo nato in Alsazia da padre cremonese - colà trasferitosi in quanto Ufficiale della napoleonica *Armata del Reno* - e poi tornato, ancora bambino, nella città sulle rive del Po.

Elìa Lombardini, ingegnere presso l'Ufficio Provinciale delle Pubbliche Costruzioni di Cremona per poi diventare Direttore Generale delle Pubbliche Costruzioni della Lombardìa , segnò la svolta dell'Idraulica Fluviale italiana, grazie all'utilizzo, nelle osservazioni, dei rilievi idromètrici sistemàtici, sìa di livello che di pioggia, nonché delle osservazioni morfologiche dei bacìni idrogràfici, attraverso i quali potè dimostrare l'insussistenza di alcune affermazioni, come

l'esistenza di un progressivo innalzamento del letto del fiume Po, dando indicazioni su come impostare i lavori sul grande fiume con approcci più corretti.

Il lavoro di Lombardini fu conosciuto anche fuori d'Italia, tant'è che lo stesso ingegnere ricordò, in una sua memoria, la visita, nel 1844, dell'amico francese Baumgarten e, nel 1854, dell'americano Humphreys, che divennero " . . . *veri proséliti dell'Idraulica italiana propugnando, in Francia ed in America, fra le tante cose, l'arginamento de' fiumi, che incontrava forti opposizioni* . . . ".

Il primo, rientrato in Francia, pubblicò un sunto dei lavori dell'italiano seguendo poi con il lavoro "*Notizia sopra un tronco della Garonna a valle del Lot*", fiume " . . . *del quale intraprese l'arginamento e la sistemazione . . . costruendo una scala delle portate, ma partendo dai risultamenti di ventitrè misure dirette, eseguite col mulinello di Woltmann da lui perfezionato* . . .".

Humphreys, tornato negli Stati Uniti d'América, condusse uno studio accurato di sistemazione del Mississippi, compiendo il rilievo planimetrico ed idraulico di 93 sezioni del fiume e di 72 dei " . . . *poderosi suoi affluenti*. . . .".

Suscitando notevole interesse fuor d'Italia, dove grande era la sua fama, Elìa Lombardini, per primo, rivolse scientifica attenzione all'idrologìa del fiume Nilo, del quale erano state scoperte " . . . *talune più remote sorgenti* . . . " nel 1863.

Raccogliendo tutte le memorie, testimonianze scritte e documenti allora disponibili sul grande fiume africano, Lombardini seppe elaborare un "*Saggio idrologico sul Nilo; con quattro Appendici*", comparso per la prima volta nel 1864, che può essere considerato il primo studio scientifico di quell'immenso bacìno idrografico. Lo stesso Lombardini, con comprensibile compiacimento, scrisse, a proposito di quel lavoro realizzato 'a tavolino': "*In successive Appendici ho dato ragguaglio di posteriori esplorazioni delle sue sorgenti, di misure di portata del Nilo Bianco che collimavano con le mie, ricavate da semplici congetture* . . .".

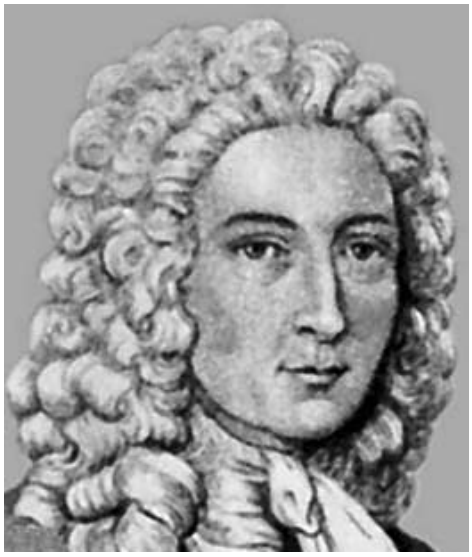
Per chiudere il richiamo all'Idraulica Italiana del XVIII sécolo, della quale anche Lombardini fu erede, possiamo affermare che essa, dopo molte esperienze, considerazioni, esplorazioni, tornava ad avere stimàto accesso sulla scena internazionale, al tempo in cui le conoscenze erano ormai avviate a svelare la gran parte delle leggi che régolano il comportamento dei fluidi.

* * *

Cap. 16 – Misura della velocità e della pérdita di energìa nel moto: le prime prove sperimentali

All'inizio del XVIII sécolo, l'importanza delle ricerche in Idraulica attraverso gli esperimenti si stava prepotentemente affermando quale integrazione e supporto essenziali per l'analisi teòrica; lo abbiamo già visto nel Capitolo 10, trattando delle ruote idrauliche.

In Italia, in quel periodo, spicca per originalità il marchese Giovanni Poléni (Venezia 1685 – Padova 1761), già ricordato nel precedente Capitolo 14, che condusse notevoli prove sperimentali, utilizzandole per verificare particolari aspetti e prestazioni delle òpere di Idraulica Fluviale da lui stesso progettate e poi realizzate.



Poléni, all'età di ventiquattro anni, era già professore di Astronomìa all'Università di Padova. Rivolse grande interesse alle lingue straniere, alla Filosofìa, alla Teologìa, e fu associato a molte delle società scientifiche in Europa. È curioso ricordare che, pur insegnando la scienza degli astri, questo scienziato veneziano si pose decisamente contro le teorie copernicane, tentando di spiegare il moto apparente dei pianéti con ragionamenti che portassero a negare la rivoluzione e la rotazione della Terra.

Poléni ebbe maggior successo come ingegnere idraulico che professore, assumendo molti incarichi dalla Serenissima Repubblica di Venezia che lo incaricò di risolvere molti problemi legati all'approvvigionamento d'acqua, al controllo delle alluvioni, al deposito di sedimenti nella Laguna di Venezia, ma anche quale àrbitro nelle dìspute tra Stati confinanti.

L'aspetto più importante dell'attività di Poléni, per la ricerca in Idraulica, è costituìto dall'utilizzo sistemàtico di prove sperimentali, al fine di verificare le principali grandezze che caratterizzavano le òpere dallo stesso progettate; egli, così, introdusse la verifica sperimentale quale elemento essenziale, in sede di progettazione, per adeguare le previsioni teòriche alle reali situazioni, financo a giungere alla definizione di relazioni in tutto empìriche, laddove la teorìa risultasse inadeguata se non assente.

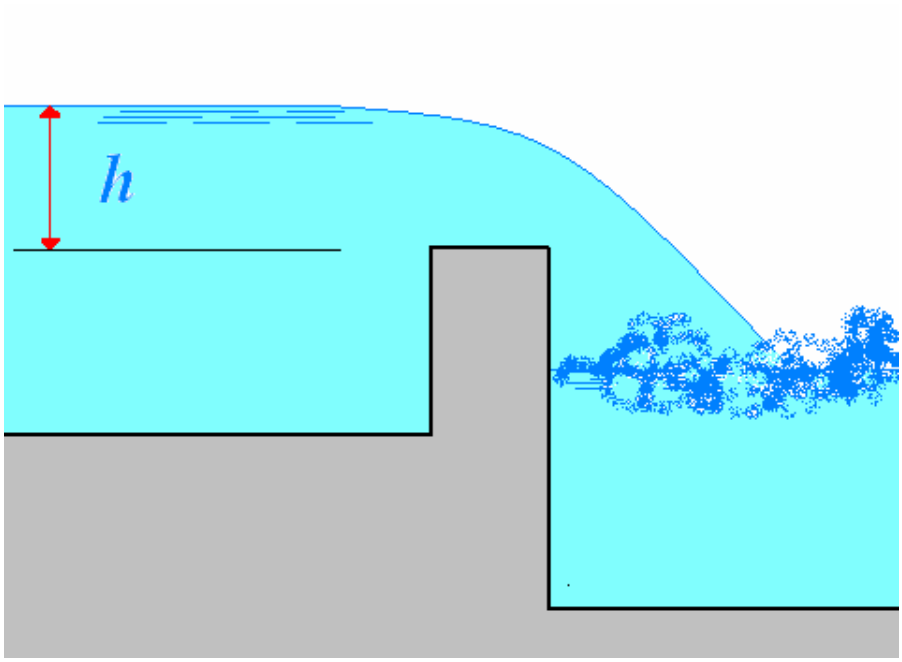
Con Poléni la via dell'Idraulica giunse ad un bivio distinguendosi, sempre più marcatamente, tra Teòrica e Sperimentale.

Già nello stesso sécolo, lo abbiamo visto nel Capitolo 13, l'Idraulica Teòrica trovò altissimi esempi in Daniel Bernoulli, Lehonard Euler e Jean-Baptise Le Rond d'Alembert, ma ancòra lontàni e non indispensabili per l'Idraulica Sperimentale; nel 1727 lo stesso Poléni, seppure ben preparato in Matemàtica, ammetteva la grande difficoltà nel comprendere le ricerche di Daniel Bernoulli.

Ciononostante, anch'egli si occupò di studi teòrici. Nel suo trattato "*De moto aquae mixto*", del 1717, Giovanni Poléni trattò dell'efflusso che tracima da un serbatoio attraverso un'apertura rettangolare, incìsa sul bordo, quindi nel caso di efflusso 'a pelo libero', indicando la velocità totale dell'acqua, per unità di larghezza, corrispondente all'area della curva parabolica delle trajettorie, espressa dalla formula:

$$Q = \frac{2}{3} hb\sqrt{2gh}$$

. . . nella quale *h* e *b* rappresentano, rispettivamente, l'altezza dell'acqua nel serbatoio rispetto al bordo inferiore dell'apertura e la larghezza dell'apertura stessa.



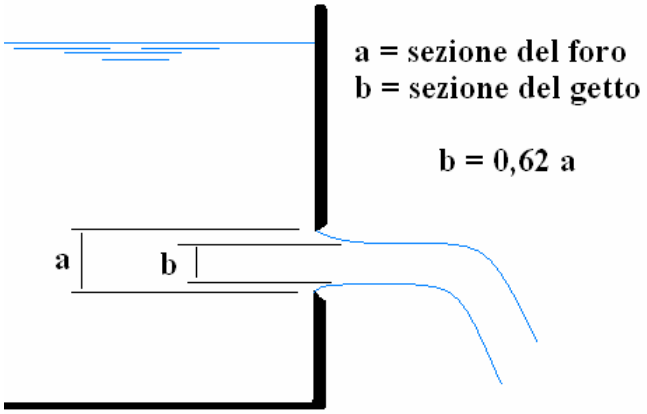
Questa formula è una delle prime espressioni ormai giunte alla loro stabilità definitiva, tant'è che ancòr oggi è utilizzata, per esempio, nel calcolo della portata che tracìma dalle creste delle dighe.

La sua più generale espressione:

$$Q = \frac{2}{3} C \cdot hb\sqrt{2gh} \qquad \text{oppure} \qquad Q = \frac{2}{3} C \cdot bh^{\frac{3}{2}}\sqrt{2g}$$

. . . è spesso indicata come "*Formula del Poléni*", nella quale *C* è un coefficiente il cui valore, nei diversi casi, è riportato nei manuali, frutto di numerose prove sperimentali, a dimostrazione della necessità dell'approccio sperimentale, sistematicamente utilizzato, per la prima volta, dallo scienziato veneziano.

Nel suo trattato "*De Castellis per quae derivantur fluviorum aquae habentibus latera convergentia liber*", pubblicato nel 1718, Giovanni Poléni si interessò del fenòmeno della contrazione del getto che esce da un orifizio a spigolo vivo; concluse che l'area della sezione contratta del getto era il 62% dell'area dell'apertura, individuando così il valore del Coefficiente di Contrazione pari a 0,62. Questa determinazione costituì un considerevole progresso rispetto al valore di 0,707 (pari a $\frac{1}{\sqrt{2}}$) determinato da Isaac Newton, che per primo analizzò il fenomeno.



Di Poléni giova ricordare la trascrizione dell'òpera di Sesto Giulio Frontino, '*De aquis urbis Romae'*, poi data alle stampe a Padova nel 1772 e della quale abbiamo ampiamente parlato nel Capitolo 4.

Nel XVIII sécolo pochi, come Giovanni Poléni, si distinsero al di fuori della Francia, la cui Scuola di Idraulica divenne, infatti, il riferimento primo per l'intera Europa, certo a scàpito (o a causa) del 'rallentamento' della Scuola Italiana.

Molto si deve, senza dubbio, al grande lavoro che Edme Mariotte realizzò nel sècolo precedente, ma a completamento del substrato culturale francese all'inizio del Settecento, in Idraulica, non possiamo omettere di ricordare Claude Antoine Couplet (Parigi 1642 –1722) ed il suo figlio, Pierre Couplet des Tortreaux (Parigi ? – 1743), entrambi membri della *Académie Royale des Sciences* della quale furono, in successione, i Tesorieri, mentre Claude Antoine ne fu anche uno dei primi associati, quando venne rifondata, nel 1666, ad òpera del Segretario di Stato di re Luigi XIV, Jean Baptise Colbert (Reims 1619 – Parigi 1683).

Claude Antoine Couplet, costretto dal padre Antoine agli studi ed alla professione di avvocato, ben presto si dedicò alle scienze che tanto lo appassionavano e per le quali possedeva una singolare predisposizione, che non passò inosservata allo sguardo di Jacques Buot; fu quest'ultimo che, quando venne scelto da Colbert, nel 1666, tra i primi membri della nuova ***Académie Royale des Sciences***, si adoperò perché, nello stesso anno, venisse accolto anche Couplet, al quale, nel 1670, cedette la cattedra dell'insegnamento di Matemàtica presso la reggia di Versailles.

Claude Antoine Couplet si occupò anche di Architettura ed Astronomìa, lavorando al fianco dell'astrònomo italiano Gian Doménico Cassini, fondatore e primo Direttore dell'Osservatorio Astronòmico, sorto all'interno della stessa accadémia parigina.

A Versailles, incaricato di soprassedere ai lavori per l'approvvigionamento d'acqua dell'enorme complesso, Claude Antoine Couplet potè condurre numerosi esperimenti nell'analisi della resistenza dell'acqua al moto; per questo realizzò sistemi di tubazioni di diametro variabile, da dieci e quarantacinque centimetri, e di lunghezze comprese tra ottocento metri e tre chilòmetri circa, in differenti condizioni di càrico, cioè variando l'altezza del livello dell'acqua posta all'inizio delle condotte e misurando, lungo le stesse, velocità e pressione.

In queste esperienze, Pierre Couplet des Tortreaux continuò il lavoro del padre, utilizzando condotte non rettilinee, con curve e gòmiti, e di differente stato d'usura (nuove o con progressive incrostazioni), giungendo alla conclusione, come già aveva fatto Edme Mariotte, che il grande divario tra i risultati sperimentali ed i càlcoli, secondo le teorìe di Torricelli, fossero dovuti al fenòmeno della resistenza al moto del fluido prodotta dalle pareti delle tubazioni.

I due Couplet però non si impegnarono nel cercare un'espressione che rappresentasse questa resistenza, ma produssero una tale mole di dati sperimentali che ancòra nel 1886 i loro risultati erano considerati affidabili per la progettazione di sistemi di condotte con bassa velocità dell'acqua.

Le esperienze dei Couplet costituiscono la prima sperimentazione condotta con modelli a grande scala per analizzare fenòmeni, come la resistenza al moto (detta, in linguaggio tecnico, *scabrezza*, o *pérdita di càrico*), che erano determinati da tante variabili, da grandezze indeterminabili singolarmente e con valori tanto piccoli da essere difficilmente misurabili utilizzando modelli in dimensioni ridotte.

Il 'gigantismo' nella modellistica in Idraulica che, come abbiamo già visto, stava avviandosi in quel periodo, ha trovato, sino agli anni Ottanta dello scòrso sécolo, un proprio spazio, laddove il problema posto fosse caratterizzato da innumerevoli variabili e grandi superfici.

L'esempio più eclatante si trova ancòr oggi a Vicksburg, nello Stato del Mississippi USA, a circa duecento chilòmetri da New Orléans, dove è stato riprodotto, su una superficie di quasi un milione di metri quadrati, il bacìno idrografico del fiume Mississippi, di tutti i suoi affluenti, di tutte le òpere idrauliche e degli sbarramenti idroelettrici in grado di influenzarne il regìme delle acque. Costruìto dal *Army Corps of Engineers* intorno al 1940, utilizzando anche prigionieri di guerra tedeschi, vide concludere la propria utilità nel 1980; oggi è destinàto a parco pubblico, di proprietà dell' esercito americano, mantenendo ancòra visibili le strutture, ormai superàte, nello scopo originario, dalle simulazioni al *computer*: quale, tra i due 'modelli', dìa i migliori risultati è un delicata questione che lasciamo . . . ad altri!

* * *

Può sorgere, da tale citazione, la curiosità di conoscere i motivi pei quali l'esercito degli Stati Unìti d'America (*U.S.A. Army*) si trovi impegnato in attività di ricerca che, per quanto possa a noi risultare, non hanno dirette applicazioni alle 'cose di guerra'. Così lo spiega l'ing. Benedetto Dal Bosco, nella prefazione del libro, dallo stesso tradotto "*Le nuove formole sul moto dell'acqua e negli àlvei sistemati dei fiumi.*", di W. A. Kutter, Milano 1873: ". . . *il Congresso votò i necessarî mezzi, acciocchè la questione venisse risolta mercè uno studio . . . che venne affidato agli Ingegneri dell'Arma Federale, come di solito si suole praticare da quel Governo, il quale non solo occupa questo insigne corpo in opere pubbliche, cioè in miglioramenti di strade, in tracciati di canali, di strade militari, e di reti di ferrovie, ma anche trae profitto dalle facoltà intellettuali degli Ufficiali e Graduati, impiegandoli in osservazioni concernenti la fisica e la storia naturale durante il tempo di occupazione militare in certe regioni.*". Prima ancòra che fossero Unìti, gli Stati Federali d'America disponevano, quindi, di una struttura militare in grado di svolgere attività pràtiche e teòriche di assoluto livello; tradizione che continua ancòr oggi . . . certo è un caso di 'buon uso delle armi'!

* * *

Di Claude Antoine Couplet dobbiamo proporre ancòra un'importante sottolineatura: l'elogio funebre, scritto per le sue esequie, ricorda l'episodio nel quale egli venne chiamato a risolvere la drammatica scarsità d'acqua della città di *Coulanges la Vineuse*, in Borgogna.

I cittadini di quel borgo, che doveva il nome all'eccezionale ricchezza della propria viticoltura, erano obbligàti ". . . *ad andare molto lontano a cercare un pozzo, anch'esso spesso asciutto, per cui erano costretti a spostarsi di una lega* [3,898 chilòmetri] *per trovare una fontana*.". Dopo molti insuccessi, nel 1705 venne affidato a Claude Antoine Couplet l'incarico di trovare una soluzione al problema che risolse, potremmo dire, 'in quattro e quattr'otto'!

L'elogio funebre riferisce che Couplet iniziò ad osservare l'andamento del terreno ben prima d'essere in vista della città, ". . . *evidenziando con picchetti i punti dove avrebbe fatto scavare e predicendo nello stesso tempo a quale profondità precisamente si sarebbe trovata l'acqua; mentre qualcun altro al suo posto si sarebbe potuto dare un'aria divinatoria, egli spiegò semplicemente i princìpî della sua arte e si privò di ogni apparenza di meraviglioso*.". Date le necessarie istruzioni, Couplet tornò alle sue occupazioni a Parigi. Quando fu nuovamente a Coulanges, a lavori ultimàti, trovò la città in preda ad un festoso e collettivo delìrio per l'abbondante acqua che, proprio in quel giorno, iniziò a fluire nei canali fatti appositamente costruìre.

Nulla pretese lo scienziato parigino per quell'òpera e la cittadinanza, riconoscente, volle dedicargli un'iscrizione:

Non erat ante fluens populis sitientibus unda
Ast dedit eternas arte Cupletus aquas

Ecco come, nel medésimo testo, sono ricordati i principî illustrati da Couplet: " . . . *In una infinità di luoghi della Terra corrono vene d'acqua . . . Se queste acque trovano delle terre sabbiose, esse si infiltrano attraverso di esse e si pérdono; occorrono dei terreni che le fermino, come sono i letti di argilla. Esse* [acque] *sono in maggior quantità secondo la disposizione dei terreni. Se, per esempio, una grande pianura ha pendenza verso una costa, contro la quale término, tutte le acque che la pianura riceverà dal cielo saranno obbligate a colare verso questa costa, che maggiormente le raccoglierà ed esse si troveranno in abbondanza al suo piede. Così la ricerca e la scoperta delle acque dipende da un esame molto preciso ed approfondito dei terreni, serve un colpo d'occhio esatto e guidato da una lunga esperienza*. " . . . ecco le prime osservazioni e le prime applicazioni di una nuova scienza: l'Idrogeologìa.

Procedendo nell'analisi della Scuola Francese di Idraulica del XVIII sécolo, incontreremo molti personaggi che abbiamo già richiamato nel precedente Capitolo 10, dedicàto ai primi passi compiuti in Idrodinàmica nello studio delle ruote idrauliche.

Tra questi, ecco Bernard Forest de Bélidor (Parigi 1693 – 1761), che òccupa un posto sìngolare perché fu il primo a concepìre trattati tecnico/scientifici quali compendî di teòrìa e pratiche applicazioni, organizzati con formule, esempi, tabelle, illustrazioni, esemplificazioni dei problemi e relative risoluzioni; con lui nacquero così i primi *Manuali*.

Di Bélidor qui citiamo nuovamente, ed a tal proposito, la sua "*Architecture hydraulique.*", in quattro volumi, pubblicata a Parigi tra il 1737 ed il 1753, che descrive lo stato dell'arte dell'Ingegnerìa Idraulica; di notevolissima qualità, nel testo e soprattutto nelle rappresentazioni grafiche, questo manuale costituì un riferimento che influenzò grandemente e per lungo tempo il modo di stendere e rappresentare le ricerche tecniche e scientifiche. Bernard Forest de Bélidor oltre che un ottimo scienziato fu anche, utilizzando un término moderno, un eccellente divulgatore.

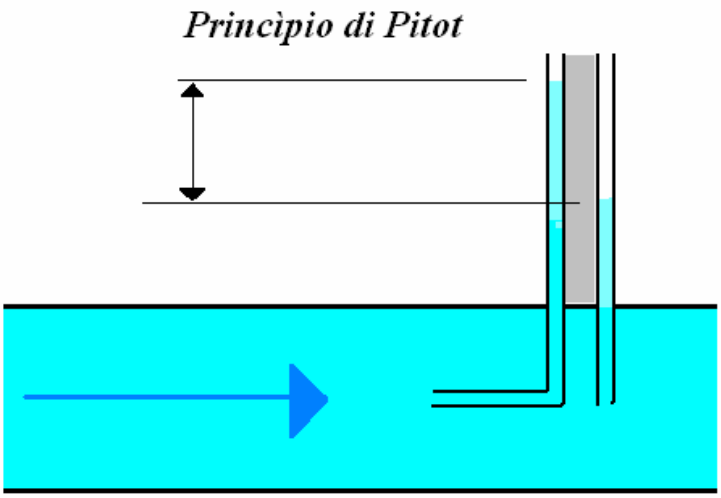
Henri de Pitot (Aramon-Gard 1695 – Tolosa 1771), il cui nome è legato alla terminologìa strumentale, fu un contemporaneo di Bernard Forest de Bélidor.

Nato ad Aramon, nel sudovest della Francia, giovane molto promettente, divenne, attorno ai vent'anni, un appassionàto studente delle scienze fisiche e matemàtiche alla scuola di Réamur a Parigi. Nel 1740 tornò alla natìa provincia della Linguadoca, come Ingegnere Capo e Sovrintendente del *Canal du Midi*, dove rimase per il resto della sua vita, durante la quale curò la realizzazione di molte òpere idrauliche: drenaggi di paludi, ponti ed acquedotti, àrgini e difese fluviali per contenere le esondazioni.

A supporto delle ricerche in Idraulica, Henri Pitot si applicò alla Geodesìa, all'Astronomìa, alla Matemàtica, alla Medicìna; condusse anche studi di ingegnerìa navale che gli vàlsero l'ammissione alla *Royal Society* e alla *Académie Royale des Sciences*, dove, però, i suoi studi sul moto dei fluidi non furono accolti con quella considerazione che ad essi, oggi, riconosce la Storia.

La sua òpera più rilevante, in Idraulica, fu "*Description d'une machine pour mesurer la vitesse del eaux courantes et le sillage des vaisseaux*", del 1732, nella quale riferì della sua invenzione: un dispositivo per misurare la velocità del moto dei fluidi, poi detta *Macchina di Pitot*, che sfrutta un principio, ancòr oggi chiamato con il suo nome.

Questo dispositivo consiste in due brevi tubi paralleli montati su un sottile telaio con una scala graduata. Uno dei due tubi è rettilineo mentre l'altro ha un tratto a novanta gradi alla sua estremità inferiore. Immergendo verticalmente i due tubi nell'acqua in movimento, mantenendo quello con il tratto orizzontale opposto alla corrente, lo scienziato francese osservò che in essi il liquido raggiungeva due differenti altezze; con moltéplici prove Pitot riuscì a dimostrare come questa differenza fosse proporzionale alla velocità che l'acqua possedeva nel punto di immersione delle estremità dei tubi.



Pitot stesso si sorprese della semplicità dello strumento:

"L'idea di questa macchina è così semplice e naturale che il momento nel quale io la concepii còrsi immediatamente sulla riva del fiume per condurre il primo esperimento con un tubo di vetro, ed il risultato confermava completamente le mie previsioni. Dopo questo primo esperimento, potei immaginare quali semplici e nello stesso tempo molto utili cose potevano generarsi ad òpera di così tanti sapienti personaggi che avevano scritto e lavorato sul moto dell'acqua."

Nonostante la fortunata applicazione di questo dispositivo (che sfrutta il principio oggi detto *Principio di Pitot*), come spesso avviene per molte invenzioni ùtili nella pratica, Henri de Pitot interpretò il fenòmeno non correttamente:

"*Ora, in accordo con gli esperimenti, l'impatto, in direzione perpendicolare, di un fluido contro un piano resta essenzialmente uguale al peso di una colonna, di questo fluido, che ha per base la superficie dell'impatto e per altezza l'altezza della velocità con la quale questo impatto si realizza. Così se* $\boldsymbol{P}$ *è la pressione,* $\boldsymbol{s^2}$ *la superficie,* $\boldsymbol{h}$ *l'altezza dovuta alla velocità, e* $\boldsymbol{w}$ *il peso specifico del fluido, noi abbiamo, approssimativamente:*

$$\boldsymbol{P = w\, s^2\, h}$$

e $\boldsymbol{h}$ *può essere determinata dalle leggi della caduta dei gravi.*"

Pitot, quindi, neppure si avvicinò alla corretta interpretazione del fenomeno, cosa che poi riuscì a Pierre Varignon (Caen 1654 – Parigi 1722), al quale Pitot stesso riconobbe essere " . . . *il primo che ottenne la gloria di dimostrare questo principio.*"

Sebbene lontano dalla comprensione dei principî della sua scoperta, Henri de Pitot, per semplificare l'uso dello strumento, elaborò una serie di tabelle, senza però procedere ad alcuna misura, per altra via, della velocità che si deducevano dal suo manuale. Ad ogni modo nulla toglie valore all'originalità dell'invenzione, non disgiunta da estrema semplicità; lo stesso suo scopritore

ne dimostrò la grande utilità sia nel determinare le velocità in un canale, sìa per misurare la velocità di una imbarcazione.

Sfruttando il *Principio di Pitot* oggi si realizzano numerosi dispositivi; tra i più comunemente nòti, detti anche *Tubi di Pitot* o *Pitometri*, per la misura della velocità di oggetti in movimento attraverso fluidi, per valori comunque superiori ad un metro al secondo; a velocità minori, infatti, la precisione della misura cala bruscamente. Il Tubo di Pitot, alle alte velocità, è lo strumento più usato; accessorio indispensabile su tutti i tipi di aeromobili, sulle macchine di Formula Uno, . . .

La risoluzione del problema di misurare la velocità dei fluidi in movimento si unisce, indissolubilmente, all'analisi della resistenza al moto stesso: infatti, la velocità calcolata teoricamente è maggiore di quella misurata nella realtà, còmplici le forze che ad essa si oppongono, prodotte dal tipo di fluido e da numerose condizioni al contorno: il tipo di moto; la natura e lo stato delle pareti della condotta o dell'àlveo (in un ùnico tèrmine: le condizioni della *sezione idraulica*); la stessa velocità; l'andamento del percorso; le irregolarità improvvise (spigoli, diramazioni, cambiamenti della stessa sezione idraulica, ostacoli, . . .).

Secondo il *Princìpio di reciprocità*, per la prima volta enunciato da Isaac Newton (Capitolo 11), le medésime considerazioni si possono condurre, *mutatis mutandis*, per un oggetto che si muova in un fluido in quiete: l'oggetto in movimento incontra una resistenza dovuta, oltre che alle caratteristiche del fluido attraversato, ai proprî peso, forma, natura della superficie.

Troviamo lo stesso problema, semplicemente con 'segno opposto', nel caso in cui l'oggetto sìa fermo ed immerso in un fluido in movimento.

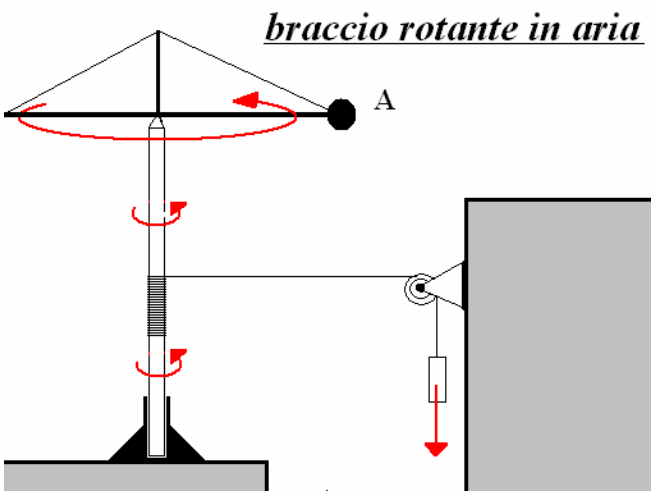
Nella corrente di un fluido, nello scorrere dell'acqua numerosissime sono le variabili che si oppongono al moto, o, meglio, che càusano la dissipazione di una parte dell'energìa contenuta nel fluido all'inizio del movimento. Prove sperimentali ed analisi teòriche, nel XVIII sécolo, furono i nuovi e necessarî strumenti per individuare le soluzioni al problema che, in alcuni casi, è ancòr oggi oggetto di studio, sìa nei liquidi che nei gas, cioè, rispettivamente, in Idrodinàmica ed in Aerodinàmica.

All'inizio del XVIII sécolo erano disponibili tre métodi sperimentali per misurare la resistenza al moto dei corpi:

- per analogìa con la misura del tempo di caduta dei corpi pesanti (*dei gravi*), originàto dalla Scuola di Galileo Galilei e seguìto da Isaac Newton;
- l'analisi della fase di risalìta nel moto pendolare, smorzata dalla resistenza del fluido nel quale il péndolo oscilla;
- lo studio sperimentale del comportamento di corpi immersi in acqua corrente, utilizzato per primo da Edme Mariotte.

Nel Settecento fu introdotto un altro método, detto '*del braccio rotante*' introdotto, pare indipendentemente, da due inglesi: Rouse di Harborough e Benjamin Robins (Bath 1707 – Madras 1751), inventore, nel 1742, del *Péndolo Balistico*, strumento atto a misurare la velocità di un proiettile, elemento essenziale per gli studi della nuova scienza, detta, appunto, Balistica, disciplina nella quale lo stesso Robins fu uno dei pionieri. In questo, Robins per primo osservò la deviazione laterale che subivano le traiettorie dei proiettili e la attribuì, erroneamente, al moto di rotazione su se stessa della palla ed anche alla resistenza dell'aria.

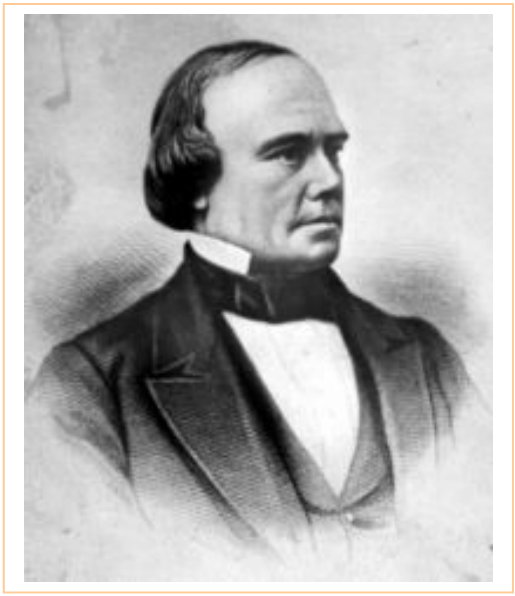
Il *Braccio Rotante* di Benjamin Robins fu presentato alla *Royal Society* nel 1746; costituìto da un braccio lungo quattro piedi (pari a metri 1,219) in grado di ruotare attorno ad un asse verticale grazie ad una corda, una puleggia ed un peso in caduta.



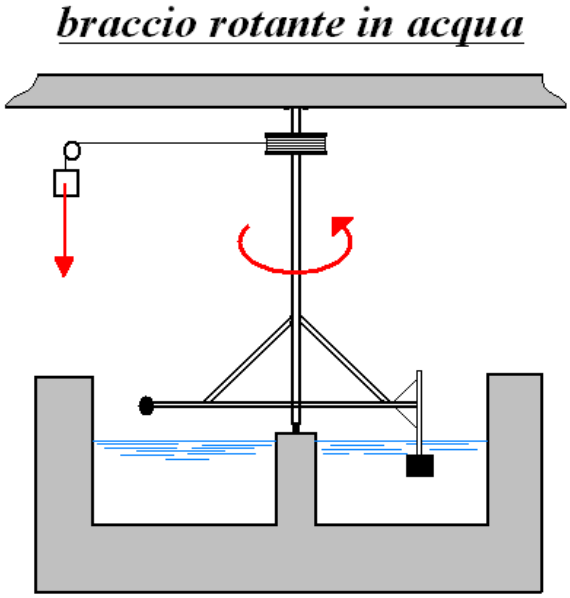
Lo strumento, utilizzando pesi diversi sino ad ottenere la velocità costante di rotazione, permise all'inglese di determinare la resistenza al moto del braccio al quale era applicato un corpo.

Una volta definìto il peso che assicurava al braccio una velocità di rotazione costante, l'inglese applicò alla sua estremità oggetti dello stesso peso e della medésima posizione del baricentro ma di differente forma, al fine di indagare come quest'ultima influisse sulla resistenza al moto nel fluido nel quale essi avanzavano, grazie al moto del braccio stesso, soprattutto nell'aria e nell'acqua. Adeguando il peso in caduta sino ad ottenere la velocità costante di rotazione, Benjamin Robins potè così giungere alle prime corrette valutazioni sull'importanza della forma dei corpi che si muovano in un fluido, sìa esso liquido o gassoso.

Il *Braccio Rotante*, così, fu ùtile in Idraulica e nella nascente Aerodinàmica ma, per quanto più interessava lo scienziato inglese, nella Balistica.



Gli effetti della resistenza al movimento di un fluido erano di particolare interesse non soltanto all'interno delle tubazioni, per la prima volta sperimentalmente indagàti dai Couplet, ma anche nel caso di correnti a pelo libero nei canali artificiali, potendosi essi intendere quali casi particolari dei più complessi corsi d'acqua naturali. Proprio al séguito delle prime osservazioni di Idraulica Fluviale, vennero condotti iniziali sforzi nella Scuola Italiana, dove si era giunti ormai alla consapevolezza che la resistenza al moto, in correnti a pelo libero, fosse uno dei principali fattori nel determinare le caratteristiche della corrente (altezza e velocità, quindi portata).



Ma i primi significativi contributi non vennero, nel XVIII sécolo dall'Italia.

In un documento del 1749, pubblicato da Cornelius Velsen ad Amsterdam, si giunse alla conclusione che la velocità fosse proporzionale alla radice quadrata dell'inclinazione dell'àlveo, ovvero della pendenza del suo fondo; l'affermazione era corretta ma priva di dimostrazione perché

basata, come spesso in quel periodo, sull'impropria applicazione della legge di Torricelli sull'efflusso, che manteneva ancòra una notevolissima influenza nella scienza dei fluidi.

In Germania, l'ingegnere tedesco Albert Brahms scrisse nel suo "*Anfangs-Gründe der Deiche und Wasserbaukunst*", pubblicato in Aurich-Hannover nel 1757, che l'azione di contrasto al movimento di un liquido era non soltanto determinata dalla gravità ma anche proporzionale al quadrato della velocità; in questa corretta direzione, però, il tedesco non andò oltre.

Di Albert Brahms è importante ricordare la sua formulazione di una sémplice relazione empirica che consentiva di calcolare, in un corso d'acqua con àlveo naturale, il valore della velocità al quale aveva inizio il trascinamento dei sedimenti del fondo e delle sponde: questa espressione, primo prodotto nello studio del *trasporto solido* dei liquidi in movimento (aspetto rilevantissimo nell'Idraulica Fluviale e Marina), mantiene tutt'oggi una propria validità.

Come spesso avviene nella ricerca, molti tentano di interpretare un fenòmeno ma uno solo trova la via giusta o, quantomeno, apre la strada sulla quale poi gli altri maturano i progressi della conoscenza.

Nel campo della resistenza al moto dei fluidi questo mérito va senza dubbio all'ingegnere francese Antoine de Chézy (Châlon-sur-Marne 1718 – Parigi 1798), anche se questo rilevantissimo contributo alla scienza Idraulica non gli valse il riconoscimento che avrebbe meritato durante la vita terrena.

Chézy nacque a Châlon-sur-Marne da una famiglia non nobile, sebbene il cognome sìa preceduto dalla preposizione 'de', probabilmente aggiunta su iniziativa del figlio. Studiò e poi insegnò nella scuola della locale parrocchia, poi, all'età di trent'anni (1748), ricevette l'incarico di insegnamento nella nuova Scuola Federale che fu più tardi chiamata la *Ecole des Ponts et Chaussées* (che abbiamo ricordato nel Capitolo 8), nella quale ottenne molti riconoscimenti, raggiungendo crescenti posizioni di responsabilità in quella struttura.

Antoine Chézy lavorò al fianco di Jean Rodolphe Perronet (Suresnes 1708 – Parigi 1794) fondatore e primo Direttore della *Ecole des Ponts et Chaussées* , Ispettore Generale delle Strade, nel 1750, e poi Primo Ingegnere Reale, nel 1763, realizzando grandi òpere civili, in particolare i ponti di Neully e della Concorde, sulla Senna, e di Saint-Maxence sull'Oise, ma anche opere idrauliche, come il grande canale navigabile della Borgogna.

Nel 1790, Chézy si ritirò dalla *Ecole des Ponts et Chaussées*, trovandosi in condizioni di estrema povertà e fu soltanto nel 1797, un anno prima della morte, che ottenne nuovamente la càrica di insegnante in questa istituzione, grazie alle insistenze di uno dei suoi studenti, il barone Gaspard Françoise Claire Marie Riche de Prony, scienziato che incontreremo tra poco.

Antoine Chézy si trovò coinvolto, nel 1768, assieme al Perronet, nell'incarico, assegnato dalla ***Académie royale des scienses***, di garantire maggior apporto d'acqua alla città di Parigi, in crisi a causa dell'ormai insufficiente sistema di approvvigionamento. Ai due studiosi dell' *Ecole des Ponts et Chaussées* si propose di utilizzare le

acque del fiume Yvette, che scorre in posizione elevata rispetto al centro urbano. Fu còmpito specifico di Chézy il determinare la sezione ed il carico idraulico del nuovo canale.

Quanto esistente nella letteratura idraulica non forniva alcun elemento per progettare con sicurezza un canale artificiale in grado di assicurare il trasporto della portata desiderata e non era certo il caso di procedere con tali ampie possibilità di errore: quando un canale è ormai scavato, è ben difficile, e soprattutto costoso, doverlo modificare in ampiezza e, soprattutto, nella pendenza!

Il còmpito, ormai, era assegnato ed allora Chézy costruì un modello in scala ridotta di un canale, lungo duecento metri, largo 1,3 metri e profondo 52 centimetri, con il quale condusse numerosi esperimenti, individuando i paràmetri che ne determinavano la quantità d'acqua trasportata, cioè la portata. Concluse, così, che qualsìasi formula dovesse esprimere la portata di un canale dovesse contenere la velocità della corrente, l'inclinazione, l'area della parte di sezione occupata dall'acqua (detta *Sezione Bagnata*) ed il perìmetro della stessa sezione, cioè la lunghezza delle sponde e del fondo della Sezione Bagnata (detto, quindi, *Perìmetro Bagnato*).

Tutti gli esperimenti condotti furono da Chézy raccolti in una relazione che non fu più rinvenuta negli archivi della *Ecole des Ponts et Chaussées*; è certo, però, che venne consegnata al Perronet.

Nella *Ecole des Ponts et Chaussées* si conservano molti altri documenti di Antoine Chézy, nei quali si può trovare il seguente passo:

"Quando si deve condurre una corrente d'acqua ed anche provvedere acqua in un sito dove non ce n'è, oppure drenare un terreno dove ve ne è troppa, quasi sempre bisogna realizzare la più grande corrente con la minor pendenza possibile.

Dopo aver disegnato un canale, e dopo averne determinato la giusta sua pendenza, è assai interessante conoscere se questo canale sarà sufficiente per l'acqua che si vuole farvi passare. Per questo è necessario conoscere la velocità che l'acqua assumerà nel canale che si è assunto con la pendenza uniforme. Questa non è una questione di velocità iniziale o momentanea, che può essere molto grande a causa di un alto carico dell'acqua . . . . Qualunque sìa la velocità iniziale, essa diminuisce abbastanza rapidamente per ridursi ad una uniforme e costante velocità che è dovuta alla pendenza del canale ed alla gravità, l'effetto delle quali è contrastato dalla resistenza dell'attrito contro la sezione del canale.

E' essenziale conoscere questa velocità almeno approssimativamente.

Il problema così proposto presenta in sé medésimo la soluzione, perché è evidente che la velocità dovuta alla gravità, che agisce continuamente (escludendo quella che può venire da qualche altra causa e che, presto esaurìta, non agisce abbastanza a lungo nel nostro problema), è solo uniforme quando non è più a lungo accelerata, e la gravità non può cessare di accelerare eccetto quando la sua azione sull'acqua sìa uguale alla resistenza causata dalle pareti e dal fondo del canale; ma la resistenza è proporzionale al quadrato della velocità, perché prodotta dal numero e dalla forza delle particelle che collidono in un dato tempo; è anche proporzionale alla parte del perimetro della sezione della corrente che tocca il contorno del canale. Si può trascurare la resistenza dell'aria contro la superficie libera.

*Chiamando la velocità **V** e la parte del perimetro **P** la resistenza per attrito sarà così come **VVP*** ['come' è da intendersi in 'proporzionale a', ndr].

*Da un altro lato, l'effetto della gravità è come l'area della sezione della corrente, e come la pendenza del canale o come l'altezza che discende da ogni passo di pendenza. Chiamando così l'area della sezione **A** e la pendenza del canale **H**, l'effetto della gravità sarà come **AH**.*

Così supponendo, se da una buona osservazione si conosce:

- *la pendenza del canale . . . . . **H***
- *l'area della sezione della corrente . . . . . **A***
- *la velocità della corrente . . . . . **V***
- *il perimetro bagnato . . . . . **P***

*dovrebbe essere facile trovare la velocità **v** di un altro canale del quale si conosce:*

- *la pendenza . . . . . **h***
- *l'area della sezione . . . . . **a***
- *e le parti fisse del perimetro . . . . . **p***

perché si avrebbe la proporzione:

$$VVP/AH = vvp/ah$$

pertanto

$$VVPah = vvpAH$$

e quindi

$$\mathbf{v = V \cdot \sqrt{\frac{Pah}{pAH}}}$$

Si vede che per poter usare tale formula si deve disporre di una osservazione nella quale ogni cosa sìa conosciuta . . . . . Potrebbe inoltre essere interessante avere simili osservazioni in differenti torrenti e correnti, ma è importante notare che queste osservazioni richiedono la grandissima cura e che è difficile eseguirle con sufficiente precisione; se ne può fare affidamento soltanto se sono condotte da persone conosciute e della massima scrupolosa attenzione."

Questa prima formula di Chézy nasce da un processo di comparazione tra un canale del quale tutto è noto ed un altro, in fase di progettazione, del quale si ipotizzano tutte le grandezze geométriche. Non c'è, in questa espressione, alcun fattore che si riferisca alla effettiva resistenza al moto, prodotta sìa dalla stessa velocità che dalla natura delle pareti.

Antoine Chézy applicò il metodo di misura anche ai casi di flussi nei tubi, rimarcando la proporzione dell'area della sezione trasversale con il perimetro del tubo.

Malgrado la semplicità e la logicità dell'analisi di Chézy nulla di essa compare nel rapporto finale di Jean Rodolphe Perronet, che si limitò ad utilizzare i soli risultati ottenuti dal collega.

Poi giunse la Rivoluzione e . . . il grande progetto venne abbandonato.

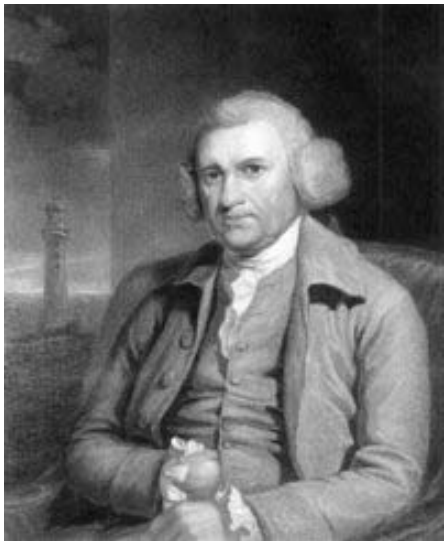
Il manoscritto di Chézy fu riportato alla luce soltanto nel 1804, ad òpera di due ingegneri francesi, Girard e Prony, ma trovò ben maggior interesse in Germania piuttosto che in Francia, e non fu pubblicato che alla fine dell'Ottocento, prima in Europa e poi negli Stati Unìti d'America, a cura del già ricordato Clemens Herschel.

Il grande mérito di Antoine Chézy, nel campo dell'Idraulica, è racchiuso nell'intrìnseco valore della sua analisi, che indicava corretti princìpi, piuttosto per l'influenza, scarsa in verità, che ebbe, nell'immediato, sullo sviluppo dell'Idraulica. Legare la portata di un canale a pelo libero alla velocità, all'inclinazione, alla sezione bagnata ed al perimetro bagnato fu il penultimo passo per giungere alla méta: un passo certo importante.

Chézy fu anche inventore di uno strumento topografico, detto *Livello di Chézy*, che perfezionò in modo significativo la precisione dei rilievi altimétrici, fondamentali nella costruzione dei canali.

Il titolo di *Ingegnere* riconosciuto presso la *Ecole des Ponts et Chaussées* non era tale in Inghilterra, dove era soltanto utilizzato per indicare il lavoratore che operava direttamente nella costruzione dei manufatti.

Fu così che John Smeaton (Austhorpe-Leeds 1724 – 1792), già incontrato nel Capitolo 10, è oggi considerato il capostipite dell'Ingegnerìa inglese alla quale, grazie al suo esempio, venne riconosciuta la dignità di professione a sé stante.



Nato a Leeds da padre avvocato, formatosi necessariamente da autodidatta, John Smeaton poté presentare, all'età di ventisei anni, il suo primo lavoro alla *Royal Society* che lo premiò con la medaglia d'oro, nove anni dopo, quando illustrò la sua quarta òpera.

Smeaton deve certo la sua fama alla ricostruzione del faro di Eddystone Rock, particolarmente impegnativa per la profondità del mare e la violenza delle acque, occasione che gli permìse di condurre importanti studi sui cementi idraulici. Realizzò ponti, tra i quali quello ad arco di Perth, e porti.

Nel campo delle òpere idrauliche, progettò il canale Forth Clyde ed anche reti di drenaggio di terre paludose prossime al mare. Per primo propose l'utilizzo del fenomeno detto del 'Colpo d'ariete', per sollevare l'acqua, chiamato poi 'Ariete idraulico' da Joseph Michel de Montgolfier (Vidalon-les-Annonay 1740 – Balaruc-les-Bains 1810), che realizzò per la prima volta, nel 1796, un sistema di pompaggio sfruttando questo fenòmeno. Joseph Michel de Montgolfier deve, a sua volta, imperitura e mondiale fama, assieme al fratello Jàcques-Etienne, per l'invenzione del pallone aerostatico, poi chiamato, in loro onore, mongolfiera.

La memoria di Smeaton, premiata dalla *Royal Society* nel 1759, "*Una ricerca sperimentale sulla naturale potenza dell'acqua e del vento per muovere i mulini ed altre macchine, dipendenti dal moto circolare*." è di particolare interesse, perché contiene indicazioni e raccomandazioni per la realizzazione dei modelli con i quali poter condurre prove in laboratorio che possano, poi, essere rappresentative della realtà del fenòmeno studiato.

Ecco una parte della sua illustrazione:

"*Quanto ho comunicato su questo argomento fu originariamente dedotto da esperimenti fatti lavorando su modelli, che io considero i migliori strumenti nelle ricerche in meccanica.*

Ma in questo caso è assolutamente necessario distinguere le caratteristiche che collegano il modello alla macchina in scala reale, altrimenti il modello può allontanarci dalla verità piuttosto che condurci verso di essa.

È evidente che un buon modello può meglio illustrare il fenomeno che si vuole studiare. Infatti, sebbene si debba utilizzare in questo la massima prudenza, la miglior struttura di macchine non può essere completamente accertata, se non utilizzando modelli costruìti nelle corrette proporzioni. È per questa ragione dunque che i modelli e gli esperimenti dei quali ho parlato, furono realizzati tra il 1752 ed il 1753; oggi giungo ad illustrarli alla Royale Society dopo aver raccolto considerazioni derivate dalla pratica applicazione dei risultati, in una varietà di casi e per diversi scopi; così come sono in grado di assicurare d'aver trovato per tutti una spiegazione."

John Smeaton, lo abbiamo già visto al Capitolo 10, condusse numerosi e varî esperimenti su modelli di ruota idraulica, mossa dall'acqua che la lambiva nella parte inferiore, e di ruote di mulini a vento, deducendo, dai risultati, le seguenti conclusioni:

"*Mantenendo uguale il carico virtuale od effettivo, l'effetto sarà proporzionale alla quantità di acqua utilizzata.*

A parità di acqua utilizzata, l'effetto sarà proporzionale all'altezza del carico virtuale od effettivo.

A parità di acqua utilizzata, l'effetto sarà proporzionale al quadrato della sua velocità.

Mantenendo uguale l'apertura, l'effetto sarà prossimo al cubo della velocità dell'acqua."

Per i suoi studi sui mulini a vento, John Smeaton usò una ingegnosa combinazione dei bracci rotanti di Rouse e di Robins. Una serie di nove massime, dedotte da questi test, ebbero la stessa validità generale di quelle sulle ruote idrauliche.

È probabilmente più che una mera coincidenza il fatto che la Francia assunse la sua prevalenza negli esperimenti di Idraulica proprio intorno al periodo della Rivoluzione.

Molti dei responsabili di questo predominio furono, a dire il vero, vittime piuttosto che sostenitori della sollevazione politica e sociale; tuttavia la scienza francese nel suo complesso non sembrò soffrirne in modo rilevante. La ***Académie royale des scienses*** fu sciolta nel 1793, ma due anni dopo fu fondato l'*Institute de France* che ne prese il posto, assicurando la continuità alla Comunità Scientifica francese.

Uno dei più rilevanti prodotti del diffuso spirito di rinnovamento fu la creazione del Sistema Métrico Decimale dei pesi e delle misure, ma la tensione al rinnovamento creò anche occasione di rifugio per molti scienziati, assorbiti nelle organizzazioni alle quali tale rinnovamento era affidato.

Jean Charles de Borda (Dax, Landes 1733 – Parigi 1799) fu un caso tipico, per quel periodo, di ingegnere/scienziato. Egli nacque a Dax e fu educato nel convento gesuìta di La Fléche, il luogo delle precoci esperienze di Mersénne e di Descartes.

Dopo un breve intervallo come istruttore di matematica, cominciò la sua carriera professionale come ingegnere militare, dedicandosi per primo alla costruzione di porti, poi all'analisi dei problemi balistici ed infine agli esperimenti in Idraulica ed in macchine idrauliche.

Già ricordato, nel Capitolo 10, per il suo contributo allo studio delle ruote idrauliche, qui è necessario ricordarlo perché, dopo aver iniziato, a soli vent'anni, i suoi primi esperimenti di Idraulica nel 1763 Borda presentò alla ***Académie royale des scienses*** il documento "*Expériences sur la résistance del fluides.*", con il quale descrisse i *test* con i *Bracci rotanti*, ideàti da Benjamin Robins, sulla resistenza al moto dell'aria; del 1767 è un documento, con il medésimo titolo, che descrive brevemente anàloghe sperimentazioni nell'acqua.

Per gli studi sulla resistenza, Borda applicò ai *Bracci rotanti* non solo sfere e pale, come era pratica comune, ma anche prismi, cilindri, coni e cunei. I valori assoluti che calcolò sono maggiori di quelli oggi accertati, ma le sue valutazioni, stante la precisione degli strumenti utilizzati, erano corrette, con ogni fluido che utilizzò.

Borda così seppe verificare la ormai diffusa teoria che lo sforzo di trascinamento di un corpo immerso in un fluido varia con il quadrato della velocità relativa, ed inoltre dimostrò che esso può essere maggiore in presenza di moto ondoso in superficie; non fu però in grado di legare il valore trovato della resistenza con l'area della sezione trasversale e con la densità del fluido.

Sebbene provò, in modo conclusivo, che la variazione della forma del corpo ha un pronunciato effetto sullo sforzo di trascinamento – in opposizione alla teoria che era a quel tempo in voga – condusse l'erronea tesi che una sfera ed una semisfera con la parte convessa verso la corrente, di stesso diàmetro, provocavano la stessa resistenza al trascinamento, ignorando l'influenza della parte posteriore, cioè quella che non si oppone direttamente alla corrente, che oggi sappiamo essere assai importante nell'aerodinamicità (o idrodinamicità) del profilo.

La validità delle ricerche di Borda non gli vàlsero riconoscimenti, né immediati né successivi. Il suo nome, tuttavia, è oggi associato in diversi aspetti dell'Idraulica per scoperte contenute nel suo lavoro, presentato nel 1766 alla ***Académie royale des sciences***, sotto il titolo "*Mémoire sur l'écoulement des fluides par les orifices del vases.*" . In questo documento cercò, sia teoricamente che sperimentalmente, di rimuovere alcune discrepanze tra le analisi di Daniel Bernoulli e di d'Alembert:

"*. . . Non si può attribuire un eccessivo mérito ai due lavori che ho appena citato, ma deve essere riconosciuto che la soluzione trovata da uno non è sempre in accordo con l'altro; resta ancora una grande incertezza in questa parte delle teoria dei fluidi; e trovo stupefacente che alcuno non abbia ancòra tentato di rimuovere tale incertezza, esaminando più particolarmente le ipotesi e l'uso dei princìpii sui quali le soluzioni sono fondate.*"

Borda per primo esaminò la corrente suddividendola in elementi tubolari longitudinali, ai quali attribuìre caratteristiche medie comuni, e non dividendo il flusso in sezioni normali alla corrente, come avvenuto sino ad allora.

Egli, inoltre, per primo chiarì che in un fluido in movimento esiste una costante e continua dissipazione dell'energìa inizialmente contenuta nel fluido stesso (allora detta Momento o, dai leibniziani, *Vis Viva*, oggi: energìa cinética).

"*Il moto dell'acqua . . . può essere considerato come un sistema di corpi solidi che si muovono gli uni contro gli altri in infiniti modi; ora noi sappiamo che, in base al principio delle forze vive, il moto dei corpi si mantiene soltanto se la loro mutua interazione produce minimi effetti ma che c'è sempre e necessariamente una perdita di forza viva nel sistema appena un corpo si scontra con un altro.*"

Trattando poi del caso di una tubazione che subisce un improvviso allargamento della sezione, Jean Charles de Borda dimostrò esservi, in quel punto, una pérdita di energìa concentrata (cioè una Pérdita di carico) pari a:

$$\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

Nella quale V_1 è la velocità di arrivo, nella sezione minore, e V_2 quella successiva all'allargamento improvviso. Tale pérdita, concluse Borda, è uguale a quella subìta da una corrente che da una tubazione si immette in un serbatoio in un punto sommerso, cioè sotto *Battente*. Ancòra oggi questa espressione è detta *Formula di Borda*.

Importantissimo è il notare che Jean Charles de Borda fu il primo idraulico che espresse esplicitamente il termine **2g** in una relazione di flusso.

Charles Bossut (Tartaras – Saint Ětienne 1730 - Parigi 1814), un contemporaneo di Borda, nacque in un paese prossimo a Lione città dove, rimasto òrfano all'età di sei anni, fu educato nel convento dei Gesuiti, divenendone poi monaco e, in séguito, Abate. Il suo precoce talento lo portò a collaborare con Clairaut e d'Alembert; a ventidue anni, nel 1752, ottenne l'incarico quale professore di Matemàtica nella Scuola di Ingegneria di Mézières.

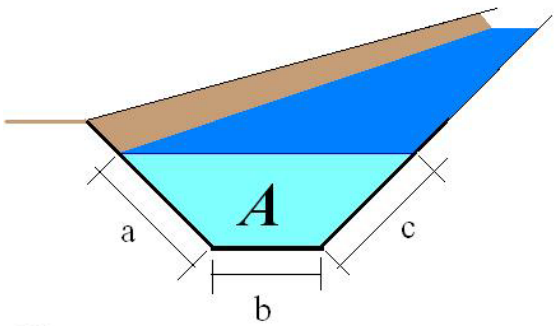
Bossut condivise con Daniel Bernoulli il premio concesso dall'Accadémia di Lione e con Euler il premio della *Académie royale des scienses* di Parigi, nella quale fu accolto nel 1768.

Grazie ai suoi studi in Idrodinàmica al *Louvre* fu creata, appositamente per lui, una cattedra dove potè insegnare questa branca dell'Idraulica.

Durante la Rivoluzione Francese, Charles Bossut perse entrambe le cariche, alla *Académie* ed al *Louvre*; rinunciò allora all'àbito talare e si ritirò temporaneamente dalla vita pubblica; in sèguito riapparve, divenendo sottoscrittore della carta costitutiva dell' *Institut de France*, nel 1803, e professore allo *Institut Polytecnique*.

Tra i suoi scritti scientifici vi furono: un "*Cours complet de matehématiques*", pubblicato per la prima volta nel 1765, comprendente sette volumi di Aritmética, Álgebra, Geometrìa, Meccànica, Idrodinàmica e Càlcolo; un libro sulle òpere di Blaise Pascal; una Storia della Matemàtica.

Il principale contributo di Bossut all'Idraulica si realizzò nell'intuìre che la resistenza al moto, prodotta dalla forma della sezione in un canale a pelo libero, dipendeva anche da una nuova grandezza: il rapporto tra il valore della superficie della *Sezione Bagnata* $\boldsymbol{A}$ e la misura del *Perìmetro Bagnato* $\boldsymbol{P}$, che Bossut indicò con **R** e chiamò *Raggio Idraulico*; d'ora innanzi grandezza tìpica e frequentissima nell'Idraulica.



$\boldsymbol{P}$ = a + b + c = perimetro bagnato

$$\mathbf{R} = \frac{\boldsymbol{A}}{\boldsymbol{P}} = \text{Raggio Idraulico}$$

Assai importante fu, dello scienziato e professore francese, l'attività dell'insegnamento, che considerò, durante il lavoro alla Scuola di Ingegneria di Mézières, quasi come una missione:

"I*nsegnare ai giovani ingegneri la meccanica dei fluidi è necessario per la loro professione*".

All'interno del corso di Matemàtica, Bossut pubblicò, nel 1771, un lavoro in due volumi, "*Traité théorique et expérimental d'hydrodynamique*", che subì ampliamenti successivi nel 1786 e

poi nel 1795. Nonostante l'esplicito riferimento, nel titolo, all'Idrodinàmica, l'argomento principale era riferito a problemi di Idraulica.

Il primo volume era originale soltanto nell'organizzazione dei temi trattati, ma produsse un'eccellente nuova rappresentazione dello stato della conoscenza in quel tempo. Il secondo volume, invece, contiene dati sperimentali, spesso in tutto nuovi e di notevole valore, alcuni ancòra vàlidi oggi; sono rilevanti anche le sue considerazioni sulle difficoltà negli esperimenti a larga scala che però mostravano una maggior affidabilità rispetto a quelli a scala troppo ridotta; a tal proposito, annotò:

"*Tra queste due sponde, c'è un corso mediano da considerare: operare a scala sufficientemente larga da rendere gli effetti distinti, senza eccedere i limiti compatibili con la precisione.*"

Nel 1775 Bossut, d'Alembert ed il marchese di Condorcet furono incaricati dal Governo del re di eseguire una serie di *test* sulla resistenza al moto di oggetti di varie forme nel loro avanzamento nell'acqua, al fine di raccogliere elementi per la progettazione delle chiglie delle navi.

Per questo scopo, sotto la guida di Bossut, furono fatti studi sull'effetto della forma della prua e sulle relative proporzioni delle sezioni trasversali, utilizzando una chiatta rimorchiata lunga circa trentuno metri, larga circa sedici metri e profonda due. La principale conclusione tratta fu che (come aveva già dimostrato, negli U.S.A., Benjamin Franklin con una chiatta in scala ridotta) la resistenza cresce quanto diminuisce la sezione relativa del canale.

Sebbene Bossut cominciò il resoconto congiunto su questi test con il salace commento "*Nulla mi aspetto dalla mente ristretta di colui che si affida alla sola pratica . . . . non esiste scienza senza ragionamento . . . ",* non mancarono conclusioni approssimate e generalizzazioni non corrette dei risultati che ebbero, comunque, influenza sulle scienze per molti anni a seguìre:

"*Noi abbiamo osservato che dal momento che l'attrito diventa minore la forza mette la nave in moto. Da ciò noi possiamo concludere che la tenacità dell'acqua è estremamente piccola e che la sua resistenza può essere considerata assolutamente nulla in paragone a ciò che è dovuto all'inerzia. Lo stesso è vero dell'attrito dell'acqua sui fianchi e sul fondo della nave. Questo attrito è molto piccolo e non può essere separato da quello dell'elica e dalla resistenza dell'aria.*"

Certo maggior successo ebbe, circa venti anni più tardi, il colonnello Mark Beaufoy (1764-1827) che condusse una varietà di test con natanti rimorchiati tra il 1796 ed il 1798 al Greenland Dock, di Londra, per organizzare nuovamente la 'Società per lo sviluppo dell'Architettura Navale'. Non solo Beaufoy investigava gli effetti singoli della forma della prua, della coda, la lunghezza e l'area superficiale, ma le sue misurazioni furono sufficientemente precise da fargli concludere che, come la velocità aumenta: "*l'attrito sempre diminuisce in una più piccola parte del doppio [da 1,71 a 1,82]*.".

Un terzo – ma non il meno importante – idraulico francese di questo periodo fu Pierre Louis Georges Du Buat (1734- 1809), noto anche per aver codificato il titolo di studio di Ingegnere.

Nato in una antica famiglia della stirpe dei Tortizambert, della Normandia, acquistò il titolo di conte dopo la morte del suo fratello maggiore. Dopo l'educazione a Parigi, divenne ingegnere a meno di vent'anni, per poi condurre esperienze nel campo dello sviluppo di canali e porti; dal 1761 al 1791 esercitò la professione come ingegnere militare.

Nella seconda parte di quest'ultimo periodo si dedicò a condurre numerosi test di Idraulica con il sostegno del governo del re. Nel 1793, allo scoppio della Rivoluzione Francese, il suo titolo nobiliare, acquisìto soltanto due anni prima, gli costò la fuga dalla Francia con tutta la sua numerosa famiglia (ebbe undici figli) con la conseguente confisca di tutte le sue proprietà. Rientrò nel 1802, tornando in possesso di una piccola parte dell'originario patrimonio di famiglia. I suoi ultimi anni furono impiegati nella revisione dei suoi maggiori lavori, in particolare "*Principes*

d'hydraulique", pubblicato in un volume singolo nel 1779, ampliato nel 1786 e pubblicato postumo in tre volumi nel 1816. La seconda edizione fu tradotta in tedesco ed in inglese, e l'ultima versione ottenne i complimenti da George Washington.

Pierre Louis Georges Du Buat è spesso indicato come il fondatore della Scuola di Idraulica francese anche se, come egli stesso indicò nella prefazione del suo libro, quasi tutto ciò che egli riportò era già noto; la sua òpera fu soprattutto un'azione di riordino e di più chiara ed organica illustrazione.

Le osservazioni introduttive di Du Buat sono infatti divulgative e molte di esse possono essere utilizzate ancòr oggi, ma resta evidente la sua critica nei confronti di una Idraulica ancòra incapace di dare quelle risposte certe a molti quesìti progettuali:

"*Si sa che le nostre conoscenze di Idraulica sono estremamente limitate; nonostante molte persone geniali si sìano applicate ad esse in tempi differenti, noi siamo ancora, dopo così tanti secoli, in una ignoranza quasi assoluta delle vere leggi alle quali è soggetto il moto dell'acqua; dopo centocinquanta anni è stato appena scoperto, con il sostegno dell'esperimento, la durata, la quantità e la velocità del flusso di acqua che esce da un orifizio.*

Tutto ciò che riguarda il moto uniforme dell'acqua sulla superficie della Terra è sconosciuto; e per ottenere una idea di come poco noi sappiamo è sufficiente dare un'occhiata in giro su ciò che non facciamo. Per valutare la velocità di un fiume del quale conosciamo la larghezza, la profondità e l'inclinazione; per determinare quale altezza raggiunge in esso l'acqua quando riceve l'afflusso di un altro fiume; per predire come cala l'acqua se viene estratta una portata da esso; per stabilire la giusta pendenza di un acquedotto perché l'acqua mantenga una certa velocità; oppure per definire la capacità di un canale per portare, data una pendenza, l'acqua necessaria ai bisogni di una città; come definìre le sezioni di un fiume nel modo che egli non òperi per cambiare il suo corso nel quale è stato confinato; per calcolare la prestazione di una conduttura della quale sìano noti la lunghezza, il diametro ed il carico; per determinare quanto un ponte, una diga o una paratoia devono essere alti rispetto al livello dell'acqua di un fiume; per indicare a quale distanza un lago debba essere per predire che la campagna sarà soggetta ad inondazione; per calcolare la lunghezza e le dimensioni di un canale che intenda drenare paludi da consegnare stabilmente all'agricoltura; per stabilire l'efficace forma della bocca dei canali ed alla loro confluenza con i fiumi; per determinare la più vantaggiosa forma da dare agli scafi per solcare le acque con il minimo sforzo; per calcolare la forza necessaria per muovere un corpo che naviga sull'acqua.

Tutti questi problemi, ed infiniti molti altri dello stesso genere, sono ancòra irrisolti: chi potrebbe crederlo? . . . Ognuno ragiona di Idraulica, ma ci sono poche persone che la capiscono . . . Per mancanza di princìpî, si affrontano progetti il costo dei quali è reale ma il successo è effimero; si pòrtano a fine progetti per i quali lo scopo non viene raggiunto; si caricano lo Stato, le Province ed i Comuni con considerevoli costi, senza ottenere frutti, spesso solo pérdite; o, in ultimo, non c'è proporzione tra il costo ed i vantaggi che si riesce ad ottenere.

La causa di tanto grande male, io ripeto, è l'incertezza dei princìpî, la falsità della teoria che è contraddetta dall'esperienza, la pochezza delle osservazioni condotte sino ad ora, e la difficoltà di condurle bene."

Il punto di vista di Du Buat fu, così, quello dell'ingegnere idraulico che cerca una concretezza esecutiva che la conoscenza del tempo non garantiva adeguatamente.

Du Buat aveva sperato di trovare negli scritti di Bossut la chiave del problema, ma presto concluse che il materiale era insufficiente; così egli stesso cercò di darsi risposte alle questioni attraverso serie di analisi ed esperimenti basate sull'essenziale equilibrio tra la forza di accelerazione e la resistenza nel moto uniforme, equilibrio che presentò come propria scoperta, sebbene già altri l'avessero individuato, tra i quali il Guglielmini, che Du Buat citò nella prefazione. Non pare che Du Buat fosse giunto a conoscenza delle conclusioni di Antoine Chézy, né del lavoro

che, sulla resistenza al moto, presentò Jean Rodolphe Perronet, che di Chézy riportava i càlcoli e le conclusioni.

Anche se Du Buat non riuscì a formulare risposte complete a tutte le questioni da lui stesso poste, molto del suo lavoro resta nuovo ed originale, ed evidente fu l'influenza che produsse sui suoi successori. Per questa ragione è opportuna una dettagliata analisi della seconda edizione del suo libro.

Nella prima parte, dedicata all'analisi della variazione dei fenomeni del flusso in tubazioni ed in canali, Du Buat – come Borda – espresse la velocità dell'efflusso da un orifizio nella forma $\mathbf{V = \sqrt{2gh}}$.

Du Buat considerò le pèrdite di carico in una tubazione in pressione di data lunghezza *S*, concludendo che esse dovevano essere indipendenti dalla pendenza; pérdite che quindi potevano essere analizzate come se la pendenza fosse sempre pari alla variazione di quota dei carichi assoluti, quindi come se si trattasse del caso di un canale a cielo libero; in tale situazione il valore della resistenza era proporzionale al quadrato della velocità ed anche al Raggio Idraulico, definìto dal Bossut, attraverso un coefficiente che doveva essere determinato sperimentalmente.

Ma al tèrmine dello studio, i coefficienti correttivi risultarono moltéplici e portarono Du Buat a scrivere una formula di tale complessità ed indeterminatezza da risultare praticamente inservibile.

Di questa formulazione è interessante notare che Du Buat non inserì alcuna espressione che tenesse conto dell'attrito tra il liquido e la parete bagnata, che dipende dalla grandezza chiamata '*Scabrezza* della parete'; l'ingegnere francese, infatti, riteneva che il fluido a contatto con il bordo formasse uno 'strato lubrificante' sul quale la corrente scivolasse senza resistenze di attrito relativo:

"*Nel considerare come la stessa acqua prepari la superficie sulla quale scorre si può vedere che pareti di differenti materiali non hanno un'apprezzabile influenza sulla resistenza. Non abbiamo trovato, su tale fatto, variazioni dell'attrito che possonsi attribuire a questa causa, nei differenti casi quando l'acqua scorre sul vetro, sul piombo, acciaio, legno o altri materiali.*"

Questa considerazione è indubbiamente errata, e denuncia l'ancòra scarsa precisione negli esperimenti che non consentiva di valutare l'effetto della *Scabrezza*. In questo, però, Du Buat era influenzato dalla sua convinzione che la viscosità del fluido agisse soltanto nel determinare le differenti velocità relative tra i differenti punti della *Sezione Bagnata*, senza produrre pérdita di energìa.

Nonostante la complessità, Du Buat applicò la sua formula a varî problemi delle tubazioni e delle correnti a pelo libero, arricchendo i càlcoli con osservazioni condotte direttamente ed indirettamente; produsse conseguentemente una gran mole di dati sulla relazione tra i valori di velocità in superficie ed in prossimità del fondo della corrente, ipotizzando che la velocità, tra questi due estremi, variasse in modo lineare.

Lavorando su altri problemi di Idrodinàmica, Du Buat ampliò le analisi del Poleni sul coefficiente degli scaricatori delle dighe, calcolandolo pari a circa 0,65; per far questo, considerò lo spessore dell'acqua che tracìma sulla soglia dello scaricatore come fosse composta di due strati sovrapposti: il superiore, da considerare come una soglia sfiorante; la parte inferiore come un'apertura rettangolare sotto battente, caso nel quale calcolò anche la perdita di carico.

Du Buat inoltre:

- elaborò un profilo idrodinàmico per le pile e per le spalle dei ponti, calcolando il minimo effetto della resistenza alla corrente;
- definì criterî per individuare il miglior profilo delle chiglie delle navi, perché avessero la minima resistenza al moto;

- elaborò una procedura grafica per tracciare il *Profilo di Rigurgito*, cioè la maggior altezza che l'acqua di un canale deve raggiungere, propagandosi all'indietro, contro corrente, per vìncere la resistenza creata da un ostacolo posto nella sezione, quale, ad esempio, le pile di un ponte che, di fatto, riducono l'àrea di passaggio. In questo caso l'acqua, per poter passare con la medésima portata che giunge sino a quella strozzatura, aumenta il livello appena prima di essa, aumentando il carico idraulico sino al valore che le consente di avere sufficiente energìa per superare l'ostacolo. Il sovralzo dell'acqua si ripercuote all'indietro nella corrente, ed è importante perché può spingersi, in caso di deboli pendenze (qualche unità per mille) anche per chilòmetri. Se l'aumento di livello, in qualche punto di quel lungo tratto, supera l'altezza delle sponde . . . sono guai seri!

Du Buat attribuiva maggior importanza alla seconda parte del suo '*Principes d'hydraulique*', dove presentava i dati sperimentali. In effetti questi dati – assieme a quelli già ottenuti dai Couplet e da Bossut – vennero utilizzati come base per molte formulazioni della resistenza, elàborate dai suoi successori.

Furono circa duecento gli esperimenti condotti da Du Buat con: tubi di vario diametro e pendenza, curvi, sistemi di tubazioni, canali rettangolari e trapezoidali, correnti in àlvei naturali, serbatoi e ponti.

Due gruppi di queste osservazioni sono particolarmente interessanti dal punto di vista storico:

- i dati delle velocità della corrente a diverse profondità, misurate con un dispositivo ad immersione del quale, però, on abbiamo informazioni certe sul princìpio del suo funzionamento;
- le valutazioni sulla relazione tra la velocità della corrente e la sedimentazione del materiale in essa trascinato, determinando il valore della velocità che dava inizio al deposito nel caso di sette tipologìe di materiali naturali suddivisi per classi di granulometrìa, dall'argilla alle ghiaie di diametro pari a 4 ÷ 5 centimetri.

Nella parte finale del '*Principes d'hydraulique*' sono descritti gli studi sulla resistenza dei corpi immersi in fluidi liquidi e gassosi; attraverso un centinajo di esperimenti con corpi di varia forma, Pierre Louis Georges Du Buat dimostrò che i *test* in aria ed in acqua possono correttamente essere tra loro correlati, in funzione dei diversi valori della densità; calcolò, ad esempio, che un paracadute dovesse avere un diàmetro di 5,68 metri per poter rallentare, a velocità adeguata per un morbido atterraggio, il peso di un uomo.

Ancòra: lo scienziato francese introdusse il concetto di *Massa Virtuale*, nella considerazione che la resistenza di un corpo in un fluido in movimento non dipendesse dal proprio peso bensì dalla quantità di fluido che è spostata e resa turbolente dalla sua sagoma; egli giunse così ad una considerazione di grandissima importanza, forse il suo più rilevante contributo all'Idrodinàmica ed anche all'Aerodinàmica: dimostrò, infatti, sperimentalmente che la forma della parte retrostante di un corpo, rispetto al verso della corrente del fluido, è tanto importante nell'influìre sul valore della resistenza, quanto la parte anteriore; rilevò infatti che il contributo della parte retrostante génera una '*non pressione*' o aspirazione (oggi detta *depressione*) che tende a rallentare il moto; per tale dimostrazione Du Buat utilizzò dei piezòmetri distribuiti sulla superficie del corpo immerso, connettendoli ad un manometro che rivelava i valori della pressione del fluido lungo l'intera superficie dell'oggetto.

Utilizzando il carico assoluto formulato da Bernoulli-Euler, Du Buat giunse alla conclusione:

" . . . *Quando l'acqua scorre lungo una superficie, il carico della pressione su ogni punto della superficie è uguale a quello che esisterebbe se il fluido fosse in quiete ad eccezione del carico dovuto alla velocità media del fluido nella componente parallela alla superficie stessa. . .*"

Ma sulla base dei suoi esperimenti egli, poi, concluse erroneamente:

"*. . . la pressione del carico sul centro della superficie piana perpendicolare al flusso è uguale una volta a e mezzo dell'altezza cinetica.*"

Le sue osservazioni diedero orìgine al cosiddetto *Paradosso di Du Buat*:

"*La forza esercitata, su un corpo in quiete, dall'acqua in movimento è più grande di quella richiesta per muovere lo stesso corpo alla stessa velocità relativa attraverso la stessa acqua*."

. . . pur nell'evidente contrasto con l'ormai affermato *Princìpio di Reciprocità*, formulato da Isaac Newton.

Non è noto se questa conclusione fosse dovuta alla impossibilità di valutare con precisione i fenomeni di turbolenza e l'effettiva distribuzione della velocità, oppure per il suo erroneo método di misura della velocità stessa.

Nonostante alcune errate posizioni, tanto grande fu l'influenza degli scritti di Pierre Louise Georges Du Buat sugli idraulici europei del tardo XVIII sécolo e dell'inizio del successivo, da oscurare, almeno in apparenza, l'attività di molti studiosi suoi contemporanei.

Per almeno due di costoro, possiamo tranquillamente affermare che nulla abbiano avuto di minor mérito del Du Buat: il fisico italiano Giovanni Battista Venturi (Bibiano 1746 - Reggio Emilia 1822) e l'ingegnere tedesco Reinhard Woltman (Axtedt1757-Mònaco di Baviera 1837).

Venturi ebbe una varia e ben documentata carriera. Nato a Bibiano, paese vicino a Reggio Emilia, ricevette la prima educazione, come spesso avveniva allora in Italia, nella locale parrocchia cattolica, dove maturò la scelta di prendere i voti sacerdotali; fu ordinato prete all'età di 23 anni.

Le sue particolari capacità, manifestate negli anni di seminario, lo portarono a coprire la cattedra di Geometrìa e Filosofìa a Mòdena, assumendo poi l'incarico di Ingegnere Ducale e di Revisore dei Conti; infine fu nominato professore di Fisica Sperimentale.

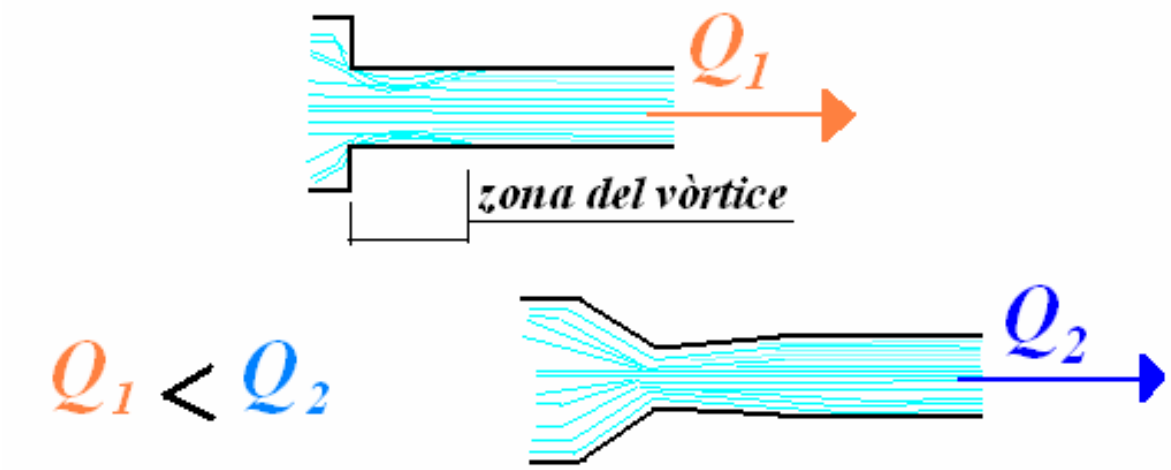
In Francia, giunto in veste di Segretario della delegazione italiana a Parigi, durante la rivoluzionaria Repubblica Francese, si occupò in studi di Fisica e di Chimica, per poi concentrarsi sull'Idraulica, riesaminando le esperienze ed i lavori di Leonardo da Vinci e di Galileo Galilei.

Sotto il patrocinio di Napoleone Bonaparte, rientrò poi in Italia.

L'opera "*Recherches expérimentales sur le principe de communication latérale dans les fluides"*, pubblicata a Parigi nel 1797, contiene una dettagliata descrizione degli esperimenti che aveva precedentemente compiuto in Italia sul fenomeno dell'efflusso da un serbatojo, utilizzando lo stesso método seguìto da Giovanni Poléni: applicando, cioè, all'orifizio un tubo con attacco a spìgolo vivo. Poléni era riuscito a dimostrare che la portata massima nella tubazione si manifestava quando questa sporgeva dal serbatojo per una lunghezza di 4÷5 diàmetri.

Il fenòmeno che si verificava nella tubazione era idéntico, così intuì Venturi, al caso nel quale una tubazione subisce un improvviso restringimento del diàmetro senza alcun tratto di raccordo. Le osservazioni e le misure condotte portarono alla conclusione che il brusco restringimento pròvoca nel flusso un vòrtice circolare, lungo la parete della tubazione, che si estende per 4÷5 diàmetri; questo vòrtice è di fatto una perturbazione al moto che determina una pérdita di energìa concentrata in quel punto.

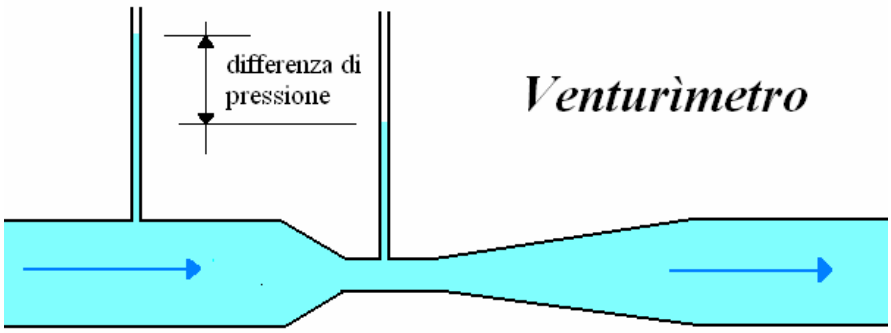
Se invece la tubazione di minor diàmetro è unìta alla precedente più grande con un tronco di cono che restringe ulteriormente la luce per poi raccordarsi gradualmente alla stessa tubazione più piccola , la portata che tràn sita, così dimostra il Venturi, è superiore. La cosa può sembrare assurda, ma lo scienziato emiliano dimostrò che la contrazione brusca del flusso all'ingresso in un tubo cilindrico, causava sìa una locale riduzione nella pressione sìa la generazione di vòrtici, che si diffondevano nella corrente, rendendo il moto più turbolento ed aumentando le perdite di carico. Se il tubo era sostituìto con due sezioni coniche successive in modo da presentare diametri prima decrescenti e poi crescenti, i vòrtici non si manifestavano ed aumentava la velocità, quindi la portata, pur non evitando ancòra una locale riduzione della pressione. Mediante prove,



Venturi giunse a determinare la geometrìa dei due tratti cònici che, dando la massima portata, provocavano la minima pérdita di carico.

Da queste esperienze condotte dal Venturi, l'americano Clemes Herschel realizzò lo strumento di misura delle portate in tubazioni in pressione, che chiamò, in onore dello scienziato italiano, *Venturìmetro,* aggiungendo, tra i due tronchi di cono, un tratto rettilìneo.

Sfruttando le equazioni di Bernoulli-Euler, viste al Capitolo 13, Herschel dimostrò, pubblicando i risultati nel 1898, che si otteneva una precisa misura di portata semplicemente attraverso la lettura della differenza della pressione del liquido in un punto di corrente indisturbata, nel tratto precedente il raccordo, ed il tratto

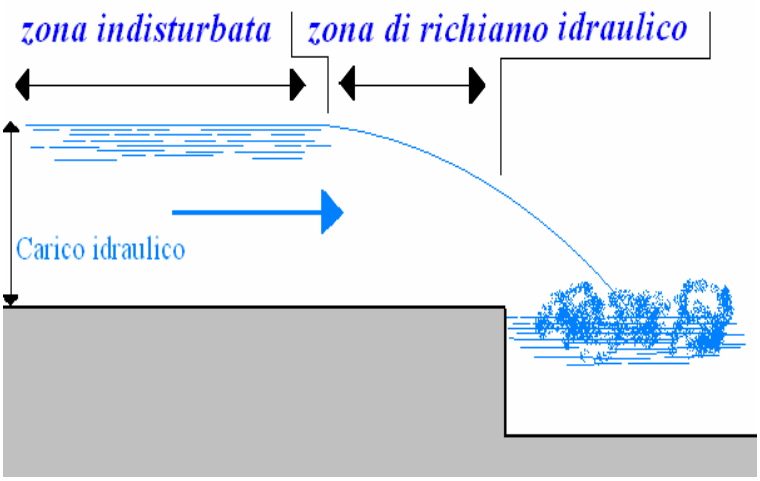


rettilìneo, inserìto, tra i due tronchi di cono.

Questo strumento, sèmplice e di grande affidabilìta, si diffuse velocemente ovunque.

Venturi condusse anche osservazioni sulla diffusione dei vòrtici nei canali a cielo libero e ne propose il medésimo meccanismo per i moti dell'atmosfera.

Lo scienziato italiano, inoltre, per primo osservò che una corrente a pelo libero, in prossimità di un salto idraulico, deprime il proprio livello rispetto al fondo, a causa della graduale accelerazione man mano che si avvicina al salto stesso; il cosidetto *Effetto di richiamo*, dal quale ci si deve mantenere lontani, cioè restare nella zona indisturbata, quando si vuol attribuìre, al salto, il càrico idraulico che determina la portata transitante.



Poco è noto della vita di Reinhardt Woltman, se non il fatto che sviluppò tutta la sua attività professionale nel Dipartimento dei Porti e della Navigazione della provincia di Hannover, particolarmente a Cuxhaven e ad Amburgo.

I contributi di Woltman all'Idraulica prendono forma in due trattati. Il primo "*Theorie und Gebrauch des hydrometrischen Flügels*", pubblicato in Amburgo nel 1790, descrisse l'applicazione dell'elica a palette come misuratore della corrente dei liquidi, producendo quel progresso nella misura delle velocità atteso da sècoli. Sebbene Woltman avesse onestamente ammesso d'essersi ispirato all'anemòmetro, precedentemente disegnato da Schober, il suo nome è oggi sempre associato a questo tipo di strumento, allora detto *Mulinello di Woltman* ed oggi, semplicemente, *Mulinello*.

Il secondo trattato, "*Beiträge zur hydraulischen Architecture*", consiste nella raccolta delle pubblicazioni uscite a Göttingen tra il 1791 ed il 1799, sull'evoluzione dell'Ingegneria Idraulica – sulla scorta del precedente esempio francese ad òpera di Bernard Forest de Bélidor con il suo '*Architecture hydraulique*', già ricordato nei precedenti Capitoli 10 e 13.

Nei citati due lavori del Woltman si tròvano alcune esperienze di misura della resistenza in condotte e in canali, sulla base delle quali il tedesco propose una semplificazione della complicata formula della resistenza di Du Buat, con una potenza da applicarsi alla velocità compresa tra 1,75 per le tubazioni, e 2,0 per i canali a pelo libero; valori ancòr oggi utilizzati.

Nell'ultimo periodo del secolo, tra i test di Giovanni Poléni e quelli di Giovanni Battista Venturi, è evidente che la sperimentazione idraulica fece decisìvi progressi, soprattutto nella Scuola

Francese, anche grazie al fatto che poche delle ambiziose méte, elencate dal Du Buat, erano a quel tempo raggiunte.

Alcune invenzioni, in questo periodo, costituirono passi fondamentali e definitìvi per il progresso della scienza dei fluidi:

- il *Piezòmetro*, per la misura della pressione nelle condotte, per l'appunto, in pressione;
- il *Tubo di Pitot*, per misurare la velocità dei fluidi, alle alte velocità ed in particolar modo dei gas;
- il *Mulinello di Woltman*, misuratore della velocità delle correnti, soprattutto di liquidi per valori anche mìnimi;
- i modelli in scala;
- le vasche galleggianti, per le esperienze di Idraulica Navale e di Idrodinàmica.

In secondo luogo questo periodo segnò l'era di ragionate e precise osservazioni sperimentali sotto condizioni controllate.

Ma il maggior evento, per quanto ci riguarda, si risolse nella prima teorizzazione del fenòmeno della pérdita di energìa dei fluidi in movimento, sìa essi in pressione che liquidi a pelo libero, aprendo la via alla risoluzione di questo che, nell'Idraulica ma non solo, è il problema più complesso, al punto che ancòr oggi è oggetto di studio.

* * *

Cap. 17 – I progressi agli inizi del XIX sécolo

Lo slancio della ricerca in Idraulica alla fine del XVIII sécolo continuò nel successivo Ottocento. La Scuola Francese era ancòra il più qualificato riferimento, ma altre realtà raggiunsero livelli altrettanto significativi.

Di fatto, grazie al lavoro corale condotto dagli scienziati del Settecento, dalle Accadémie e dalle Università, crebbe in modo esponenziale il numero di studiosi in ogni campo della ricerca e con essi la massa dei documenti e degli studi prodotta.

Questa Storia, d'ora innanzi, si troverà sempre più immersa nella situazione dalle caratteristiche speculari rispetto al più remòto passato della storia umana: il proliferare di studi e di studiosi; chi e cosa mèritano d'essere ricordati?

Le necessità del racconto, così come è stato concepìto, impongono non soltanto la scelta selettiva, nella valutazione dell'importanza dei fatti da ricordare, ma l'estrema sìntesi.

Di conseguenza, d'ora in poi l'attenzione sempre più si limiterà a proporre isolàti accenni a fatti ed a personaggi, certo esponendoci al dissenso di molti; ma il progresso, ormai travolgente, accresce il numero degli eventi e quindi, nel racconto, la frequenza delle scelte, seguìte dalle proporzionali, inevitàbili ma sempre positive critiche.

L'Idraulica proseguì dunque nella sua sempre più ràpida e compléta crèscita, secondo tre direzioni:

- la produzione di dati sperimentali;
- l'interpretazione dei dati e la formulazione di empiriche formule di applicazione pratica;
- l'elaborazione dei princìpi generali discendenti dalle leggi della Fisica.

Nell'Ottocento, i lavori puramente sperimentali erano ormai giunti ad una elevata affidabilità, con costanti e inequivocabili risultati che confermavano i princìpi fondamentali ancor prima, a volte, delle relative dimostrazioni matematiche o delle interpretazioni fisiche.

In questo Capitolo e nel successivo ci occuperemo, in particolare, delle deduzioni empìriche sui fenòmeni del moto dei fluidi, tratte dai dati esclusivamente sperimentali, che produssero, grazie all'affidabilità dei procedimenti, a nuove ed ùtili indicazioni nelle pratiche applicazioni.

L'inizio del XIX sécolo vide la fase terminàle dell'attività di un grande scienziato francese: Charles Augustin de Coulomb (Angoulême 1736-Parigi 1806).

Nato ad Angoulême, nella Francia centro-occidentale, formò la propria preparazione scolastica a Parigi, per approdare, infine, nell'esercito come ingegnere militare, curando la costruzione di fortificazioni nell'isola della Martinìca (tra il 1764 ed il 1766), a Cherbourg (1776) ed a Rochefort (1779); mentre si occupava di queste òpere, condusse esperimenti di Fisica e di Meccanica.

Nell'Idraulica, rigorosamente applicata, Coulomb si occupò della realizzazione di canali in Bretagna, meritando la carica di 'Generale Soprintendente per le acque e fontane di Francia'.

Una sua memoria sulla teorìa delle macchine semplici gli valse un premio della *Académie royale des scienses*, della quale fu nominato

membro nel 1784. Nel 1795, anno in cui ricevette l'incarico di Ispettore Generale della Pubblica Istruzione, fu tra i primi componenti dell'*Institut de France*. Le sue ricerche si inoltrarono in diversi campi scientifici: la Statica, l'elettricità e l'elettrostatica, il magnetismo, l'Idraulica, la Termodinàmica, la Geotécnica.

Particolare notorietà gli fu riconosciuta per l'invenzione della Bilancia Torsionale, oggi detta 'Bilancia di Coulomb', che consente di misurare direttamente forze di valore infinitesimo, come quelle elettrostatiche.

Con il suo nome sono oggi individuate:

- in Elettrostatica: La legge ed il Teorema di Coulomb;
- in Fisica Nucleare: la Barriera di Coulomb;
- in Geotecnica: il Teoria di Coulomb (o 'Del prisma di massima spinta').

"*Expériences destinées à déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur résistance dans les mouvements trés lents.*" è la memoria che più interessa l'attività dello scienziato francese nel campo dell'Idraulica, pubblicata a Parigi nell'anno 1800. Vi si trovano i resoconti degli esperimenti sulla resistenza al moto di oggetti immersi in un fluido in movimento, sospesi ad un filo in ottone fissato alle sue estremità che quindi poteva soltanto torcersi. Coulomb misurò la resistenza al moto, deducendola dall'effetto di smorzamento delle oscillazioni rotazionali del cavo.

I *test*, condotti con differenti velocità e liquidi, quindi con diversi valori della viscosità, consentirono a Coulomb di elaborare un'espressione binomia della resistenza al moto, nella forma

$$R = (av+bv^2).$$

Lo scienziato francese, pur dichiarando che tale definizione fosse già stata espressa dall'inglese Isaac Newton, ne diede la seguente personale giustificazione:

"*Ci possono essere due tipi di resistenza: uno, dovuto alla coerenza delle molecole che sono separate le une dalle altre in un dato tempo, proporzionale al numero di molecole e quindi alla velocità; il secondo, dovuto all'inerzia delle molecole che si fermano a causa delle irregolarità contro le quali cozzano, proporzionale al loro numero ed alla loro velocità e conseguentemente al quadrato di quella velocità.*"

Durante gli esperimenti, Coulomb osservò che l'utilizzo di fluidi a diversa viscosità portava alla variazione del solo primo addendo, moltiplicatore della velocità ad esponente uno.

Con il grande scienziato francese oltrepassiamo la soglia del XIX sécolo, al cui inizio attìrano la nostra attenzione tre idraulici, uno tedesco e due francesi, non solo per il valore del loro contributo ma anche per l'influenza che, proseguendo nel lavoro in Idraulica di Charles Augustin de Coulomb, seppero suscitare nei rispettivi paesi.

Il primo fu Johan Albert Eytelwein (Francoforte 1764 - 1848), che operò come ingegnere idraulico e civile (nel senso di 'costruttore di òpere edilizie') nell'àmbito della carriera militare; partecipò alla costruzione del palazzo del Consiglio di Prussia, realizzò la sistemazione idraulica di numerosi fiumi, costruì porti, creò il nuovo sistema prussiano di pesi e di misure.

Il secondo fu Pierre Simon Girard (Caen 1765 - 1836), ingegnere dell'Ufficio Ponti e Strade, anch'egli militare, fu al séguito di Napoleone nella campagna d'Egitto e successivamente divenne 'Commissario delle Acque' a Parigi.

Il terzo fu il barone Gaspard Françoise Claire Marie Riche de Prony (Chamelet, Lione 1755- Asniè 1839); professore di Matemàtica all'*École Polithecnique* di Parigi, fu primo direttore del *Bureau du Cadraste*, iniziando la realizzazione del Catasto Generale di Francia, coordinando, per tale scopo, la redazione di tavole logaritmiche fino alla diciannovesima cifra decimale.

Si interessò alla sistemazione di porti in Francia ed in Italia; esaminò la possibilità di bonificare le Paludi Pontine e condusse studi sulla sistemazione del fiume Po.

Direttore Generale, dal 1798, della *Ecole des Ponts et Chaussées*, Prony fu anche componente della *Commission des Poids et des Mesures*, occupandosi della misura della latitudine, dimostrando, attraverso la frequenza delle oscillazioni del pendolo, la forma non perfettamente sfèrica della Terra (il cosiddetto 'schiacciamento').

Questo scienziato francese, nel 1821, ideò il freno dinàmometrico ad attrito che porta, ancòr oggi, il suo nome, e che è utilizzato per misurare la coppia motrice applicata ad un albero in rotazione.

Nel 1835 Gaspard Françoise Claire Marie Riche de Prony ricevette l'onorificenza di *Pari di Francia*.

Nel 1801 Eytelwein pubblicò a Berlino la prima edizione del suo "*Handbuch der Mechanik fester Köper und der Hydraulick.",* reso famoso, in particolare, dalla formula della velocità per i canali a pelo libero:

$$U = \chi\sqrt{R_m i}$$

Nella quale si ìndica con:

- U =la velocità media della corrente che si vuole ottenere, quindi la portata, moltiplicando la stessa velocità per la sezione del flusso;
- i = la pendenza del fondo;
- R_m = Raggio Idraulico della sezione, dato dal rapporto tra l'area, della sezione del flusso, ω ed il contorno bagnato c . . .

Come già abbiamo ricordato nel Capitolo 14, il coefficiente χ assunse, per Eytelwein, il valore di 50,93.

Curiosamente questa stessa formula, con il fattore χ pari a 50,0 invece di 50,93, apparve in Italia, nel 1830, ad òpera dell'idraulico bergamasco Antonio Tadini (Romano di Lombardia, Bergamo, 1754-1830) e da questi trovò diffusione anche . . . in Germania ed in Francia!

Come già aveva evidenziato Antoine Chézy, è ormai riconosciuta la posizione definitiva delle grandezze idrauliche che dòminano il moto a pelo libero: la pendenza ed il rapporto tra l'*Area*

Bagnata ed il *Perìmetro Bagnato*, che, poi, Charles Bossut chiamò *Raggio Idraulico*. Eytelwein, però, non partì dagli studi di Chézy - resi noti, come abbiamo visto nel precedente Capitolo, soltanto nel 1804 – ma dalla versione semplificata dell'ingombrante relazione di Pierre Louis Georges Du Buat, realizzata da Reinhardt Woltman.

Un'altra formula che definisce la velocità della corrente, a pelo libero, di un fluido in funzione della pendenza dell'àlveo, fu elaborata da Pierre Simon Girard e presentata nel documento "*Rapport à l'Assemblée des Ponts et Chaussées sur le projet général du Canal de l'Ourcq.*".

Dopo un breve cenno critico alle analisi di Chézy, Girard propose una sua relazione che, come lui stesso affermò, era dedotta dai risultati degli esperimenti di Coulomb sulla resistenza dei corpi immersi:

$$U = \sqrt{0{,}25 + 8047 R_m i} - 0{,}50$$

Anche Gaspard Françoise Claire Marie Riche de Prony, nel suo lavoro "*Recherches physico-mathématiques su la théorie des aeux courantes.*", condusse l'analisi della complessa formula di Du Buat e del lavoro di Chézy, giungendo ad affermare:

"*Chézy, Direttore della Ecole des Ponts e Chaussées, fu occupato con la stessa ricerca nel 1775, undici anni prima della pubblicazione della seconda edizione di Du Buat, in connessione con il lavoro sul canale Yvette, e fu portato ad una espressione per la velocità infinitamente più semplice della precedente. Comparò la resistenza del contorno alla nota resistenza che segue la legge del quadrato della velocità ed assunse che il rapporto* ($\chi U^2/\zeta\omega\lambda$) *è lo stesso in tutte le correnti dello stesso fluido; in accordo con questa ipotesi è sufficiente trovare, attraverso l'esperienza, i particolari valori di U,* χ, ζ *and* λ, *che prevale allo stesso tempo per una data corrente, e si deduce quindi il generale valore di U come una funzione di assolute costanti e della quantità di* χ, ζ *and* λ *pertinenti ad ogni qualsiasi corrente.*" (I simboli vanno così intesi: U = velocità, χ, = perimetro bagnato, ω = area bagnata e ζ/λ = pendenza del fondo.)

Prony, quindi, cadde nell'errore di ritenere che l'analisi di Chézy avesse sviluppato un coefficiente costante, sebbene ciò si scontrasse con l'analisi matematica condotta dallo stesso Prony.

A differenza di Girard, Prony utilizzò la formula di Coulomb della misura della resistenza nell'analizzare sìa la grande complicazione di Du Buat che la semplice relazione dedotta da Chézy, trovando giustificazione, dal punto di vista matematico, con una prima approssimazione delle infinite serie: $c+aV+bV^2+gV^3+\ .\ .\ .$ Dopo aver analizzato ogni dato disponibile, con i métodi suoi e di Laplace, Prony propose alcune formule del tipo seguente, da utilizzarsi per tubazioni e per canali a cielo libero:

$$DS=a_1V+b_1V^2$$
$$RS=a_2V+b_2V^2$$

Influenzato, senza dubbio, dalle precedenti conclusioni di Du Buat – ed anche o soprattutto dai dati sperimentali - Prony elaborò i due gruppi di coefficienti come indipendenti dalla natura della superficie del contorno.

Eytelwein, sulla base delle recenti evidenze sperimentali, pubblicò, nel 1818, un documento, "*Untersuchungen über die Bewegung des Wassers"*, contenente due formule di identica struttura ma con coefficienti piuttosto modificati. Benché gli scritti di Prony e di Eytelwein furono tradotti in tedesco ed in francese, rispettivamente, ciascun gruppo delle due formule trovarono maggior favore nei paesi di origine, ma le formule di Eytelwein ebbero maggior diffusione nelle altre regioni.

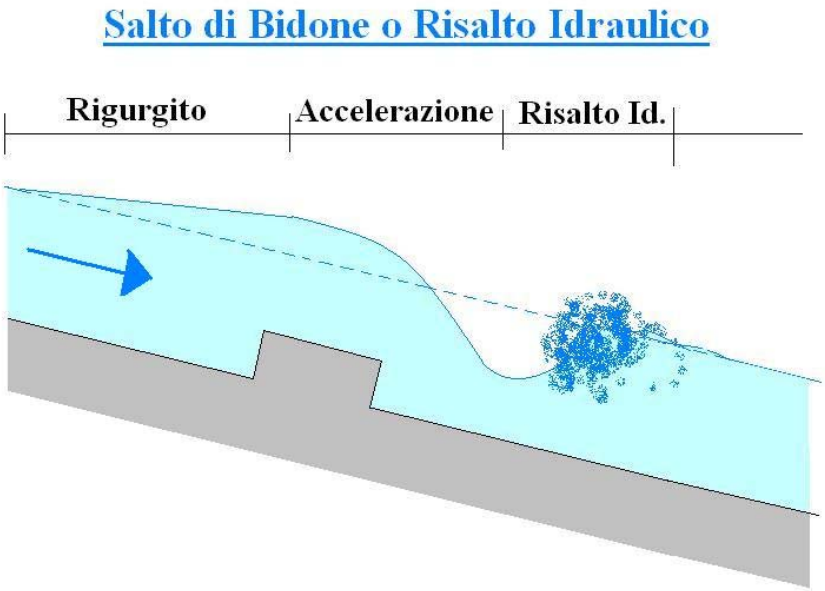
Degli idraulici italiani del XIX secolo, due méritano la citazione a questo punto: Giorgio Bidone (Casalnocéto 1781 - Torino1839), dal 1815 professore di Idraulica all'Università di Torino, e Giuseppe Venturòli (Bologna 1768 – Roma 1846), professore di Matemàtica Applicata all'Università di Bologna e successivamente direttore della Scuola di Ingegneria di Roma.

Entrambi produssero un numero di scritti di grande importanza, nei consueti campi della ricerca.

Giorgio Bidone dedicò grande attenzione al profilo che il pelo libero dell'acqua corrente assume in circostanze particolari, come i salti, il restringimento e l'allargamento della sezione, l'efflusso dai serbatoi; a quest'ùltimo proposito, lo scienziato italiano fu il primo a definìre il profilo del pelo libero dell'acqua che tracìma da un grande serbatoio, quale una diga.

A Giorgio Bidone è riconosciuto il primo studio del fenomeno oggi detto 'Risalto Idraulico' ma chiamato anche, in suo onore, *Salto di Bidone*.

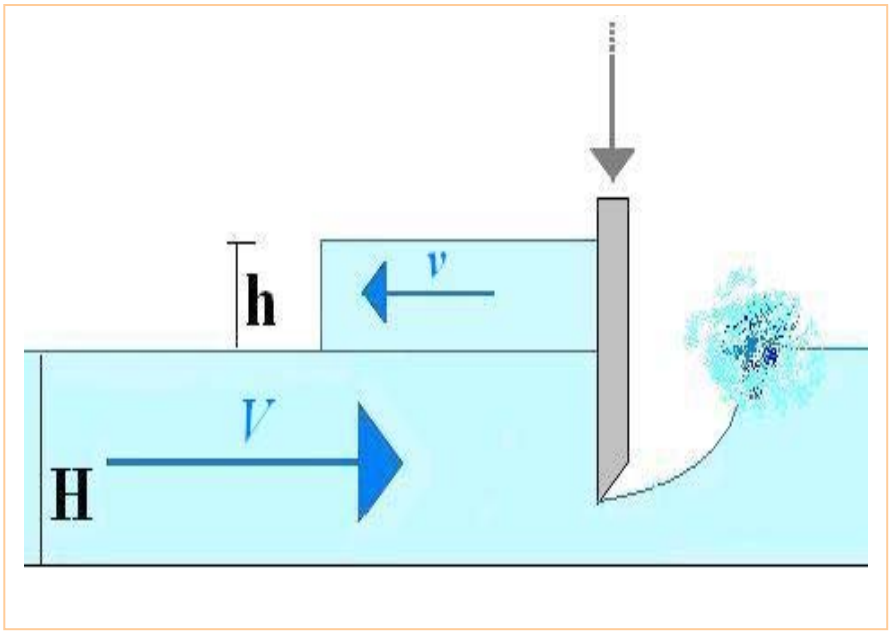
Il Risalto Idraulico è un fenòmeno molto frequente nelle correnti a pelo libero, sìa in canali che nei corsi d'acqua naturali. Quando il flusso incontra un ostacolo che riduce la sezione della corrente, il livello del pelo libero, prima di questo ostacolo, si innalza, per accumulare quella maggiore energìa che consenta all'intera portata transitante di superare il restringimento.



Poiché la sezione, a causa dell'ostacolo, è più stretta, l'acqua, in quel punto, accelera, spinta dal maggior livello che ha raggiunto a monte; poi, una volta superato questo passaggio stretto, se la sezione torna alla forma precedente, l'acqua deve decelerare, tornando alla velocità proporzionata alle ritornate precedenti caratteristiche idrauliche.

Anche nel caso in cui una corrente a pelo libero trova un salto del fondo, il flusso accelera per poi tornare, rallentando, alla precedente velocità, se le grandezze idrauliche dell'àlveo tornano alle medésime caratteristiche precedenti al salto.

In entrambi i casi, dovendo ridurre la velocità, il fluido deve dissipare parte dell'energìa cinética attraverso un sorta di 'vòrtice orizzontale' che, in alcune situazioni, assume forme e dimensioni spettacolari: è il Risalto Idraulico o Salto di Bidone, in onore dell'italiano che fu sicuramente il primo a studiare questo fenomeno in modo sperimentale, tentandone l'analisi sulla scorta dei risultati descritti nelle sue memorie torinesi "*Expériences sur le remous et la propagation des ondes"* e *"Expériences sur la propagation du remous",* pubblicati nel 1820 e nel 1826.



Come i titoli ìndicano, non fu il Risalto Idraulico il principale oggetto di studio di Bidone, bensì i fenomeni prodotti da una istantànea riduzione della sezione della corrente provocata, ad esempio, da una paratoia che cali improvvisamente; correttamente collegò la velocità assoluta *v* e l'incremento di altezza *h* dell'ondata alla velocità *V* ed alla profondità *H* della corrente in arrivo, con la relazione: *vh=VH*. Ma i suoi sforzi per valutare l'altezza dell'ondata prodotta e quindi la sua pressione sullo sbarramento, che chiamò 'percussione', furono vani a causa di numerosi errori nel suo uso del Princìpio del Momento.

Tuttavia, notando che il sovralzo *h* era invariabilmente più grande dell'altezza cinetica legata alla velocità (pari a $V^2/2g$), Bidone arbitrariamente introdusse un fattore di moltiplicazione, in accordo con i dati sperimentali:

$$h = \frac{2H + h}{h} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Giuseppe Venturòli, si laureò in Filosofìa a ventuno anni ed a ventitre era già accolto nell'Accadémia delle Scienze di Bologna; nel 1795 l'Università più antìca della storia lo vide titolare di *Lettura Onoraria* di Matematica e poi, tre anni dopo, di *Lettura Stipendiaria*, nella stessa materia; nel 1797 fu professore di Storia Naturale e nel 1802 gli fu assegnata la Cattedra di Matematica Applicata; nel 1817 venne chiamato a Roma dal Papa, Pio VII, che, il 23 ottobre, lo nominò Presidente del Consiglio Idraulico e Direttore della Scuola degli Ingegneri, che fu la prima in Italia, seguita da quelle di Milano e di Napoli.

Nonostante le molte materie in cui si impegnò, l'incarico papale colse nel segno della sua più spiccata attitudine: l'Idraulica. Tutti i lavori di Venturoli riguardano, infatti, la scienza dei fluidi, sia teòrica che applicata.

L'opera più celebre di Venturòli è il trattato '*Elementi di Meccanica e d'Idraulica*', di cui furono pubblicate molte edizioni, anche dopo la sua morte. Quest'òpera fu tradotta anche in inglese e pubblicata nel 1822.

L'interesse di Venturòli incluse il problema della resistenza delle tubazioni e dei canali presentando dati che confermavano la formula di Eytelwein; fu il primo, inoltre, ad analizzare l'aspetto inerziale della corrente stabilizzata in un tubo.

Il contributo di Venturòli fu di maggior successo dal punto di vista analitico di quello di Bidone, ma di questo la Storia non gli rese mérito. Fu lui che per primo derivò l'equazione elementare del rigurgito per canali rettangolari (con un errore di segno che fu successivamente corretto) in una memoria che volle anònima, nel 1823: "*Ricerche sulla figura del pelo dell'acqua negli àlvei di uniforme larghezza*."; la cui paternità si rivelò attraverso una lettera che egli stesso scrisse a Giorgio Bidone. Attraverso integrazioni grafiche dell'equazione differenziale, Venturòli fu

in grado di disegnare varie forme del profilo del pelo libero; le sue memorie, però, non ebbero successo; l'equazione fu derivata nuovamente in Francia pochi anni dopo.

Il fisico tedesco Wilhelm Eduard Weber (Wittemberg 1804 – Gottinga 1891) pubblicò a Lipsia nel 1825, assieme al fratello fisiologo Ernst Heinrich (Wittemberg 1795 – Lipsia 1878), un libro su esperimenti con le onde "*Wellentheorie auf Experimente gegründet, oder ünder die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall – und Lichtwellen.*".

Professore ad Halle e poi, dal 1831, a Gottinga, Weber fu licenziato nel 1837, assieme ad altri sei colleghi colpevoli d'aver pubblicamente protestato contro Ernesto Augusto, primo re del novello regno di Hannover, per l'abrogazione della Costituzione; riprese l'insegnamento nel 1843 a Lipsia e, dal 1849, ancòra a Gottinga.

Wilhelm Eduard Weber si dedicò principalmente in studi su aspetti dell'energìa elettrica, elaborando una teorìa unitaria dei fenomeni elettrostatici ed elettrodinàmici, e propose un sistema di unità di misura per le grandezze elettriche, analogo a quello di Gauss per le grandezze magnetiche.

Il *weber* è, in suo onore, l'unità di misura nel Sistema Internazionale, con simbolo Wb, del flusso magnetico.

Lo scienziato tedesco seppe calcolare il fattore di proporzionalità tra le unità elettromagnetiche ed elettrostatiche, dimostrandolo prossimo al valore della velocità delle luce, dal quale prese spunto J. C. Maxwell per formulare la teoria delle onde elettromagnetiche.

Da questa descrizione dell'attività di Weber non sembra potersi cogliere collegamenti con i temi dell'Idraulica, ed il suo libro è in effetti poco noto nella letteratura idraulica, sebbene contenga un dettagliato resoconto di ciò che sino ad allora era stato scritto sul moto dell'onda ed un ampio panorama di nuove osservazioni.

Weber, in molti esperimenti sul comportamento delle onde, utilizzò una vasca con pareti di vetro, assai lunga e stretta, che permise di investigare sui fenomeni di riflessione, interferenza, moto orbitale e forma del profilo, utilizzando, oltre all'acqua, il mercurio ed il . . . brandy!

Per mancanza di precedenti, molte delle tecniche sperimentali di Weber furono tanto ingegnose quanto di assoluta novità; usò, ad esempio, spargere farina sul pelo libero del fluido applicando alla sponda della vasca un sottile lavagna, oppure cospargeva la lavagna stessa di povere bianca poi rimossa dal moto ondoso; in questo modo poteva esaminare le tracce del comportamento dell'onda nei diversi esperimenti, 'fotografando' la continuità del moto.

Le osservazioni furono essenzialmente qualitative; Weber non fece alcun tentativo per correlarle con una teoria esistente:

"*La velocità delle onde in nessun modo dipende soltanto dalla larghezza [i.e., larghezza dell'onda] come Newton, Gravensande, D'Alembert e recentemente Gerstner avevano affermato, ma anche dalla loro dimensione, cioè dalla loro altezza e larghezza insieme. La sola lunghezza dell'onda (cresta) non ha una diretta influenza sulla velocità . . . . Quando un'onda muove tra due pareti e così né può aumentare né diminuire in lunghezza (i.e.: larghezza), l'altezza così decresce ma allo stesso tempo la sua ampiezza aumenta. Poiché la velocità dipende sia dall'altezza che dall'ampiezza, essa resta quasi invariata e l'onda quindi diventa più lenta solo a causa della frizione del fluido sulle pareti della vasca e per la resistenza dell'aria che riduce la velocità . . . . In accordo ai nostri esperimenti, la velocità delle onde diminuisce con la diminuzione della*

profondità del fluido. Se la profondità decresce in progressione aritmetica, la velocità decresce più lentamente."

Ma i nuovi studi di Weber sul moto ondoso furono contemporànei ad un'altra novità particolarmente stravolgente. In quel periodo, infatti, comparve per la prima volta il término '*turbina idraulica*' ad indicare la macchina idraulica alla quale lavorarono con grande impegno due ingegneri francesi: Claude Burdin (Saint Ětienne 1790-1873), professore della *Ecole des Mines* a Saint Ětienne, e Benoit Fourneyron (Saint Ětienne 1802- Parigi 1867), studente di Burdin.

Nel 1824 Claude Burdin sottopose alla *Académie royale des scienses* la memoria '*Des turbines hydrauliques ou machines rotatoires à grande vitesse*', che descrive la nuova tipologìa di apparecchiatura che indicò con il término 'turbina', che divenne subito comune nella terminologìa comune a molte scienze.

Il dispositivo proposto da Burdin convogliava il flusso costringendolo ad assumere un moto rotatorio attorno ad un asse verticale al quale era solidale un ordine di palette, mentre all'esterno del condotto dal quale proveniva il flusso erano montate pale-guida. Le palette giranti avevano una particolare curvatura ed una piccola inclinazione, calcolate, in via sperimentale, per rendere minimi urti, turbolenze e velocità di uscita dal dispositivo stesso.

La memoria di Burdin non fu accolta con il meritàto favore, sebbene il suo autore ricevette molti incoraggiamenti nel continuare le ricerche.

Ben presto la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* (alla quale Burdin aveva sottoposto la propria memoria) offrì un premio al primo " . . *che avesse avuto successo nell'applicare a larga scala in modo soddisfacente, nei mulini e nelle industrie, le turbine idrauliche o le ruote idrauliche con le pale ricurve di Belidor* . . .". Purtroppo Burdin era tanto predisposto negli studi teorici quanto poco nelle applicazioni pratiche e mai avrebbe avuto successo nella realizzazione di un modello di accettabile fattura ed efficienza.

Benoit Fourneyron, dotato, a differenza del suo professore Claude Burdin, di una grande abilità pratica, proseguì nello sviluppo dell'idea originale di Burdin, sfruttando la sua ampia esperienza in Metallurgìa e, nel 1827, potè realizzare una prima turbina sperimentale che, a dispetto dell'imperfetto disegno delle palette rotanti in ingresso, si dimostrò già affidabile ed efficiente; la chiamò '*Ruota a pressione universale e continua*'; di Furneyron, Burdin scrisse:

"*Perlomeno se io non costruìì buone macchine si potrà dire che almeno abbia costruito un buon costruttore di macchine, che è di ancor più maggior mérito.*"

I primi scritti scientifici di Fourneyron descrissero l'uso del freno dinàmométrico, per misurare la potenza della rotazione, dando prima applicazione all'invenzione di Prony, e le sue prime pratiche realizzazioni di turbine idrauliche gli vàlsero, nel 1833, il premio offerto, e non ancòra assegnato, dalla *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nazionale*; la sua "*Mémoire sur l'application en grand dans les usines et manifactures, des turbines hydrauliques ou roues à palettes courbes de Bélidor.* », che descrive la teoria generale e la sua applicazione nella realizzazione di tre installazioni, fu pubblicata dalla *Société* nel 1834.

Fourneyron costruì più di cento turbine idrauliche, in varie parti del mondo, tutte a flusso di scarico libero anche se il loro inventore intravvide la possibilità di realizzarne a flusso sommerso

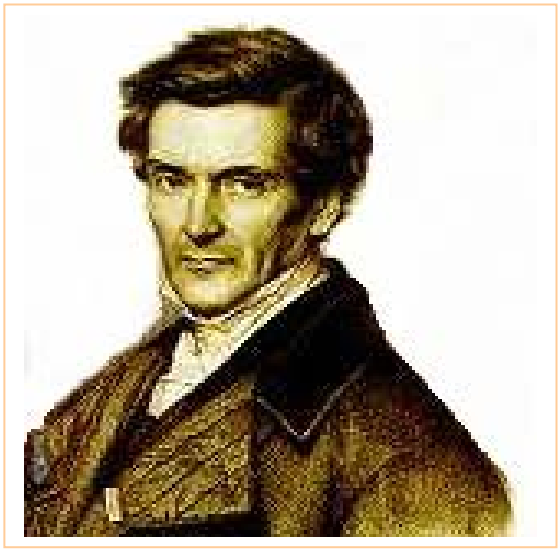
attraverso un dispositivo finale, che chiamò 'diffusore', e che brevettò nel 1855 per la sua turbina a flusso esterno; la seguente osservazione è tratta dal documento di brevetto:

"*La velocità assoluta che rimane nell'acqua dopo la sua azione nella ruota è raramente nulla ed a volte considerevole. Così tutte le forze attive rappresentate dalla velocità dell'acqua all'uscita costituiscono una pura perdita. Il mezzo che propongo per evitare questa perdita consiste nell'allargamento, con una gradualità significativa, la sezione di passaggio che conduce l'acqua al canale di scarico, così che la sezione ultima è due, tre o quattro volte la sezione prima. Con tale metodo l'acqua sarà privata, dalla forma del passaggio, della velocità non strettamente necessaria alla sua uscita dalla macchina. Così si creerà un carico artificiale più grande del carico naturale . . . a patto che non ecceda la colonna d'acqua che rappresenta la pressione atmosferica.*"

Nella prima metà del XIX sécolo, nel *Corps des Ponts et Chaussées* v'erano un certo numero di idraulici degni di nota, dei quali tre ora méritano una particolare menzione: Pierre Vauthier (Boulogne 1784 - Parigi 1847), Jean Baptise Belanger (Valenciennese 1789 - 1874) e Gaspar Gustave de Coriolis (Parigi 1792 - 1843).

Pierre Vauthier, entrato nella *Ecole des Ponts et Caussées* proveniente dalla *Ecole Polytechnique*, dedicò la sua vita professionale alla partecipazione e poi alla direzione dei progetti del *Corps des Ponts et Chaussées* e lavorò anche allo sviluppo della navigazione interna.

Jean Baptise Belanger, dopo aver seguìto Vauthier nella stessa scuola e nella successiva attività presso il *Corps des Ponts et Chaussées*, si applicò attivamente all'insegnamento alla *Ecole Centrale des Arts et Manifactures*, alla *Ecole des Ponts et Caussées* ed alla *Ecole Polytechnique;* si occupò e scrisse in modo esteso nei campi della Matematica, della Meccanica, delle macchine, della resistenza dei materiali e d'Idraulica.



Gaspar Gustave de Coriolis (che mai usò, nel suo cognome, il nobiliare suffisso '*de*') nacque a Parigi, seguì lo stesso percorso scolastico dei due precedenti, e dopo molti anni di attività tornò ad insegnare alla *Ecole des Ponts et Caussées* ed alla *Ecole Polytechnique*, diventando alla fine direttore del *Corps des Ponts et Caussées*.

Coriolis è universalmente noto per il suo Teorema che definisce le relazioni tra le diverse componenti dell'accelerazione nei sistemi rotanti (quindi anche nelle turbine); una di queste componenti porta oggi il nome di '*Accelerazione di Coriolis*'.

Indipendentemente dalle scoperte di Giuseppe Venturòli, anche Belanger derivò, l'equazione elementare del Rigurgito nel suo "*Essai sur la solution numérique de quelques problémes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes*", pubblicato a Parigi nel 1828. Egli seguì la linea generale di Prony, attraverso l'equalizzazione delle forze di gravità e di resistenza, assunta la condizione che il fluido si muovesse linearmente, secondo sezioni successive ortogonali alla direzione del moto, e che il cambiamento delle dimensioni delle sezioni trasversali fosse trascurabile in confronto allo spostamento longitudinale.

Spesso in Idraulica, come anche in altre scienze, il non considerare variazioni infinitesime rispetto alle altre grandezze in gioco è uno stratagemma fondamentale per semplificare il problema e giungere ad una soluzione comunque accettabile.

Jean Baptise Belanger cercò di perfezionare l'analisi di Giorgio Bidone del Salto Idraulico, attraverso l'uso del principio della *Forza viva*.

L'impostare la ricerca dalle considerazioni sull'energìa contenuta nel fluido in movimento portò Belanger ad indagare sul comportamento degli sfioratori posti sulla cresta delle dighe (problema che invece, lo abbiamo visto nel Capitolo 16, Giovanni Poléni aveva affrontato soltanto per via geométrica), giungendo, nel 1849, alla relazione:

$$\xi = \frac{1}{3} H \quad \text{e} \quad Q = \frac{2}{3 \cdot \sqrt{3}} H \sqrt{2gH}$$

. . . dove con H è da intendersi il càrico idraulico sulla cresta della diga sfiorante.

Vauthier pubblicò, negli *Annales des Ponts et Chaussées* del 1836, una estensione dell'analisi di Belanger sul profilo del Rigurgito sotto il titolo "*De la théorie du mouvement permanent des eaux courantes et de ses applications à la solution de plusieurs problémes hydraulioques.*" Attraverso meno tediose (ed allo stesso tempo meno esplìcite) considerazioni, egli arrivò ad un'espressione che dimostrò essere sostanzialmente la stessa di Belanger, ma in una forma che ne consentiva l'uso in canali non prismatici, ottenendo, inoltre, risultati più accurati.

Questo documento di Vauthier indusse Coriolis a pubblicare negli *Annales des Ponts et Chaussées*, nello stesso 1836, la memoria "*Sur l'établissement de la formule qui donne la figure des remous, et sur la correction qu'on doit y introduire pour tenir compte des différences de vitesse dans les divers points d'une même section de courant.* ».

La derivazione di Coriolis dell'equazione del Rigurgito fu basata specificatamente sul principio di energia-lavoro; ne discende l'assunto che la quota alla quale il lavoro compiuto dalle forze della resistenza, sìano esse esterne che interne, poteva essere espresso dal prodotto della velocità e la locale resistenza del contorno e che quest'ultima poteva essere considerata uguale a quella del flusso in moto uniforme. Così, a dispetto delle differenze di base tra i principi del momento e dell'energia, l'equazione di Coriolis differì da quelle di Belanger e di Vauthier soltanto nella forma dell'ultimo termine, che riflette la sua idea che si dovesse anche tener conto della distribuzione della velocità nella sezione trasversale.

Attraverso l'introduzione di ciò che è ancòra chiamato il coefficiente di Coriolis, egli ridusse giunse alla definizione della seguente espressione:

$$\Delta s = \frac{-\alpha \cdot \Delta \frac{V^2}{2g} \pm \Delta h}{\frac{\chi}{\omega}(aV + bV^2) - i}$$

. . . dove per Δs è da intendersi la lunghezza del Rigurgito (cioè il tratto di canale, verso monte, interessato da una maggior altezza d'acqua) e per Δh la maggior altezza del pelo libero raggiunta nel punto dove è posta la causa che ha provocato il Rigurgito stesso.

Coriolis fu un poco dubbioso sul primo valore dato alla costante α, 1,47, stabilendolo poi pari ad 1,40 sino a giungere a 1,16.

Ma Vauthier, provocato dalle implicazioni di Coriolis che aveva migliorato la sua analisi, intraprese estensivi càlcoli e pubblicò in séguito una nota nella quale cercò di provare:

primo, che Coriolis era in errore nel trattare alla fine α come una costante; secondo: che α doveva ridursi in valore e probabilmente non superiore a 1,1 e che poteva diventare come 1,02.

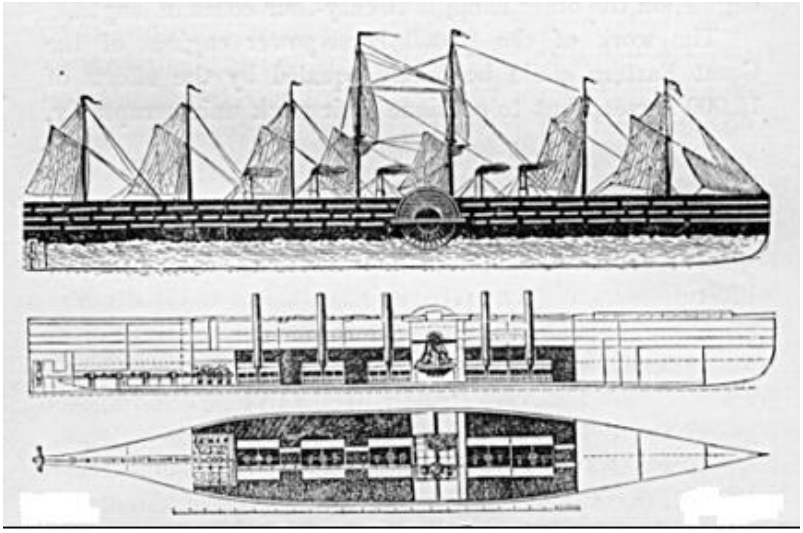
Così cominciò un dibattito che è continuato, tra gli idraulici, sino a tempi recenti.

I calcoli di Coriolis si sono rivelati essenziali nel caso di un flusso che subisca il ràpido cambiamento di sezione; Vauthier appropriatamente concluse, nel caso di corrente gradualmente variata:

"*. . . la completa soluzione di questo problema, così importante, come abbiamo dimostrato, nella pratica idraulica, neppure è nell'attuale interesse dei teorici di Idraulica. Da nuovi studi non abbiamo concluso che potrebbe essere affrontato nel caso delle correnti stazionarie, come nelle correnti uniformi, aspetto più interessante rispetto al problema del coefficiente.*"

I problemi delle correnti non stazionarie e non uniformi nei canali a pelo libero senza discontinuità furono per la prima volta investigati da un ingegnere scozzese di questo periodo, John Scott-Russel (1808-1882). Nato a Glasgow, figlio di un ministro (la cui famiglia era di cognome Russel piuttosto che Scott-Russel, al contrario frequentemente usato), ricevette la sua educazione come allievo ingegnere alle Università di Edinburgh e Glasgow. Si laureò verso la fine dei sedici anni ed in séguito insegnò, con notevole successo. Nel 1834 fu incaricato di svolgere una ricerca, per conto di una locale compagnia di canali, sulla praticabilità della navigazione a vapore nelle acque interne, che fu da guida per la sua successiva carriera.

I risultati dei suoi esperimenti furono presentati alla "Associazione britannica per lo sviluppo delle scienze" nel 1834, e nel 1835; nel 1837 un terzo documento dello stesso argomento ricevette la grande medaglia d'oro della *Royale Society* di Edinburgh.



John Scott-Russel ebbe anche l'incarico, da parte della Associazione Britannica, di preparare uno studio generale sulle onde, la cui versione preliminare fu presentata nel 1837 e la definitiva negli anni 1842-1843. Sulla base delle sue conclusioni sull'importanza della formazione dell'onda nella resistenza al moto delle navi, Russell propose, agli inizi del 1834, per il profilo della prua una forma a curva rovesciata, che riteneva avrebbe ridotto al minimo l'effetto della resistenza; tra i trentacinque ed i quarant'anni, prima a Edinburgh e poi a Londra, furono costruite, su suo progetto, numerose navi con tale profilo della prua. La più nota di queste fu la '*Great Eastern*', varàta nel 1838, con le struttura in metallo e

legno, la più grande nave del suo tempo; era mista anche nella propulsione: a vela ed a motore, a vapore, che azionava due grandi ruote verticali, poste sulle fiancate, a circa a metà dello scafo.

Russel fu uno dei fondatori dell'Istituto di Architettura Navale e durante tutta la seconda metà della sua vita prestò attivamente la sua òpera nell'organizzazione di questa istituzione.

Il documento che valse a Russell la medaglia d'oro della *Royal Society* di Edimburgh, "*Ricerche sperimentali sulle leggi di alcuni fenomeni di idraulica che accompagnano il moto dei corpi galleggianti e che non possono ridursi previamente in conformità con le conosciute leggi della resistenza dei fluidi.*" , pubblicato nelle *Transactions* della stessa *Royal Society*, contiene un pieno resoconto della prima parte della sua opera, in particolare delle esperienze condotte studiando il comportamento di grandi imbarcazioni, di differente forma, in un canale utilizzando, per il tràino, prima cavalli e poi un sistema di funi e contrappesi; potè provare che la resistenza prima tendeva ad aumentare con il quadrato della velocità, poi, ad un certo punto, diminuiva rispetto a tale grandezza, dipendendo – come è oggi noto agli architetti navali – dal percorso longitudinale della formazione dell'onda che si forma a prua.

Russel trovò che la brusca accelerazione del natante pròvoca la formazione di una singola onda positiva che continua a viaggiare per una grande distanza lungo il canale; chiamò questo tipo di onda la "*grande onda primaria di traslazione*". Ripetute campagne di osservazioni su altezza e velocità di questa onda, sostenute più tardi da esperimenti a scala ridotta, portarono Russel a proporre la seguente variazione all'equazione di Lagrange per la velocità di propagazione . . .

$$v = \sqrt{gh'}$$

. . . nella quale, con *h'* volle ìndicare non la profondità media dell'acqua, bensì l'altezza del fluido misurata partendo dalla cresta dell'onda.

Russel cercò di giustificare i suoi risultati analiticamente, ma in questo tentativo non fu particolarmente brillante; dichiarò, per esempio:

- di aver provato che il punto del primo massimo nella curva di resistenza si verifica quando la velocità è pari ai quattro terzi dell'accelerazione di gravità *g*;
- che la resistenza al moto era prodotta, quindi da studiare in tale direzione, dallo sforzo proporzionale al sollevamento dell'acqua che formava l'Onda Primaria';
- che per una velocità di propagazione dell'onda pari a due volte l'accelerazione di gravità *g* il punto più depresso dell'onda avrebbe raggiunto il fondo del canale stesso.

Sebbene Russel ritenne che i risultati degli esperimenti su modelli in scala potessero dare indicazioni qualitative ma non i valori certi dei fenomeni in scala reale, proprio i suoi stessi dati sperimentali furono eccellenti; quelli riferìti all'ampiezza dell'onda sollevata dalla chiglia in movimento sono tuttora un vàlido riferimento per valutare l'effetto dello sforzo che si oppone al movimento a causa della viscosità.

Per tutto quanto detto, a John Scott-Russel meritatamente spetta il riconoscimento del primato d'aver per primo analizzato e risolto, nel modo corretto, il fenòmeno e gli effetti della formazione dell'onda nel moto delle navi.

È curioso notare che un francese, contemporaneo di Russell, Ferdinand Reech (1805 - 1880), cominciò ad interessarsi della praticabilità dei *test* con modelli in scala nel periodo in cui Russel sviluppava la sua critica più convinta sulla loro affidabilità quantitativa.

Ferdinand Reech, alsaziano di orìgine, fu per molti anni professore di Matemàtica – e più tardi direttore – alla scuola di applicazione del Genio Marittimo a Parigi. Sebbene interessato ad un'ampia varietà di problemi di meccanica, pubblicò soltanto due documenti, entrambi nel campo della navigazione a vapore. Al suo insegnamento, però, Jouguet riconosce l'aver dato una profonda influenza sulla scienza Meccanica e sulle sue derivazioni soprattutto per l'attenzione che, sin dalle sue prime lezioni del 1834, dedicò alle leggi della gravitazione; la prima versione data alle stampe delle sue lezioni, pubblicata nel 1852, contiene un generale sviluppo dei princìpi basati sulle leggi del moto di Isaac Newton.

In essa leggiamo:

"*Così nel caso che si sìa determinata con esperimenti la resistenza del modello di un vascello, oppure un modello completo di nave a vapore con ruote o eliche, in termini di determinate forze note, si potrebbe procedere alla sua costruzione (i.e.: prototipo) con dimensioni lineari* ***l*** *volte multipli di tutte le velocità osservate della quantità* $\boldsymbol{u}=\sqrt{\boldsymbol{l}}$*, per il nuovo sistema di funzione similare a quello precedente, dando valore alle forze delle quali l'intensità statica sarebbero tutte aumentate in proporzione al cubo del rapporto delle dimensioni lineari. . . . Tuttavia, per una accuratezza completa sarebbe anche necessario che la pressione dell'atmosfera sulla superficie del liquido, così come per le forze di frizione o di aderenza delle particelle liquide contro il contorno del sistema, seguisse la legge generale delle altre forze. . . . A proposito di aderenza o frizione del liquido contro un contorno liscio , il poco che si conosce sembra indicare che le forze di questo tipo, in effetti, siano molto vicine al quadrato della velocità.*"

Reech così fu il primo che espresse quello che oggi è noto come *Criterio di similitudine di Froude*; per questo, purtroppo solo in Francia, il criterio è chiamato di Reech-Froude.

Nello sviluppo dell'architettura navale e dell'ingegneria marina l'attenzione venne rivolta anche allo sviluppo della propulsione delle navi.

L'americano James Rumsey (1743-1792), impegnato nello sviluppo del nuovo motore a vapore per la spinta delle navi sul fiume Potomac, condusse esperimenti sulla spinta di reazione a getto dell'acqua espulsa da una pompa a pistoni.

I battelli di John Fitch (1743-1798), testati sul fiume Delaware circa nello stesso periodo, furono dotati di un sistema meccanico di pale che poi si evolse gradatamente nella propulsione a pale laterali, che ottennero, all'inizio del XIX sécolo, numerose applicazioni come propulsione di integrazione alla spinta delle vele, della quale fu uno degli esempi più importanti il già ricordato piroscafo Great Eastern.

Probabilmente la prima nave spinta esclusivamente da un motore, attraverso due ruote laterali, fu progettata da Robert Fulton, e completata nel 1807; lunga 45 metri, effettuò il viaggio inaugurale, 177 chilòmetri da New York a Clermont, alla velocità media di 4,6 nodi, poco meno di nove chilòmetri all'ora.

Dobbiamo ricordare che Daniel Bernoulli aveva affermato, nel 1752, che le vele potevano essere sostituite interamente da ruote di spinta sommerse, in tutto simili a quelle dei mulini a vento.

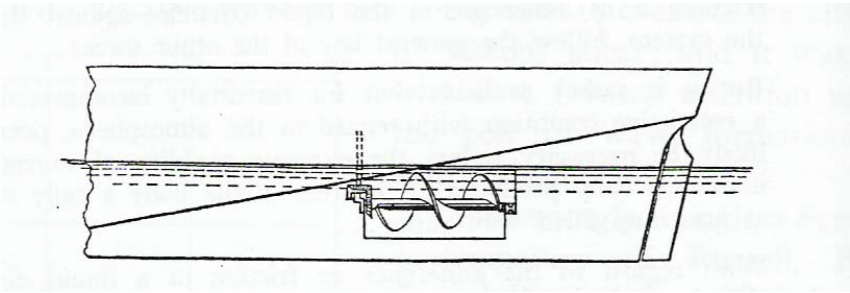
Seguirono, all'inizio dell'Ottocento, molte proposte ed ipotesi, ma soltanto poche giunsero alla fase di sperimentazione prima della fine del sécolo diciannovesimo.

Il primo battello che svolse una normale attività spinto da un motore a vapore, con una doppia élica, fu realizzato da John Cox Stevens (1749-1838) e fece servizio regolare nel porto di New York nel 1804.

I cento e più brevetti, catalogati nel 1852, includevano eliche singole e doppie; ruote con pale a raggiera, singole e doppie; propulsori con pale regolabili nonché unità con propulsione a getto, alcune con inclusa una girante assiale al flusso.

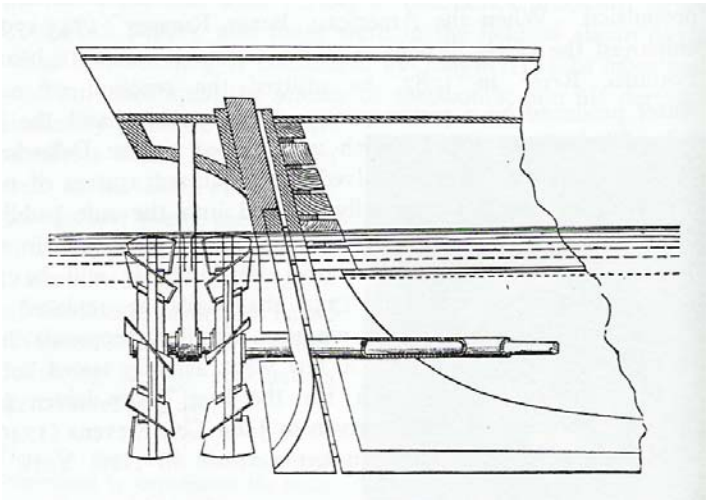
È assodato che Francis Pettit Smith (1808-1874), inglese, e John Ericsson (1803-1889), di origine svedese, sono coloro ai quali debba essere attribuìto il mérito della definitiva adozione dell'elica navale, così come oggi noi conosciamo, detta 'a opposizione a largo raggio'.

I relativi brevetti, sia di Smith che di Ericsson, furono ottenuti in Inghilterra nel 1836, il primo per l'élica a forma di vite elicoidale singola, sìmile ad una Vite di Archiméde, ma limitata a due sole volute.



Spesso la fortuna, perché sempre bendata, può aiutare la Scienza; durante gli esperimenti un'élica di Smith si ruppe, restandone in rotazione una sola parte; Smith poté notare che la spinta del propulsore migliorò, aprendo la strada per studiare éliche corte, ad una sola voluta, e trovando nella diminuzione della lunghezza valori più alti della spinta.

Il modello di Ericsson era costituìto da una coppia di ruote in controrotazione, con pale lungo la circonferenza; una era azionata dall'albero dell'elica, che scorreva all'interno di un manicotto, e la seconda era azionata dalla prima, per mezzo di ingranaggi dentati, ruotando in verso opposto. Non ottenendo sostegno dall'Ammiragliato inglese, Ericsson emigrò negli U.S.A. dove ottenne un accordo con la Marina Militare, grazie al quale costruì la prima nave da guerra con propulsione a elica, la USS *Princeton,* varata nel 1844.

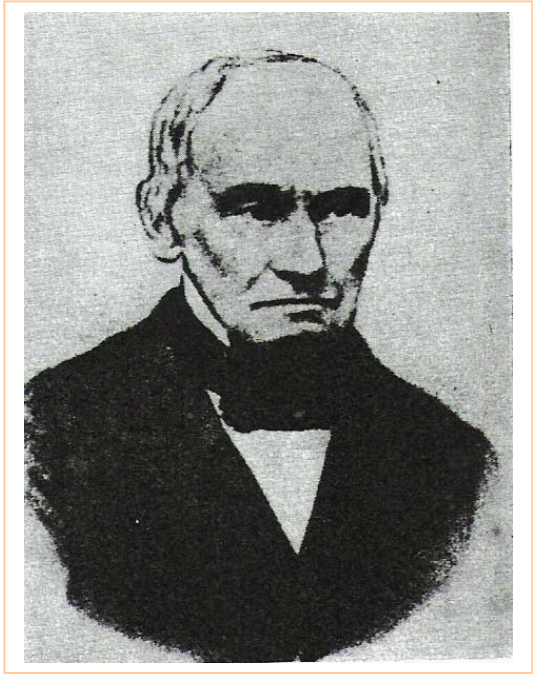


Ma l'individuazione di un modo più efficace di spingere i bastimenti non rimuoveva il problema più importante: studiare, comprendere e rendere mìnima la resistenza al moto provocata dalla forma della chiglia, oltre che dalla stazza.

L'aspetto ormai certo era che la velocità giocasse il ruolo principale nel determinare la resistenza al movimento, ma in modo non lineare; cioè la resistenza non aumentava nella stessa proporzione con la quale s'accresceva la velocità.

Con riferimento alla formulazione di Ferdinand Reech del parametro che oggi è da tutti associato al solo nome di Froude, è opportuno annotare che, nel 1852, l'inglese usò lo stesso princìpio generale, utilizzando i risultati dei *test* condotti con i vascelli con propulsione ad élica, che rendevano non più necessaria la complessa e limitata sperimentazione di scafi trainati:

"*I risultati sono suscettibili di applicazione nel caso di tutti i vascelli di forma simile, ma di dimensioni sia più grandi che più piccole, se è presa la precauzione nel considerare una velocità adottata per rispondere ad un altro caso, variata secondo la radice quadrata della dimensione lineare* dei *vascelli.*"



Un ingegnere idraulico tedesco di questo periodo, Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (Königsberg 1797 - 1884), caratterizzò l'energia dissipata dalla resistenza della prua, ma – come per Reech – il suo contributo restò ignorato.

Hagen nacque a Königsberg, dove ricevette l'educazione godendo del privilegio di un diretto contatto con il matematico Bessel; viaggiò, per un anno e mezzo, attraverso l'Europa centrale, dove dedicò particolare attenzione alle strutture idrauliche; tornato a Berlino, gradualmente si impegnò in tre attività: ingegnere del governo, insegnante e scrittore.

Uno dei suoi maggiori lavori pratici fu il progetto della base navale di Wilhelmshaven e la sua maggiore pubblicazione fu il trattato, in più volumi, sull'Ingegneria Idraulica "*Handbuch der Wasserbaukunst.*"; la prima delle sue numerose edizioni apparve a Berlino nel 1841.

Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen fu molto interessato a tutto ciò che potesse riguardare l'Idraulica; sui problemi di resistenza nelle tubazioni e nei canali a pelo libero scrisse un grande numero di documenti in varie epoche della sua vita.

È singolare verificare che i due testi contenenti i suoi più originali contributi in Idraulica trattarono argomenti che lo stesso autore poi ignorò nelle sue pratiche realizzazioni.

Nel primo di questi, "*Ueber die Bewegung des Wasser in engen cylindrischen Röhren.*", del 1839, descrisse un'estensione dello studio condotto da Gerstner nel 1796 sull'effetto della temperatura sulla resistenza del flusso attraverso le tubazioni di piccolo diametro. I *test* furono condotti in tubi in ottone trafilato di diametro 1.4, 2.0 e 3.0 millimetri e di lunghezza compresa tra i 47 ed i 100 centimetri, variando la temperatura in un intervallo di 64° Reaumur (circa 80 ° Centìgradi) ed il carico idraulico da 2,5 a 40 centimetri; ogni tubo era collegato ad un serbatoio attraverso un sistema che garantiva un flusso costante e con un efflusso sommerso in un grande volume di acque provvisto di un sistema di smorzamento delle onde; il càrico idraulico era letto in continuo sìa a monte che a valle. Hagen rilevò che la velocità del flusso variava linearmente secondo strati cilindrici concentrici, da zero, in prossimità della parete, sino al valore massimo nel centro del tubo.

Sulla base di questo assunto, lo scienziato tedesco riuscì a dedurre una relazione tra la perdita di carico e la temperatura del fluido, sebbene cadde nell'errore di non considerare la perdita di carico concentrata all'imbocco della tubazione; tuttavia, poichè il diametro dei tubi e le velocità

del flusso erano abbastanza piccoli e l'accuratezza delle misure assai elevata, l'errore nelle sue empiriche valutazioni fu irrilevante, tant'è che i valori calcolati nei suoi esperimenti si accordano all'interno dell'uno per cento con i dati attuali.

Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen non è degno di nota soltanto per questo primo empirico approccio alla legge che lega la perdita di carico alla temperatura - cioè, oggi noi sappiamo, la variazione della viscosità con la temperatura - e che oggi è conosciuta con un nome di un altro studioso, ma è mérita d'essere citato anche per la conclusione del suo testo che contiene la prima indicazione dell'esistenza di due differenti tipi di moto:

"Queste leggi dovunque si applicano soltanto a condizione che la resistenza sia grande abbastanza da mantenere sotto sforzo l'intera quantità di acqua nella tubazione, così che la pressione dell'acqua possa trasmettersi direttamente. Ma una volta che tale vincolo è superato, cosa che avviene in tutte le grandi condotte, la pressione necessariamente per superare la resistenza della tubazione può non essere propagata direttamente più a lungo, e questo avviene invece in bruschi movimenti che l'acqua assume nella cessazione di quanto necessariamente la forza viva sviluppa. Quindi appare sotto queste circostanze ancòra un altro membro nell'espressione di ***h*** *che ha la seconda potenza dello scarico e allo stesso tempo la lunghezza del tubo come coefficiente, e che presto assume un più grande valore rispetto agli altri. L'esatta analisi dei risultati prodotta in questo caso appare quindi offrire grandi difficoltà; in ultimo io non ho avuto successo nel chiarire sufficientemente le peculiarità che sono qui evidenti.*"

Hagen, cioè, si rese conto che le sue analisi erano compatibili fino a quando il fluido manteneva un moto nel quale con le particelle che lo compongono procedono secondo trajettorie rettilinee e, per questo, parallele; oggi è detto '*Moto Laminare*'. Oltre un certo lìmite, determinato anche dalle dimensioni della tubazione il fluido si muove anche *in bruschi movimenti*, cosicchè una parte significativa della propria energìa è dissipata in altri effetti oltre al movimento; oggi diciamo che il fluido si muove in '*Moto Turbolento*'; situazione assai più frequente nella realtà.

Hagen continuò la sua ricerca sulle differenze tra i due modi di flusso, utilizzando tubi di vetro per consentire l'osservazione di particelle sospese di ambra e riscaldando l'acqua per accentuare la transizione da un moto all'altro. Questi esperimenti furono descritti in un documento del 1854, "*Ueber den Einfluss der Temperatur auf die Bewegung des Wasser in Röhren.*", dal quale è tratta la seguente affermazione:

"*Quando davanti ai miei occhi ottengo invariabilmente il getto in efflusso, io noto che il suo apparire non è sempre lo stesso. Alle piccole temperature esso rimane invariato, come se fosse una solida bacchetta di vetro. D'altra parte, appena l'acqua viene decisamente scaldata, ecco rilevanti fluttuazioni di breve periodo si stabilizzano, che quando il riscaldamento viene ridotto nonostante quindi l'altissima temperatura non scompaiono completamente. . . . Ad ogni ripetizione dell'esperimento avviene lo stesso fenomeno, e quando finalmente ho ridotto questo in un riepilogo grafico, io trovo che le più brusche fluttuazioni prendono luogo nella porzione della curva dove la velocità decresce con l'incremento della temperatura.*"

Hagen infine riuscì, inoltre, a correlare le sue misure di resistenza alla turbolenza del flusso nella forma:

$$h \cong \frac{\rho \cdot LV^{1,75}}{D^{1,25}}$$

Sebbene Hagen non fu in grado di giungere a definìre un generale parametro di similitudine che esprimesse la viscosità del fluido e le sue variazioni con la temperatura, è chiaro che anticipò molte delle scoperte oggi attribuìte ad Osborne Reynolds.

A sfavore di chi rivéndica il primato di Hagen sulla paternità dei *test* di resistenza dei fluidi con il variare della temperatura, nello stesso periodo, a Parigi, fu condotta una ricerca estensiva ad òpera di Jean Léonard Marie Poiseuille (Parigi 1799-1869).

Poiseuille non era un ingegnere ma un medico, interessato ad esperimenti di fisiologia.

In una serie di documenti, iniziati nel 1828, discusse la sua ricerca sulla potenza di pompaggio del cuore, sul conseguente flusso del sangue nelle vene e nei capillari, utilizzando emodinamometri e viscosimetri di sua invenzione.

Lo scienziato francese si occupò anche della viscosità dei fluidi in generale e della resistenza al flusso attraverso le condotte. L'ultimo di questi argomenti fu affrontato nel testo pubblicato, nel 1840, sul *Comptes Rendus,* della *Académie royale des scienses,* sotto il titolo "*Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de trés petits diamétres*".

In nessun passo di questo lavoro Poiseuille indicò di conoscere il lavoro svolto da Hagen, ma per una più appropriata (o fortunata?) scelta del diametro dei tubi (da 0,029 a 0,142 millimetri), le perdite di carico nell'entrata e nell'uscita nei suoi esperimenti furono resi trascurabili anche per tubazioni lunghe meno che un centinaio di volte il loro diametro e per carichi del valore pari alla pressione di una colonna di sei metri di mercurio.

Le misure di Poiseuille, forse anche meno precise di quelle di Hagen, portarono alla relazione seguente:

$$Q = B(1 + \alpha T + \beta T^2) \cdot \frac{hD^4}{L}$$

I valori calcolàti da Poiseuille sono in accordo con quelli utilizzati oggi, con uno scarto di circa 1,5%. Egli fu anche persuaso, dalla Commissione della *Académie* che esaminava i suoi documenti, a condurre esperimenti supplementari con etere e con mercurio. Mentre i test fatti con l'etere portarono a similari funzioni di relazione, i pochi condotti con il mercurio furono inconclusivi – dai quali ancòra persiste il convincimento (smentito sperimentalmente da Warburg nel 1870) che il mercurio, che non bagna il vetro, obbedisca ad una differente legge di resistenza.

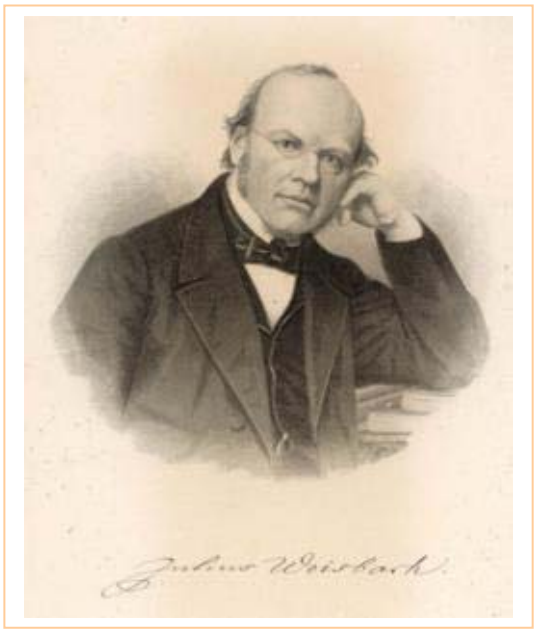
Si deve ora sottolineare la derivazione analiticamente corretta di quella che è chiamata oggi *Legge di Poiseuille* che non fu definìta se non nel 1858÷1860, con un lavoro indipendente, da due fisici, Franz Neumann (Königsberg 1798-1895) ed Eduard Hagenbach (Basilea 1833-1910).

Questi due scienziati giunsero alla conclusione che la viscosità partècipi alla distribuzione parabolica della velocità, anche valutando la correzione dovuta alla componente dell'energia cinética, correzione a volte chiamata *Correzione di Hagenbach*, anche se questi fece un errore di valutazione che invece non fece Neumann. Correttamente oggi è attribuìta ad Hagenbach, invece che ad Hagen, la definizione della legge '*Della resistenza del moto laminare*'.

Jean François d'Aubuisson de Voisins (1769-1841) è da alcuni ritenuto aver scritto il primo trattato di Idraulica a scopo didattico: "*Traité de l'hydraulique à l'usage des ingénieurs.*", pubblicato a Parigi nel 1834, tradotto in inglese ed in tedesco e soggetto a numerose ristampe. A dispetto della sua eccellente riflessione per quei tempi, fu semplicemente uno di una serie di libri in rapido sviluppo su un argomento che era, di per sé stesso, sottoposto a continui progressi.

Anche D'Aubuisson è a volte considerato il primo ad aver scritto l'equazione della resistenza così come oggi è nota ed utilizzata. Tuttavia il principale motivo per il quale egli è conosciuto è l'aver notato (anche se ciò lo fecero altri prima di lui) che la prima potenza della velocità poteva essere ignorata in paragone alla seconda.

Il trattato che ebbe un grande effetto sui corsi di Idraulica fu quello scritto dieci anni più tardi da Julius Weisbach (1806-1871), nativo della Sassonia, che aveva studiato a Greiberg, Göttingen e Vienna, e che in seguito divenne un insegnante di scienze matematiche applicate alla Scuola di Miniera di Freiberg.



I principali interessi di Weisbach furono nel campo dell'Idraulica e della Geodesìa; in entrambe queste materie pubblicò numerosi testi, ma il suo più importante lavoro fu l'òpera, in tre volumi, "*Lehebuch der Ingenieur – un Maschinen – Mechanik.*", la cui prima edizione fu pubblicata nel 1845 e che fu ripetutamente ampliata e tradotta in altre lingue, escluso . . . il francese.

Se Bossut è ricordato per aver introdotto l'insegnamento della Meccanica dei fluidi come argomento della scuola di Ingegnerìa, fu Weisbach che modernizzò la didattica dell'Idraulica e che scrisse un'originale ed integrale sezione di Ingegneria Meccanica.

Il Capitolo VII del volume sulla Meccanica teòrica, trattò i seguenti argomenti: teoria matematica del moto, scienza fisica del moto, statica dei corpi rigidi, elasticità e durezza dei materiali, dinàmica dei corpi rigidi e dinàmica dei fluidi. Sebbene quest'ultima fu la sua prima passione, non le dedicò uno spazio sproporzionato. Presa in sé stessa, la parte riferita ai fluidi segnò la via per molti futuri testi – anche per l'esteso utilizzo di numerosi esempi illustrativi – e la sua influenza è evidente ancòra al giorno d'oggi.

Nell'òpera di Weisbach gli argomenti sui fluidi furono più limitati all'Idraulica piuttosto che all'Idrodinàmica, intesa, dallo scienziato tedesco, come applicazione ingegneristica della stessa Idraulica.

Il tredicesimo capitolo venne scritto sui seguenti argomenti: equilibrio e pressione dell'acqua nei vasi; equilibrio dell'acqua con altri corpi; azioni molecolari dell'acqua; equilibrio e pressione dell'aria; teoria dell'efflusso dell'acqua; contrazione del getto; flusso dell'acqua attraverso tubazioni; resistenza, espansione e contrazione dell'efflusso; efflusso sotto pressioni variabili; efflusso di aria e di altri fluidi; flussi in canali e fiumi; misura dell'acqua; sviluppo della resistenza dei fluidi.

Altre sezioni furono copiosamente illustrate con diagrammi xilografati (frequentemente mutuati o copiati ad òpera di autori successivi) che mostrarono un acuto intùito nell'illustrare il modello di flusso. Il trattamento di ogni sezione fu così completo che potè passare inalterato (a volte soltanto con un aggiornamento dei dati) da una ristampa all'altra nei testi di Idraulica sino al secolo XX.

Non soltanto il lavoro di Weisbach rappresenta il miglior riferimento delle nozioni a suo tempo disponibili, ma in molti casi riporta integrazioni e valutazioni direttamente frutto del suo originale lavoro sperimentale. Alcuni dei suoi dati originali , infatti, non sono più stati miglioràti e sono tuttora utilizzati.

Weisbach fu un convinto sostenitore della necessità di utilizzare coefficienti adimensionali e fu il primo, per esempio, a scrivere l'equazione di resistenza nella forma:

$$h = \xi \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

In questo egli è qualche volta accusato di aver semplicemente ridotto l'equazione di Prony nella forma:

$$h = (\frac{a}{V} + b) \cdot \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

ma potrebbe essere sottolineato che Weisbach dimostrò che il coefficiente ζ variava non solo con la velocità (con esponente 0,5 piuttosto che uno) ma anche con il diametro e con il materiale che costituisce la parete della tubazione. Tuttavia nel riscrivere la sua equazione, per usarla nei canali a pelo libero, nella forma che ricorda la versione di Prony della formula di Chezy,

$$V = \sqrt{\frac{A}{\xi' LD} 2gh}$$

. . . Weisbach seguì la tesi di Prony nel ritenere ζ variante con la velocità soltanto.

A Weisbach il mondo dell'Idraulica deve anche l'estensione (nel 1841) dell'equazione d'onda per includere la velocità di arrivo:

$$q = \frac{2}{3} C_c \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{V^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{V^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

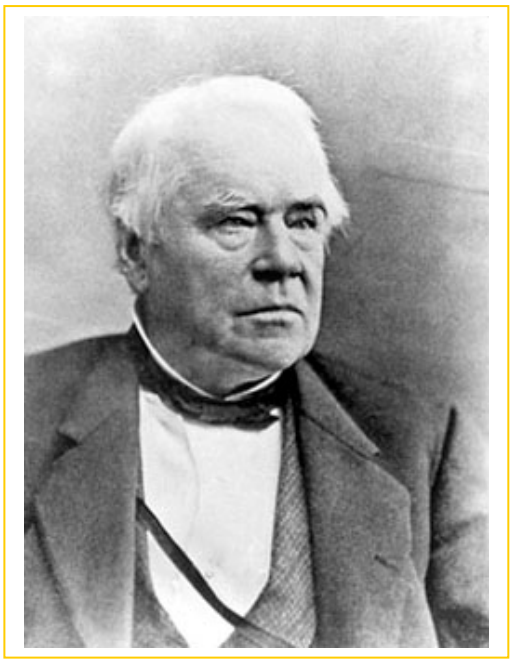
Un'ultima significativa notazione per chiudere il racconto del XIX sécolo: fu Julius Weisbach che per primo riscrisse e diffuse la formula di Daniel Bernoulli nella forma oggi comunemente accettata.

Prove di laboratorio, anàlisi matemàtiche, interpretazioni fìsiche, all'inizio del XIX sécolo sono ormai alla portata di sempre più numerosi ricercatori, che portarono l'Idraulica, come tutte le altre scienze, ad essere pronta per il 'salto' che la consoliderà nella forma che oggi tutti conòscono.

* * *

Cap. 18 – I primi passi dell'Aerodinàmica

Eccetto Benjamin Franklin, del quale abbiamo già citato i primitivi test di resistenza e di Idrodinàmica con battelli trascinati, il primo sperimentatore americano di una certa importanza, a nostro giudizio degna di notazione nel campo dell'Idraulica, fu James Bicheno Francis (Southleigh, Inghilterra 1815 - Lowell, Massachussetts1892).



Inglese di nascita, Francis decise di emigrare negli Stati Uniti in giovane età, giungendo a Lowell, nel Massachussetts, dove fu assunto in un gruppo di compagnìe manifatturiere, del quale divenne in séguito direttore, che controllava le acque del fiume Merrimac.

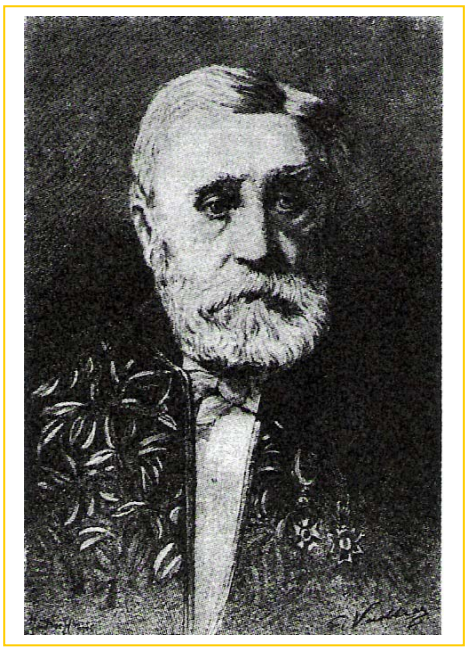
Queste compagnìe avevano acquisìto i diritti di costruzione di turbine disegnate, nel 1844 da Uriah A. Boyden.

Grazie all'intervento di Francis queste macchine furono migliorate nelle prestazioni, diventando le prime di un tipo che ora porta il suo nome. Il disegno originale era simile a quello di Fourneyron, ma con alcune modifiche che si rivelarono sostanziali: fu introdotto un condotto di invito conico; la guida delle pale era inclinata; la girante era a flusso centrìpeto; il vano di uscita della corrente era seguìto da un semplice diffusore sommerso, quasi dieci anni prima del brevetto di Fourneyron del suo modello di diffusore, del quale vennero proposte soluzioni còniche sempre più efficienti.

Un'istallazione in grande scala fu sviluppata, per gli esperimenti, in uno dei canali di Lowell; come descritto nel documento di Francis "*Esperimenti idraulici del Lowell*.", la cui prima edizione fu pubblicata a Boston nel 1855 e poi, in nuova edizione, nel 1868.

Una turbina derivata dall'ultimo modello ideato da Francis venne brevettata, nel 1838, da Samuel B. Dowd, e Francis stesso dubitò che essa differisse in modo significativo da giustificare un nuovo brevetto, del quale egli non avesse parte.

Ad ogni modo, completato il processo di miglioramento delle prestazioni, il modello a flusso centrìpeto venne riconosciuto come *Turbina Francis*, rendendo giustizia al suo originale ideatore. Nel 1880 James Bicheno Francis venne onorato con l'elezione alla Presidenza della Società Americana di Ingegneria Civile.



In Francia, l'Idraulica non conosceva alcuna interruzione nella propria dominante tradizione della Scuola di Idraulica che, verso la fine del XIX sécolo, continuò ad essere dominata dagli ingegneri della '*Ecole des Ponts et Chaussées*', tra i quali Adhémar-Jean-Claude de Barré de Saint Venant (Villier en Brie1797 – Saint Ouen 1886) fu certamente il più stupefacente.

Educàto alla *Ecole Polytechnique* ed alla *Ecole des Ponts et Chaussées*, entrato di diritto nel *Corps des Ponts et Chaussées*, se ne distaccò nel 1848, per dedicarsi all'insegnamento, all'Istituto Agronòmico di Versailles (dal 1848 al 1854), alla ricerca ed alla redazione di trattati in diversi campi della Meccanica, della Geometrìa Analìtica e della

Matemàtica.

Dal 1868 fu nominato tra i quaranta membri della *Académie Royale des Scienses*.

Lavoratore infaticàbile, Saint Venant lasciò centosessanta testi e numerosi manoscritti che furono pubblicati postumi; dedicò particolare attenzione al problema dell'elasticità, ed in tale campo diede il suo maggior contributo. Scrisse anche di Idraulica, con particolare attenzione al moto d'onda, al moto nelle tubazioni e nei canali a pelo libero, alle correnti gradualmente variate ed ai flussi d'aria. Tuttavia, come spesso avviene a coloro che si occupano in modo eccelso in molti campi, nessuna delle pubblicazioni di Saint Venant, sul moto dei fluidi, ha rilevanza pari a quelle in altre discipline.

Delle sue scoperte parleremo con dettaglio nel prossimo Capitolo; per il momento ci limitiamo a ricordare i seguenti contributi minori ma non meno importanti: l'analisi dell'orifizio sònico; l'introduzione del termine 'celerità' per distinguere la velocità di propagazione dell'onda rispetto alla velocità del fluido nella quale l'onda si forma; la differenziazione tra i fiumi ed i torrenti in termini di pendenza critica nel caso di correnti uniformi.

Un altro ricercatore appena più giovane di Saint-Venant fu Arsene Jules Emile Juvenal Dupuit (Fossano, Cuneo 1804-Parigi 1860), nacque, da genitori italiani, a Fossano, in provincia di Cuneo, restituìta al regno dei Savoia nel 1814 con il Trattato di Parigi.

Come Saint Venant, Dupuit ricevette la propria educazione alla *Ecole Polytechnique* e poi alla *Ecole des Ponts et Chaussées*; entrò anch'egli, alla fine degli studi, nel *Corps des Ponts et Chaussées* dove, diversamente da Saint-Venant, rimase attivo per il resto della sua vita, diventandone Ispettore Generale; nonostante questo lavoro prettamente tecnico ed operativo, trovò il tempo di scrivere ampiamente su diversi argomenti tecnici.

Nel 1848 egli pubblicò a Parigi il suo "*Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement de eaux courantes.* », la più notevole parte del suo trattato sui canali a *pelo libero*. Sebbene le sue serie di integrazione delle equazioni del flusso gradualmente variato svilupparono numerose approssimazioni (larghezza infinita, resistenza costante ed accelerazione trascurabile), correttamente descrisse il profilo della superficie libera per i canali orizzontali, moderatamente e fortemente inclinati, riferito alla linea perpendicolare alla profondità, ed illustrò gli effetti delle espansioni e contrazioni dei canali e dei cambiamenti della pendenza del letto.

Saint Venant, nel suo testo "*Formules et tables nouvelles pour la solution des problémes relatifs aux eaux courantes.* », pubblicato negli *Annales de mines* del 1851, migliorò grandemente le serie numeriche di soluzione dell'equazione del flusso gradualmente variato con l'inclusione dell'effetto dell'accelerazione e la predisposizione delle tavole per facilitare l'uso dei risultati.

Ma fu l'ancòr più giovane contemporaneo dei due, Jaques Antoine Charles Bresse (Isére, Vienna 1822-Parigi 1883), che finalmente completò l'integrazione analiticamente.

Bresse, nativo di Isére vicino a Vienna, entrò nel *Corps des Ponts et Chaussées* alla fine degli studi, come fecero Saint Venant e Dupuit, ma poi ottenne la cattedra di Matemàtica.

Il suo principale interesse, come per Saint-Venant, fu il campo dell'elasticità; ma il suo libro "*Cours de méchanique appliquée.*", del 1860, contiene sia la prima corretta formulazione del

risalto idraulico, dalla quale Bresse dedusse tabelle ancòra riprese in libri in libri su questo argomento

In connessione con questi contributi sui canali a pelo libero di Dupuit, Saint-Venant e Bresse, ricordiamo il contributo di colui che introdusse la nomenclatura ancòr oggi utilizzata: Emmanuel Joseph Boudin (1820-1893), un membro del *Belgians Corps des Ponts el Chaussées* e professore alla *Ecole du Génie Civil of Gant*.

A questo punto è bene illustrare il campo delle ricerche che tanto hanno impegnato questi ùltimi quattro scienziati: la determinazione del profilo di una corrente a *pelo libero*, cioè la quota e la forma che assume la superficie dell'acqua in movimento.

Quota e forma della superficie che altro non sono se non il risultato della quantità di acqua che trànsita; la portata, espressa in unità di volume per unità di tempo (i più usati: m^3/sec e litri/sec).

A questo punto della nostra Storia non dovrebbe essere difficile affermare che, a prescindere da qualsìasi considerazione scientifica, è evidente che l'acqua, mossa dalla sola accelerazione di gravità, si muova secondo quantità dipendenti: dall'inclinazione del canale, dalla forma della sezione (ben espressa attraverso il *Raggio Idraulico*) e dalla scabrezza della superficie della sezione bagnata; Chézy, per primo, legò queste grandezze in modo ormai stabile.

Mentre si può conoscere la quantità d'acqua che trànsita, calcolandola, meno immediato è lo stabilìre quale forma assuma, nel movimento, la superficie, cioè il *pelo libero*; il problema non è di poco conto ed è in grado, ancor oggi, di mettere in difficoltà più di un 'addetto ai lavori'.

Per prima cosa, a titolo d'esempio, possiamo osservare che la conoscenza della forma del pelo libero, ed in particolare dell'altezza dal fondo, consente di valutare, anche nella fase progettuale, se le sponde del canale sìano sufficienti a contenere le acque, con l'adeguato màrgine di sicurezza, in Idraulica detto *franco*; ma questo aspetto è soltanto uno e forse quello di minor importanza, anche se comunque sempre essenziale!

Gli studi di Saint Venant, Dupuit, Bresse, Boudin portarono, infatti, a scoprire interessanti caratteristiche delle correnti a *pelo libero*.

L'acqua, per muoversi in un canale in pendenza, consuma una quantità di energìa che dipende dalle condizioni 'al contorno'.

Nella situazione ideale, il consumo di energìa è pari alla resistenza opposta al movimento; non v'è altra dissipazione; la *Linea dei Carichi Totali* ed il *pelo libero* sono, in tal caso, paralleli al fondo; una situazione che si verifica soltanto nel caso ideale di canale son sezione circolare (ovvero di forma cilindrica) e di lunghezza infinìta; il tale situazione Boudin indicò il movimento del fluido con il términe di *Moto Uniforme*.

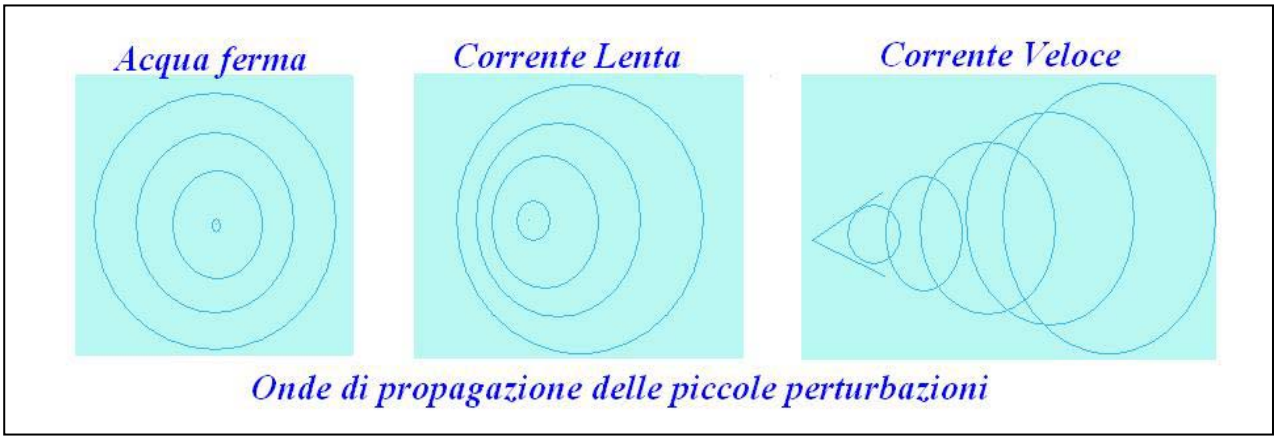
Nel *Moto Uniforme*, la corrente, quindi, 'consuma' soltanto quella parte di energìa potenziale corrispondente alla variazione di quota rispetto alla quota 'zero' di riferimento; ma, come già detto, si tratta di una situazione ideale, teoricamente mai verificata, anche se costituisce il riferimento al quale tendono i fluidi in movimento.

È infatti possibile, i qualsìasi caso e per ogni portata assegnata, calcolare l'*Altezza di Moto Uniforme*, indicata usualmente con h_0, e l'*Altezza Critica*, indicata con la lettera k; quest' ùltima rappresenta uno stato della corrente, instabile, nel quale l'acqua, in movimento, ha la minima energìa rispetto al fondo.

Altezza di Moto Uniforme ed *Altezza Critica* costituiscono, così, un riferimento per meglio 'collocare' la corrente in esame all'interno di due grandi categorìe: *Correnti Lente* e *Correnti Veloci*, nelle quali bàlzano evidenti due differenze:

- nelle *Correnti Lente* le piccole perturbazioni si diffondono a velocità relativa (la *celerità* di Saint Venant) superiore alla velocità della corrente; nelle *Corrrenti Veloci*, la *celerità*

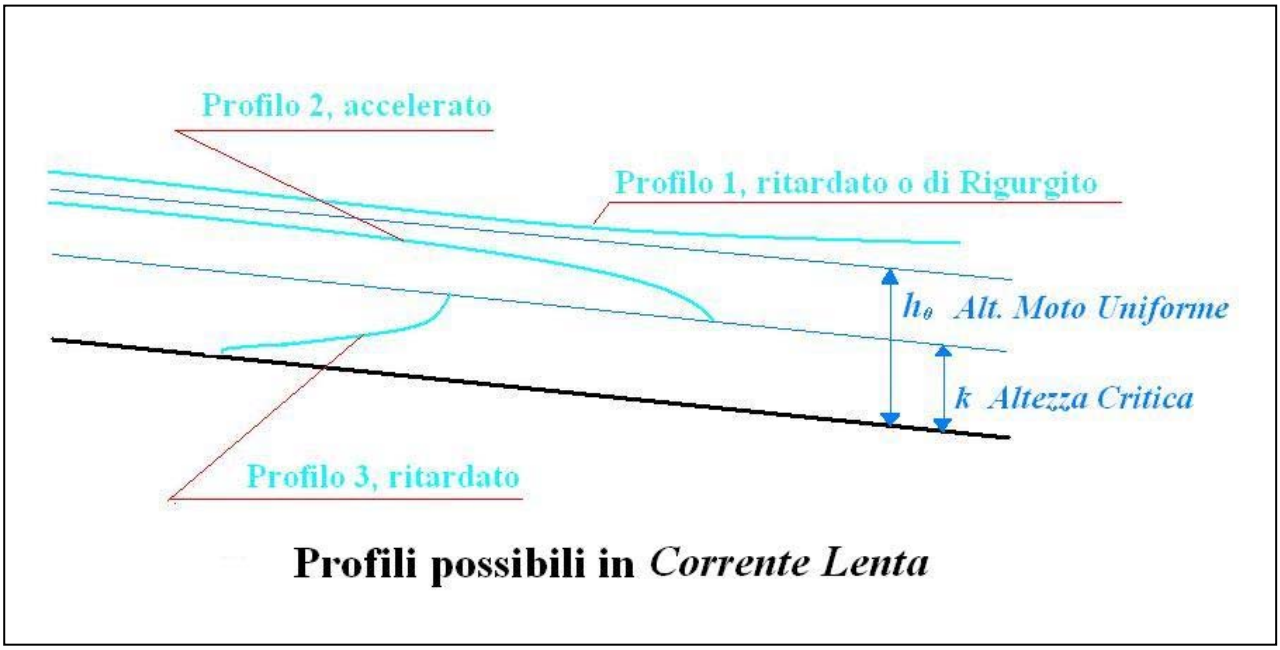
è minore del moto. Ne consegue che le onde concentriche create da un sasso che cada nell'acqua ferma, sono in grado di risalire la *Corrente Lenta* ma non la *Corrente Veloce*;

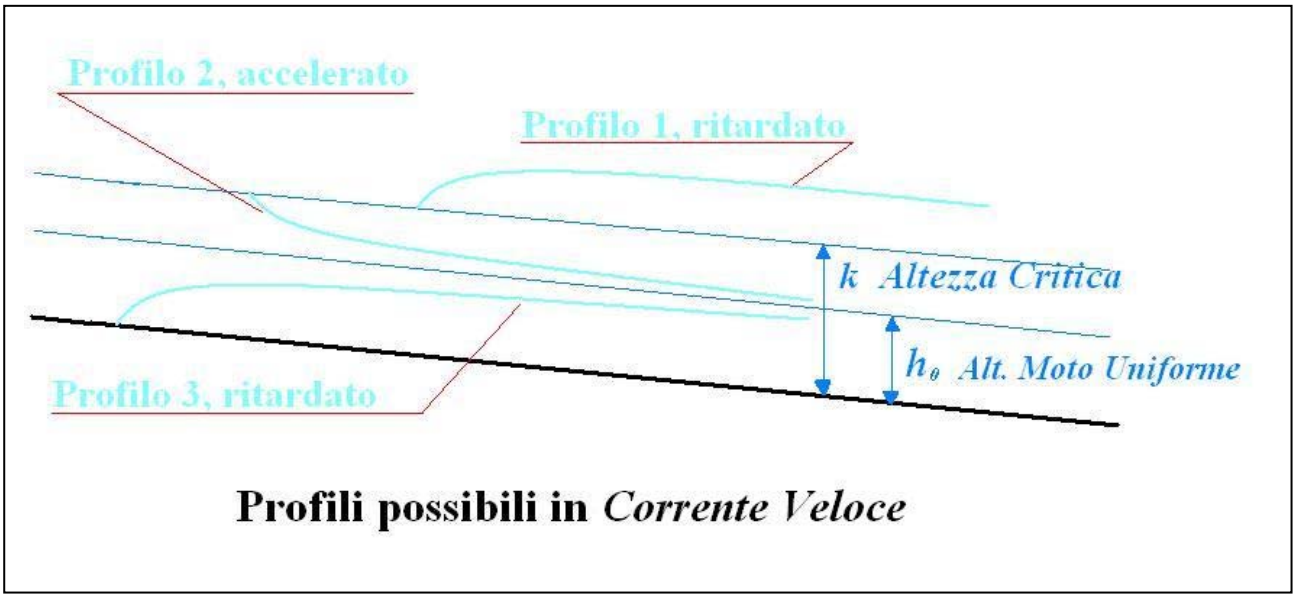


- la *Corrente Lenta* assume caratteristiche determinate dalle situazioni che ne lìmitano il flusso in sezioni poste verso valle; la *Corrente Veloce*, al contrario, è definìta da condizioni poste a monte.

Lenta o *Veloce*, la corrente ha comunque, nella maggioranza dei casi, una sola natura: è *Permanente* e *non Uniforme*. Si parlerà quindi, nella realtà di *Moto Permanente*, in *Corrente Lenta* o *Veloce*, tendente, in alcuni casi, al *Moto Uniforme* ma mai in questo identificabile strettamente.

Tutto quanto qui osservato portò Boudin, in una testo pubblicato a Gant nel 1861, dal titolo "*De l'axe hydraulique des cours d'eau contenus dans un lit prismatique et de dispositifs réalisant, en pratique, ses formes diverses.* », all'identificazione di due gruppi di profili possibili, distinti a seconda che la corrispondete altezza di *Moto Uniforme* fosse maggiore o minore di dell'*Altezza Critica*; all'interno di questi due gruppi distinse i tipi 1, 2 e 3, rispettivamente nel caso che la profondità fosse maggiore di quella normale e di quella critica, intermedia tra esse o minore di entrambi.

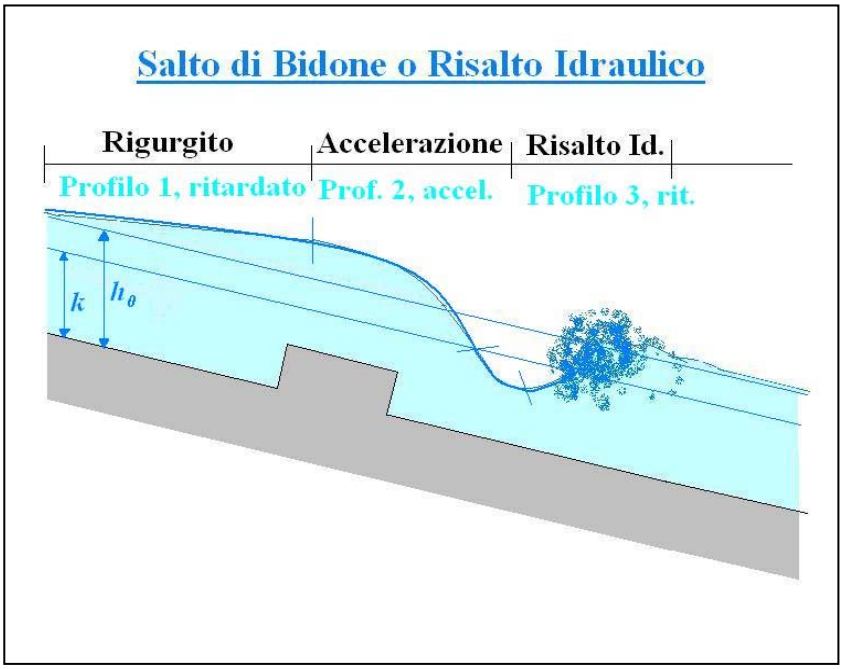




Tuttora le conclusioni dello scienziato belga sono valide: ancòra oggi i possibili profili che assume il pelo libero si possono riconoscere nei casi individuati da Boudin.

Le illustrazioni che séguono li schematizzano, esagerando nelle pendenze: nella realtà le differenze di altezza si misurano spesso in centimetri ogni chilòmetro, quindi non percettibili all'occhio. Soltanto nei pressi di brusche variazioni di velocità, in particolare nel passaggio attraverso lo stato critico, si possono intuire queste forme.

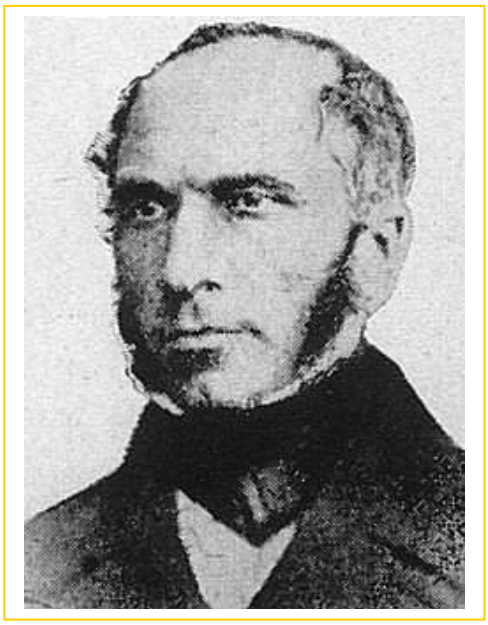
Nel caso del Risalto Idraulico, o salto di Bidone, visto nel Capitolo 17, possiamo ora individuare alcuni di questi profili, in *Corrente Lenta*, riproponendo la medésima illustrazione:



Ecco allora che la risoluzione delle equazioni differenziali del moto dei fluidi permise di 'disegnare' le forme della superficie del *pelo libero*, che restò comunque un risultato più che un obiettivo nella ricerca, finalizzata alla definizione della miglior formula che interpretasse il moto delle correnti.

Laddove, con il términe 'miglior formula' intendiamo, a memoria di quanto scritto nel Capitolo 14, i risultati, differenti ma di valenza spesso equivalente, ai quali giunsero gli studiosi di Idraulica che, in alcuni casi, subirono il sospetto di plagio o di slealtà laddove le differenze nelle proprie formule, trattandosi dello studio del medésimo problema, apparivano sìmili.

Tale incidente capitò ad un altro illustre idraulico francese, padre, tra l'altro, dello studio del moto dei fluidi attraverso materiali porosi, così detto, per l'appunto, *Moto di Filtrazione*.



Parliamo di Henry Philibert Gaspard Darcy (Digione 1803 - 1858), ricercatore anch'egli proveniente dal *Corps des Ponts et Chaussées*, nella prima metà dell'Ottocento.

Dopo aver seguìto la formazione scolastica nella Capitale francese, Darcy tornò e rimase per sempre a Digione, dove svolse l'attività professionale nel campo della Pubblica Amministrazione. Il suo maggior lavoro fu il progetto e l'esecuzione dell'acquedotto municipale della sua città natale, che non solo funzionò a lungo in modo perfetto, ma che gli diede anche l'occasione di condurre una serie di studi sul flusso dell'acqua nelle tubazioni; il successo di questa sua òpera gli valse l'incarico di progettare il nuovo acquedotto di Bruxelles.

I risultati di questi numerosi esperimenti sulle tubazioni furono pubblicati nel 1857 sotto il titolo "*Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux.*".

Darcy utilizzò ventidue condotte di differenti materiali: ferro battuto, piombo, ghisa, acciaio con asfalto e vetro; con diametri variabili, da circa 12 a 460 millimetri, ed in differente stato di manutenzione. Il francese riuscì a dimostrare che la resistenza dipendeva sìa dal materiale, del quale erano composte le tubazioni, sìa dalle condizioni nelle quali si trovavano le pareti della condotta (più o meno liscia e con o senza incrostazioni).

Darcy prese quale riferimento la formula elaborata dal barone Riche de Prony, nella quale si ipotizzava che la resistenza al moto fosse dovuta alla somma di due término, nel primo dei quali il valore della Velocità compariva alla prima potenza e, nel secondo, al quadrato. Così è che Darcy giunse a questa considerazione:

"*Se si utilizzano tubazioni con depositi o si imprime al flusso una velocità molto elevata – ovvero, se si aumenta la parte della resistenza dando più effetto alle asperità – il primo termine in* V *scompare ed il coefficiente in* V^2 *aumenta: quindi l'ultimo è almeno in parte relativo alle asperità.*"

Tuttavia egli avvertì, almeno qualitativamente, che giocasse un ruolo importante, da comprendere nella ricerca, lo strato del fluido a contatto con le pareti, come si desume dalle seguenti sue considerazioni:

"*Se si utilizzano tubazioni molto liscie, di piombo, ricoperte di bitume vetroso, ecc. . . il coefficiente del fattore* V^2 *diminuisce continuamente tanto quanto cresce la lisciezza. Ma questa riduzione, ciononostante, è lontana dall'apparire proporzionale al grado di lisciezza ottenuto. Credo sìa inutile dire che l'influenza delle asperità, trascurabili agli occhi, persista a causa della natura molecolare dell'acqua; questa spiegazione non mi pare soddisfacente. In effetti, il termine* V^2 *non sembra corrispondere soltanto alla resistenza causata dalle asperità, ma anche prodotta dallo strato di fluido prossimo al contorno.*"

Perciò Darcy propose per tubi lisci una formula di resistenza del tipo:

$$R = \left(\frac{a+b}{D^2}\right) \cdot V + \left(\frac{b+c}{D}\right) V^2$$

Mentre per le tubazioni rugose, cioè con asperità non "*trascurabili agli occhi*", egli raccomandò di considerare soltanto l'ultimo termine, con qualche eventuale aumento dei valori del coefficiente.

Proprio questa espressione produsse su Darcy l'effetto d'essere, per sempre associato, a Julius Weisbach, acquisendo l'usuale nome di 'Formula di Darcy-Weisbach', sebbene per primo fu il tedesco ad esprimerla, in forma sìmile ma non idéntica e con l'utilizzo, a differenza del francese, del coefficiente adimensionale ζ.

Comunque Darcy diede un inequivocabile contributo all'Idraulica riprendendo lo studio della distribuzione delle velocità nelle tubazioni, ricerca direttamente conseguente alle sue osservazioni sull'esistenza di uno strato prossimo alle pareti, nel quale la velocità si approssimava a zero; il francese definì la seguente formula per calcolare la velocità assunta dal fluido ad una distanza r dal centro della sezione, dove la velocità è massima pari a v_{max}:

$$v = v_{\max} \cdot Cr^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{S}{D}}$$

Come già detto, Darcy per primo condusse rigorose ricerche nell'àmbito dello studio dei Moti di Filtrazione, cioè del movimento di un fluido attraverso un materiale permeàbile.

L'esempio più tìpico e più frequente è il moto dell'acqua nel sottosuolo, laddove costituìto da strati di materiali non compatti, significativamente, sabbie, ghiaie ed argille, prodotti dai depositi orogenétici nelle pianure alluvionali. Parte delle acque superficiali, percolando nel sottosuolo, incontrano questi differenti strati, ed in essi si infiltrano, saturandoli, e procedono poi secondo le condizioni al contorno di ciascuno (pendenza, permeabilità, estensione, . . .).

Il movimento che così si produce è anch'esso moto di un fluido, quindi governato da leggi dell'Idraulica, ma complicato dal fatto che esso avvenga attraverso i vuoti, tra loro collegati, interposti ai grànuli che compongono il materiale filtrante.

Ecco allora che si utilizzano términi proprî dell'Idraulica, come pendenza, cadente, piezométrica, pérdita di carico, . . .

I risultati degli studi su questi Moti di Filtrazione, condotti da Darcy, mostrarono che la pérdita di carico non fosse proporzionale alla radice quadrata della velocità.

Nel suo trattato, édito nel 1856, "*Les fontanine publiques de la ville de Dijon.*", Darcy enunciò la legge che oggi porta il suo nome (detta anche L*egge di Darcy-Ritter*), nella quale egli dimostra che la velocità di filtrazione v di un fluido in un corpo poroso (ad esempio: una corrente attraverso uno strato di sabbia) è direttamente proporzionale alla differenza delle quote dell'acqua all'inizio ed al términe dello strato poroso Δh ed inversamente proporzionale alla lunghezza l del percorso:

$$v = k\frac{\Delta h}{l}$$

dove k è una costante caratteristica del moto in ciascun materiale filtrante, del quale è detta *Permeabilità*.

Fu sulla base di questa scoperta che Arsene Jumes Emile Juvenal Dupuit, già incontrato in questo stesso Capitolo, nella riedizione del suo libro del 1848 dal titolo "*Traité théorique et pratique de la conduite et de la distribution des eaux.*", pubblicata nel 1865, riuscì a dimostrare la forma parabòlica della superficie 'libera', sebbene all'interno del materiale filtrante, quindi non certo a *pelo libero*, secondo la quale si dispone il livello delle acque soggette ad un moto di filtrazione.

Ma in questo trattato, Dupuit non si occupò soltanto di moti di filtrazione, occupandosi anche della capacità della corrente di un corso d'acqua di trasportare in sospensione materiali sedimentabili, seguendo così il primo che studiò questo aspetto, il connazionale Du Buat, circa cinquanta anni prima.

Dopo aver osservato che le particelle più fini tendevano a restare in sospensione più a lungo e che il numero ed il diametro delle particelle trasportate crescevano man mano che esaminava strati sempre più profondi della corrente, Dupuit concluse:

"*Le acque fluenti possono portare solidi in sospensione anche se questi possiedono maggiore densità di quella dell'acqua stessa. La capacità di sospensione dipende dalla relativa velocità dei flussi ed è maggiore dove maggiore è la velocità. In generale è relativa al valore di dv/dz, cosicchè gli strati inferiori possono portare solidi più voluminosi e numerosi. Ma la capacità di trasporto in sospensione di uno strato della corrente è limitata: infatti . . . può trovarsi trasportato soltanto un certo numero di solidi in un dato volume. Così, per ogni strato, c'è un caratteristico livello di saturazione*."

Dupuit così evidenziò il fenòmeno del trasporto dei sedimenti nella fase di sospensione, ma, sulla stessa strada, il primo dei suoi successori nel *Corps des Ponts et Chaussées*, Paul-Francois-Dominique du Boys (1847-1924), riprendendo l'analisi quantitativa, considerò anche il movimento dei sòlidi trascinati, dalla forza della corrente, sul letto del corso d'acqua.

Nel suo documento "*Le Rhòne et la riviéres à lit affouillable.*", pubblicato negli *Annales des Ponts et Chaussées* del 1879, du Boys giunse all'espressione:

$$Q_s = \chi F(F - F_0)$$

in cui Q_s rappresentava la quantità di sedimenti trasportati per unità di larghezza, χ un coefficiente di trasporto e F_0 l'intensità di trascinamento della parte del letto all'inizio del movimento. Sebbene le ipotesi non fossero realistiche, questo tipo di formula del trasporto solido sul letto dell'àlveo è stata usata da allora in poi come base per molti studi empirici.

Torniamo a Darcy, che, nonostante il grande riconoscimento ottenuto per il proprio lavoro a Digione, fu ingiustamente costretto a lasciare quella città a causa dei moti rivoluzionari del 1848; trasferitosi prima a Burges e poi a Parigi, egli comunicò attraverso una fitta e rigorosa corrispondenza, trattando di argomenti inerenti le strade e le pavimentazioni stradali.

Nel 1855 questo grande scienziato francese si ammalò, soffrendo di un crescente malessere di origine nervosa, che però non lo costrinse, almeno inizialmente, a desistere da alcuni esperimenti di Idraulica, condotti attraverso molte serie di *test* su canali a *pelo libero*, utilizzando una diramazione del canale Bourgogne a Digione, dove nel frattempo era rientrato, nel tentativo di trovare in questo campo il modo di dare un importante contributo nello studio del flusso nelle tubazioni. Cosciente di un rapido deteriorarsi delle sue capacità mentali, lavorò alacremente per

portare a término gli esperimenti che aveva programmato, ma fu a mala pena in grado dare le necessarie istruzioni all'assistente, che continuò il lavoro dopo la sua morte.

Questo assistente era Henri Emile Bazin (Nancy 1829 - Chênove 1917), che seguì, a Nancy, l'educazione ad òpera di un membro del *Corps des Ponts et Chaussées* per poi stabilirsi a Dijon nel 1854 dove incontrò Darcy con il quale richiese di poter lavorare ottenendo d'essere assegnato tra il personale addetto al suo laboratorio. Sperimentatore impeccabile, Bazin non solo completò l'originale programma di *test* di Darcy sui canali a *pelo libero*, ma li estese fino ad includere la propagazione delle onde nei canali stessi ed analizzando, con ottimo ésito, il problema dell'efflusso dagli stramazzi.

Bazin, nel 1875, fu promosso al grado di Ingegnere Capo del *Corps des Ponts et Chaussées* di Digione, con competenza estesa anche sul sistema del canale Bourgogne e, nel 1886, raggiunse al posto di Ispettore Generale del *Corps des Ponts et Chaussées* a Parigi. I suoi impegni non gli impedirono di continuare nella redazione di scritti scientifici (cominciò ancor prima del suo avvicinamento a Darcy) lasciandoci trentacinque testi.

Delle òpere di Bazin, due méritano particolare attenzione: "*Recherches hydrauliques I^a^ partie, recherches expérimentales sur l'écoulement del l'eau dana les canaux dècouvert; 2ª partie, recherches éxperimentales relative aux remous et à la propagation des ondes.* » pubblicata nel 1865 dall'Accademia delle Scienze sotto i nomi di Darcy e di Bazin ; "*Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir.*", una raccolta di articoli, èdita nel 1898, sull'efflusso dagli stramazzi, apparsi negli Annali del *Corps des Ponts et Chaussées* tra il 1888 ed il 1898.

Nel 1900 Bazin si ritirò dall'impiego al *Corps*, incapace di trovare finanziamenti per gli esperimenti che desiderava realizzare. Soltanto nel 1913 l'Accademia delle Scienze di Parigi tardivamente lo elesse Presidente.

La prima parte del trattato di Bazin sui canali a pelo libero contiene una ricchezza di nuove informazioni, presentate in un lucido stile completamente diverso dal suo usuale modo di parlare e discutere, caratterizzato da una timidezza quasi remissiva.

I *test* erano stati condotti in canali in cemento, legno, mattoni, ghiaia e roccia, con sezioni rettangolari, trapezie e semicircolari. Per le condizioni di moto uniforme è noto che – come nei *test* di Darcy sulle tubazioni – la resistenza dipendeva non solo dal tipo di contorno ma anche dalla forma della sezione. Infatti, laddove la formula di Prony indicava che:

$$R = \left(\frac{a+b}{V}\right)V^2$$

in séguito ai numerosi esperimenti di Darcy-Bazin si potè giungere alla forma:

$$R = \left(\frac{a+b}{R_i}\right)V^2$$

dove, naturalmente, R_i rappresenta il *Raggio Idraulico*, ed i due coefficienti *a* e *b* dipendono dalle caratteristiche del materiale costituente l'àlveo. I risultati prodotti da questa espressione erano compresi tra la metà ed il doppio di quelli ottenuti con la formula di Prony.

Su questo fatto è opportuno citare una considerazione di Bazin:

"*Questi due coefficienti non sono, è vero, completamente indipendenti dalla pendenza; ma essi variano con limiti assai più stretti di quelli della formula binomia di Prony. La pratica superiorità della formula* ($a+b/R_i$) *risulta dal fatto che i suoi due coefficienti variano in senso inverso con la pendenza S del canale: in effetti, quando questa cresce,* ***a*** *anche cresce ma* ***b*** *al contrario diminuisce. Resta così stabilìta una sorta di compensazione, attraverso la quale le formule ottenute per numerose pendenze, sebbene differenti dalla prima, danno limiti di applicazione pressoché identici, ed essi possono quindi essere ripetuti senza inconvenienti da ogni singola formula, attaverso appropriati coefficienti. Non lo stesso avviene per l'espressione* ($a+b/V$), *nella quale entrambi i coefficienti crescono rapidamente con la pendenza del canale*."

Come fece il suo maestro Darcy, anche Bazin condusse misurazioni della distribuzione della velocità attraverso diverse sezioni trasversali, con differente rivestimento, usando una nuova forma del tubo di Pitot ideata da Darcy e molto simile a quella tuttora utilizzata. In queste esperienze Bazin notò che la profondità del punto di massima velocità variava con la larghezza relativa della sezione, avvicinandosi a zero quando il rapporto larghezza-profondità superava il fattore 5.

Gli studi sulle onde nei canali a pelo libero, nella seconda parte del trattato di Bazin, furono principalmente una ripetizione a larga scala di quelli precedentemente condotti da John Scott-Russel, incontrato nel precedente Capitolo 17, ma essi inclusero anche la propagazione delle onde e del moto ondoso, sia a favore di corrente che controcorrente.

Bazin inoltre tentò di affrontare, senza particolare successo, la teorìa del Risalto Idraulico, o Salto di Bidone, non trovandosi in sintonìa con l'analisi di Jaques Antoine Charles Bresse.

Maggior successo ebbe Bazin negli studi dell'efflusso da soglie provviste di una lama sottile, solitamente metallica, chiamate *Stramazzi in lama sottile* o *Stramazzi a parete sottile*.

Utilizzando lame sìa orizzontali che inclinate, Bazin potè esprimere con grande precisione il legame tra il *Carico Idraulico* sulla lama - cioè il livello dell'acqua, nella zona ancora non interessata dall'effetto del *Richiamo Idraulico* – e la portata transitante. Nello studio degli stramazzi, Bazin determinò l'andamento del profilo con tale precisione che i suoi dati sono, infatti, ancor oggi utilizzati così come lui stesso li determinò.

Il francese, inoltre, investigò sulla distribuzione della velocità e della pressione nello spessore dello strato d'acqua stramazzante, elaborando tavole grafiche per la loro individuazione secondo le caratteristiche di ogni stramazzo.

Bazin fu il primo a proporre l'espressione della portata di uno stramazzo nella quale i fastidiosi términi necessari per tener conto della velocità di avvicinamento, furono espressi come funzione del carico relativo:

$$Q = \frac{2}{3} C_c \sqrt{2g} \left[1 + 0{,}55 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right] h^{\frac{3}{2}}$$

Bazin presentò anche numerose misurazioni dell'efflusso completamente sommerso, secondo differenti profondità, nonché dell'efflusso da soglie larghe circolari di differenti forme e dimensioni.

Gli stramazzi preceduti da una vasca che aumenti la Sezione Idraulica sino a rendere trascurabile la velocità di arrivo, costituiranno, con il nome di Stramazzo Bazin, il dispositivo che finalmente risolse, con la tanto agognata precisione, la misura delle acque correnti, operazione essenziale nella distribuzione delle acque per l'Agricoltura. Si risolve, quindi, con lo scienziato francese il problema che tanti Idraulici aveva impegnato, in ogni época.

Prima del lavoro di Darcy e di Bazin, l'interesse in Europa sulla resistenza al moto dell'acqua nei canali a *pelo libero* era stato grandemente stimolato dal voluminoso "*Rapporto sulla Fisica e sull'Idraulica del fiume Mississippi*", sottoposto nel 1861 all'Ufficio degli Ingegneri Topografi dal Capitano A. A. Humphreys e dal tenente H. L .Habbot dell'esercito degli Stati Uniti d'America, che descriveva la ricerca resasi necessaria per le spese, senza precedenti, occorse nel contrastare le piene del Mississippi in quegli anni.

Nel Capitolo 15, abbiamo già incontrato questo Ufficiale dell'US_Army, ricordandone la visita, nel 1854, all'ingegnere idraulico cremonese Elìa Lombardini, esperto di Idraulica fluviale, dal quale trasse ispirazione proprio per gli studi che poi eseguì sul Mississippi. Sulla scorta degli insegnamenti del Lombardini, che raccomandava attente osservazioni e sistematici rilievi idrometrici per gli studi sul comportamento dei fiumi, Humphreys ed Habbot condussero un dettagliato studio del grande fiume americano, redigendo un rapporto che rimane ancòr oggi valido quale istruttiva lettura.

In questo documento, la parte di maggior interesse, per noi, è il riepilogo della letteratura europea, allora disponibile, sulla resistenza al moto delle acque nei canali e sui métodi per misurarla. Non trovando un soddisfacente accordo, applicando le diverse teorie disponibili, i due americani elaborarono una nuova formula, che cercarono di verificare non soltanto con i dati del Mississippi ma con tutti i dati disponibili – inclusi quelli ottenuti da Du Buat nei suoi piccoli canali sperimentali. La formula stessa era di difficile uso, a dispetto dell'assenza di un término che tenesse conto della scabrezza media dell'àlveo.

Il miglior contributo nella definizione della resistenza al moto nei fluidi venne da due ingegneri svizzeri, Emile Oscar Ganguillet (1818-1894), ingegnere capo del Dipartimento di lavori Pubblici di Berna, ed un membro del suo staff, Wilhelm Rudolph Kutter (1818-1888).

Kutter, già interessato al problema della resistenza nei canali, accolse le raccomandazioni espresse da Humphreys ed Abbot per testare la loro formula sotto le più ampie condizioni possibili comparandole con misurazioni su correnti di fiumi svizzeri di montagna.

Ganguillet e Kutter giunsero alla conclusione che la formula di Humphreys ed Abbot era applicabile soltanto a pendenze relativamente lievi e che, come nella formula di Bazin, l'effetto delle rugosità non poteva essere ignorato.

Tuttavia, come affermano nel loro "*Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel für die Gleichförmige Bewegung des Wasser in Canälen und Flüssen.*":

"*Le due formule non sono ugualmente valide per un'applicazione generale. Quella di E. H. Bazin è in verità non applicabile per il Mississippi, così come quella di Hunphreys ed Abbot non è adatta ai canali con pendenze ripide; ma quella di Bazin contiene le basi di una formula che può essere applicata in tutti i casi, semplicemente introducendo l'effetto della pendenza, mentre la formula degli americani non può essere così generalizzata.*"

Così, Ganguillet e Kutter resero sempre applicabile la formula secondo la seguente espressione del coefficiente *C*:

$$C = \frac{(a + \frac{b}{n} + \frac{m}{S})}{\left[1 + \left(a + \frac{m}{S}\right)\frac{n}{\sqrt{R_i}}\right]}$$

dove C è il coefficiente di Chezy, *a, b* ed *m* sono costanti; *n* è un fattore variabile con il grado di rugosità.

Sulla base di molte centinaia di esperimenti (includendone 16 fatti da Humprheys ed Abbot, 97 da Bazin) Ganguillet e Kutter determinarono le costanti e proposero il valore medio di *n* nelle seguenti sei classi:

1. sponde spianate e cemento lisciato;
2. sponde normali;
3. mattoni in concio senza malta cementizia;
4. muratura in breccia;
5. canali in terra;
6. correnti con detriti e piante flottanti.

Così elevata fu la richiesta di copie dei loro calcoli che ben presto la rivista sulla quale vennero pubblicata andò esaurita. Ma nel 1877 fu rivisto e nuovamente pubblicato tutto il materiale in un testo che venne poi tradotto in numerose lingue.

Nel 1897 la popolarità della formula di Ganguillet e Kutter, indusse Bazin a riprendere la sua precedente relazione con la formula:

$$C = \frac{A}{1 + \frac{y}{\sqrt{R_i}}}$$

nella quale γ era il fattore di rugosità, variabile ma senza che tenesse conto della partecipazione della pendenza.

Una strada in tutto differente fu seguita nel 1868 da Philippe Gaspard Gauckler (1826-1905), ingegnere del *Corps des Ponts e Chausseés,* che, invece di cercare una singola formula che potesse descrivere ogni tipo di canale, propose due formule, per altrettanti intervalli di pendenza:

$$V = \lambda_1 R_i^{\frac{4}{3}} S \quad per\ S > 0{,}0007$$

$$V = \lambda_2 R_i^{\frac{2}{3}} S \quad per\ S < 0{,}0007$$

Un'espressione identica alla seconda di queste fu definìta da un ingegnere irlandese, Robert Manning (1816-1897), due decenni più tardi.

Manning era nato in Normandìa, l'anno successivo alla battaglia di Waterloo, nella quale suo padre aveva partecipato. Ingegnere capo dell'ufficio dei lavori pubblici, fu responsabile di varie opere di drenaggio, di navigazione interna, di progetti di porti; per un certo periodo fu anche Presidente dell'Istituto di Ingegneria Civile d'Irlanda.

Sebbene, giudicando dai suoi scritti, il suo primo interesse fu l'Idrologìa, nel 1889 egli presentò all'Istituto un documento "*Sulla corrente dell'acque*

in canali a pelo libero e nei tubi.", nel quale cercò di rimediare ai varî difetti che riteneva esserci nelle precedenti formule di resistenza.

Apparentemente all'oscuro della proposta di Gauckler, egli mostrò che la relazione nella forma:

$$V = KR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}\,2}$$

. . . era quella che meglio si accordava con i dati disponibili, anche nel suo uso più generale. Tuttavia, non solo Manning considerò la prima potenza frazionaria come inconveniente, ma riconobbe con chiarezza che:

". . . *se le moderne formule sono empìriche . . . è comunque ovvio che la verità di ognuna di tali equazioni deve completamente dipendere dal risultato delle osservazioni stesse, e non può essere applicata strettamente ad un singolo caso fuori di esse*."

Manning, perciò, trasse le formule del tipo oggi associato al suo nome, proponendo invece le relazioni dimensionalmente omogenee:

$$V = C\sqrt{gS}[R^{\frac{1}{2}} + \frac{0{,}22}{\sqrt{m}}(R - 0{,}15m)]$$

In questo caso il fattore *C* non è il coefficiente di Chezy, ma un numero adimensionale ". . . *che varia con la natura delle superficie . . .* " e *m* (che egli introdusse in forma adimensionale proprio per ragioni fisiche) era pari ". . .[all'] *altezza di una colonna di mercurio che bilancia la pressione atmosferica.*"

In nessun punto Manning suggerì l'uso del coefficiente *n* di Kutter nelle altre formule, sebbene tale grandezza fosse stata ottenuta - più come Chezy aveva in origine proposto – da dati conosciuti per un canale del tipo preso in considerazione. Ciò che noi oggi chiamiamo *Formula di Manning*, non fu in tale forma concepita dallo stesso Manning, così come non lo sono le raccomandazioni che oggi ad essa vengono associate.

L'ultimo terzo del XIX sécolo vide lo sviluppo di tre tecniche sperimentali per i *test* a piccola scala, che contìnuano a giocare un ruolo fondamentale nelle pratiche di laboratorio anche oggigiorno: la galleria del vento; il modello di fiume a letto mobile; i bacìni navali.

I progressi su queste tecnologie sperimentali furono sostanzialmente indipendenti l'uno dall'altro, ma alla fine il primo ed il terzo ebbero nella loro origine una serie di ricerche derivate dalle ricerche di Edme Mariotte sulla misura della resistenza al moto di un fluido ed in un fluido.

Il progresso degli esperimenti in acqua fluente, con le vasche navali e con il braccio rotante di Robins, sono stati già descritti.

A questo punto dobbiamo invece render conto dei tentativi di formulare le leggi sulle quali si fondano i Criterî di Similitudine che permettono di estendere i risultati dei *test* a scala ridotta al progetto delle opere reali. Tuttavia, eccetto che per esempi isolati, come i *test* di Smeaton sul vento e sulle ruote ad acqua, l'applicazione rigorosa di queste leggi dovette attendere il necessario affinamento delle tecniche sperimentali.

La galleria del vento, è bene sottolinearlo, non si sviluppò come uno strumento sperimentale, finchè non si diffuse l'interesse sullo studio della forma delle pale degli òrgani giranti nel flusso (éliche e turbine).

Un ingegnere tedesco, Otto Lilienthal (1848-1896), per primo misurò la spinta di una piano inclinato su un braccio rotante nel 1866; egli seppe elaborare sìa la curvatura sìa la forma del corpo nella parte piatta, facendole assumere un andamento concavo, allo scopo di incrementare la

forza della spinta. Lilienthal testò le forme che aveva elaborato esponendole al vento naturale, nel 1874.

Questi esperimenti furono decritti nel "*Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst.*" che Lilienthal pubblicò a Berlino nel 1889, appena due anni prima che, assieme al fratello Gustav, costruisse e fece volare il loro primo aliante.

L'ìdea di dare una sàgoma bombata alle superfici delle pale fu indipendentemente concepìta (e brevettata) anche dall'inglese Horatio Frederick Phillips (1845-1912), nel 1884, che, in séguito, per primo ideò e costruì una piccola galleria del vento con la quale misurare la spinta ed il trascinamento delle differenti sàgome. I risultati dei suoi *test* apparirono, in forma anònima, nel 1885 nel giornale inglese "*Engineering*", con l'articolo "*Esperimenti con correnti d'aria*.", nel quale era illustrato il prototipo della galleria, composto da un sistema di iniettori a vapore, che metteva la galleria in depressione, con un tratto di condotta per la misura della velocità del flusso secondo lo schema del Venturìmetro.

Fu un altro inglese, Frederick William Lanchester (1868-1946), che per primo cercò di spiegare il fenomeno della spinta aerodinàmica in termini quantitativi. Dai risultati di *test* estensivi con modelli di alianti, Lanchester sviluppò almeno le forme preliminari della più recente teoria sulla circolazione dei flussi; fu tuttavia incapace di conciliare le sue analisi con i principi classici del moto dei fluidi.

Il primo caso in cui venne concepìto un modello di fiume a *Letto Mobile* è attribuìto al francese Louis Jérome Fargue (1827-1910), del *Corps des Ponts e Chaussées*, che lo utilizzò per progettare òpere idrauliche nel fiume Garonna, a Bordeaux. Con una scala orizzontale di 1:100 e le rive del modello di fiume ipotizzare inalterabili, Fargue stese uno strato di sabbia sul fondo, per osservarne la variazione in caso di inserimento della nuova òpera, ovviamente anch'essa nella medésima scala. Fu nell'idea piuttosto che nella tecnica, che Fargue mérita d'essere ricordato, seppur avesse compiuto l'errore concettuale di scegliere, senza criterio alcuno, le scale per la profondità e per il tempo.

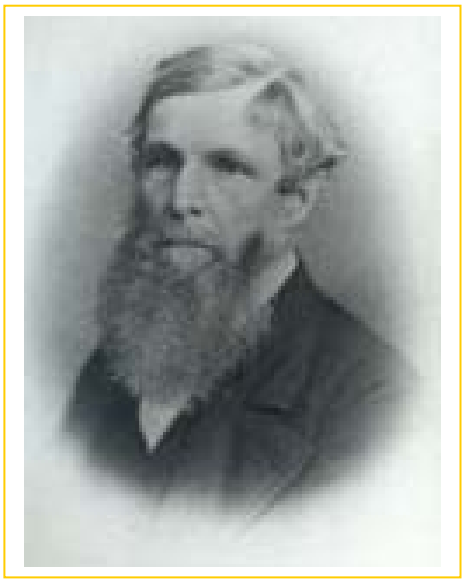
Queste scale furono propriamente correlate da Osborne Reynolds (1842-1912), del quale molto sarà riportato nel prossimo Capitolo, durante i suoi esperimenti del 1885 con un modello di marea della foce del fiume Mersey, vicino a Liverpool. Reynolds utilizzò un fattore di distorsione, tra scala orizzontale e scala verticale, di circa tre volte, simulando l'effetto delle maree attraverso un grosso galleggiante, più o meno appesantìto, perché ne potesse variare il pescaggio e quindi lo spostamento di liquido, nel modello, verso il fiume, nel quale ancora la sabbia, posta sul fondo, simulava gli effetti della corrente.

"*Il . . . modello . . . sùbito mostrò che c'era solo un periodo di tempo nel quale il moto dell'acqua . . . poteva imitare i moti dell'attuale marea nel fiume Mersey, il cui valore era di circa quaranta secondi; un risultato che poteva essere previsto dalla teorìa del moto delle onde, secondo la quale la scala delle celerità varia con la radice quadrata della scala delle altezze d'onda, cosa che porterebbe a ritenere che le velocità nel canale potrebbero essere proporzionali alle radici quadrate delle scale verticali . . . . e la scala dei periodi di tempo potrebbe essere pari al rapporto delle scale orizzontali ed il valore delle velocità . . .*".

Gli esperimenti di Reynolds sul fiume Mersey furono continuati da Levison Francis Vernon-Harcourt (1839-1907), professore di Ingegneria Civile alla *University College* di Londra, che studiò, in modo approfondìto, il problema di migliorare il regìme idraulico dell'estuario della Senna. Nell'elaborare la propria teorìa dei modelli, Vernon-Harcourt riprese, migliorandole, le

prescrizioni di Reynolds, giungendo ad una forma sostanzialmente seguìta ancor oggi nei modelli che sìmulano i fiumi; sulle finalità e potenzialità dei modelli, ecco un suo commento:

"*Se ho successo nel dimostrare che le condizioni reali possono essere riprodotte nel modello in scala e se, inoltre, dimostrerò che le òpere inserìte nello stesso modello possono riprodurre, in modo realistico, gli effetti nel caso reale, allora io sarò sicuro che si potrà compiere il passo più importante: riprodurre gli effetti dei progetti con ogni promessa di successo . . . .*"



Il progresso delle vasche navali per i *test* sui modelli di navi trovò una notevole crescita nel lavoro di due inglesi, William Froude (1810-1879) e suo figlio Robert Edmund Froude (1846-1924). Il padre nacque a Dartingham, nel Devonshire, specializzato in matematica ad Oxford, si era inizialmente applicato all'Ingegneria Civile e poi rivolse particolare attenzione all'Ingegneria Navale; alla giovane età di trentasei anni già lo troviamo ritirato dalla pratica attiva, ma a causa del suo grande interesse sulle costruzioni navali (particolarmente sulla navigazione e sulle eliche), accolse l'invito del titolare della ditta presso la quale aveva lavorato, conducendo *test* sulla resistenza al moto e sulle oscillazioni degli scafi, in connessione sìa con la progettazione che dopo il varo del piroscafo '*Great Eastern*', nave della quale abbiamo già parlato nel precedente Capitolo 17 e che vide, quale progettista principale, John Scott Russel.

William Froude non abbandonò mai gli studi di Idraulica Navale, sino alla morte; intorno ai sessant'anni cominciò privatamente lo studio sulla resistenza delle navi, utilizzando modelli in scala, e finalmente riuscì, a dispetto della forte opposizione proprio di John Scott Russell e di altri membri dell'Istituto di Architettura Navale, ad ottenere dall'Ammiragliato Britannico modesti fondi con i quali costruire vicino a casa, a Torquay, una vasca navale, lunga di 250 piedi, che iniziò ad essere utilizzata nel 1872, soltanto otto anni prima della sua morte. Il lavoro sperimentale, con questa struttura, venne dal figlio di William Froude, Robert Edmund, che più tardi ottenne i fondi per costruire, ad Haslar, l'attuale vasca dell'Ammiragliato.

L'iniziale opinione di W. Froude, condivisa dal francese Ferdinand Reech (185-1880), fu che:

"*Gli esperimenti adeguatamente condotti in una piccola scala possono dare risultati veritieri indicativi delle prestazioni di navi di ogni forma*."

Nella sua richiesta di fondi all'Ammiragliato, avanzata nel 1868, egli cercò di contrastare le diffuse opinioni che si opponevano a quest'ìdea:

"*Si osserva che i modelli, quando sono trainati attraverso l'acqua, producono onde proporzionalmente più ampie di quelle osservate con le navi esistenti, . . . ma, per rispondere a queste obiezioni non temo l'azzardo nell'affermare che c'è una prima ragione di ritenere che anche le navi reali, simulate dai modelli trainati, creerebbero onde così formidabili, muovendosi alle corrispondenti velocità . . .*"

Per definire queste *velocità corrispondenti*, Froude utilizzò la legge di Reech sulla somiglianza (senza, tuttavia, menzionare il nome di Reech):

". . . *il diagramma che mostra la scala della resistenza di un modello a diverse velocità esprime il valore della resistenza al moto della nave che sarà di dimensioni pari ad (**n**) volte le*

*dimensioni del modello, mentre le velocità saranno pari alla radice quadrata di (**n**) e la corrispondente resistenza proporzionale a (**n**^{3}) . . .* "

Un secondo argomento sostenuto da chi si opponeva alla validità dei modelli navali di Froude, era relativo alla impossibilità di valutare gli effetti della viscosità dell'acqua; come Reech, William Froude pensò che questo fosse trascurabile, purchè i modelli fossero di adeguate dimensioni:

" . . . . *mentre trovavo che, nei miei esperimenti, nel comparare la prestazione di modelli similari di tre e sei piedi, il più piccolo mostrava un lieve eccesso nel valore della resistenza, . . . con i modelli più grandi, tra i sei ed i dodici piedi, non furono osservate tali differenze*."

Che Froude, ciononostante, dovesse avere qualche sospetto che l'effetto della viscosità potesse mettere in discussione i suoi modelli, è testimoniato dal fatto che praticamente i primi *test* ad essere condotti nella vasca di Torquay costituirono un'estesa serie di prove e misure sull' '*attrito di superficie*' di tavole sommerse, variabili in lunghezza da 10 pollici a 50 piedi e ricoperte con uno strato di e con sabbia incollata. Nel suo rapporto del 1872 alla British Association, su questi *test*, egli riferì che il loro scopo era determinare la variazione della resistenza con: (*a*) la velocità; (*b*) la lunghezza; (*c*) la finitura della superficie.

La resistenza delle superfici lisce manifestava variazioni proporzionali al valore della velocità con esponente superiore a 1,85, che poteva anche raggiungere valori maggiori di due, man mano che aumentava la rugosità.

Nei risultati ottenuti Froude ritenne che fosse ricompreso l'effetto della lunghezza che sembrava concorrere, alla resistenza, soltanto sino ad un certo valore e comunque non in modo proporzionale; egli interpretò quest'apparente singolarità in término che anticipavano la teorìa dello *Strato Lìmite*, che si forma, nei fluidi in moto, nella parte immediatamente a contatto con le pareti:

"*Sempre mi sembra . . . che la porzione della superficie anteriore, che affronta per prima la linea del moto nell'acqua, può comunicare il moto all'acqua che segue*; *conseguentemente la porzione della superficie che segue quella anteriore si trova a scorrere non contro acqua ferma, ma contro acqua già parzialmente in movimento nella stessa sua direzione, che quindi produce una resistenza al moto che si riduce man mano che la stessa superficie scorre. Sebbene questi esperimenti s utilizzano superfici non più lunghe di 50 piedi, essi forniscono dati sufficienti per permetterci di prevedere, con una certa tolleranza, la resistenza degli scafi ben maggiori, come sono comunemente quelli delle navi. Per questo, una volta osservato il decremento della resistenza al moto alla lunghezza di 50 piedi, l'attrito che si aggiunge, per piede quadrato, di ogni lunghezza addizionale è così piccolo che può essere trascurato, senza grande errore, nella nostra stima della resistenza di una superficie lunga trecento piedi; se non lo si volesse trascurare potremmo assumere che tale decremento continui, riducendosi allo stesso ritmo nei rimanenti duecentocinquanta metri della superficie; è certo che la verità deve trovarsi da qualche parte tra queste due affermazioni*."

Froude ebbe l'opportunità di provare il suo metodo attraverso i *test* con modelli per comparazione con esperimenti che condusse, nel 1871, sulla nave militare H.M.S. '*Greyhound*', pur ammettendo di non aver potuto superare tutte le difficoltà incontrate, non ottenendo, quindi, previsioni perfettamente corrispondenti alla realtà:

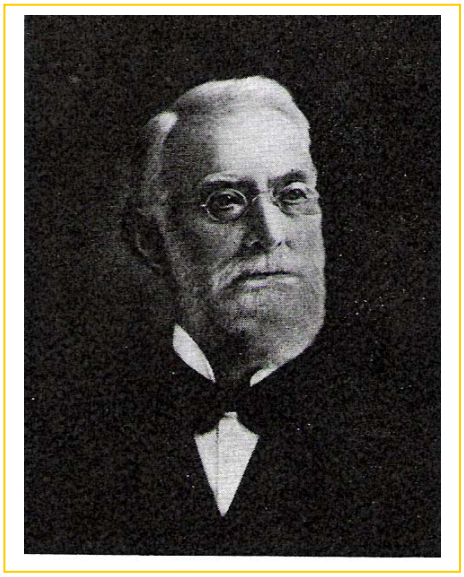
"*Come ho già detto, non è facile accertare con precisione la resistenza al moto dovuta alla superficie dello scafo del 'Greyhound', ma non è improbabile che la gomma, con la quale è*

rivestito, deteriorata dal tempo, possieda una qualità decisamente pessima rispetto ad una superficie nuova, appena verniciata . . .".

Una delle ironìe della storia è il fatto che il nome di William Froude divenne inseparabilmente associato alla *Legge della Somiglianza* (invece formulata da F. Reech) e ad un numero dimensionale che esprime la caratteristica cinemàtica del flusso (il *Numero di Froude*); la prima che non aveva enunciato; il secondo che non aveva mai usato!

Il suo grandissimo contributo nello studio dello *Strato Lìmite*, o strato di contorno, al contrario, è oggi raramente menzionato al di fuori dell'architettura navale.

Resta ora la necessità di ricordare tre ingegneri americani – Pelton, Herschel e Freeman – che diedero una vigorosa spinta alle conoscenze tecniche negli U.S.A..



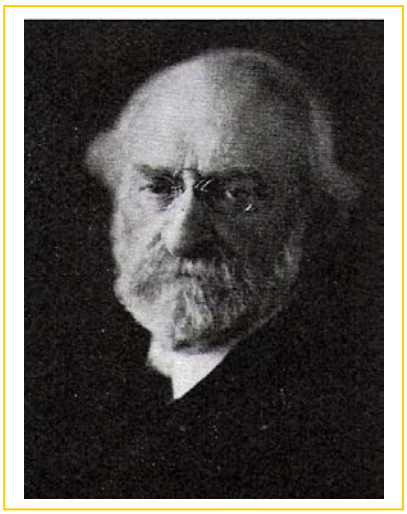
Lester Allen Pelton (1829-1908) lasciò la sua casa di Vermillion - Ohio, all'età di vent'anni per partecipare alla corsa dell'oro.

Non avendo ottenuto alcun successo come minatore, Pelton si dedicò, a Camptonville in California, alla costruzione di mulini a pestelli e dei connessi macchinari, tra i quali realizzò anche un nuovo tipo di ruota idraulica, a reazione, formata da pale a forma di tazza, che identificherà una nuova generazione di turbine dette, in suo onore, *Turbine Pelton*.

Si dice che Pelton lavorò da solo, durante l'inverno del 1878, per migliorare l'efficienza di queste ruote, costruendo, a mano, differenti forme delle pale, anche utilizzando materiali particolari, quali, ad esempio, le scatole in cui erano confezionate le òstriche.

Durante l'anno successivo, egli fece almeno un viaggio all'università della California, dove riuscì a costruire un modello, poi sottoposto a molti *test* e che, infine, ottenne un premio bandìto dalla stessa Università. Questo modello venne così brevettato, proprio nel 1880, ed i relativi diritti furono più tardi venduti alla società nata appositamente per sfruttarli e nella quale Lester Allen Pelton rimase per molti anni come consulente.

Il *Franklin Institute* pubblicò un esteso rapporto sulle ruote di Pelton nel 1895 e premiò il loro inventore con la medaglia '*Elliot Cresson*' per il suo contributo al progresso della scienza.



Clemens Herschel (1842-1930) fu forse austriaco di nascita (sia Vienna che Boston sono date come luogo di nascita) e la sua educazione fu in definitiva internazionale (Harvard, Parigi, e Karlsurhe), ma è ormai accettata la sua nazionalità statunitense. All'inizio Herschel si occupò come ingegnere civile, pur lavorando in una ditta di costruzioni idrauliche, nel New Jersey. Manifestando grande interesse e predisposizione per l'Idraulica Applicata, ottenne l'incarico di consulente nella costruzione delle centrali idroelettriche realizzate alle Cascate del Niagara, sia per gli Stati Uniti che per il Canada, poi fu assunto, come ingegnere idraulico, nella compagnìa Allis-Chalmers.

Sia la *Boston Society* di Ingegneria Civile che l'omòloga *American Society* gli conferirono l'incarico di Presidente.

Di Herschel ricordiamo che, nel 1899, individuò, in un monastero italiano, una copia dell'òpera di Sesto Giulio Frontino (40 – 103 d. C.) "*De aquis Urbis Romae*" (ne abbiamo parlato al Capitolo 4); ne trasse una copia fotografica per poterla poi tradurre in inglese, includendo alcune sue interessanti e caratteristiche annotazioni. Fu anche un prolifico scrittore, trattando molti argomenti di Idraulica.

Oggi, Herschel è meglio conosciuto per l'invenzione del dispositivo, il cui princìpio fu scoperto da Giuseppe Venturi, e descritto nel testo; édito nel 1898, "*Il misuratore d'acqua di Venturi*". A motivo di questa invenzione, anche Herschel, come Pelton, ricevette la medaglia "*Elliot Cresson*" del Franklin Institute.

Come osservò lo stesso Herschel, le idee di base di questo dispositivo erano tutte disponibili in letteratura: dalle formulazioni di Bernoulli-Euler a quelle di Venturi, sulla caduta di pressione e sul restringimento nelle tubazioni, agli studi di Francis sulle proporzioni da utilizzarsi nella sezione divergente dello scarico, per rendere minima la perdita di carico. Ma fu Clemens Herschel che per primo combinò queste idee in un apparato in grado di sfruttarle e rendere la perfetta misura della portata in trànsito nella tubazione.

Il nome dello strumento che Hershel propose, Venturìmetro, sembra sìa derivato dalla consuetudine, seguìta nel suo laboratorio, di chiamare 'Punto Venturi' il tratto, a sezione ristretta, dove si effettuava la lettura della pressione; Herschel lasciò che tale termine rimanesse, ad indicare lo strumento da lui stesso realizzato ma che ora, per sua volontà, onora il ricordo dello scienziato italiano.

* * *

Val la pena soffermarci su questo episodio, di tale valore ético da sembrare, ai giorni nostri, quasi incomprensibile. È infatti ben raro, forse ormai impossibile, che si possa trovare chi rinunci all'imperitura fama, quando, anche o soltanto per mérito altrui, la si trovi 'a portata di mano'! . . . eppure, a quei tempi, dove alcuni valori assoluti (onestà, dignità, moralità, ética, . . .) ancora non erano inquinati dall'imperante relativismo, non era un episodio raro.
La costante, mondiale celebrazione delle scoperte di Charles Darwin (1809-1882), sull'Origine delle Specie, crea, a questo punto, l'occasione, doppiamente irrinunciabile, di ricordare il caso di Alfred Russel Wallace (1823–1913), che per primo intuì, durante un attacco di malària, quale fosse il vero 'motore' dell'evoluzione di tutte le Specie: la Selezione Naturale. Di tale deduzione, Wallace ne fece partécipe Charles Darwin, con il quale era legato da profonda amicizia e che sapeva essere impegnato da anni, senza alcun ésito, ad analizzare i risultati delle sue osservazioni condotte 'in giro per il mondo'. Il saggio di Wallace illuminò la mente di Darwin: ecco la soluzione! Per mezzo dello stesso Darwin, la scoperta giunse al comune amico Lyell, geologo scozzese, che impose ai due di pubblicare contemporaneamente il risultato, cosa che fecero senza alcuna pretesa di vedersene attribuire la paternità. Addirittura, Wallace, che era il vero scopritore della Selezione Naturale, ne coniò il nome con il término '*Darwinismo*', consegnando all'amico, in eterno, una fama che era forse più sua. Un bell'esempio di altruismo, amicizia, stima e rispetto . . . 'd'altri tempi'!

* * *

Clemens Herschel, curiosamente, s'accorse che il princìpio di Bernoulli_Euler fosse applicabile all'interpretazione del funzionamento del Venturìmetro soltanto dopo averlo ampiamente sperimentato; così, per questo, osservò:

"*. . . abbiamo così visto che la comprensione del princìpio che presiede alla scoperta di un'invenzione può seguire, invece che precedere, la realizzazione dell'invenzione stessa; infatti un inventore può giungere a sufficienti cognizioni* [da concepìre l'invenzione e la sua utilità] *attraverso i soli esperimenti . . .* ".

John Ripley Freeman (1855-1933), nato in una fattoria del West Bridgton, nel Maine USA, studiò Ingegneria Civile al Massachusetts Institute of Technology e ricevette la sua istruzione pratica proprio lavorando in una centrale idroelettrica nello Stato del Massachusetts, a Lawrence, sotto la direzione di William F. Mills.

Dopo un apprendistato di dieci anni, divenne Ingegnere Ispettore per una azienda di Boston di assicurazioni contro gli incendi; nel corso di questo impiego Freeman condusse accurati esperimenti sugli ugelli antincendio e sulla resistenza dei manicotti, tubi e raccordi.

I test sugli ugelli vennero descritti in documenti che apparirono nella *Transactions* della *American Society* di Ingegneria Civile, nel 1889 e nel 1891: "*Experiments relating to Hydraulics of Fiare Streams*." e "*The nozzle as an Accurate Water Meter*."; ognuno di questi ricevette la medaglia d'oro, Premio assegnato dalla Società.

I dati di Freeman sui tubi, non pubblicati se non quarant'anni dopo la sua morte, ancor oggi appaiono compatibili con le ben più accurate misurazioni della resistenza oggi effettuabili.

La vita di Freeman fu lunga ed attiva, divisa tra l'ingegneria e le assicurazioni; il suo ultimo contributo allo sviluppo dell'Idraulica appartiene già al 20° secolo. È sufficiente dire a questo punto che egli partecipò nel lavori della *America Society* di Ingegneria Civile ed alla *Boston Society* di Ingegneria Civile, alla *American Society* di Ingegneri Meccanici, ciascuna delle quali lo onorò con l'elezione a Presidente.

Il 19° secolo fu in molti modi una grande éra per lo sviluppo dei métodi sperimentali in Idraulica, ma segnò anche l'inizio di una nuova scienza dedicata al comportamento ed al moto dei fluidi, principalmente alle alte velocità: l'Aerodinàmica.

Allo spirare del sécolo, inoltre, la via era ormai tracciata per la redazione di qualsiasi trattato di Idraulica (come "*Hydraulique*" di Flamant del 1891), secondo i tre princìpi ormai assolutamente compresi: continuità, energia e resistenza.

I coefficiente adimensionali entrarono a far parte dell'uso comune.
Innumerevoli dati sperimentali furono ottenuti per la loro corretta valutazione.
Molti tentativi, sebbene non sempre coronàti da successo, furono condotti per comprendere e definìre le leggi fisiche della loro variabilità.

Il più complesso caso del flusso non uniforme od instabile nei canali a pelo libero fu affrontato con almeno un parziale successo, ma, soprattutto, la scienza dei fluidi aveva raggiunto un punto nel quale la progettazione delle costruzioni idrauliche e navali potè procedere (come Du Buat aveva intravisto cento anni prima) su quantità calcolate e misurate 'a tavolino', quindi in sede progettuale, piuttosto che secondo la valutazione puramente empìrica e qualitativa.

Di questo periodo, così fecondo, piace ricordare una testimonianza di Clemens Herschel sull'eterno confronto tra teorìa ed esperienza, così frequente in Idraulica:

"*Io so bene . . . che brancolando, quasi senza méta, la ricerca tende a precedere la scienza applicata; ma ho scoperto che è più frequente che le invenzioni pratiche antìcipino la loro spiegazione scientifica* [poiché ne prevale l'utilità, che spinge alla loro realizzazione] . . . *mentre le ricerche senza méta* [condotte a volte con pervicace testardaggine] *troppo spesso risultano ùtili, al massimo, per ingombrare selve di librerie . . . tra queste, molti gli studi della teoria idraulica, in alcuni casi investigando, per sécoli, orizzonti assolutamente infruttiferi . . .*"

* * *

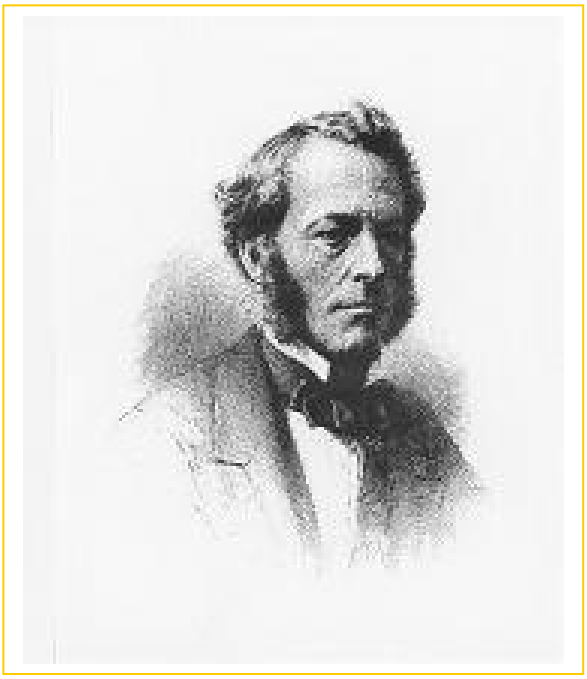
Cap. 19 – Idrodinàmica classica ed applicata nel XIX sécolo

Nell'Ottocento, i progressi in Idraulica ed in Idrodinàmica crebbero con un ritmo reciprocamente comparabile, ma le attività si svilupparono in modo quasi indipendente, tanto da apparire distinte persino nella méta, che invece era praticamente la stessa: la conoscenza del comportamento dei fluidi, liquidi e gassosi. L'Idrodinàmica, in particolare, generò, verso la fine del sécolo, l'Aerodinàmica, ben più distinta e sempre più distinguibile dalle prime due, sebbene ne fosse 'figlia'.

Nonostante ciò, vi furono ricercatori in ciascuna materia, Idraulica o Idrodinàmica che fosse, che seppero considerare anche l'importanza delle due differenti prospettive e si sforzarono di utilizzare, studiare e seguìre tutti i risultati ed i metodi disponibili nell'uno e nell'altro campo.

Ferdinand Reech e Jaques Antoine Charles Bresse, per esempio, sebbene fossero ingegneri, cioè applicati principalmente ai casi pratici – di essi abbiamo trattato nel precedente Capitolo, descrivendone l'attività sperimentale - realizzarono i loro principali contributi attraverso metodi analìtici; il lavoro di Bresse, in particolare, affrontato in questo Capitolo, ha un grande rilievo teorico anche se raggiunto attraverso la via sperimentale.

I più grandi progressi in Idraulica, come in altre materie scientifiche, sono spesso il prodotto della combinazione di un fondato ragionamento fisico e di una acuta consapevolezza della realtà; ma è certo che il progresso frequentemente compie i proprî passi partendo da una formulazione di natura empìrica, a volte con scarsi fondatezza e ragionamento, ma poi ogni valutazione giunge alla méta attraverso le successive analisi matematiche che, a loro volta, possono apparire inizialmente non applicabili ai casi pratici. È su quest'ultimo aspetto che sarà ora focalizzata l'attenzione.



In questo quadro, ecco giungere il tempo e la necessità di parlare di un ingegnere francese, Louis Marie Henri Navier (Digione 1785- Parigi 1836) il cui nome è oggi frequentemente associato alle equazioni che elaborò attraverso analisi puramente matematiche.

Navier, nato a Digione, entrò nel *Corps des Ponts e Chaussées* dopo il classico corso accademico e spese il resto della sua vita nella triplice attività di insegnante di Meccanica, alla *Ecole des Ponts et Chaussées*, mantenendo anche la pratica attiva nel *Corps*, particolarmente nella costruzione di ponti, compiendo ricerche e componendo memorie e testi su svariati argomenti.

Il suo lavoro meglio conosciuto fu un trattato sui ponti, in due volumi, ma ricevette anche notevole notorietà per il progetto di un ponte sospeso a Parigi sulla Senna, che crollò, poco dopo la fine della costruzione, a causa del cedimento della fondazione di uno dei due pilastri di sostegno.

Importanti furono le ricerche di Navier nel campo della Scienza delle Costruzioni, che riportò nelle lezioni, raccolte nel libro "*Leçons sur l'application de la mécanique*", édito a Parigi nel 1826.

Il documento che per noi ha maggior rilevanza fu presentato nel 1822 alla *Académie Royale des Scienses* (alla quale fu eletto membro poco dopo) sotto il titolo "*Memoire sur les lois du mouvement des fluides*.", nel quale Navier procedette ad analizzare il moto di un fluido quasi allo

stesso modo di Eulero, ma considerò, in aggiunta, quelle forze che Eulero attribuiva ad un'ipotética attrazione o repulsione tra le molecole adiacenti.

"S*e il fluido è in movimento, si presume, in generale, che le molecole vicine si avvicinino e le vicine si allontanino le une dalle altre . . . Noi immaginiamo, infatti, che in uno stato di quiete del fluido, le molecole sìano poste a distanze relative determinate dalla condizione di mutuo annullamento delle forze di repulsione e di compressione, che determina la misura del volume occupato, in funzione della temperatura e della pressione, alle quali il fluido è sottoposto . . . . e noi partiamo dal princìpio . . . che, per effetto del movimento del fluido, le azioni repulsive delle molecole aumentano o diminuiscono in una quantità proporzionale alla velocità con la quale le molecole si avvicinano o si allontanano le une dalle altre*."

Eccetto per l'assunta proporzionalità di questa azione, assegnata alla velocità relativa delle molecole adiacenti, Navier fu portato ad esprimere la grandezza nei términi di una sconosciuta funzione dello spazio molecolare. Poi con lo sforzo di una assai complessa analisi di numerose forze agenti, ivi compresa l'accelerazione del fluido che esse producevano, lo scienziato francese giunse alla seguente modifica di ciascuna delle tre equazioni di Eulero, delle quali si riporta soltanto quella secondo la direzione *x*:

$$P-\frac{dp}{dx}=\rho\left(\frac{du}{dt}+u\frac{du}{dx}+v\frac{du}{dy}+w\frac{du}{dz}\right)-\varepsilon\left(\frac{d^2u}{dx^2}+\frac{d^2u}{dy^2}+\frac{d^2u}{dz^2}\right)$$

nella quale ε rappresenta semplicemente una funzione dello spazio molecolare, alla quale Navier diede un significato fisico di non particole significatività.

Contrariamente alla scoperta, realizzata, per via sperimentale, da Clemens Herschel, del Princìpio che consentisse di misurare la velocità media del flusso, ancor prima di concepirne la teoria, qui, con Navier, c'è un esempio di una scoperta teòrica senza riuscire a svilupparne la potenzialità quale strumento di analisi.

E' vero che Navier cercò di applicarla all'analisi del moto uniforme attraverso le tubazioni ma, a dispetto del suo credere d'essere nel giusto, il risultato non fu corretto, per un errore dovuto in parte alla sua preconcetta accettazione di indicazioni sperimentali ed in parte all'incapacità di integrare le deduzioni teoriche all'interno del meccanismo della resistenza del fluido.

"*Nel comparare questa espressione per un tubo circolare, precedentemente trovata per un tubo quadrato, si vede che la velocità media prende lo stesso valore sia nella sezione quadrata che in quella circolare, quando la loro sezione è la stessa oppure molto piccola. Questi risultati mòstrano, in più, che il valore della velocità è sensibilmente indipendente dalla mutua azione delle parti fluide, frutto di quel fenomeno chiamato usualmente coesione, cioè la viscosità del fluido. Questo valore dipende quasi unicamente dal valore dell'aderenza che esiste tra il fluido ed il contorno . . . Quando i tubi sono molto piccoli, la velocità media aumenta, a parità di tutte le altre condizioni, in proporzione al diametro; ma essa tende ad aumentare più rapidamente dell'aumento del diàmetro stesso; da qui si conclude che l'influenza della coesione diventa prevalente e finisce con l'essere la sola che determina, quando il diametro diventa molto grande, la velocità media del fluido*."

Il concetto di Navier dell'attrazione molecolare fu studiato dal barone Augustin Louis de Cauchy (Parigi 1789 - Sceaux 1857).

Di salute cagionevole, forse soffrendo dell'infanzia vissuta nel pieno dramma della Rivoluzione, Cauchy dimostrò uno straordinario talento matemàtico; si racconta che Joseph Louis Lagrange, indicandolo ad alcuni colleghi professori e matemàtici, disse: "*Vedete quel giovanotto minuto? Bene! Come matemàtico ci soppianterà tutti!*"; ma diede un consiglio apparentemente incoerente a suo padre: "*Fate che non tocchi un libro di Matemàtica sinchè non avrà compiuto i diciassette anni.*", auspicando che, nel frattempo, si applicasse soprattutto a materie letterarie ed umanistiche, affinchè fosse poi in grado di esprimersi in modo originale, ma comprensibile, su tutto ciò che avrebbe scoperto nella 'scienza dei nùmeri'.

Lagrange aveva visto giusto: Cauchy divenne il più importante matemàtico del suo tempo, pur applicandosi, per necessità, ad attività non soltanto teòriche.

Completàti gli studi alla *École Polytechnique*, con il titolo di Ingegnere Civile, nel 1810, Cauchy iniziò la professione a Cherbourg sino al 1813.

Tornato a Parigi si impiegò al *Corps des Ponts et Chaussées* ma, a causa della sua salute malferma e, per questo, su consiglio degli amici e colleghi Lagrange e Laplace, si dedicò interamente agli studi di Matemàtica; in questi acquisì notorietà per alcuni lavori sui poliedri e sugli integrali, diventando Accademico di Francia nel 1816.

Professore al Collegio di Francia ed alla Sorbona, si rifiutò di prestare giuramento al re, Luigi Filippo, nel 1830, per non tradire il proprio credo legittimista, pur cosciente che questo gesto gli sarebbe costato l'esilio. Riparò, così, in Svizzera e poi a Torino, dove insegnò Fisica Sublime; poi giunse a Praga.

Cauchy tornò a Parigi nel 1838 ma non riprese più l'insegnamento. Fu una delle figure di maggior valore tra i matematici del XIX sécolo e produsse una grande quantità di materiale, raccolto in 789 scritti, dove fissò i cànoni della rigorosa trattazione dell'Analisi Matemàtica, ancor oggi seguìti nell'insegnamento. Con le sue lezioni ed i suoi libri si formarono le generazioni di matemàtici, non solo francesi.

In Idraulica, Augustin Louis de Cauchy contribuì grandemente all'analisi del moto d'onda ma, a causa dell'eccelso livello della sua Matemàtica, l'òpera "*Memoire sur la teorie des ondes*", del 1816, fu veramente compresa soltanto da quei matemàtici che erano pure particolarmente esperti di Idrodinàmica. Quello che oggi è conosciuto come il *Numero di Mach* era una volta indicato con *Numero di Cauchy*, in suo onore, avendolo per primo definìto quale rapporto tra la velocità di un fluido e la celerità con la quale in esso si muovono le piccole perturbazioni. Così, in Aerodinàmica, fu il nome del Fisico cecoslovacco Ernst Mach (Turas, Moravia 1838 – Haar, Monaco di Baviera 1916) ad essere utilizzato per indicare valori di velocità multipli della velocità del suono.

Le equazioni di Navier furono nuovamente derivate, ma da basi un poco differenti rispetto a Cauchy, da Simeon Denis Poisson (Pithiviers 1781- Parigi 1840), anch'egli amico di Lagrange e di Laplace, fisico e matemàtico, professore, dal 1806, alla *École Polytechnique* ed

astrònomo, dal 1808, presso il *Bureau des Longitudes*, ed anche, dal 1809, professore di Meccanica alla facoltà di Scienze di Parigi.

I principali interessi di Poisson furono la Meccanica, l'elasticità, il calore, il suono, ma – come altri matemàtici di quel sécolo – scrisse anche, sebbene in forma più generale, sul moto d'onda.

Il suo adattamento delle equazioni dell'equilibrio dei solidi elastici al flusso dei fluidi incomprimibili fu illustrato, nel 1829, nel lavoro "*Mémoire sur les équation générales de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques et des fluides*.", di grande interesse a causa delle considerazioni sull'imperfetto concetto che allora esisteva del fenomeno della resistenza.

Poisson ragionò che, allorquando, nello stato di equilibrio, la pressione era la stessa in tutte le direzioni, durante il movimento vi fosse una certa tendenza delle molecole ad adattare la propria posizione in funzione del movimento stesso, causando la variazione della pressione nelle diverse direzioni.

Così Poisson stabilì:

" . . . *è consigliabile osservare che si potrebbe non confondere l'effetto che noi ora indichiamo soltanto con la viscosità dei fluidi imperfetti. L'effetto in questione può occorrere nei liquidi che hanno una viscosità non apprezzabile, ed anche nei fluidi gassosi, sui quali deve soprattutto essere considerato quando la loro agitazione diventa estremamente rapida. La viscosità è quella che impedisce ai liquidi di esercitare, dopo un intervallo di tempo più o meno lungo, un'eguale pressione in tutte le direzioni; ma si può attribuire all'influenza della forma delle molecole la loro mutua azione e considerare i liquidi viscosi come una sorta di materia intermedia tra i solidi ed i fluidi perfetti* [gli ultimi essendo] *i soli che sono considerati nella parte seguente di questa memoria . . .* ".

Anche Saint Venant affrontò questo problema in molti dei suoi scritti, ma seppe scansare con successo la questione dell'indeterminata natura delle caratteristiche molecolari, considerandone invece il solo effetto come sforzo interno prodotto e valutabile. La sua analisi fu portata alla pubblica attenzione nel suo breve "*Note à joindre au mémoire sur la dynamique des fluides*.", del 1843, dalla quale è tratta la seguente affermazione:

"*Io assumo . . . che in un fluido in movimento non c'è una componente tangenziale di pressione nella direzione nella quale non c'è scivolamento. Questo equivale ad ammettere che la direzione lungo la quale l'attrito è nullo . . . è nullo lo strisciamento; o che la principale componente tangenziale ha la stessa direzione del principale trascinamento, o, se uno vuole, che l'attrito prodotto dallo strisciamento è una resistenza che si oppone allo stesso strisciamento . . . . questa è solo un'ipotesi che io propongo*."

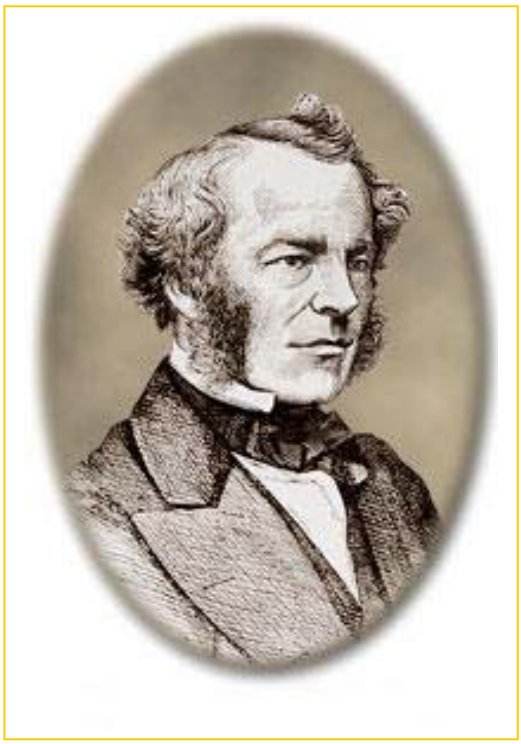
Non soltanto Saint Venant derivò le equazioni di Navier su una base più ragionata, ma in questo ottenne espressioni per i tre sforzi normali (ovvero le tensioni) ed i tre sforzi tangenziali in funzione dei gradienti di velocità e del coefficiente ε, nelle rispettive forme:

$$p_{xy} = p + 2\varepsilon \frac{du}{dx} \qquad p_{xy} = \varepsilon \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right)$$

Egli non tentò di dare il corretto significato al coefficiente ε, che Navier vagamente immaginava quale funzione dello spazio molecolare, al di là di questa notazione:

"*La soluzione è senza dubbio non ancora completa, poiché la formula non impone che ε sia lo stesso in tutti i punti; ma è quantomeno ùtile comprendere la questione e provare che ogni analisi, il cui punto di partenza è in accordo con ciò che noi abbiamo assunto, . . . porta necessariamente, e quindi soltanto, a queste formule*."

Il realtà la derivata di Saint Venant non fu ristretta a ciò che era conosciuto come *Moto Laminare*, ma applicata ad ogni stato del moto (quindi anche nel *Moto Turbolento*), coinvolgendo gli sforzi del tipo assunto. In altri scritti, inoltre, egli assunse che gli sforzi variavano in proporzione all'intensità della formazione di turbolenze locali. In modo assai ingiustificato, sebbene le sue equazioni fossero così generalmente giustificabili, il suo nome non è mai associato con alcuna delle molte forme nelle quali esse sono utilizzate oggi.



L'ùnico che vide collegato il proprio nome a quello di Navier, nell'indicare le equazioni del moto di un fluido viscoso, fu sir George Gabriel Stokes (Skreen 1819 - Cambridge 1903).

Nativo di Skreen, in Irlanda, concluse gli studi a Cambridge e rimase in Inghilterra per il resto della sua vita, contribuendo grandemente alla crescita, in quel paese, della Fisica Teòrica.

Stokes fu il primo scienziato, dopo Isaac Newton, ad occupare la Cattedra Lucasiana di Cambridge, nel 1849.

Segretariato della *Royal Society*, nel 1854, dove presentò oltre cento lavori su diversi argomenti, tra i quali l'Idrodinàmica, ne divenne Presidente nel 1885.

Il suo scritto, del 1845, "*Sulle teorie dell'attrito interno dei fluidi in moto e dell'equilibrio e moto dei solidi elastici*." era l'ùnico che conteneva le derivate di Navier nella forma oggi seguìta, dove il coefficiente ε, nella sua più generale formulazione, fu sostituito dalla viscosità dinamica μ.

Tuttavia Stokes fu messo fuori strada dall'errata interpretazione di alcuni dati sperimentali, come testimonia la seguente osservazione:

"*Il prossimo caso da considerare è quello di un fluido in contatto con un solido. La condizione, che per prima mi sovviene da assumere in questo caso, è che la pellicola di fluido immediatamente a contatto diretto con la superficie del solido non si muova rispetto alla superficie medèsima. In accordo con le ipotesi adottate, se il moto relativo delle particelle fluide, immediatamente attorno ad ogni immaginaria superficie nelle quali può intendersi diviso il fluido,*

è molto elevato, le forze tangenziali chiamate in azione sarebbero molto grandi, cosicché il valore del moto relativo rapidamente decrescerebbe. Passando al limite, noi possiamo supporre che ad ogni istante le velocità cambiano discontinuamente nel passare attraverso ogni superficie immaginaria. Le forze tangenziali, chiamate in azione, andrebbero immediatamente ad annullare il moto relativo delle particelle, indefinitamente chiuse le une contro le altre, cosicché da rendere il moto continuo; per analogìa, lo stesso può essere supposto vero per la superficie di contatto tra il fluido ed il solido. Ma avendo calcolato, in accordo con le condizioni che abbiamo menzionato, la perdita di carico di lunghe tubazioni, circolari diritte e canali rettangolari, e comparàti i risultati con alcuni degli esperimenti di Bossut e Du Buat, io trovai che le formule non sono tutte d'accordo con gli esperimenti . . . infatti sembra, dagli esperimenti, che le forze tangenziali varino in modo prossimo al quadrato della velocità quando questa non è molto piccola . . .".

I soli modi che Stokes poteva trovare per riconciliare teorìa e risultati sperimentali fu di ammettere che l'acqua in contatto con le pareti del condotto non dovesse avere necessariamente velocità nulla:

"*Ho detto che quando la velocità non è molto piccola la forza tangenziale, chiamata in azione dallo scorrere dell'acqua sulla superficie interna dei tubi, varia approssimativamente con il quadrato della velocità. Questo fatto sembra ammettere una naturale spiegazione quando una corrente di acqua fluisce contro un ostacolo, che produce una resistenza che varia con il quadrato della velocità. Ora, anche se la superficie interna del tubo è liscia, noi possiamo supporre che esistano piccole irregolarità, formando così tanti ostacoli alla corrente. Ogni piccola protuberanza esprimerà una resistenza vicina al quadrato della velocità; da questo risulterà un'azione tangenziale della superficie del tubo, che varierà all'incirca con il quadrato della velocità e la stessa sarà vera dell'uguale ed opposta reazione del tubo sul fluido. Le forze tangenziali dovute a questa causa saranno combinate con quelle con le quali il fluido chiude il tubo è mantenuto in quiete quando la velocità è sufficientemente piccola . . . . Sebbene la perdita di carico di un liquido attraverso un lungo tubo diritto od un canale, sotto date circostanze, non possa essere calcolata senza conoscere le condizioni che sono soddisfatte alla superficie di contatto tra fluido e solido, è anche vero che si sta certo andando verso la soluzione di questo problema*."

Stokes seguì la strada di assumere un arbitrario valore di scorrevolezza della parete, assegnando una resistenza che fosse funzione di tale valore, aumentando poi, secondo una distribuzione parabolica, la velocità e, proporzionalmente, la corrispondente velocità alla parete.

Egli così presunse, in effetti, che le condizioni alla parete non avessero influenza sul meccanismo interno della resistenza; il suo risultato, quindi, divenne corretto soltanto per le condizioni di scorrimento nullo. Nel suo scritto del 1851 "*Sull'effetto dell'attrito interno dei fluidi sul moto dei pendoli*.", tuttavia diede modo di credere nella possibilità di un moto relativo tra contorno e fluido.

Nel caso delle due seguenti analisi egli applicò le funzioni di corrente di Lagrange per il moto bidimensionale di correnti viscose, non uniformi, con simmetria assiale.

È interessante il fatto che, da tali studî, Stokes giunse ad ottenere l'espressione della velocità con la quale un corpo, più pesante dell'acqua e di forma prossima alla sfera con raggio *r*, scende verso il fondo:

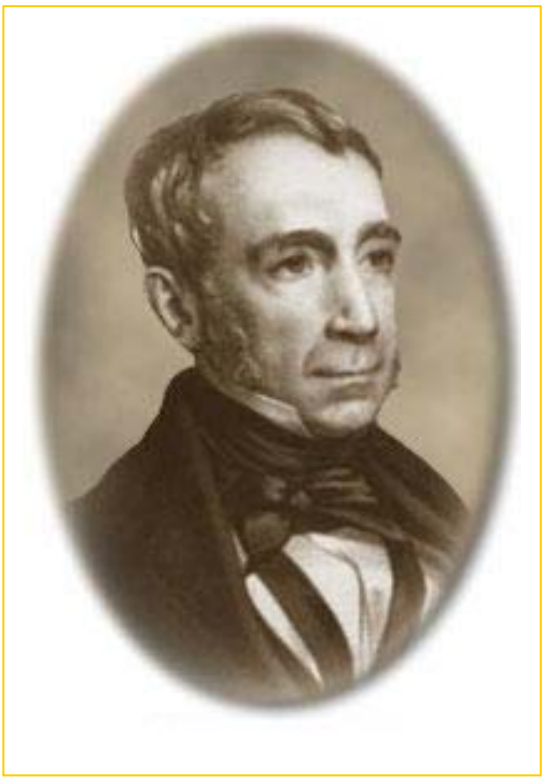
$$v = \frac{2g}{9\mu}\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \cdot r^2$$

che è conosciuta ancor oggi come la *Legge di Stokes*, nella quale:

- μ è la viscosità dinàmica del corpo;
- ρ_s è la densità dell'oggetto;
- ρ è la densità del fluido;
- r il raggio medio del corpo.

La Legge di Stokes è molto importante in tutti gli studi che tendono ad eliminare, nelle correnti, i *solidi sedimentabili*, perché consente di calcolare in quanto spazio, percorso dal flusso nel quale sono immersi, essi raggiungono il fondo dell'àlveo, problema principale del dimensionamento dei *Sedimentatorî*, indispensabili, per esempio, negli impianti di depurazione delle acque di scarico.

Stokes inoltre seguì la consuetudine degli idraulici di dedicarsi al moto d'onda; producendo un lavoro del 1847 "*Sulla teoria dell'oscillazione delle onde*.", nel quale non soltanto rivisitò l'analisi di Gerstner (citato nel Capitolo 13) sulle onde in acqua profonda in condizione di flusso non rotazionale, ma incluse uno studio sulle onde all'interfaccia tra fluidi di differenti densità.



Tuttavia il più esteso trattamento delle onde di quel periodo fu di un compatriota di Stokes, Sir Gorge Biddle Airy (Alnwick, Northumberland 1801- Greenwich 1892), professore Lucasiano di Matematica a Cambridge, dove divenne direttore del locale Osservatorio, per passare, poi, a ricoprire lo stesso incarico all'Osservatorio di Greenwich, dal 1836 al 1881, che divenne, sotto la sua direzione, un centro di ricerche non solo astronòmiche, ma di Geodesìa, Geomagnetismo e Meteorologìa.

Per primo Airy ipotizzò, nel 1855, l'*Isostasìa* della crosta terrestre, dandone l'interpretazione che, perfezionata da W.A. Heiskanen nel 1930, è oggi la *Teorìa di Airy-Heiskanen*, che spiega le anomalìe del campo gravitazionale. Airy, per primo, ipotizzò che la Terra non fosse costituìta da materia omogénea, ma da masse di differente densità, in grado di spostarsi nel corpo del pianéta; con tale ipòtesi, l'inglese diede ragione di alcuni anòmali comportamenti del péndolo, in prossimità dei rilievi montuosi (già osservàti da Leonardo da Vinci) ed al fatto che la gravità, rispetto all'andamento dovuto alla forma ad ellissoide del globo, mostrasse valori minori nelle aree montuose e maggiori sugli oceani.

Airy inoltre dimostrò la non uniformità del moto di Venere e della stessa Terra; di quest'ultima riuscì a misurarne la massa e la variazione dell'accelerazione di gravità usando un pendolo astronomico posto in profondi pozzi di miniera; condusse anche analisi sull'effetto del sole e della luna sulle maree terrestri.

La sua ultima ricerca fu dedicata al tentativo di trovare la teorìa generale del moto d'onda, che rese pubblica nell'articolo "*Maree ed onde*.". Qui non solo revisionò criticamente i lavori teorici di Newton e di Cauchy e gli studi sperimentali di Weber e di Russell, ma procedette a formulare una sòlida impostazione di Idrodinamica per la Meccanica delle onde, in acque non profonde, di piccola ampiezza e sotto variabili condizioni al contorno.

Ad Airy l'Idraulica mondiale deve questa elementare relazione:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} tan \frac{2\pi y}{\lambda}}$$

. . . tra l'effetto della profondità y, la lunghezza dell'onda λ e la sua celerità c.

Airy giunse alla conclusione che la *Grande Onda Primaria di Traslazione*, teorizzata da John Scott-Russell quale ésito dello spostamento di massa dovuto all'avanzamento della chiglia di ogni natante, non fosse né grande né primaria, ma semplicemente un tipo di onda, mai riprodotto negli esperimenti. Infatti, attraverso un semplificato trattamento delle onde lunghe di ampiezza finita, Airy dimostrò che la variazione nella celerità con la profondità avrebbe generalmente causato un continuo cambiamento del profilo con il tempo e quindi non avrebbe potuto esistere un'onda stabile di semplice traslazione di massa.

Mentre Stokes stava contribuendo allo sviluppo dell'Idrodinàmica, due fisici tedeschi stavano cominciando ad applicare la potenza dello strumento matematico della *Conforme Trasformazione* (originalmente dovuta a Lagrange, grandemente sviluppata da Cauchy e poi largamente accresciuta in Germania per mano di Riemann, Christoffel e Schwartz) allo studio del *Moto Irrotazionale* in due dimensioni; tipo di moto, teòrico, nel quale si ipotizza che ciascuna particella, che compone il fluido, non subisca movimenti di rotazione nonostante il flusso; è una condizione che si può immaginare soltanto nei cosiddetti fluidi perfetti, ma ùtile per giungere a corrette interpretazioni matemàtiche.

Il primo: Hermann Ludwig Ferdinand von Helmotz (Potsdam 1821- Charlottenburg 1894). Nativo di Potsdam, conseguita la laurea in Medicina nel 1842, con una tesi sul sistema nervoso degli invertebrati, insegnò Fisiologia a Könisberg, a Bonn, ad Heidelberg; poi ricevette l'incarico all'Università di Berlino come professore di Fisica, materia alla quale si era definitivamente rivolto, e, contemporaneamente, fu anche Direttore dell'Istituto fisico-tecnico a Charlottenburg.

L'evoluzione della carriera di Helmotz nell'insegnamento seguì il mutare dei proprî studi; inizialmente si dedicò alla Fisiologìa, analizzando, tra l'altro, il rapporto tra lavoro muscolare e calore corporeo. Questi studi lo portarono ad interessarsi di Fisica, conducendo analisi teoriche sulle forze, pubblicati, nel 1847, nel testo "*Über die Erhaltung der Kraft.*", òpera che contiene la prima rigorosa esposizione fisico-matematica del principio di conservazione dell'energìa.

Lo scienziato tedesco condusse ricerche fisico-fisiologiche, rivelatesi poi fondamentali, sulla percezione visiva ed acustica, alle quali deve la sua maggior fama, utilizzando strumenti da lui stesso inventati, come l'oftalmoscopio; raccolse queste sue ricerche nell'òpera "*Handbuch der physiologischen Optik*", del 1856, dove formulò la teorìa (poi detta T*eoria di Young-Helmotz*) secondo la quale le sensazioni cromatiche possono essere ricondotte alla combinazione di tre colori

elementari: rosso, verde, violetto, ciascuno dei quali in grado di stimolare tre differenti tipi di ricettori.

Il particolare interesse di Helmotz nel campo dell'Idrodinamica fu l'analisi del moto dei vòrtici, ma nel suo testo "*Ueber discontinuirliche Flüssigkeitsbewegungen*" nel Berliner Monatsberichte, del 1868, egli focalizzò l'attenzione inizialmente sullo studio della superficie libera tra fluidi di differente densità.

Fu però la sua corretta analisi del flusso che si formava da un orifizio con tubo aggiuntivo (il *Tubo di Borda*, che abbiamo già visto) che lo portò a produrre una serie di lavori sulle linee di flusso che costituiscono tutt'oggi un riferimento essenziale.

Il secondo scienziato tedesco è Gustav Robert Kirchoff (Könisberg 1824 - Berlino1887). Nato a Könisberg, divenne professore straordinario di Fisica all'Università di Breslau, poi, nel 1854, in quella di Heidelberg ed infine a Berlino.

Fu particolarmente attivo nella ricerca nei campi della Fisica e dell'Elettrologìa, elaborando princìpi sui circuiti elettrici comunque complessi (*Leggi e Princìpi di Kirchoff*); è considerato uno dei fondatori della Spettroscopia; di lui ricordiamo la costruzione, assieme a R. W. Bunsen, di uno spettroscopio che permetteva di riconoscere gli elementi chimici analizzando la luce dagli stessi emessa o assorbìta.

Tra i risultati pratici di questi studi annoveriamo la scoperta di due nuovi elementi: il Cesio ed il Rubidio. Attraverso l'analisi spettroscopica, Kirchoff dimostrò che si poteva risolvere il problema, da tutti ritenuto irrisolvibile, dell'analisi della composizione delle stelle.

Questo grande scienziato tedesco condusse anche studi di Termodinamica, in particolare sul fenomeno dell'irraggiamento (emissione ed assorbimento della radiazione tèrmica).

Nel campo dell'Idrodinàmica, Kirchoff, che già prima del 1845 aveva condotto osservazioni sui percorsi del flusso, fu ràpido ad estendere l'analisi di Helmotz al caso del getto da una fenditura con un contorno piano ed al flusso che si separava incontrando un profilo affusolato, il cosidetto '*Piatto immerso*'.

Il suo documento "*Zur Teorie freier Flüssigkeitsstrahlen*", apparso sul *Crelle's Journal*, nel 1869, contiene l'equazione del profilo del getto, il coefficiente di contrazione π (π + 2) = 0,611 ed il coefficiente di resistenza di 0,88 per il piatto immerso.

Il coefficiente di contrazione, definìto da Kirchoff, rimane il limite teorico per la fenditura, per l'orifizio circolare, per la paratoia e per gli stramazzi a soglia sottile.

Il coefficiente di resistenza, a causa della mancanza di accordo tra le condizioni assunte ed i reali stati del moto nel quale non c'è una discontinuità della densità, ebbe una valutazione di fatto errata, ma il metodo di Kirchoff portò a fornire un punto di partenza per gli studi sulla *Cavitazione*, fenòmeno che si manifesta laddove il flusso crea zone dove la pressione diminuisce, anche a valori prossimi al vuoto assoluto, con gravi danni alle superfici esposte quali, ad esempio, le éliche delle navi progettate senza valutare tale effetto.

Il ruolo della *Cavitazione* nel provocare una superficie in depressione a valori minori di quello atmosfèrico fu discusso per la prima volta da Helmotz in un documento del 1868.

Giungiamo ora ad una figura che fu assai importante per il progresso dell'Idraulica: Valentin-Joseph Boussinesq (Saint André de Sangonis 1842-Parigi 1929).

Professore, dal 1886, alla Sorbona di Parigi, Boussinesq si occupò di studi statistici in Idraulica ed in Idrodinamica, di elasticità e di trasmissione del calore. Nato in una famiglia di agricoltori, a S. Andrè de Saugonis, Boussinesq completò l'educazione superiore a Montpellier mentre già insegnava al liceo. In questo periodo alla sua ufficiale occupazione di insegnante in varie scuole secondarie, affiancò una rigorosa attività di ricerca analitica, nella quale utilizzò le sue notevoli conoscenze in Matematica per condurre studi sui fenomeni fisici.

Durante il 1867 egli vinse il dottorato presso la facoltà di Scienze di Parigi, presentando, per errore, due dissertazioni, una sul calore ed una sulla luce.

Come insegnante era pressoché mediocre, per una combinazione di naturale indisposizione, mancanza di passione all'insegnamento, poco tempo disponibile; i continui cambiamenti di incarico, inframmezzati a periodi senza entrata alcuna, lo ponevano in precarie condizioni economiche. Soltanto nel 1873, il suo amico de Saint Venant riuscì a fargli assegnare una cattedra a Lille. Boussinesq continuò a prediligere lo studio, scrivendo numerose memorie sull'elasticità, sulla Meccanica delle terre, sulla Termodinamica, sull'Idrodinamica e sull'Idraulica.

Subito dopo la morte di Saint Venant, Bossinesq fu eletto all'Accademia delle Scienze.

Nominato professore alla Sorbona nel 1886, mantenne la Cattedra sino al 1896.

Professore assolutamente originale, egli condusse l'ultimo trentennio della sua vita ritirandosi da ogni contatto verso l'esterno; ogni giorno, alle tre del mattino, si presentava alla biblioteca dell'Università, aperta appositamente per lui, e lì si tratteneva sino all'ora di chiusura.

Il suo interesse non si limitò alle materie matematico-fisiche; si occupò anche di Filosofia e di Metafisica, nello sforzo di conciliare, come tentò Descartes, il determinismo e la libertà delle scelte di vita, cercando di dare all'òrdine matematico la possibilità di descrivere ogni aspetto della vita stessa. Teneva molto al proprio *Princìpio di Semplicità*, secondo il quale la verità deve trovarsi nella direzione che porti ad una unificazione delle teorie in una forma che tenda a rendersi sempre più semplice; con ciò aborriva la crescente complicazione che, in ogni campo, caratterizzava la ricerca e lo sviluppo dell'inizio del XX sécolo; per questo ne fuggiva, rifugiandosi nei suoi studi.

Delle cinquanta e più pubblicazioni di Boussinesq, la sua opera di 700 pagine "*Essai sur la théorie del aus courentes*.", presentata all'Accademia delle Scienze nel 1872, rimane un documento prestigioso nella letteratura idraulica; molti degli originali contributi in esso contenuti erano già stati pubblicati, da Boussinesq, in date precedenti, ma in questo lavoro essi sono inseriti integralmente in un trattato completo e sistematico, affrontando, in particolare, l'Idraulica delle tubazioni e dei canali a pelo libero.

La prima parte del libro inizia con la seguente dichiarazione:

"*I fluidi si muovono in due differenti maniere a seconda che il flusso avvenga in tubazioni molto strette, oppure in condotte o canali di grande sezione. Nel primo caso, i loro movimenti sono continui e le velocità sono ovunque gradualmente variate, ad ogni istante, da un punto del fluido ai punti vicini; le ben note formule, date da Navier, per rappresentare questi movimenti, bene ne esprimono il moto, con tutte le approssimazioni desiderate, a condizione che si assuma la velocità nulla nello strato a contatto con la parete; il coefficiente di attrito che si sviluppa da tali regolari movimenti è estremamente piccolo; ma se questa considerazione fosse*

sostenibile nelle tubazioni a grande diametro o nei canali a pelo libero, i filetti fluidi della corrente acquisterebbero, man mano che ci si avvicina alla parete, velocità di grandissima differenza. È quindi necessario, se si desidera che l'Idraulica continui ad esistere, sciogliere un enìgma, presente nelle parole di de Saint Venant, apparentemente irrisolvibile, sulla stima delle vere velocità all'interno di un fluido corrente con velocità non minime, oppure nel caso di brusche variazioni da un punto ad un altro, ovvero capace di produrre attrito con un valore di maggior òrdine di grandezza rispetto a quello del caso di tubazioni piccolissime. Per determinare i valori medi su un determinato piccolo elemento della corrente, non solo si devono conoscere le velocità medie locali intorno all'elemento, o piuttosto le relative derivate di primo ordine, per mezzo della misura dello sforzo medio di trascinamento degli strati liquidi, ma deve essere anche determinata l'intensità dell'agitazione dei vòrtici, che può prevalere nella conservazione dell'energìa. Per investigare, conseguentemente, le cause dell'agitazione dei vortici nei vari punti di una sezione ed il fatto che il coefficiente d'attrito varî con queste cause, così come per determinare l'equazione del moto, non si devono soltanto considerare le relazioni che esprimono, in un dato momento, l'equilibrio dinamico dei diversi volumi elementari del fluido, ma anche i valori medi di queste relazioni durante un tempo adeguatamente breve . . ."

Boussinesq poi procedette a derivare le stesse equazioni di base del moto, come altri avevano fatto prima di lui, ma considerò, in modo originale, che il coefficiente di attrito potesse essere espresso come una funzione dello stato del flusso:

"*Queste espressioni sono isotropiche e non differiscono da quelle che Navier produsse per rappresentare lo sviluppo dell'attrito in movimenti continui, eccetto che il coefficiente ε, dipendente, in ogni punto, non soltanto dalla temperatura e forse dalla pressione ma anche e soprattutto dall'intensità media dell'agitazione prodotta localmente. Gli esperimenti di Du Buat e di Darcy hanno mostrato che ε non varia sensibilmente in funzione della pressione, cosa apparentemente naturale quando si pensa che la pressione può influire sulla densità del fluido, riducendo la recìproca distanza tra le molecole, senza causare l'aumento della loro resistenza al trascinamento relativo. Il contrario è, invece, vero per due solidi, più o meno coperti da asperità, pei quali lo spazio delle superfici contigue cambia grandemente con la pressione normale che li mantiene in contatto. Ma se il coefficiente ε dell'attrito interno è essenzialmente invariabile quando la pressione cambia, dall'altro lato esso dipende enormemente dalla agitazione media che si verifica nel punto considerato. Questa agitazione muove, in effetti, dal generale moto di traslazione, ma . . . diventa così una sorgente di resistenza, passiva incomparabilmente più grande dell'attrito sviluppato nel moto continuo. Si evidenzia, infatti, che il coefficiente è prossimo a zero nel punto dove la locale agitazione è nulla, ma cresce in proporzione all'agitazione stessa e dipende da tutte le cause che possono causare tale turbolenza*."

A causa della mancanza di dati sperimentali, Boussinesq fu portato ad accettare valori presunti sulla variazione di ε, considerandolo, giustamente, proporzionale al raggio idraulico, alla velocità vicina al contorno ed al peso specifico del fluido, ma, erroneamente, considerò che il coefficiente ε fosse essenzialmente costante con la profondità, nel caso di canali molto larghi, ma inversamente proporzionale alla distanza dall'asse del tubo, nel caso delle condutture.

Una volta così formulato ε, tuttavia, le equazioni del moto divennero integrabili in termini di caratteristiche sezionali e coefficienti sperimentali. Nella seconda edizione del suo libro, Boussinesq integrò queste equazioni per il caso di cambiamenti molto lenti nella sezione trasversale, che portarono in particolare alla seguente equazione del flusso gradualmente variato in canali a pelo libero:

$$S = \frac{C^2}{V^2} R + (1 + \eta + \theta) \frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Questa equazione differisce da quella di Coriolis, in virtù della sua derivazione, che rappresentava fondamentalmente una quantità di moto piuttosto che una relazione di energia. Come risulta, il coefficiente α di Coriolis, per l'energìa cinética del flusso, fu rimpiazzato dal coefficiente, di minor valore, della quantità di moto (indicato oggi con il simbolo β):

$$1 + \eta = \int \frac{V^2 dA}{V^2 A}$$

Tuttavia, questa riduzione fu più che bilanciata dal fattore θ, che rappresentava il cambiamento della sezione trasversale. Il residuo termine per la resistenza al contorno poteva essere valutato dalle esistenti formule del moto uniforme.

Il risultato fu una formulazione, considerevolmente più rigorosa di quella di Coriolis, ma ancora dipendente dalle impostazioni di Boussinesq – solo parzialmente corrette – come per la variazione di ε. Per le condizioni assunte egli mostrò che $\alpha \approx 1+3\eta$ e che $1+\eta+\theta$ variava tra 1,08 nelle sezioni rettangolari a 1,14 per le sezioni circolari – valori così vicini che l'errore era non importante.

Boussinesq poi estese la sua equazione per correnti gradualmente variate ad includere, come prima approssimazione, gli effetti della curvatura in zone di più rapida variazione, in tal modo mostrando che, nelle vicinanze della profondità critica, una forma ondulata della superficie libera doveva necessariamente essere stabilizzata. Questo lo portò a designare una classe intermedia tra i fiumi ed i torrenti di Saint Venant: i canali; nei quali l'effetto della curvilinearità non poteva essere ignorato. La terza sezione del libro entra in maggior dettaglio nei vari aspetti delle onde nei canali a pelo libero. Per il caso di acqua in quiete, Boussinesq sviluppò la formula generale della celerità:

$$c = \sqrt{gh} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\Delta h}{h} + \frac{h^2}{6\Delta h} \frac{d^2 \Delta h}{dx^2} \right)$$

Ottenendo una raffigurazione dell'approssimazione di Airy, con l'idea di includere l'effetto della curvatura della superficie; in tal modo potè dimostrare che i vari elementi di un'onda data potevano propagarsi con la medésima *Celerità*, a condizione che il profilo si configurasse, prima dell'onda, in forma di moto permanente.

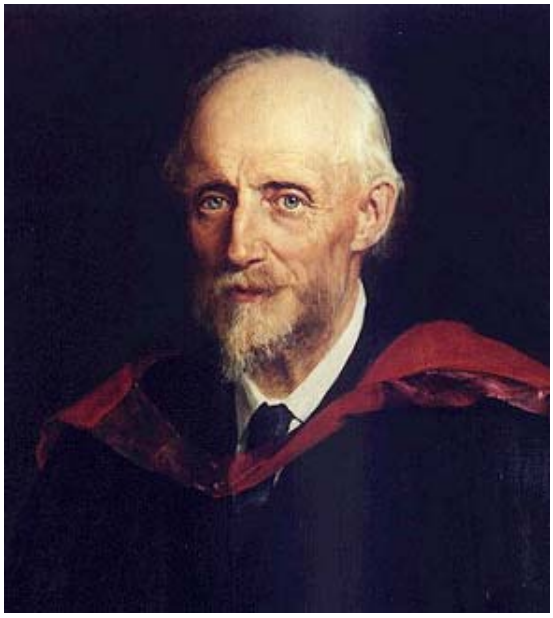
Dopo aver valutato lo spostamento del centro di gravità di un'onda ed aver dimostrato che la sua energìa cinética era scomponibile in una metà cinética ed una metà potenziale, Boussinesq determinò il profilo di un'onda stabile isolata, indagando gli effetti che su di questo produce la pendenza del canale, ed espresse la formula per disegnare le traiettorie; procedette poi ad esaminare il caso del moto delle onde in acqua corrente, determinando l'effetto della distribuzione sìa delle celerità che della stabilità dell'onda; nel caso di onde lunghe, inoltre, aggiunse l'analisi degli effetti delle condizioni al contorno, ivi compresa la resistenza allo stesso moto.

La quarta parte del libro di Boussinesq consiste in tre notazioni supplementari: una sugli orifizi e sugli stramazzi; la seconda sulle condotte e sulle curve dei canali; la terza sugli effetti della capillarità. Questi tre passi sono forse i meno eclatanti dell'intera òpera, perché i risultati non raggiungono il medésimo rigore ottenuto da Kirchoff (le cui teorie sulle correnti a pelo libero non furono accettate da Boussinesq), ma non furono neppure assai distanti dai casi realmente osservati, come invece avveniva negli studi di molti idraulici sperimentali.

Però, in un'appendìce che riporta una serie di note chiarificatrici, Boussinesq incluse un trattato, di notevole fattura, sugli effetti della forma della sezione trasversale di una tubazione sul valore della resistenza al moto; in questo incluse una rigorosa analisi Idrodinàmica del *Moto Laminare* (ovvero: flusso non turbolento) nei tubi a sezione circolare, quadrata e triangolare.

Il lavoro di Boussinesq non fu soltanto straordinariamente completo per il suo tempo, ma segnò l'inizio della nuova época del consolidamento della conoscenza nelle materie dell'Idraulica; ancòr oggi, infatti, il suo trattato è necessario per quanti vogliano condurre analisi, anche più approfondìte, sugli stessi temi.

Il trattato di Boussinesq, di fatto, non si presta ad una lettura per diletto, ed è sconsigliabile a chi, volesse, anche se 'del mestiere', accostarlo per un proprio desiderio di comprendere l'intero quadro da lui costruìto. A dispetto del suo *Principio di Semplicità*, Boussinesq non si potè sottrarre alla complicazione di molte delle sue analisi, dimostrando egli stesso l'utopìa di tale ìdea. Il libro resta comunque un riferimento ancòra valido per chi volesse approfondire particolari aspetti dei fenomeni in esso affrontati.



Nato nello stesso anno di Boussinesq, Osborne Reynolds (Belfast 1842- Wattchet 1912) differiva grandemente dal collega francese anche negli stessi studi che i due condussero indipendentemente. Mentre Boussinesq avvicinò l'Idraulica dal punto di vista teorico, Reynolds analizzò ogni aspetto con la prospettiva dell'ingegnere, come testimoniano i suoi esperimenti con i modelli delle maree dei quali abbiamo già detto. Paradossalmente, tuttavia, il maggior contributo di Boussinesq è da ricomprendersi negli aspetti dell'Idraulica, mentre Reynolds deve essere annoverato tra coloro che contribuirono allo sviluppo dell'Idrodinàmica.

Reynolds veniva dalla famiglia di un pastore anglicano di Belfast e dopo una prima esperienza di officina, studiò Matemàtica a Cambridge, dove si laureò con lode. Nel 1868 fu nominato alla nuova cattedra di Ingegneria (che era allora la seconda di tale tipo in Inghilterra) nell'*Owens College*, che più tardi divenne la *Victoria University*, a Manchester. Qui egli organizzò un corso di tre anni di letture per tutti gli studenti di Ingegneria, senza riguardo al loro campo di specializzazione. Il suo metodo di lettura fu ben lontano dall'ortodossìa e non particolarmente facile da seguire; tutti i suoi studenti lo trovarono però decisamente stimolante.

Non avendo a disposizione un laboratorio, Reynolds inizialmente ne attrezzò uno 'di fortuna' nella sua casa; ottenne poi dall'Università di poterne realizzare uno al College e lì condusse un'ampia varietà di studi. Il suo interesse fu molteplice; la sua produzione altrettanto, sìa come scrittore sia come sperimentatore; compose infatti più di settanta lavori, tutti caratterizzati non solo dal rigore scientifico ma da un'esposizione intrigante; possiamo dire che Reynolds, a differenza di Boussinesq, sìa stato un miglior comunicatore, individuando forse quella via di mezzo tra l'aspirazione di semplicità del francese e l'oggettiva complicazione delle interpretazioni dei fenomeni idraulici.

Reynolds esplorò vaste parti della Fisica e dell'Ingegneria: da un lato, infatti, si applicò a temi di Meccanica, Termodinamica, Elettrologia, dall'altro studiò questioni legate alla navigazione, alla propulsione ad élica, all'attrito volvente ed alle prestazioni dei motori a vapore, e non solo.

Nonostante la particolare attenzione all'Idrodinàmica, Reynolds deve essere ricordato per aver enunciato una nuova e valida teoria sulla lubrificazione degli òrgani meccanici in movimento e per il perfezionamento del freno idraulico. Nel 1877 fu eletto "*Fellow*", e rimase attivo a Manchester sino al suo ritiro per motivi di salute nel 1905.

Per quanto riguarda l'Idraulica, Reynolds fu il primo a dimostrare il fenomeno della *Cavitazione* e ad attribuirne il rumore al collasso delle bolle di acqua vaporizzata, a causa della locale riduzione della pressione a valori inferiori alla tensione di vapore dell'acqua, " . . *quasi come in una pentola che inizia a bollire* . . . "; lo scienziato irlandese fu anche il primo a correlare le scale di riduzione del tempo e della lunghezza nello studio con modelli a scala, ridotta ma non omogenea, cioè deformati nelle proporzioni; il primo che introdusse la viscosità nei parametri che fissano il lìmite tra i moti turbolento e laminare.

Sebbene Hagen avesse certo preceduto Reynolds nel dimostrare l'esistenza di entrambi questi tipi di moto, fu il suo ultimo scritto "*Una ricerca sperimentale delle circostanze che determinano se il Moto dell'Acqua potrà essere rettilineo o sinuoso, e della legge di resistenza in Canali paralleli*", del 1883,, che contiene la formulazione dei parametri che ora portano il suo nome.

Scrive Reynolds:

"*Le equazioni del moto erano state oggetto di un così accurato studio, in particolare da parte del prof. Stokes, che c'erano poche possibilità di scoprire qualcosa di nuovo o di trovare in esse qualcosa di imperfetto. Mi sembrò possibile, tuttavia, che potessero contenere aspetti ancora degni d'essere indagati in òrdine alla dipendenza delle caratteristiche del moto in relazione alle proprietà dimensionali ed alle circostanze esterne. Trovai questa relazione, in via defintiva, senza neppure ricorrere all'uso del calcolo integrale. Se il moto è supposto dipendere da un singolo parametro di velocità U, che assumiamo essere la velocità media lungo il condotto, e da un parametro singolo c, che è la misura del raggio del condotto stesso, allora, eliminata come è usuale l'effetto della pressione, le accelerazioni possono essere espresse in due distinti términi; uno dei quali è*

$$\frac{U^2}{c^3}$$

e l'altro

$$U\frac{\mu}{\rho c^4}$$

Cosicché i valori relativi di questi termini variano rispettivamente in proporzione alla velocità U ed al fattore $\frac{\mu}{\rho c}$

Questa è la definitìva relazione nell'esatta forma nella quale la stavamo cercando. Naturalmente, senza eseguire alcuna integrazione, le espressioni danno solo la relazione senza mostrare in qual modo il movimento dipenda da essa.

Sembrò, tuttavia, certo che se i vortici erano dovuti ad una particolare causa, quella integrazione avrebbe mostrato che l'insorgere dei vortici dipendesse dai valori definiti dall'espressione:

$$\frac{c\rho\mu}{U}$$

In séguito, Reynolds riuscì a dimostrare sperimentalmente che la velocità alla quale iniziava il moto dei vortici (cioè si passava dal moto Laminare al Turbolento) variava in funzione

del diametro della condotta e delle caratteristiche del fluido; lo scienziato irlandese fu così in grado di elaborare il parametro che fissa questo lìmite e che, nella terminologìa idraulica, assumerà il nome di *Numero di Reynolds*.

Al momento della sua formulazione, però, lo scienziato irlandese non dedicò grande interesse al significato, all'utilità ed alla quantificazione di questo parametro; si limitò ad affermare, in modo apparentemente casuale, che esso esprimeva il limite tra due condizioni di moto che chiamò '*condizioni critiche superiori ed inferiori*'. Furono, in séguito, alcuni esperimenti che indussero Reynolds a studiare le variazioni della resistenza, con particolare attenzione all'intorno dei valori, assunti dal parametro, che segnavano l'inizio dell'instabilità del flusso.

Sebbene Reynolds, in un successivo documento, stabilì che il parametro

$$\rho \cdot DU_m / \mu$$

fosse dell'ordine di grandezza di 1,4 x 10^3 , che poi ricalcolò a 1,9 e poi a 2,0, per definire la linea di demarcazione tra il moto Laminare ed il moto Turbolento, mai associò questo parametro al fenòmeno della resistenza al moto.

Il *Numero di Reynolds* è indubbiamente il contributo più prezioso nell'analisi del moto dei fluidi, in particolare in aerodinamica, dove lo studio dei lìmiti di turbolenza è particolarmente importante.

Lo scienziato irlandese lo usò, per la prima volta, nella formula di Navier-Stokes per elaborare, nel 1886, la *Teoria della Lubrificazione*, che si òccupa di interpretare le caratteristiche del liquido lubrificante interposto tra i meccanismi da lubrificare, il cosiddetto *film di olio*; analizzando la distribuzione della velocità e delle pressioni, sìa nel caso di scorrimento tra piani sia nel caso del rotolamento dei cuscinetti a sfera, Reynolds ottenne risultati in perfetto accordo con le misure ed i dati disponibili.

Poi nel suo scritto, del 1894, "*Sulla teoria dinamica dei fluidi viscosi incomprimibili e sulle determinazioni dei criteri*." egli estese le equazioni di base al caso del moto turbolento attraverso l'analogìa con la teoria cinetica dei gas.

In quest'òpera Reynolds attribuisce alla turbolenza l'effetto di smaltire parte dell'eccesso di energia cinética in calore, individuando un'equazione che esprime tale dissipazione di energia in tutto simile a quella generale della conversione in calore dell'energìa. Disponendo così dello strumento per stimare quando il moto Turbolento, dissipando calore, si sostituisce al moto Laminare e quando la dissipa, Reynolds cercò di utilizzare il bilancio energético tra guadagno e perdita per determinare il parametro che ìndichi il punto di transizione tra i due moti.

Questo parametro, così derivato, era evidentemente lo stesso (che fu poi chiamato *Numero di Reynolds*) che aveva precedentemente formulato partendo dalle sole considerazioni dimensionali, ma a quel punto lo scienziato irlandese fu in grado di determinare per esso un valore minimo, al di sotto del quale la turbolenza non può persistere.

Nonostante questo importante significato, ancora una volta Reynolds non proseguì nella ricerca, raccolgiendone i grandi frutti ormai pronti, ma si limitò a considerazioni termodinàmiche che permettevano di esprimere la variazione della temperatura nel flusso, oggi chiamati *Numeri di Karman*.

Reynolds, in definitiva, non ebbe mai la giusta consapevolezza della grande importanza del traguardo che raggiunse definendo il parametro che consentiva di predire l'inizio della turbolenza.

Il suo ultimo contributo, tuttavia, fu la derivazione delle equazioni del moto – ora conosciute come le *Equazioni di Reynolds* – per il flusso turbolento. Sotto condizioni nelle quali gli sforzi impediscono l'aumento del moto primario (cioè ad alti numeri di Reynolds) i termini di Saint

Venant diventano esprimibili (come lo stesso Saint Venant aveva vagamente intuito) in termini di velocità secondarie.

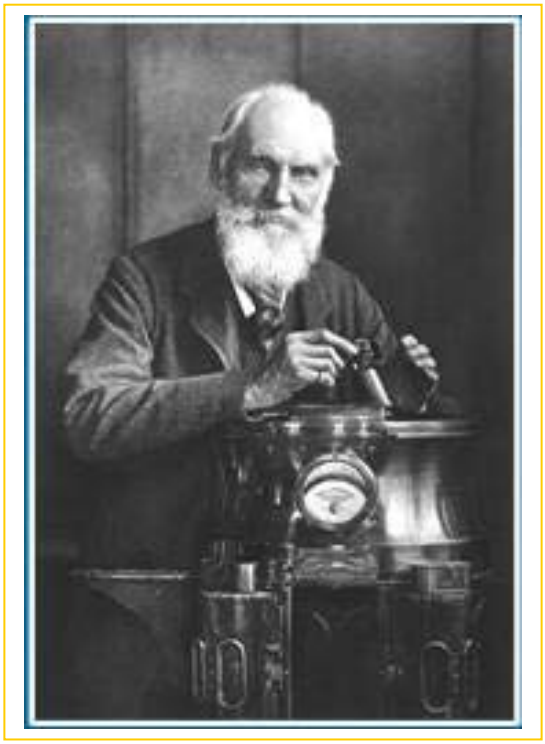
$$2\varepsilon \cdot \frac{du}{dx} = -\rho \cdot u'^2 \qquad \text{e} \qquad \varepsilon\left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}\right) = -\rho u' v'$$

Reynolds così compì in un modo rigoroso ciò che Boussinesq aveva cercato di fare attraverso la valutazione approssimata del coefficiente di Saint Venant. Per scarsità di una soluzione completa del problema della turbolenza, entrambi i metodi di approccio continuano ad essere usati: quello di Boussinesq, nei problemi connessi alla distribuzione della velocità media, e quello di Reynolds nell'analizzare in sé stesso il meccanismo della turbolenza.

Contemporanei di Reynolds, tre Inglesi mèritano la citazione in questo Capitolo sull'Idrodinamica del 19° secolo.

Il primo fu William Thomson (Belfast 1824- Netherhall 1907), nativo di Belfast, Irlanda; il secondo fu John William Strutt, barone di Rayleigh (Langford Grove 1842- Witham 1919) nato nell'Essex e divenuto meglio noto sotto il titolo ereditato di lord Rayleigh; il terzo fu Horace Lamb (Stockport 1849-1934), originario di Stockport, che, grazie alle sue scoperte, ottenne la nomina a Cavaliere.

Tutti studiavano all'Università di Cambridge e tutti contribuirono grandemente all'Idrodinàmica nella tradizione di Euler, Lagrange, Laplace, Stokes, Helmotz e Kirchoff. La loro influenza sulla storia dell'Idraulica fu, così, quasi indiretta ma non per questo meno importante.



William Thomson barone di Kelvin, figlio di un professore di Matematica, ottenne, appena ventiduenne, la cattedra di Fisica all'Università di Glasgow, dove rimase per cinquantatre anni, durante i quali, tra le tante iniziative, istituì il primo laboratorio britannico per le ricerche di elettrodinàmica. Nel 1890 fu eletto Presidente della *Royal Society* e nel 1892 fu nominato *Pari d'Inghilterra* con il titolo di barone di Kelvin.

I suoi più grandi contributi sono relativi al campo della Termodinàmica, definendo la scala assoluta di temperatura, detta oggi scala Kelvin i cui gradi si indicano con '*K*°'.

Nel 1851 questo scienziato britannico pubblicò una memoria sulla teoria dinàmica del calore e sulla dissipazione dell'energìa, dove è contenuta la prima enunciazione del *Secondo principio della Termodinamica*.

Il Lord Kelvin si occupò anche di problemi pratici, ideando, tra tante innovazioni, nuovi tipi di cavi telegrafici sottomarini. I molti dispositivi da lui brevettati gli fruttarono notevoli successi anche economici, oltre a riconoscimenti pubblici. I suoi trecento documenti e testi scientifici coprono praticamente ogni aspetto della Fisica e della Matematica; ma non meno importante fu il suo lavoro nel campo dell'Idrodinamica. Sviluppò infatti l'analisi del flusso irrotazionale, il moto dei vortici, il fenomeno delle maree, le onde nei canali a pelo libero, le onde generate dalle navi e le onde capillari. Fu lui che per primo espresse le

condizioni di *Minima Celerità* per le onde su una superficie sotto l'azione gravitazionale e – alcuni anni dopo Reynolds – per primo investigò analiticamente l'instabilità del flusso di un fluido viscoso; in particolare, fu Kelvin che, nel 1887, introdusse la parola '*turbolenza*' per indicare lo stato del moto fluido oltre il valore critico del *Numero di Reynolds*.

John William Strutt, barone di Rayleigh, successe a J.C. Maxwell alla cattedra di Fisica sperimentale all'Università di Cambridge nel 1879 e, dal 1887, fu professore di Filosofia naturale alla *Royal Institution* di Londra.

Segretario della *Royal Society*, ne divenne Presidente nel 1905.

La sua prevalente attività di ricercatore fu rivolta all'Ottica, con importanti studi sul potere di risoluzione degli strumenti ottici e sulle analisi delle dimensioni molecolari basate sulla diffusione della luce nei gas.

Di grande rilievo furono anche gli sudi di Strutt in Acustica, con la formulazione di tre teoremi sulle vibrazioni sonore; ideò uno strumento per misurare la pressione sonora, oggi detto *Disco di Rayleigh*; condusse anche ricerche di spettroscopia, sull'elettricità e sulla densità dei gas; nel 1904 ricevette il premio Nobel per la scoperta del primo gas nobile, l'Argon, avvenuta in collaborazione con W. Ramsay, che condivise il prestigioso riconoscimento.

I suoi contributi nell'Idrodinamica furono singolarmente 'paralleli' a quelli di Kelvin, ma in cinque questioni si distinse in modo originale:

- nell'analisi del collasso di una bolla all'interno di un liquido, che ora forma la base dello studio del danno dovuto alla cavitazione;
- nella sua completa ricerca delle caratteristiche delle onde, sìa nella forma di oscillazioni della superficie in serbatoi sìa alla valutazione del profilo delle onde di ampiezza finita;
- nello studio dell'instabilità dei getti;
- nell'introduzione sulle analogìe della cessione del calore nel moto laminare;
- in ultimo, ma probabilmente aspetto più rilevante per questa Storia, la divulgazione del *Principio della Analogìa Dinamica*. Sebbene Fourier avesse iniziato la costruzione dell'approccio dimensionale, all'inizio del 1822, e vari altri avevano da allora proseguito, secondo differenti prospettive, in ciò che oggi è chiamata *Analisi Dimensionale*, non fu che fino al primo tentativo di Rayleigh di generalizzare il princìpio, nel 1899, che questo approccio non attrasse ben più di una casuale attenzione. La sua nomina, nel 1909, alla Presidenza della prima Commissione Britannica di Aeronautica non solo indicò il valore riposto sulla sua conoscenza scientifica ma senza dubbio influenzò considerevolmente il corso di questo nuovo campo scientifico.

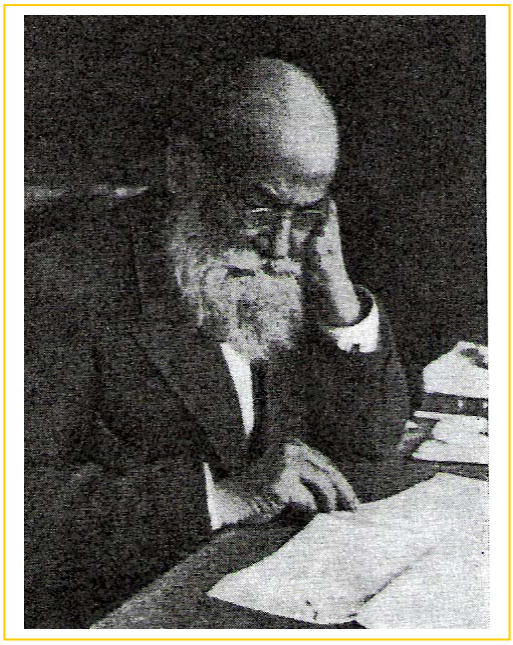
Horace Lamb, dopo essere stato *fellow* al Trinity College e poi professore di Matematica all'*Adelaide University*, fu nominato professore a Manchester, assieme a Reynolds, dove rimase sino al suo ritiro nel 1920.

Sebbene sìa stato autore di scritti di Matematica, Meccanica, Acustica, Elasticità, ed Elettricità, Lamb è meglio conosciuto oggi per i suoi scritti di Idrodinamica.

Il primo di questi fu "*Teoria matematica del moto dei fluidi*", del 1878, seguito nel 1895 dalla sua monumentale "*Idrodinamica*", passata attraverso sei edizioni, resta il riferimento standard su questo argomento; il particolare interesse di Lamb all'analisi del moto d'onda emérge chiaramente in questo testo, che è, tuttavia, un'amplissima, diremmo quasi inesauribile, fonte di informazione storica e tecnica in molte tematiche della scienza.

Il primo idrodinamico di valore, in terra di Russia, fu Nicolai E. Jouwkowsky (1847-1921), figlio di un ingegnere civile del Dipartimento Federale di Ingegneria Civile.

Nato vicino a Vladimir ed inviato a Parigi per completare la propria educazione, Jouwkowsky impiegò il resto della sua vita professionale a Mosca, come professore di Meccanica, dal 1872, all'Istituto Politecnico e dopo il 1886 all'Università. Sviluppò, in quel periodo, un profondo interesse sulla spinta idrodinamica e nel 1891 egli costruì all'Università una piccola galleria del vento, per condurre le indagini sperimentali sulla resistenza al moto nell'aria.



I contributi di Jouwkowsky allo sviluppo dell'Aeronautica, durante i successivi decenni, furono così importanti che Lenin gli conferì il titolo di "*Fratello dell'aviazione russa*".

Jouwkowsky è forse meglio conosciuto per la sua formulazione, nel 1905, del *Teorema Generale della Spinta Laterale*, esercitata su un cilindro di sezione trasversale qualunque, immerso in un flusso irrotazionale con velocità costante. Da questo primo passo, lo scienziato russo estese l'analisi ad includere non solo la spinta, ma anche l'intero caso del flusso attorno una serie di piani bidimensionali, di variabile spessore e curvatura.

Ci spostiamo in Germania per ricordare William Kutta (1867-1944), che, ispirato dagli studi sperimentali di Otto Lilienthal, aveva ottenuto, in modo indipendente, alcuni dei risultati di Jouwkowsky, compresa l'originale (ad entrambi attribuìta) interpretazione del princìpio della vite a còclea o *Vite di Archimede*, macchina che sfrutta il princìpio della Circolazione dei Flussi la cui teorìa, con la quale l'inglese F.W. Lanchester (citato nel precedente Capitolo) iniziò l'analisi della spinta aerodinàmica, non possedeva, sino ad ora, il rigore dell'analisi di Kutta- Jouwkowsky.

Sebbene Jouwkowsky avesse ottenuto il maggior crèdito per i suoi progressi in Aeronautica, non resta privo di interesse, soprattutto per noi, il suo trattato sul fenomeno del *Colpo d'Ariete*.

Già Helmotz aveva mostrato, nel 1848, che la celerità con la quale il suono si propagava attraverso un liquido comprimibile in un condotto poteva variare con l'elasticità del materiale del condotto stesso e, nel 1878, D.J. Korteweg aveva tratto la corrispondente equazione.

Ma rimase a Jouwkowsky dimostrare e calcolare, nel 1897, l'aumento di pressione prodotto in una condotta d'acqua a causa della rapida chiusura di una valvola, utilizzando l'analogìa con i fenomeni acustici.

Il Colpo d'Ariete è, infatti, il fenomeno provocato, in una lunga condotta, quando il flusso subisce una veloce, se non immediata, riduzione o interruzione della portata. L'acqua prossima alla chiusura si arresta, ma quella lungo la condotta mantiene, nel primo àttimo, la velocità originale mentre l'energìa cinética dell'intera condotta rapidamente si trasforma in energìa di pressione, o meglio di sovrapressione contro le pareti, con valori a volte elevatissimi (si pensi, ad esempio, alle *Condotte Forzate* delle centrali idroelettriche, spesso lunghe chilòmetri e con pressioni, ordinarie, di centinaia di atmosfere). Per limitare i valori della sovrapressione, si inseriscono nei condotti: *Pozzi Piezométrici*, *Camere ad aria* oppure, con tecnologìa ormai più diffusa negli acquedotti, *Vàlvole di Sicurezza*.

Jouwkowsky fu impegnato, nell'estate del 1897, ad una serie di esperimenti a larga scala, per determinare la massima velocità dell'acqua che poteva, con adeguata sicurezza, essere usata nel nuovo acquedotto di Mosca; il test fu condotto con tubazioni di 50, 100 e 150 millimetri di diametro e di lunghezza variabile da 30 a 800 metri.

Lo scienziato russo non si limitò ad analizzare gli effetti di differenti tipologìe delle vàlvole di chiusura, della càmera di carico, delle valvole di sicurezza e di tutti i meccanismi e strutture coinvolti nel *Colpo d'Ariete*, ma, per ogni situazione, egli elaborò la relativa ed accurata analisi matematica. Il rapporto fu pubblicato, sia in russo che in tedesco, nel 1898, nelle *Memorie* dell'Accademia delle Scienze di San Pietroburgo, e rappresenta, in letteratura, la prima compléta analisi del Colpo d'Ariete.

Ecco alcune osservazioni, di particolare chiarezza, distinguendosi così, anche nella forma, dai confusi ed imprecisi approcci che avevano affrontato questo problema sino a quel tempo:

"*. . . la massima sovrappressione causata dal Colpo d'Ariete è data dalla formula*

$$\Delta p = v\, c\, \rho$$

da questa formula . . . noi vediamo che l'incremento di pressione Δp è direttamente proporzionale alla velocità v, del flusso che viene arrestato, alla densità ρ, alla celerità c, con la quale si propaga l'onda di pressione, ma è indipendente dalla lunghezza del tubo; la celerità c è espressa nella forma:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\rho}{E_w} + \frac{D\rho}{SE_v}\right)}}$$

. . . una camera d'aria di adeguata grandezza può proteggere quella parte della condotta compresa tra la stessa camera d'aria e l'origine del colpo d'ariete. Questa misura è, in generale, sufficientemente adeguata . . . tuttavia è preferibile utilizzare valvole di sicurezza . . . la valvola di sicurezza permette lo sfogo della sovrapressione del colpo d'ariete attraverso una molla che règola la chiusura, tarata per aprirsi oltre un prefissato limite della pressione stessa . . . "

L'ultimo personaggio ad essere qui ricordato, nella ricerca in Idrodinàmica del XIX sécolo, è Junius Massau (Goselies 1852-1909), nato a Gosselies, Belgio, ed educato alla scuola di Genio Civile di Gant.

Come molti altri, citati in questo Capitolo, iniziò l'attività come Ingegnere Civile, ma la sua singolare abilità in Matematica, già evidente nel corso della scuola secondaria, apparve chiara a tutti quando pubblicò il pregevole studio sul giroscopio, che lo stesso Massau espose nel corso di una competizione universitaria, nella quale meritò, per questo, il Primo Premio.

Poco dopo questo primo successo, questo ingegnere belga entrò nel nazionale Corpo di Ponti e Strade, che abbandonò, nel 1878, per assumere la carica di professore di Matemàtica all'Università di Gant, dove rimase per sei anni.

Mai abbandonando gli studi matematici, Massau, nel 1889, pubblicò una memoria sull'integrazione grafica delle equazioni a derivate parziali, pròdromo del successivo trattato, pubblicato in prossimità della fine del sécolo, sotto il titolo "*Intégration garphique par les caratéristiques*.".

In Idraulica, Massau si pose in particolare il problema di capire dove si manifestassero discontinuità nel movimento delle onde; le variabili indipendenti, caratteristiche di questo moto, erano già state usate da Riemann, nel 1860, per valutare il percorso delle onde sonore, nel piano

bidimensionale. Il contributo di Massau, pertanto, non costituì lo sviluppo originale del método, ma piuttosto la sua applicazione ad un fenòmeno determinato dalla Gravità, risolto attraverso lo sviluppo grafico, piuttosto che con metodi numerici. Ancor oggi esso rappresenta forse il più potente strumento disponibile per l'analisi di tali fenomeni, nel caso delle onde di piena, che non sono suscettibili di essere esaminate secondo le procedure dell'Idrodinamica classica.

Un paragone tra gli aspetti affrontati nello studio dell'Idrodinamica e dell'Idraulica, così come esaminati dai lavori di Lamb e di Flamant, può dare una adeguata sìntesi degli sviluppi raggiunti al dischiudersi del XX secolo.

Nell'Idrodinamica si compirono sforzi per concludere l'analisi di un fluido perfetto, lasciando in secondo piano l'aspetto del *Moto Laminare*, quasi ignorando il problema del flusso in moto Turbolento, che era quasi esclusivamente il tipo di moto con il quale l'Idraulica si confrontava quotidianamente. Alcuni degli idrodinamici, a dire il vero, erano stati eccellenti sperimentatori ed alcuni degli idraulici avevano enfatizzato l'approccio rigorosamente scientifico. Ma alla lunga, dall'una e dall'altra parte, ogni studio non sembrava mosso dalla necessità di creare lavori pratici e pochi avevano una preparazione matematica sufficiente per comprendere pienamente i pertinenti risultati teorici.

Cosicché il XIX secolo giunse al términe con i due campi di ricerca, Idraulica ed Idrodinamica, essenzialmente indipendenti l'uno dall'altro, ognuno progredito grandemente nell'ùtile conoscenza e nella tecnica, ma con scarsa percezione delle loro stesse necessità ed un altrettanto inadeguato apprezzamento delle opportunità create per le pratiche applicazioni.

* * *

Cap. 20 – L'ormai indispensabile Laboratorio di Idraulica

E' attribuìto a Galileo Galilei (Pisa 1564 – Arcetri 1642), del quale abbiamo ampiamente trattato nel Capitolo 7, il mérito d'aver dato origine al método sperimentale nella ricerca scientifica, sebbene, in questo, egli non fu solo tra coloro che, all'inizio del Seicento, diedero un notevolissimo impulso alla scienza tutta, quindi anche alle attività sperimentali, delle quali lo scienziato pisano fu certo maestro.

L''Occhiale' e l'Occhialino', così Galileo Galilei chiamava il telescopio ed il microscopio, furono tra i primi sofisticati strumenti scientifici che aprirono gli occhi della ricerca nell'infinitamente grande e nell'infinitamente piccolo, nuovi orizzonti di indagine che si mostravano, entrambi, sconfinati. Telescopio e microscopio che richiesero la diffusione di officine ottiche e meccaniche, per la loro produzione, e di luoghi dove potessero essere messi a disposizione di più ricercatori. Tra bottega artigiana e luogo di ricerca, nasceva così, velocemente, un nuovo luogo del sapere e dell'indagine: il Laboratorio.

Più frequentemente dedicati alla Chimica (allora detta Alchimìa), alla Medicina ed all'Astronomìa, nel XVII sécolo i primi laboratorî nacquero su iniziativa di nobili famiglie illluminàte, spesso regnanti: gli Hohenzollern, gli Asburgo, i Médici. Non mancarono, quantunque, iniziative private, di sìngoli scienziati, dalle sufficienti forze economiche, che allestivano laboratorî privati, che spesso assumevano la funzione di 'salotto scientifico', dove fervevano la ricerca ed il confronto delle idee.

Ricordiamo così, dopo averla citata nel Capitolo 11, la scienziata francese Gabrielle-Émilie Le Tonnellier de Breteuil, marchesa de Châtelet (Parigi 1706 – Lunéville 1749), che, dopo essersi ritirata, nel 1633, nella residenza di Carey, nella Lorena, allestì colà una grande biblioteca ed un laboratorio, che ben presto divenne riferimento per molti scienziati francesi.

Altro importante esempio fu il laboratorio allestito, a proprie spese, da Robert Boyle (Lismore 1627 – Londra 1691) ad Oxford nel 1654, nel quale lo scienziato inglese non soltanto trasse argomenti per importanti scoperte, ma certo maggior vigore nel sostenere e poi realizzare la *Royal Society*.

Furono proprio le nascenti società scientifiche, le Accadémie, delle quali abbiamno parlato nel Capitolo 8, che sostennero e furono, a loro volta, sostenute dai laboratori scientifici, che ne divennnero, ben presto, strumenti essenziali.

Assai significativa fu una delle più antiche, l'*Accadémia del Cimento*, voluta da Leopoldo de' Mèdici nel 1657, il cui motto '*Provando e riprovando*' ben racchiude il nuovo approccio sperimentale che, da Galilei, scatenava la tensione della ricerca, in ogni campo.

Per la 'nostra' Idraulica, giova ricordare l'azione del fiorentino Vincenzo Brunacci (Firenze 1768 – Pavia 1818) che, a Pavia nel 1803, fondò il primo laboratorio, nella penisola italiana, che si occupava espressamente del moto dei fluidi: il *Gabinetto d'Idrometrìa e Geodesìa*, dal cui esempio, succesivamente, presero spunto anàloghe strutture all'Università di Padova ed al Politecnico di Milano.

Con Brunacci, quindi, non soltanto la ricerca ma anche l'insegnamento dell'Idraulica acquistarono un nuovo importante mezzo di ricerca e di diffusione della conoscenza.

Così, nel XVIII sècolo s'erano perfezionati non soltanto la conoscenza dei princìpî di base, la capacità di realizzare le più rilevanti applicazioni, ma anche le più affidabili metodologìe per le verifiche e le ricerche sperimentali; conoscenza e sperimentazione, necessarî e sufficienti per il completamento della ricerca, ammesso che mai possa essere considerata completa.

Ecco allora aprirsi, tra il XIX sécolo e la prima parte del XX, una stagione di grandi progressi, nei quali le attività di laboratorio assunsero un'importanza irrinunciabile, a completamento di tutto ciò che era ormai accertato e disponibile.

Le equazioni di continuità e di moto, l'effetto dell'accelerazione, la quantità di energia, l'equilibrio dinàmico, la resistenza, . . . erano ormai noti ed espressi in forma definitiva, utilizzabili agevolmente.

Anche la strumentazione - per la misura della velocità, della pressione, della perdita di carico - era affidabile e di elevata precisione.

La costruzione dei modelli in scala ridotta, nei quali riprodurre i fenòmeni reali (osservàti o di progetto), per poterne studiare gli effetti ed i comportamenti, aveva ormai una precisa e corretta codifica.

Proprio la perfezione raggiunta dalla modellistica, costituì il nuovo capitolo del progresso dell'Idraulica. Infatti, i principali progressi, all'inizio del XX sécolo, non furono caratterizzati da nuove scoperte, ma piuttosto da diffuse ed approfondìte verifiche, dall'assimilazione e dall'estensione delle conquiste già conseguìte.

Tuttavia, coerentemente alla nostra impostazione, riteniamo doveroso il dedicare attenzione ai personaggi che furono i principali responsabili di questa fase di affinamento della scienza dei fluidi.

Per una revisione storica dettagliata di questo periodo, almeno per quegli aspetti dell'ingegneria che concernono l'Idraulica, si potrebbe fare riferimento a "*Die Wasserbaulaboratorien Europas*.", della *Verein Deutscher Ingegnere* di Berlino, èdito nel 1926, poi ampiamente rivisto nell'edizione inglese "*La pratica del laboratorio di Idraulica*".

Prima di citare i più importanti protagonisti, all'inizio del XX sécolo, dell'esplorazione sperimentale attraverso prove e modelli di laboratorio, è opportuno soffermarsi su coloro che risolsero i principali problemi che tale processo presentava.

La questione può essere posta in questi sémplici tèrmini: il modello utilizzato per simulare il comportamento della corrispondente realtà deve a quest'ùltima essere sìmile; si devono, cioè, creare dei criterî di similitudine che garantiscano che le valutazioni condotte sul modello a scala ridotta sìano effettivamente indicative del comportamento che avrà l'oggetto che verrà in séguito costruìto.

Questa condizione, banale nello scopo non certo nel modo di ottenerla, fu affrontata inizialmente nell'ingegnerìa navale con John Scott-Russel (1808-1882), incontrato nel Capitolo 17. Le innumerevoli prove che si potevano condurre con un modello a scala ridotta, per definìre la miglior forma della chiglia di una nave o di qualche sua parte, richiedeva la sicurezza che il vascello, una volta realizzato, avesse veramente le prestazioni dimostrate dal modello medésimo . . . non si poteva certo sbagliare!

Dopo queste prime esperienze, l'utilizzo di modelli a scala ridotta per la progettazione dei navigli si sviluppò con velocità, costituendo il punto di partenza della teorìa di questo método, applicabile ad ogni fenòmeno fisico.

I primi importanti progressi si devono, dopo Scott-Russel, al francese Ferdinand Reech (1805-1880), professore di Meccanica Applicata alla scuola del Genio Marittimo di Parigi, ed agli inglesi William Froude (1810-1879) ed al figlio di questi, Robert Edmund Froude (1846-1924), tutti già apparsi nel Capitolo 18.

Fu Reech che formulò il primo *Princìpio di Similitudine*: se si costruisce un modello ***n*** volte più piccolo del reale, allora il rapporto tra la velocità reale e quella del modello deve essere pari a $\sqrt{n}$, mentre il rapporto tra le forze (o le resistenze) uguale a n^3.

Di fatto, le grandezze da considerare secondo il *Principio di Similitudine* appartengono a tre categorìe: dimensione, tempo e massa, che si potrebbero pensare poter combinarsi in rapporti infinìti, ma così non è.

Nel caso dell'Idraulica, o meglio dell'Idrodinàmica, esistono infatti delle costanti dovute alla natura del fluido, prima fra tutte la densità, uguale sìa per il modello che per il caso reale.

Anche l'accelerazione di gravità, sempre costante, determina un altro lìmite al *Principio di Similitudine*.

I primi studi, quindi, adattarono il *Princìpio di Similitudine* alla tipologìa del fenòmeno oggetto dell'indagine condotta con modelli in scala ridotta: processi di Foronomìa (efflusso attraverso aperture); resistenza al moto dei natanti; correnti in pressione in Moto Uniforme o Turbolento . . .

Alla fine del XIX sécolo, dal *Princìpio di Similitudine* scaturì un nuovo strumento, potentissimo, per l'indagine sperimentale su modello: l'*Analisi Dimensionale*.

Padre di questa nuova branca della ricerca fu Edgar Buckingham (Philadelphia, Pennsilvania, 1867 – 1940), fisico e matemàtico statunitense, che elaborò un teorema, oggi noto come *Teorema di Buckingham* o *Teorema* π, che sta alla base dell'*Analisi Dimensionale*, procedimento della ricerca sperimentale, applicabile a qualsìasi fenòmeno fisico, che definisce i rapporti funzionali tra le tante grandezze che interagiscono nel fenòmeno studiato.

Il *Teorema di Buckingham* consente di ridurre il numero dei fattori fisici in gioco, raggruppandoli secondo le relazioni che li legano reciprocamente, giungendo ad analizzarli, così, per gruppi. Se ***n*** sono le grandezze che interagiscono nel processo studiato, è pari ad (***n-m***) il numero dei gruppi funzionali delle stesse grandezze che debbono essere individuati, riducendo così i paràmetri indipendenti con i quali condurre la sperimentazione attraverso le recìproche conbinazioni. Buckingham dimostrò che ***m*** non poteva mai essere minore di tre.

Grazie a tale Teorema, quindi, anche la modellizzazione otteneva una notevole semplificazione, pur nella garanzìa di mantenere significativo il rapporto tra le grandezze in gioco rispetto alla realtà. L'Analisi Dimensionale assume, quantunque, carattere di complessità concettuale il cui approfondimento ésula dagli scopi e dai lìmiti di questa Storia.

Approssimativamente alla svolta tra i due sécoli, la prevalenza della ricerca nel campo dell'Idraulica – se non anche per l'Idrodinamica – passò definitivamente nella mani della scuola tedesca, forse a causa del sistema educativo allora seguìto in Germania, nel quale lo Stato controllava le scuole di preparazione, le università e gli istituti politecnici, ma in diretta connessione con gli interessi dell'industria, in travolgente créscita; cosicchè le cattedre d'insegnamento furono occupate, in maggioranza, da coloro che avevano evidenziato elevate abilità sìa nella teorìa sìa nell'applicazione della propria conoscenza.

I contributi tedeschi all'Idraulica, nella prima parte del XX sécolo, possono così essere ben illustrati discutendo di alcuni tra i massimi professori delle scuole di quella nazione.

Il primo di questi fu Hubert Engels (1854-1945) che, dopo dieci anni di ingegneria pratica presso il "*Georg und Ludwig Franzius*", fu nominato alla cattedra di Idraulica dell'Istituto Politecnico di Brunswik e poi a quello di Dresda; qui cominciò, nel 1891, a condurre esperimenti con modelli idraulici nell'*Osservatorio di Idraulica*, realizzato dal suo predecessore Zeuner, uno studente di Julius Weisbach (incontrato nel Capitolo 17).

Nel 1898, Engels costruì il basamento per la costruzione di un nuovo laboratorio, di circa duecentoventi metri quadrati, attrezzato con un sistema di pompaggio, per alimentare le acque che poi scorrevano in un canale, specificatamente concepìto per i modelli idraulici a fondo mobile, che rispecchiano, in particolare, gli àlvei naturali dei corsi d'acqua. Nel 1913 questa struttura fu sostituìta con un laboratorio di Idraulica Fluviale completamente nuovo, di maggiori dimensioni, nel quale Engels continuò a condurre studi sulla regolazione dei fiumi per alcuni decenni.

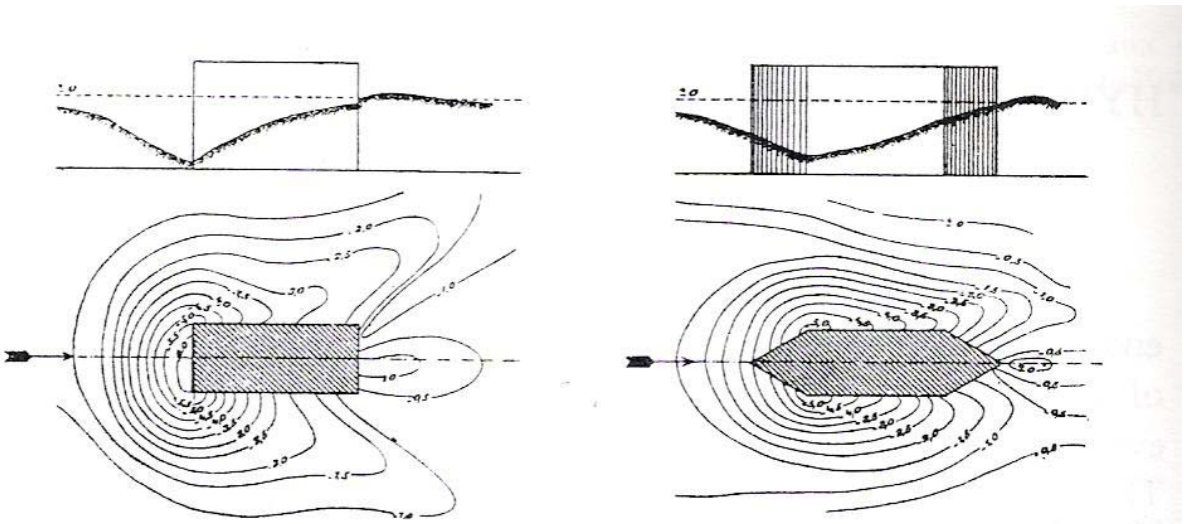
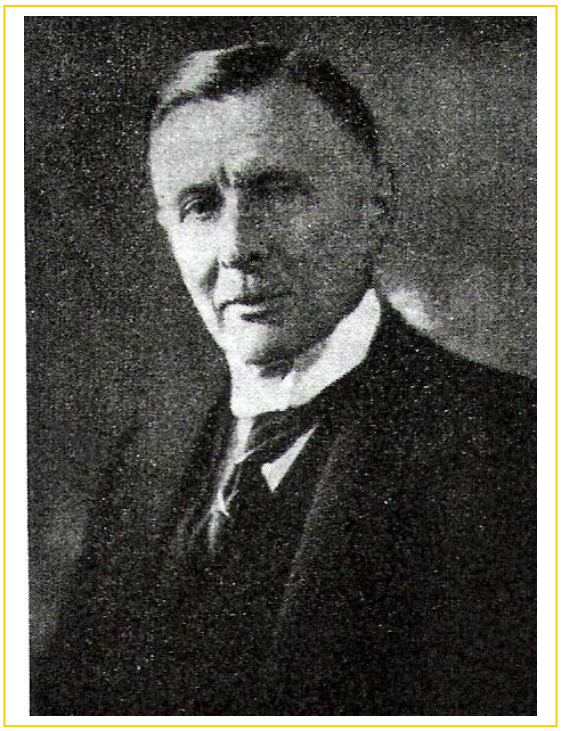


Illustrazione dei flussi e del pelo libero, osservàti da Engels nel laboratorio di Zeuner, prodotti da due tipi di pila di ponte immersi in una corrente

Contemporaneo di Engels fu Theodor Rehbock (Amsterdam 1864 - 1950); nato ad Amsterdam da genitori tedeschi, iniziò l'attività come assistente ingegnere di Ludwig Franzius; si trasferì poi in Sud America e, successivamente, in Africa. Nel 1899 Rehbock accettò la nomina alla cattedra di Idraulica dell'Istituto Politecnico di Karlshure, con l'accordo che avrebbe personalmente finanziato la realizzazione di un laboratorio sperimentale, che venne in effetti realizzato nel 1901.



Il laboratorio, costruìto da Rehbock a Karlshure, era molto simile a quello che Engels aveva realizzato a Dresda, ma nel primo ventennio di attività subì molti miglioramenti ed innovazioni; tra queste venne realizzato un canale con pareti di vetro, cosa oggi consuetudinaria in ogni laboratorio di Idraulica, nonché modelli di dighe in terra, di scaricatori di piena, di sifoni, di gallerie di ingresso, di sezioni ristrette per la presenza di pile di ponti, osservando, con particolare énfasi, la zona dove si formano i vòrtici.

Purtuttavia, nel 1921, l'Istituto Politecnico di Karlshure dovette prendere atto che il laboratorio era diventato inadeguato per la quantità di lavoro che si doveva in esso svolgere e quindi venne abbandonato e sostituìto da una nuova struttura, che andò a formare l'intera nuova ala del palazzo della facoltà di Ingegneria Civile.

Nal 'suo' laboratorio, Rehbock condusse numerosi esperimenti su moltéplici aspetti dell'Idraulica e dell'Idrodinàmica: di lui si ricordano, portandone ancor oggi il nome, i *Denti di Rehbock*, blocchi fissati, in sequenza alternata, al piede degli scivoli degli scaricatori e dovunque vi sìa la necessità di dissipare l'energìa della corrente, a tutela dell'àlveo che deve poi ricevere le acque dopo lo smorzamento.

Mentre Engels può propriamente essere considerato il padre dei laboratori di Idraulica Fluviale, Rehbock fu il primo che li utilizzò massicciamente, dimostrandone la grande utilità, diremmo l'irrinunciabile necessità, nell'affrontare numerosi problemi di Idraulica e, soprattutto, di Idrodinàmica.

Grazie all'ìmpetuoso impegno di entrambi, la pratica di condurre studi di fenomeni e strutture idraulici attraverso modellizzazione in scala ridotta si diffuse largamente in Germania, anche se, curiosamente, la più importante di queste strutture sperimentali non sorse all'interno di una organizzazione scolastica, bensì nella *Preussische Versuchsanatalt für Wasserbau und Schiffbau*, fondata a Berlino nel 1903 come Centro federale di sperimentazione per studi con modelli, sia su strutture idrauliche che su scafi navali; laboratorio che ottenne grandi riconoscimenti sotto la guida di Hans Detlef Krey (1866-1928), che ne assunse la direzione nel 1910.

Sebbene in misura minore, la scuola tedesca ebbe un ruolo di riferimento anche nello sviluppo di laboratorî per lo studio e la progettazione delle macchine idrauliche; il principale tra questi fu quello costruito, nel 1904, all'Istituto Politecnico di Charlottenburg da Hermann Foettinger (1877-1945), che contribuì notevolmente alle ricerche sul fenomeno della cavitazione nelle pompe e nelle turbine, ma il cui nome è associato in particolare al convertitore di coppia

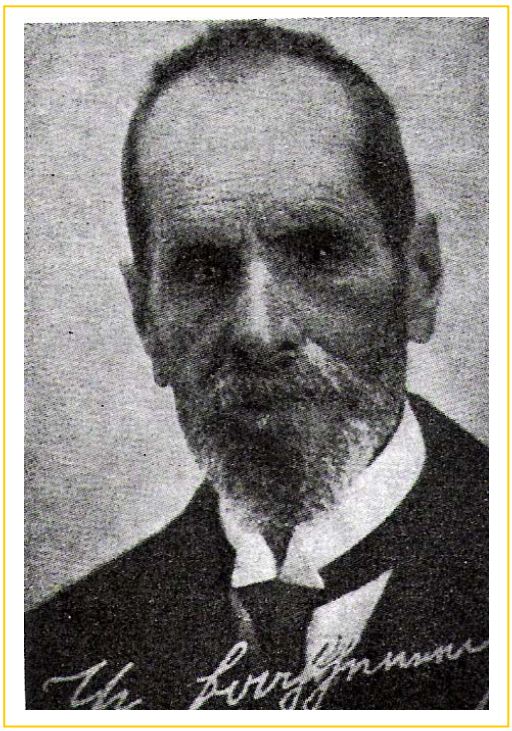
idraulico, dispositivo oleodinàmico che accoppia organi di trasmissione meccanici assorbendo, attraverso la circolazione dell'olio, gli sforzi prodotti dalla variazione del carico o della potenza: è uno strumento sul quale si basa, per esempio, il cambio automàtico delle automobili.

Un altro laboratorio d'eccellenza fu quello di Dietrich Thoma (1881-1943), dell'Istituto Politecnico di Monaco di Baviera, che ne fu il Direttore dopo aver costruito e diretto, per circa un decennio, il centro di prova di una industria manifatturiera a Gotha.

Il nome di Thoma è oggi frequentemente citato per indicare il parametro di cavitazione usato nelle macchine idrauliche.

Un tedesco, anche se non di nàscita, ben degno di menzione in questa Storia, fu il professore Victor Kaplan (Brün 1876 – Berlino 1934); nato a Brün, in Cecoslovacchia, dove costruì, tra il 1910 ed il 1924, le prime turbine ad éliche con pale regolabili, oggi chiamate *Turbine Kaplan*, particolarmente adatte per sfruttare al meglio salti idraulici non elevati e grandi portate, queste ùltime anche dal valore sensibilmente variabile.

Giocoforza il grande fervore della ricerca, tra la fine del XIX sécolo e l'inizio del XX, comparvero numerosi trattàti in lingua tedesca sui vari aspetti dell'Idraulica; due di questi méritano d'essere ricordati a questo punto, per il singolare contributo che diedero alla ricerca.



Il primo, di gran lunga superiore a tutti gli altri, fu redatto da Philip Forcheneimer (Vienna 1852 – Graz 1933); nativo di Vienna, professore di Idraulica all'Università di Aachen e poi a quella di Graz.

L'òpera *Idraulica* di Forcheneimer, la cui prima edizione fu pubblicata nel 1914, rimane ancora oggi il riferimento principale delle teorie e delle osservazioni il questa scienza; forse, questo testo è il più rilevante di tutti i tempi.

Il secondo trattato che non si può omettere di citare è quello di Alexander Koch (Steinach 1853 - Berlino 1923), che lo compose durante la sua attività all'Istituto Politecnico di Darmstad nel 1909, operando principalmente in un piccolo laboratorio utilizzato sìa per l'insegnamento che per la ricerca. In esso Koch affronta, con particolare attenzione, la necessaria correlazione dell'analisi con la sperimentazione:

"*Noi abbiamo bisogno*", scrisse Koch, "*al posto di una Idrodinamica matematica e di una empirica Idraulica di una chiara e pratica Idrodinàmica*."

Negli scritti di Koch vi sono molte considerazioni sulla *Legge delle forze portanti*, che oggi chiamiamo *Principio della quantità di moto*; di grande rilievo è l'utilizzazione, per la prima volta ad òpera di Koch, della *Linea dell'energia del flusso*, oggi detta *Linea dei Carichi Totali* (nata con Daniel Bernoulli, ma solo ora giunta al corrente utilizzo) e del diagramma della perdita di carico.

Le note al lavoro di Koch furono, su iniziativa di Max Carstanjen, ampliate e pubblicate postume, a Berlino, nel 1926 sotto il nome dello stesso Koch, con il titolo "*Von der Bewengung des Wasser und den dabei auftretenden Kräten*.". In questo testo furono descritti accuratamente numerosi profili idraulici del pelo libero nonché la distribuzione della pressione del flusso tracimante su traverse, sotto le paratoie e nei canali di raccordo. Resta di maggior significatività in quest'òpera il continuo richiamo alla necessità di procedere con rigorosi mètodi di analisi, anche se non ne definì di nuovi.

Sull'esempio della Germania, nei paesi ad essa limìtrofi si diffusero rapidamente numerosi nuovi laboratori di Idraulica, non sempre e non soltanto utilizzati per lo studio dei fenomeni naturali; tra questi: a Leningrado nel 1907 da Victor E. Timonoff (1862-1936); a Tolosa nel 1908 da Charles Camichel (1877), a Padova nel 1910 da Ettore Scimeni (1895-1952); a Vienna nel 1912, poi diretto da Friederich Schaffernak; a Stoccolma nel 1917, dove lavorò Thomas Theodoor Thijsse (1893).

Il laboratorio originale di Osborne Reynolds, a Manchester, fu riattivato ed ampliato durante questo periodo ad opera di Arnold Hartley Gibson (1878 - ?), il cui libro "*L'Idraulica e le sue applicazioni*", venne ampiamente utilizzato nei paesi di lingua inglese.

Durante la metà degli anni Venti, largamente stimolàti dal lavoro di Rehbock e d'altri, furono condotti notevoli sforzi per far sorgere un'organizzazione tra coloro che lavoravano in questi laboratori, soprattutto in quelli particolarmente dedicati all'Idraulica Fluviale. I tentativi non ebbero un grande successo e trovarono, tra l'altro, anche alcune opposizioni; fu soltanto nel 1935, nel corso di un congresso sulla navigazione a Bruxelles, che venne impostata la struttura della "*Associazione internazionale di ricerca in Idraulica*", rivolta al principale fine di unìre gli sforzi per risolvere i problemi ingegneristici delle òpere e degli interventi idraulici. L'Associazione di fatto potè realizzare un solo congresso, nel 1937, a Berlino prima che la tragedia della Seconda Guerra Mondiale travolgesse tutto e tutti.

Il primo laboratorio di Idraulica di scuola americana fu fondato nel 1887 alla *Lehigh University* da Mansfield Merriman (1848-1925); era un piccolo edificio, non più di centotrenta metri quadrati su un solo piano, alimentato con una portata di circa cinquanta litri al secondo, grazie alla derivazione da un vicino torrente.

Il secondo laboratorio statunitense fu costruito, soprattutto a scopo didattico, presso l'Istituto Politecnico di Worcester nel 1894, ad òpera di Charles Metcalf Allen (1871-1950) che, nello stesso anno, ricevette l'incarico di professore di Ingegneria Meccanica.

Attraverso l'iniziativa di Allen, il laboratorio si sviluppò in dimensioni ed in attività; in aggiunta ai *test* sulle macchine a fluido, sui misuratori di flusso e sulle strutture idrauliche; fu in questa struttura che venne sviluppato, agli inizi degli anni Venti, il metodo della variazione della velocità per la misura delle perdite di carico.

Un terzo laboratorio, anch'esso come quello di Allen dedicato principalmente all'attività scolastica, fu costruito nel 1899 alla *Cornwell University*, dove si formò la gran parte dei migliori studiosi di Idraulica americani del successivo quarto di secolo. All'inizio del Novecento, questo laboratorio fu diretto da Ernest William Schoder (1879 - ?), che collaborò, mentre era ancora giovane assistente, alle numerose misure sulla resistenza delle tubazioni.

Nel 1908 vennero installate attrezzature provvisorie all'Università della California dal Servizio Geologico Federale, per lo specifico studio del trasporto solido e dei sedimenti sotto la direzione di Grove Karl Gilbert (1843-1918). Furono allestiti tre canali di legno, uno dei quali aveva una parete di vetro; con essi si condussero numerosi esperimenti sul movimento iniziale e sul susseguente trasporto, simulato per diversi tipi di materiali, ghiaie e sabbie, depositate su àlvei sia lisci che caratterizzati da differenti gradi di rugosità. Sebbene ostacolato dalla malferma salute, Gilbert riuscì a portare le ricerche sino a dove si era prefissato, presentando i propri risultati nel *USGS Professionale Paper* n. 86 del 1914; risultati che ancòr oggi continuano ad essere quelli più spesso utilizzati quale riferimento per lo studio del trasporto solido delle correnti in fiumi e canali.

Un altro laboratorio di rilievo fu quello del Distretto di Tutela di Miami, una organizzazione nata nel sud-ovest dell'Ohio per pianificare un sistema generale di previsione e controllo delle inondazioni in quella regione. Grandemente determinato dalle pressioni di Sherman Melville Woodward (1871-1953), un professore di Idraulica dell'Università dell'Iowa che era impiegato come consulente nel Distretto, furono condotti *test* di simulazione nel 1915 per gli studi del Risalto Idraulico (o Salto di Bidone) e per la progettazione delle *Vasche di Dissipazione* e delle *Vasche di Calma*, utilizzate per dissipare l'energìa cinética delle correnti veloci prodotte dagli scìvoli e dagli scaricatori dei bacini di ritenuta.

Melville Woodward fu anche l'artefice della nascita dell'Istituto di Ricerca dell'Iowa che permise l'arrivo di Floyd August Nagler (1892-1933), che ne fu, nel 1918, il primo Direttore, e David Ray Yarnell (1833-1937), inviato in Iowa dal *US Departement of Agriculture* dove rimase dal 1922 sino alla fine; i tre collaborarono in molte indagini sperimentali. Un notevole risultato dell'istituto dell'Iowa fu la prima correlazione dimostrata tra le misure da modello e quelle da prototipo, nel caso dell'efflusso da uno scaricatore di piena.

Sebbene l'uso dei laboratorî per la ricerca idraulica si diffuse grandemente all'inizio degli anni Venti del Novecento, non cessarono le ricerche teoriche e pratiche che non utilizzavano modelli in scala, anche perché questi non potevano certo esaurire tutte le problematiche della scienza dei fluidi.

Solidamente affiancate troviamo pratica e teorìa nella notevole serie di *test* condotti, per conto del *U.S.D. of Agricolture*, da Fred Charles Scoley (1880), i cui risultati, pubblicati nel 1915, contengono dettagliate osservazioni sulla resistenza del flusso nei canali di Irrigazione; lo stesso autore, nel 1916, pubblicò gli ésiti di altre prove ed analisi sul comportamento delle tubazioni in legno.

David Ray Yarnell, prima di giungere in Iowa, presentò nel 1917 dati prodotti dalle osservazioni sui sistemi di drenaggio di terreni acquitrinosi, realizzati con tubazioni forate in laterizio di diverse misure commerciali. Ancora Yarnell, nel 1915, avviò studi su un canale artificiale, dotato di un restringimento ispirato al venturimetro, per la misura dell'acqua di

irrigazione, primo passo per giungere al più moderno edificio di misura della corrente a pelo libero, il Misuratore a Risalto, definitivamente codificato, nel 1948, dal prof. Duilio Citrini (Milano 1913 – 2006), del Politecnico di Milano.

Precedentemente al risultato degli studi in campo furono importanti le serie delle analisi condotte nelle Indie Britanniche sull'equilibrio del flusso nei canali scavati in terreni soggetti ad erosione. Questi dati, fornìti dagli sforzi di Robert Gregg Kennedy (1851-1920), condotti verso la fine del XIX sécolo, giunsero alla formulazione dei requisìti geometrici ed idraulici per evitare l'innesco di azioni di erosione o di deposito nei canali di Irrigazione non rivestiti, cioè, come suol dirsi, 'in terra'.

Il lavoro di Kennedy venne poi seguìto, con notevoli ampliamenti, da Edward Seales Lundley (1882) e da Gerald Lacey (1887).

Studi anàloghi vennero condotti, nel medésimo periodo, in Egitto.

Tuttavia fu soltanto all'inizio degli anni Trenta che i grandi problemi della sedimentazione ricevettero, negli USA, le necessarie attenzioni quantitative, non limitate, quindi, ai soli aspetti qualitativi, principalmente presso il *Corps of Engineers*, il *Bureau of Reclamation* ed il *Soil Conservation Service*.

La produzione di energia idroelettrica subì un rapidissimo sviluppo tra la fine del XIX e l'inizio del XX sécolo, enfatizzando la necessità di disporre di una accurata misurazione della perdita di carico per valutare con precisione il rendimento delle differenti forme e tipologie di turbina.

Negli USA si svilupparono due differenti tecniche: la prima fu il metodo che sfrutta il processo di diluizione del sale nella corrente, applicato nel 1916 da Benjamin Feland Groat (1867-1949); il secondo fu il princìpio della misura congiunta di pressione e quantità di moto, sviluppato nel 1923 da Norman Rothwell Gibson (1880).

Inoltre, Lewis Ferry Moody (1880-1953), noto per il perfezionamento dei condotti di scarico delle turbine, per primo introdusse, nel 1922, i paràmetri di progetto per evitare il pericoloso fenòmeno della cavitazione nelle giranti delle turbine; paràmetri poi associati al nome di Thoma.

John R. Freeman (? – 1932), un anziano ingegnere datosi alla politica, oggi ricordato anche per i suoi progressi sperimentali alla fine del XIX secolo, fu profondamente colpìto, all'inizio degli anni Venti, costatando l'avanzato stadio di sviluppo della pratica di laboratorio in Germania ed in altri paesi europei.

Sfruttando la propria influenza politica, Freeman cominciò a premere affinché il Governo degli Stati Uniti sostenesse la realizzazione di un grande laboratorio di Idraulica.

In secondo luogo, egli persuase i più importanti scienziati europei, sotto gli auspìci del *Verein Deutscher Ingegnerie*, a preparare un trattato che descrivesse nel dettaglio tutta l'attività dei laboratorî tedeschi; in terzo luogo contribuì, anche con proprie risorse, nell'organizzare viaggi di studio, in Europa, per numerosi giovani ingegneri americani, che poterono così visitare le più importanti istituzioni scientifiche del Vecchio Continente.

Una quarta iniziativa dello 'scienziato-politico', fu l'invitare numerosi direttori dei principali laboratori tedeschi (inclusi Rehbock e Thoma) in America, per visite e per prolusioni e

letture. Freeman, inoltre, tradusse i trattati tedeschi sulle attività di laboratorio, che vennero così pubblicati, a volte con notevoli ampliamenti scientifici ma anche a scopo didattico, in inglese.

La grande influenza, nella scienza Idraulica che ebbe l'attività di Freeman negli USA, se non anche altrove, non potrà mai essere pienamente apprezzata; attraverso la sua lungimirante perspicacia, unìta ad una rara umiltà nel riconoscere il maggior valore dell'altrui conoscenza, consentì a molti idraulici americani, in particolare quelli facenti parte dell'esercito degli Stati Uniti d'America di stanza a Vicksburg, di avvicinare ed assimilare le conoscenze e le esperienze delle migliori scuole d'Europa.

Così è che all'inizio degli anni Trenta, le attività dei laboratori delle Università americane crebbero assai, in qualità ed in quantità.

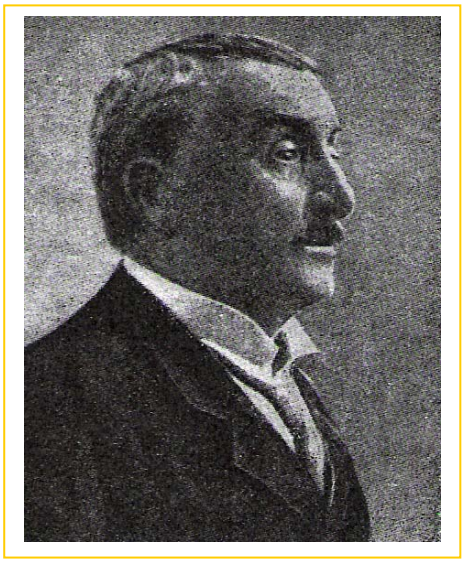
Appena prima della morte di Freeman, nel 1932, fu fondato il *National Hydraulic Laboratory* presso il *U.S. Bureau of Standard*.

È evidente che la ricerca idraulica, nella prima parte del XX sécolo, enfatizzò l'approccio sperimentale a scàpito dell'approccio analìtico, che aveva fortemente caratterizzato gli ultimi idraulici francesi nel sécolo precedente.

Son poche ricerche non sperimentali di questo periodo, mèritano d'essere citate.

Una di queste fu proposta dallo stesso Freeman, sulla suggestione che a lui produsse la pubblicazione, ad òpera di Rayond Deloraine Johnson, nel 1908, delle equazioni differenziali del *Pozzo Piezométrico*.

Due anni dopo, Thoma formulò un parametro per la stabilità dei Pozzi Piezométrici in sistemi autoregolanti.



Durante questo stesso periodo, l'idraulico italiano Lorenzo Allevi (1856-1941) estese ampiamente l'analisi di Jouwkowsky del colpo d'ariete.

Procedendo da proprie indipendenti derivate delle equazioni fondamentali, Allevi pubblicò, nel 1913, un trattato matematico e grafico che è considerato il fondamento di tutti i successivi sviluppi in questo campo.

Il metodo grafico fu, in séguito, adattato all'uso pratico da Omar Shjder (1904), svizzero, e da Louis Bergeron (1878-1948), francese.

Il progresso della ricerca scientifica mai s'arresta, ma spesso nelle singole discipline e, all'interno di ciascuna di

esse, nei sìngoli argomenti può subìre accelerazioni o rallentamenti, a volte soltanto apparenti, che possono caratterizzare interi periodi, in passato anche assai lunghi e poi, via via, sempre più brevi.

Così avvenne, almeno noi riteniamo, agli inizi del XX sécolo per la scienza dei fluidi, quando al grande sviluppo delle tecniche sperimentali di laboratorio non corrispose un altrettanto progresso delle ricerche teòriche e, soprattutto, analitiche. Non sarà un ritardo patologico, ma la naturale fisiologìa del processo virtuoso che accomuna, con alterne vicende, tutte le menti che lavorano alla scoperta delle infinìte ed appassionanti leggi della Natura.

* * *

Cap. 21 – L'ascesa della Meccànica dei fluidi

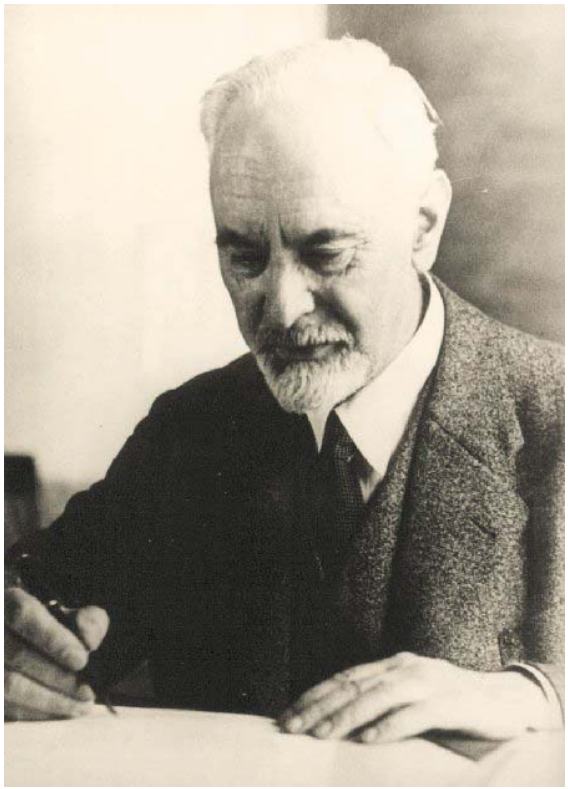
Pienamente comparabile al progresso dell'Idraulica sperimentale, all'inizio del XX sécolo fu lo sviluppo della teoria dell'Idrodinàmica, rendendo necessario questo specifico Capitolo, certo aiutata dal moltiplicarsi dei Laboratorî di Idraulica, dove si potevano condurre innumerevoli prove e verifiche.

Interesse e dotazioni strumentali accentuarono la separazione tra la ricerca in Idraulica ed in Idrodinamica, quest'ultima favorita dalla crescente e pressante domanda di sviluppo nella scienza Aeronautica, alla prima strettamente legata.

La scienza 'del volo', concretizzando un sogno che l'Umanità aveva tanto cullato, sino ad allora, da viverlo come un mìto, attrasse le menti scientifiche più eccelse, certo grazie anche ai poderosi interessi, purtroppo alimentàti dalla inevitabile competizione internazionale in fatto di potenziamento militare.

Poco o nulla, dei problemi affrontati in questa 'corsa', era veramente una assoluta novità: Charles Bossut aveva specificatamente raccomandato, ben più di un sècolo prima, l'insegnamento della "Meccanica dei fluidi" ai giovani ingegneri; poi, uomini come Weisbach, Reynolds e Boussinesq, avevano chiaramente dimostrato come il comportamento dei fluidi potesse essere affrontato e risolto in base a precisi riferimenti di Fisica, piuttosto che attraverso puri calcoli matematici o semplici osservazioni empiriche.

Tuttavia soltanto all'inizio del XX sécolo si assiste alla svolta decisiva nel nuovo approccio che dà il via allo sviluppo dell'Aeronautica con applicazioni, questa volta secondarie, all'Idraulica e ad altre scienze che non avevano fattori strategico-commerciali così rilevanti, come invece aveva, ed ha tuttora, la scienza che presiede la costruzione delle macchine volanti.



Il fondatore dell'attuale Meccanica dei fluidi, considerato uno dei fondatori dell'Aerodinàmica, fu Ludwig Prandtl (Frisinga 1875 - Göttingen 1953).

Figlio di Karl, professore di Filosofìa all'Università di Monaco di Baviera, nacque vicino a Frisinga, borgo prossimo alla stessa Monaco. Ludwig studiò Ingegneria Meccanica all'Istituto Politecnico della capitale bavarese e, laureato, ottenne il dottorato, alla stessa Università, nell'àmbito di ricerche sull'elasticità.

La necessità di una migliore correlazione tra la teorìa ed i dati sperimentali, nel problema del flusso dei fluidi, gli risultò evidente mentre lavorava come ingegnere in una grande industria meccanica, dove, così, iniziò le ricerche sul flusso dell'aria.

Nel 1901 Prandtl ricevette l'incarico di professore all'Istituto Politecnico di Hannover, dove continuò le ricerche giungendo, nel 1904, a presentare un iniziale rapporto sulle proprie scoperte, in tempo perché fosse presentato al terzo Congresso Internazionale di Matemàtica:

"*Mi sono assunto il còmpito di investigare sistematicamente il moto di un fluido la cui resistenza interna possa assumere valori molto piccoli. Infatti io ritengo che la resistenza sia così*

piccola da poter essere ignorata, laddove le grandi differenze di velocità e gli effetti cumulativi della resistenza non esistono. Questo approccio ha dato ottimi risultati, perché attraverso di esso si può arrivare alle formulazioni matematiche che non solo permettono di risolvere problemi ma danno anche la garanzìa di raggiungere un soddisfacente accordo con l'osservazione . . . la ricerca di un particolare fenomeno è così divisa in due parti interdipendenti: da una parte c'è il fluido libero, che può essere trattato come perfetto in accordo con il principio di Helmotz sulla vorticosità, dall'altro gli strati di transizione prossimi al contorno fisso, alle pareti del condotto; il movimento nelle due parti è controllato dal fluido libero, che tuttavia si pone in rotazione al formarsi, negli strati, dei primi vortici".

Tra gli oltre ottanta documenti tecnici letti prima del congresso, quello di Prandtl ricevette apparentemente un'attenzione soltanto superficiale da parte dei matematici che lo ascoltavano; tuttavia il concetto che esso introdusse – la *Teoria dello Strato Limite* – ha avuto ed ha oggi una grandissima influenza sulla comprensione del moto dei fluidi e su ogni princìpio discusso in queste pagine. Prandtl si preoccupò di pubblicare una versione del documento presentato al Congresso largamente descrittiva e di solo otto pagine, nella quale traspare la sua previsione di tutti gli effetti che la sua scoperta avrebbe provocato nella teoria e nella pratica.

Un matematico che partecipò al Congresso del 1904 e che percepì il valore del contributo di Prandtl, fu il professor Felix Klein, prestigioso riferimento di Matematica Applicata, Meccanica e Fisica all'Università di Göttingen.

Senza indugio, ancora nel 1904, Klein si fece promotore dell'invito di Prandtl all'Università di Göttingen, con l'offerta di un doppio incarico: professore e direttore di un piccolo istituto di ricerca di Meccanica Applicata.

Prandtl accettò e, ben presto, rese a tutti l'evidenza dell'aver acquisìto, tra le fila della prestigiosa università, un giovane ma eccellente scienziato " . . . *altamente dotato, con una rara predisposizione alla comprensione dei fenomeni fisici e di una non consueta capacità nel descriverli con formule matematiche relativamente semplici. Il suo controllo dei metodi e degli artifici matematici fu limitato, ma molti dei suoi collaboratori e seguaci, superandolo nel risolvere le difficoltà dei problemi matematici, ne divennero affascinati collaboratori, creando un gruppo di grandi capacità. Fu ùnica la sua abilità nel definire sistemi di equazioni semplificate, che esprimevano l'essenziale relazione fisica, e di eliminare o dimostrare irrilevanti gli aspetti non essenziali nel fenomeno osservato . . .* ".

Sotto la guida ispiratrice di Prandtl, la nuova organizzazione della ricerca – che fu alla fine ispiratrice del *Kaiser Wilhelm Institute für Strömungsforschung* – si avvviò rapidamente in tre distinte direzioni: la prima, intorno ai métodi di analisi che non erano più astrazioni matematiche né formulazioni empiriche; la seconda, concentrata sulle più raffinate tecniche sperimentali, che produssero il proliferare di laboratori in ogni centro dove fosse attiva la ricerca; la terza – ma non certo la meno importante – l'organizzazione di ottimi corsi di tirocinio per giovani analisti, sperimentatori ed insegnanti.

Così, a Göttingen si condussero, perché strettamente associate con la teoria dello *Strato Limite*, molte analisi del fenomeno della turbolenza e della resistenza aerodinàmica, scoprendo i numerosi princìpi, puramente aerodinamici, sul comportamento delle superfici soggette al flusso, sìa subsònico che supersònico.

A sostegno del poderoso lavoro, alimentato dall'attività del gruppo di Prandtl, venne costruita una *Galleria del Vento* estremamente avanzata per quell'época, la cui impostazione fu portata a riferimento in tutte quelle che furono realizzate in séguito. Anche gli strumenti utilizzati e perfezionati da Prandtl – tubi di Pitot, misuratori di pressione, bilance da tunnel, dispositivi per

rivelare le traiettorie del flusso – si diffusero, nella loro versione originale, per poi subìre continui miglioramenti.

Tra i molti mériti, Ludwig Prandtl annovera certamente l'essere stato anche un ottimo insegnante, per i numerosi allievi, molti dei quali divennero, a loro volta, i più insigni studiosi di Aerodinàmica.

Il primo, tra questi, a ricevere un condiviso riconoscimento fu il tedesco Paul Richard Heinrich Blasius (Berlino 1883 – Amburgo 1970), che, all'inizio del 1908, pubblicò una soluzione analitica della distribuzione della velocità e della resistenza nel flusso Laminare di bordo, introducendo l'aspetto quantitativo alla teoria, solo qualitativa, di Prandtl. Tale risultato fu pienamente verificato da successive misure di laboratorio.

Nell'àmbito dell'Idraulica, fu Blasius che originalmente dimostrò, nel documento del 1911 "*Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten*", che il coefficiente di resistenza per tubi lisci poteva essere un'unica funzione del *Numero di Reynolds*. L'edizione del 1913 confermava questo risultato, estendendo la sperimentazione con acqua a diversa temperatura e con l'aria.

Blasius inoltre presentò (nello stesso documento) il primo diagramma del *Numero di Reynolds* per lo strato limite, elaborato in parte su dati originali ottenuti a Berlino nella vasca navale.

Con le *Formule di Blasius* si procede ancora oggi nel calcolare le forze ed i momenti aerodinamici agenti su un corpo, a causa della corrente fluida che lo lambisce.

Probabilmente il più illustre alunno della scuola di Göttingen fu Theodor von Kármán (Budapest 1881 – Aquisgrana 1963), figlio di un professore dell'Università di Budapest.

Dopo la laurea con i più alti onori in Ingegneria Meccanica all'Istituto Politecnico Reale della capitale ungherese, Kármán ottenne il dottorato e poi l'insegnamento a Göttingen; nel 1912 divenne professore nel Politecnico di Aquisgrana, dove fondò l'Istituto di Aerodinamica.

Nel 1930 si trasferì negli Stati Uniti d'America, assumendo l'incarico di direttore del laboratorio di Aerodinàmica di Pasadena, presso il *California Institute of Technology*.

Gli interessi di Kármán, come quelli di Prandtl, si estesero praticamente in ogni campo della Meccanica, comprendendo, quindi, anche la Meccanica dei fluidi.

Mentre l'approccio di Prandtl fu principalmente fisico, Kármán affiancò alla Fisica l'intùito della Matematica, mostrando in questo una naturalezza tanto eccezionale da sembrare che ogni deduzione fosse per lui semplicemente istintiva.

Qui ci limitiamo a parlare dei suoi principali contributi sulla resistenza al moto, sulla turbolenza, sull'analogìa tra le onde sonore e le onde di gravità.

Tra le sue prime ricerche (1911) vi fu quella della formazione dei vortici attorno ai corpi cilindrici immersi in un flusso; egli elaborò una soluzione analitica che ancor oggi è conosciuta come la *Traccia del vortice di Kármán*, che dimostra come la corrente che supera l'ostacolo di un

corpo cilindrico, forma, a valle di questo, vòrtici caratterizzati da un'intensità crescente sino ad un massimo e che poi si annulla per poi riprendere a crescere, in modo alternato ai due lati dell'ostacolo. In gergo tecnico si dice che i vòrtici 'si staccano' dall'ostacolo alternativamente, prima da un lato poi da un altro.

* * *

Questo fenomeno produce alcuni effetti quantomeno curiosi e rari. Un caso avviene nel canale '*Pietro Vacchelli*', del *Consorzio Irrigazioni Cremonesi*. Quando la portata entrante è prossima al massimo concesso, in corrispondenza del primo manufatto sostenuto da pile nell'àlveo, il pelo libero oscilla, trasversalmente, quasi fosse un piano rigido incernierato al centro del canale, con escursioni di livello che, in corrispondenza delle sponde, possono raggiungere i trenta centimetri. L'oscillazione produce un'onda retrògrada, alternata tra destra e sinistra, che risale la corrente. Il fenòmeno, studiato da una commissione del Politecnico di Milano, fu attribuìto proprio ai *Vòrtici di Kármán* che, staccandosi altrenativamente, a destra e sinistra delle pile, e favoriti dalla particolare geometrìa del canale e del suo percorso (il ponte è posto al término di un'ampia curva), entrano in risonanza producendo questa oscillazione, curiosa, quantomeno, per chi ha il tempo e l'accortezza di osservare . . . guardando. (Gli ésiti dello studio di questo fenomeno furono presentati nella Memoria: "*Transversal oscillation induced by vortex street downstream of piers*." – XX Congresso dell'Associazione Internazionale di Ricerca in Idraulica – Mosca 1983 – a cura di E. Orsi e D. Zampaglione – Politecnico di Milano – Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche).

* * *

Theodor von Kármán condusse anche studi approfondìti sui raccordi tra le ali e la fusoliera degli aeroplani, oggi detti *Raccordi di Kármán*.

Lo scienziato ungherese, assieme a Prandtl, contribuì con successo all'analisi della distribuzione della velocità e della resistenza nel flusso turbolento in tubi e lungo le superfici piane, e le risultanti espressioni logaritmiche portano ancora i loro nomi.

Da ultimo ricordiamo che al *California Institute of Technology* Kármán elaborò métodi derivati dai princìpi dell'Acustica per condurre analisi sul moto dei canali in *Corrente Veloce*.

Troppo numerosi sono i 'frutti di Prandtl', sìa nelle conquiste scientifiche che nelle òpere di coloro che da allievi ne divennero successori.

Citarne alcuni, inevitabilmente, produrrà torto per tanti altri.

Albert Johan Betz (1885 - ?), che fu a lungo il principale assistente di Prandtl, divenne direttore di quella parte del laboratorio di Göttingen dedicata alle macchine a fluido, ottenendo risultati notevoli e di generale applicazione.

Walter Gustav Johannes Tollmien (1900 - ?), un altro giovane assistente, distintosi più volte per le sue analisi sulla stabilità del flusso e sulla diffusione della turbolenza, fu nominato successore alla cattedra di Prandtl a Göttingen, dopo il formale ritiro di questi verso la metà del secolo.

Walter Ludwig Christian Schiller (1882 - ?), il cui principale interesse fu rivolto al problema della resistenza nelle tubazioni; fu professore all'Università di Liepzig, dove pubblicò lo stupendo "*Handbuch der Experimentalphysic*."; quattro volumi dell'òpera furono dedicati al moto dei fluidi.

Jalov Ackeret (1898 - ?), una vera autorità sul fenomeno della *Cavitazione*; particolarmente attivo nel laboratorio di Aerodinàmica dell'Istituto Federale di Zurigo, dove, nell'àmbito delle ricerche sul flusso supersonico, realizzò importanti progressi nello studio del moto d'onda.

Oskar Karl Gustav Titjens (1893 - ?), ridusse le 'letture' di Prandtl in forma di testo nel 1929, ed aiutò lo stesso Prandtl a preparare la propria òpera "*Abriss der Strömungslehre*", nel 1931, che subì quattro successive ampliate edizioni.

Herman Schlichting (1907 - ?) contribuì notevolmente all'analisi della stabilità ed allo sviluppo dello *Strato Limite* e fondò un'organizzazione sperimentale all'Istituto Politecnico di Brunswick.

Tre altri membri dello staff del gruppo di Göttingen allargarono grandemente il raggio della conoscenza sperimentale:

- Carl Wieselberger (1887-1941), sul fenomeno della resistenza aerodinamica;
- Otto Flachsbart (1898 - ?), anch'egli sulla resistenza aerodinàmica, particolarmente sulla pressione del vento sugli edifici (contribuendo ad un notevole e storico sommario del manuale di Schiller);
- Johan Nikuradse (1894 - ?) nel campo della resistenza dei tubi.

Sebbene il laboratorio di Göttingen fosse una parte dell'Università, piuttosto che un autònomo Istituto Politecnico, non fu predominio degli Ingegneri Meccanici, ma attrasse anche molti tecnici e ricercatori con particolare predisposizione agli studi avanzati.

Inoltre l'influenza del laboratorio di Göttingen non caratterizzò soltanto la preparazione degli allievi Ingegneri Meccanici tedeschi, ma avvicinò allo studio ed alla ricerca in Idraulica anche gli Ingegneri Civili, che si accostarono a questa scienza secondo un'altra prospettiva, rispetto agli studi scolastici. Un esauriente esempio di questa tendenza è contenuta nel piccolo libro "*Elemente der techishen Hydromechanik* ", pubblicato nel 1914 da Richard von Mises, allora Ingegnere Meccanico all'Università di Strasburgo Inteso come un ùtile manuale per la pratica dell'Ingegnere, questo manuale spiega, in modo semplice e coerente, i princìpi dell'accelerazione e della resistenza del fluido, applicati alla soluzione dei problemi idraulici.

* * *

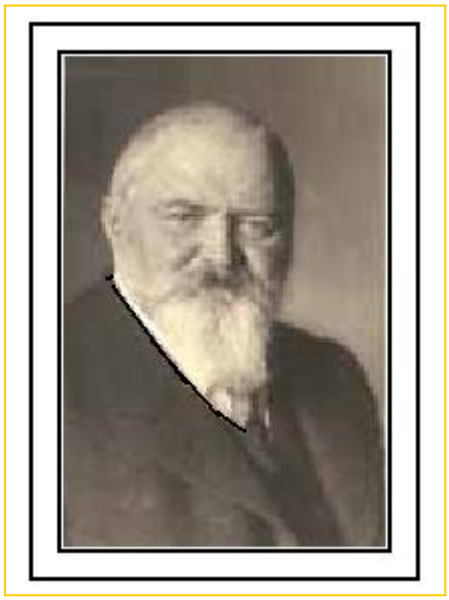
Dell'Università di Göttingen non possiamo mancare di ricordarne la morte, decretata durante l'abisso nel quale fu trascinato quasi l'intero mondo e dal quale, ancora oggi, non tutta l'Umanità sembra esserne completamente e sicuramente uscita. La follìa di cui fu preda la Germania e poi, con cruento contagio, l'intera Europa ed il mondo, trovò nell'Università di Gottinga un obiettivo da distruggere, per farneticanti motivi neppur degni d'essere elencati. Così è che, nel 1933, tutti i contributi pubblici vennero sospesi ed i professori, di sospetta origine ebrea, furono costretti a dimettersi o messi nell'impossibilità di lavorare; l'attività, di fatto, cessò. Si completò, allora, la distruzione, con questa Università, del primato europeo negli studi matematici, a favore della città di Princeton, USA, dove chi potè riuscì ad emigrare, colà ricostruendo, brandello dopo brandello, una nuova Università libera e prestigiosa. I lavoro di Gauss, Riemann, Prandtl, Maxwell non andò completamente perduto, l'attività riprese ma l'Europa, da allora, divenne più povera, per sempre!

* * *

Nello stesso periodo, lo svizzero Franz Práŝil (Zurigo1857 - 1929), dell'Istituto Politecnico Federale di Zurigo, usando molti princìpi dell'Idrodinàmica classica nell'analisi delle pompe e delle turbine, nel 1913 per primo utilizzò il *Reticolo a Maglie Quadrate* quale strumento per l'interpretazione grafica dei tracciati del flusso.

Il '*Reticolo a maglie quadrate*' è un artificio grafico-matematico che consente di suddividere il campo di un flusso (la corrente in una tubazione, in un canale o un moto di filtrazione) in una ragnatela di poligoni di quattro lati, non necessariamente sempre quadrati.

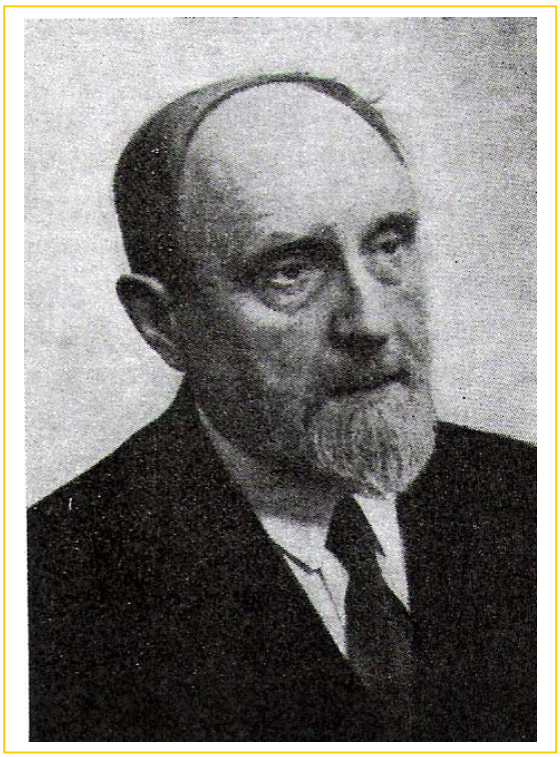
L'analisi numérica del fenomeno studiato consente di attribuìre a ciascuna maglia, le caratteristiche che génerano il fenomeno studiato, partendo da estremi nei quali tali caratteristiche sìano note: procedendo, secondo i princìpi del flusso in questione, di maglia in maglia, è possibile costruìre le grandezze del flusso in ogni punto.



I metodi di Práŝil furono generalizzati e portati in una forma che si accordava con l'approccio di Parndtl, ad òpera di Wilhelm Soannhake (1881 - ?), un allievo di Göttingen, che lavorò nel Laboratorio di Meccanica Fluida all'Istituto Politecnico di Karlshure.

Attraverso l'ulteriore influenza di tali Ingegneri Meccanici, come Thoma e Ackerett, l'uso del numero di Reynolds nella calibrazione e nelle standardizzazioni della misura del flusso finalmente divenne una cosa abituale, come avviene nei dispositivi dei *test* di Idraulica in aria e, in alcune occasioni, in quelli idrodinamici in acqua.

La necessità di un nuovo approccio all'analisi del moto del fluido fu in tutto il mondo sentita quale cruciale problema nello sviluppo dell'Aeronàutica, tant'è che non ottenne progressi significativi soltanto in Germania.



Particolarmente importante fu la ricerca condotta, su questo argomento, in Russia, seppure ancòra agli inizi; ai primi lavori di Jouwkowsky seguirono quelli di un suo giovane collega, Dimitri Pavlovitch Riabouchinsky (1882, ?), che giunse a nuovi ed originali sviluppi.

Nativo di Mosca, Riabouchinsky fondò un istituto di Aerodinàmica in una proprietà di famiglia vicino a Koutchino agli inizi del 1904; lo mantenne attivo sino a che la Rivoluzione del 1917 lo costrinse a trasferirsi, nel 1919, a Parigi, dove collaborò con il Ministero dell'aria.

Nella capitale francese Riabouchinsky divenne direttore associato del Laboratorio di Meccanica dei Fluidi, realizzato dal Ministero dell'Università.

Acuto analista, fantasioso sperimentatore e prolìfico scrittore, Riabouchinsky diede orìgine a diverse teorìe e tecniche, alle quali, però, il suo nome non è oggi più associato.

Ricordiamo, tra le molte, l'invenzione dei tubi di lancio per i proiettili autopropulsi (oggi chiamati *bazooka*), da lui proposti nel 1916, ma che non divennero popolari se non un quarto di secolo dopo. I suoi originali contributi nel generale campo della Meccanica dei fluidi portarono a sviluppi nell'analisi dimensionale (1911), nella resistenza laminare e turbolenta (1914), nel disegno delle superfici libere (1919), nella Cavitazione (1923), nell'analogìa delle onde (1932) e nella strumentazione. Lo scienziato russo, nel 1909, formulò l'ipotesi di misurare la velocità dei fluidi gassosi attraverso uno strumento che divenne poi

l'*Anemòmetro a Filo Caldo*, al quale si deve gran parte dello sviluppo della Meccanica dei fluidi, nella prima metà del XX sécolo.

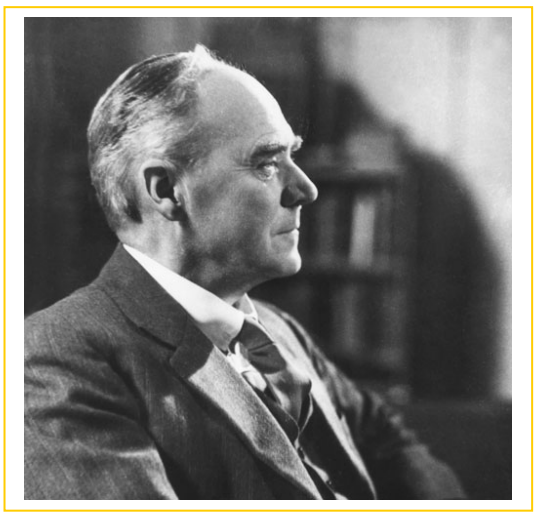
Purtroppo gran parte degli scritti di Riabouchinsky, oltre duecento, erano difficili da leggere perché in essi egli rifletteva in pieno il proprio carattere schivo e la naturale propensione alla massima concisione; così le sue òpere non ricevettero quell'attenzione e quel riconoscimento che invece meritavano pienamente.

In Francia, sebbene la ricerca fosse condotta secondo la prevalente tendenza dei suoi studiosi nella direzione della pura Analisi Matematica, si ebbe, in questo periodo, almeno un eminente scienziato di grande livello scientifico, che seppe unìre all'analisi i successi di numerose applicazioni pratiche: Alexandre Gustave Eiffel (Digione 1832 - Parigi 1923).

Sebbene il suo nome richiami alla mente di tutti la sua più spettacolare costruzione in ferro, la Torre che, a Parigi, porta il suo nome, Eiffel affrontò anche il problema di determinare la pressione del vento su forme elementari attraverso *test* su modelli; nel primo decennio del Novecento egli condusse, inoltre, esperimenti di caduta libera, sfruttando i trecento metri della sua Torre, eretta a Parigi in occasione dell'Esposizione Universale, ma costruì anche numerose *Gallerie del Vento*, dalle quali trasse numerosi dati sperimentali.

La più notevole conseguenza dei risultati dei suoi *test* in Aerodinàmica, fu l'ottenere un coefficiente di forma, per la resistenza al moto, tìpico dei corpi sferici, pari a meno della metà di quello determinato a Göttingen; ésito che confermò anche riducendo la velocità del flusso d'aria allo stesso valore utilizzato nell'Università tedesca.

Inoltre Eiffel osservò il decremento delle dimensioni della scia, lasciata dal corpo che si sposta nell'aria, che intervenivano con l'aumento della velocità, fenomeno che Prandtl, nel 1914, finalmente spiegò in términi di riduzione dello spazio di transizione tra il moto Laminare, dello Strato Limite, e quello turbolento, lungo i bordi del profilo dell'oggetto.



La vasta serie di contributi inglesi nel XIX sécolo sull'analisi del moto del fluido migliorarono, in qualità, all'inizio del Novecento attraverso il lavoro di Geoffrey Ingram Taylor (Londra 1886 – Cambridge 1975), un meteorologo all'Università di Cambridge.

Iniziando nel 1915 con uno studio del moto dei vortici nell'atmosfera, Taylor presentò, nel corso dei successivi due decenni, una serie di scritti dedicati alla fondamentale analisi delle turbolenze dei fluidi con metodi statistici; ne derivò un notevole progresso, rispetto alle ipotesi di Prandtl e di Kármán, poiché la teorìa di Taylor tracciò la via per i successivi miglioramenti ed analisi. Taylor estese le proprie ricerche nel campo dei moti vorticosi creati dagli esplosivi e fu nel gruppo di scienziati che, negli anni Quaranta, costruì la prima bomba atòmica a Los Alamos USA.

Nell'àmbito dei moti vorticosi, meritevole di citazione fu il lavoro sperimentale di Thomas Edward Stanton (1865 - 1931), un tempo studente e collega di Osborne Reynolds all'Owens College e per quarant'anni sopraintendente del Dipartimento di Ingegneria del Laboratorio Nazionale di Fisica.

Meglio conosciuto in Idraulica per i suoi studi sulla resistenza dei tubi, Stanton contribuì a molti altri aspetti della sperimentazione nella Meccanica dei fluidi, dalla forza del vento sui ponti al flusso supersonico.

L'evidenza sperimentale ed il sostegno delle nuove analisi, particolarmente quelle sulla turbolenza dei fluidi, furono ottenuti in larga misura dai più significativi nuovi strumenti sviluppati nel XX secolo, in particolare l'*Anemòmetro a Filo Caldo*, il cui princìpio di funzionamento fu compiutamente formulato, dopo l'iniziale intuizione di Riabouchinsky nel 1909, dall'inglese Louis Vessot King (1886 - ?) nel 1914; poi sia la teorìa che la tecnica di questo strumento furono grandemente affinate in diverse parti del mondo, mentre già dava ottimi risultati grazie all'intenso uso condotto nel laboratorio di Johannes Martinus Burges (1895 - ?), a Delft in Olanda, ed anche al contributo di Hugh Latimer Dryden (1898 - ?) e di Galen Brandtl Schubauer (1904 - ?), entrambi ricercatori presso il *US Bureau of Standard*.

Le applicazioni dell'*Anemòmetro a Filo Caldo* furono inizialmente limitate al flusso dell'aria, poiché l'uso nei liquidi presentava alcuni gravi limìti, soprattutto per la rottura del filo, che ha diàmetri dell'ordine di 1/200 di millimetro.

Successivamente, utilizzando lo stesso principio, si realizzò l'*Anemòmetro a Film Caldo*, che potremmo più correttamente chiamare *Idrotachìmetro a Film Caldo*.

Il principio, che accomuna i due strumenti, sfrutta il fenomeno secondo il quale un conduttore, se attraversato da una corrente elettrica, si riscalda (per il cosiddetto *Effetto Joule*); ma se, contemporaneamente, questo conduttore è immerso in un flusso, parte del calore viene ceduto al fluido, per convezione, in proporzione alla velocità del flusso stesso.

Definita questa proporzionalità, non lineare e di una certa complessità, fu possibile risalìre, conoscendo tutti i parametri dello strumento, alla misura istantanea della velocità.

L'istantaneità della misura, la semplicità dello strumento e la sua intrinseca precisione, ne fecero l'invenzione che provocò un vero salto di qualità nella ricerca sulla dinamica dei fluidi.

La prima evidenza del nuovo approccio apparve negli Stati Uniti d'America, grazie agli scritti sull'analisi dimensionale, pubblicati nel 1914 e nel 1915, da Edgar Buckingham (1867 - 1940), un fisico al *US Bureau of Standard*.

Non soltanto Buckingham introdusse in America (senza citare le fonti) le osservazioni di Blasius della correlazione dei dati sulla resistenza al moto nelle tubazioni ed il *Numero di Reynolds*, ma egli presentò (ancora tacendone l'orìgine) la generalizzazione del metodo di Riabouchinsky nel formulare diversi parametri non dimensionali, per mezzo di quella che chiamò *Teorema del* π.

Una puntuale attenzione fu dedicata alla logica del ragionamento dimensionale in un piccolo libro pubblicato nel 1922 da un altro fisico, Percy Williams Bridgman (1882 - ?) dell'Università di Harvard; ma il maggior impulso all'America, nell'accogliere le nuove teorie della Meccanica dei fluidi, venne procurato, in modo indipendente, da quattro scienziati che qui ricordiamo.

Già abbiamo presentato John R. Freeman e Theodor von Kármán.

L'impatto di von Kármán sulla ricerca e sulle applicazioni pratiche fu immediata già dal suo arrivo in America.

L'influenza di Freeman fu indiretta ed anche più lenta nel produrre evidenti effetti, grazie alle molte iniziative che abbiamo già raccontato.

Di certo il decàno dei pionieri americani della moderna scuola dei fluidi fu William Frederick Durand (1859 - 1958). Attraverso una intensa esperienza in Ingegneria Civile, in Marina, in Meccanica ed in Aeronautica, durante la sua lunga ed attiva vita, Durand esplorò ampi campi della ricerca, portando la sua influenza i molti aspetti dell'attività professionale.

Egli servì come professore di Ingegneria Marina a Cornell e di Ingegneria Meccanica a Stanford; come professore del *National Avisory Research Council* ed alla fondazione Guggenheim per la promozione dell'Aeronautica; fu inoltre consulente in molti progetti di ingegneria.

I suoi scritti furono pochi, non certo proporzionati alla sua influenza; uno di essi mérita particolare attenzione: "*Teoria aerodinamica*", édito nel 1934; òpera in sei volumi nella quale coordinò il lavoro dei *leader* mondiali di questa ancor giovane disciplina, comprendendo anche una dettagliata indagine storica sugli sviluppi di questa scienza.

Il quarto personaggio che grandemente sostenne il pensiero e la ricerca negli USA fu il russo Boris Alexandrovich Bakhmeteff (1880-1951), nativo di Tiflis, che studiò all'Istituto Politecnico di San Pietroburgo ed a quello di Zurigo; divenne poi professore di Ingegneria Civile, sviluppando anche un'intensa attività di progettazione, a San Pietroburgo.

Nel 1916 Bakhmeteff pubblicò in Russia un libro sull'Idraulica dei canali a *pelo libero*, nel quale per primo fece uso del diagramma dell'energìa.

Ambasciatore di Russia negli Stati Uniti sotto il regime di Kerensky, Bakhmeteff rimase poi in America, dove acquisì prestigio e fortuna nelle fabbriche di fiammiferi.

Non abbandonò però il suo grande interesse per l'Idraulica, pubblicando la versione in inglese, ampliata, del suo libro sui canali a *pelo libero*, e curando numerose letture alla *Columbia University*. Queste letture includevano una serie specificatamente dedicata alla Meccanica dei fluidi ed un compendio che venne pubblicato in estratto nel 1932 ad uso degli studenti, che rappresentò il primo esempio di una nuova serie di tale tipologia di testi che invaderanno la stampa scientifica statunitense.

Bakhmeneff pubblicò anche un numero di documenti su originali ricerche ed una speciale serie di letture sulla turbolenza, più tardi apparse in forma di libro.

Sebbene molti dei suoi scritti proponevano l'interpretazione di teorìe e risultati di altri, piuttosto che scoperte sue originali, furono comunque assai efficaci nello stimolare l'interesse degli studenti e degli idraulici americani in questo nuovo approccio. Tuttavia ancora più efficace in tale effetto fu la stessa dinàmica personalità di Bakhmeteff .

Con riferimento ai persistenti sforzi di Freeman per costruire un laboratorio idraulico nazionale è doveroso ricordare, a questo punto, l'impianto che venne realizzato al *US Bureau of Standards*, che ottenne l'universale apprezzamento attraverso gli scritti di un uomo, Garbis Hovannes Keulegan (1890 - ?), nel campo della Meccanica dei fluidi. Nato in Armenia, Keulegan completò la sua educazione negli Stati Uniti, dove ricevette un ufficiale riconoscimento dal *US*

Bureau of Standards a vent'anni, diventando poi membro effettivo dello staff del nuovo laboratorio di Idraulica. Garbis Hovannes Keulegan fu un matematico per tendenza ed un idraulico per associazione; non deve quindi sorprendere che i suoi successivi documenti e rapporti (sul moto dell'onda, sulla resistenza nei canali a cielo libero e nelle tubazioni, sul flusso con stratificazione della densità) rifletterono la combinazione della teoria del suono, degli esperimenti e dell'ampia conoscenza della letteratura sull'argomento.

L'indubbio successo, universale, dell'insegnamento di Prandtl-Kármán trascinò tutti gli studiosi di Idraulica al nuovo approccio, soprattutto dopo aver verificato l'esattezza delle risultanze nella correlazione del fenomeno della resistenza al flusso nelle condotte. A metà degli anni Trenta, alcuni tra loro avevano già dato un notevole ed originale contributo, non soltanto ampliando grandemente la ricerca sulla scabrezza delle pareti dei condotti, ma anche nell'applicazione della teoria della turbolenza, nell'analisi del movimento del sedimento, sìa temporaneamente in sospensione che sul fondo dell'àlveo.

I flussi dell'aria e dell'acqua cominciarono ad essere considerati aspetti particolari di un medésimo fenomeno; attraverso la teoria di Prandtl dello Strato Limite, l'essenziale ruolo delle equazioni fondamentali del moto ottenne un definitivo riconoscimento, sebbene in Idraulica il problema della configurazione dei sìngoli filetti di corrente non ebbe mai, e non ha tuttora, l'importanza che invece riveste nell'Aerodinàmica.

In ogni caso, la fine degli anni Trenta, proprio in procinto dell'immane tragedia, la Meccanica dei Fluidi giunse ad un ampio ed esaustivo corredo di strumenti e concetti, non solo per gli idraulici ma per qualunque scienza che fosse in qualche modo interessata a questo tipo di moto.

* * *

Cap. 22 – Una valutazione della Scienza della metà sécolo XX.

Spesso di dice che non si possa scrivere la Storia di eventi troppo recenti, quasi che la memoria collettiva debba vivere del solo passato remòto. "*Bisogna lasciare che i fatti sedimentino*", come se l'accaduto, di per sé, vivesse di vita propria e potesse essere analizzato e, poi, raccontato soltanto quando il tempo ne avesse 'stabilizzato' motivi, mériti e responsabilità.

Crediamo, invece, che la Storia sìa anche quella ancòra prossima all'oggi; anzi, della quale si dovrebbe scrivere senza indugio, al più presto, non appena i fatti avvengono, anche se, in tal modo, si corre il rischio, o si ha la certezza, di essere sgradìti, parlando di chi ancòra esiste, e, in alcuni casi, ancòra gestisce un potere!

La Storia contemporànea forse è più difficile da scrivere, poiché si sottopone, senza sconto, all'esame degli stessi protagonisti che l'hanno costruìta, con il pensiero e con le azioni.

"*La Storia del presente non è Storia è Cronaca*"; sarà vero, ma altrettanto vero è il perverso meccanismo per il quale la Cronaca, cioè la Storia del presente, spesso smentisce i suoi stessi protagonisti, diventando poi e comunque, quando il presente sarà passato remoto, . . . Storia!

Ecco allora che avvicinandoci ai giorni nostri, nel continuare il racconto, ci esponiamo alle critiche dei diretti interessati, ma anche al pericolo di costruire una Storia diversa, forse meno vera; le critiche, potenzialmente numerose e, almeno in parte, pertinenti, non possono però sottrarci all'analisi delle realtà contemporanee.

Pertanto concludiamo con questo 'quasi-ùltimo' Capitolo, nel quale effettuiamo un tentativo di raccontare cosa è avvenuto nella seconda metà del XX sécolo, che è ancòr oggi il Presente, accennando ai princìpi fondamentali ed all'evoluzione dei métodi.

Lasciamo, così, una traccia, tra tante altre, ùtile, speriamo, quando questa realtà diverrà 'passato remoto' e sarà così possibile attribuire ad ogni aspetto un valore più prossimo all'irraggiungibile verità assoluta.

L'universalità dell'interesse ai problemi del moto dei fluidi e dell'efficacia di procedere accomunando sforzi e conoscenze fu massima, come per molti altri aspetti, durante la Seconda Guerra Mondiale.

Tutte le professionalità che si erano dedicate, o potevano dedicarsi, al fenomeno del flusso vennero coinvolte per risolvere i problemi che, in tempo di guerra, avevano riflessi di carattere militare; per quanto ci riguarda: problemi intorno all'acqua, all'aria, al comportamento degli olî e dei grassi; si aprirono nuovi argomenti, riferìti ad innumerevoli altri fluidi e secondo prospettive ed approcci in tutto differenti da quelli indagàti, sino ad allora, dalla ricerca puramente scientifica; quindi, in alcuni casi, in assenza di esperienze già consolidate.

Il tempo di guerra, che non ha mai aspetti positivi che valgano una tale e purtroppo ricorrente tragedia, si attenua l'interesse per la definizione dei princìpi e si esalta, per contro, l'interesse, la necessità di giungere al più presto alle pratiche applicazioni.

Alla fine dello spaventoso conflitto mondiale, campi di ricerca in Idraulica, in òrigine inseparàbili, si trovarono lontani dalla 'scienza madre', avendo imboccato strade in tutto separate; la balistica, la propulsione a getto, il controllo dei moti turbolenti, vennero infatti portati all'interno di prospettive nuove, mentre le leggi dell'Idraulica entrarono in nuove discipline come, ad esempio, la Meteorologìa, l'Aeronautica, l'Oceanografia ed altre ancòra.

Nella tradizionale Meccànica dei Fluidi troviamo nuovi problemi, pei quali le attività di laboratorio erano comunque necessarie: la dispersione delle nebbie, la resistenza al moto dei vascelli, galleggianti o sommersi, la stabilità o la stratificazione dei flussi, . . .

A metà del sécolo ventesimo i lìmiti dell'Idraulica erano ormai piuttosto confusi ed incerti, aumentando l'arbitrarietà delle scelte nel proseguire a tracciarne la Storia.

Un'altra difficoltà: la separazione degli argomenti si rispecchia anche nel proliferare delle professioni che, sino all'Ottocento appartenevano ad un ùnico 'ceppo': Ingegneri, Matematici, Fisici, Geologi, Biologi, Chimici, Statistici, Analisti . . . non sempre neppure accomunati da 'connotazioni idrauliche'.

Forse il più profondo solco che si è formato nell'Ottocento e progressivamente diventato un fossato quasi invalicabile, a separazione delle discipline riconducibili all'Idraulica è stato il perseverare dell'impostazione originale di considerare non rotazionale il moto del fluido. Questa ipòtesi era infatti sufficiente per risolvere, a livello ingegneristico, tutti i problemi idraulici, che affrontavano moti con velocità ridotte se non ridottissime, ma non fu accettabile per le scienze che, invece, trattano soprattutto velocità elevate se non elevatissime.

Cosi avvenne che l'Idraulica fu più lenta dell'Aerodinàmica ad adottare strumenti matematici di grande potenziale, semplicemente perché le strutture idrauliche e le esigenze delle nuove costruzioni idrauliche non avevano l'esasperato bisogno di precisione e compiutezza dei calcoli rispetto ad una scienza Aerodinàmica, che muoveva passi da gigante, affrontando problemi di flusso con velocità pari a numerosi multipli della velocità del suono.

Soltanto il problema della Cavitazione, forse ùnico fenomeno idraulico dominato da elevate velocità, era causa di uno sviluppo più approfondìto ed assai sofisticato nella scienza dei fluidi.

Anche la caratterizzazione delle reti di flusso, quali, ad esempio, il funzionamento di un complesso acquedotto urbano, ha causato un notevole lavoro di ricerca, per rappresentare sempre più correttamente il campo delle velocità, comunque schematizzato in sole due dimensioni, quindi lavorando sempre con valori medi delle velocità, oppure, al massimo, secondo piani di movimento radiali, come spesso avviene nel caso dei moti di filtrazione provocati, nel sottosuolo, dall'emungimento tràmite un pozzo.

Il problema del moto delle onde fu a lungo un aspetto dell'Idraulica considerato quasi esclusivamente argomento da trattare con la sola Analisi Matemàtica. Progressivamente, alcuni aspetti di questo particolare fenòmeno, soprattutto inerenti a fasi non stàbili come la rottura dell'onda, furono esaminati sìa analiticamente che in via sperimentale, con promettenti successi. Il problema, più ampio e complesso, del moto dell'onda comprendente sìa le resistenze del bordo che quelle interne, fu stato affrontato secondo applicazioni ed analisi in tutto differenti: da un lato si studiò la progressiva pérdita dell'energìa dell'onda a causa della viscosità che ne produceva la dissipazione; dall'altro, l'attenzione si rivolse al fenomeno della propagazione delle onde di piena lungo i sistemi fluviali, anche nel caso di improvvisi crolli di sbarramenti e dighe.

L'applicazione dei princìpi dell'onda acustica nello studio delle propagazioni dell'onda nei canali *a pelo libero* in *Corrente Veloce* ha avuto come 'controaltare alle *Gallerie del Vento*', le vasche trainate ed i modelli di corsi d'acqua ad alta velocità.

La parte terminale del secondo millennio dell'Era Cristiana resterà caratterizzato dall'incredibile e vertiginoso sviluppo e l'universale diffusione dei processi grafici e, successivamente, dell'utilizzo degli elaboratori elettronici.

Paradossalmente la fase dell'Idraulica che attiene la resistenza delle superfici al moto del fluido, che maggiormente interpreta un fenomeno onnipresente, è l'argomento che desta oggi gli interessi minori. Poiché la distribuzione della velocità e della resistenza del flusso in una tubazione sono strettamente correlate con il problema dello *Strato Limite* (o *Strato di Bordo*), è probabilmente attraverso tali correlazioni che continueranno i soli veri progressi nella valutazione degli effetti della scabrezza, che resta un problema dùplice, sìa nel prevedere gli effetti dinàmici sul flusso,

ipotizzando differenti conformazioni geométriche della rugosità, sìa caratterizzando la naturale rugosità delle superfici dei prodotti commerciali.

Il solo aspetto del moto del fluido, che sembra a tutt'oggi accomunare le molte professionalità che ai fluidi si rivolgono, è la necessità della perfetta padronanza del fenòmeno della turbolenza, anche se l'Idraulica è solo in parte coinvolta nei problemi della diffusione della turbolenza e della conseguente variazione della resistenza, poiché la scala nella quale òpera è sempre dimensionata in términi di 'flusso medio' ed anche per la configurazione irregolare delle pareti, ancòra régola in Idraulica piuttosto che eccezione.

Comunque non è trascurabile il contributo allo studio della turbolenza dovuto all'Idraulica, attraverso la sperimentazione diretta piuttosto che con studi teorici; per la parte teòrica, significative sono le 'incursioni' di altre scienze: la Matemàtica, la Fisica, l'Aerodinàmica, la Chimica, la Termodinàmica, che hanno consentìto di completare soluzioni certo ancora approssimate ma soddisfacenti per tanti problemi, come la diffusione e l'espansione del flusso e delle scìe.

Una categoria di problemi di flusso che interessano ancòra e quasi esclusivamente l'Idraulica, soprattutto relativamente ai fenòmeni naturali, è costituìta dagli aspetti del trasporto solido, sìa come trasporto di materiale in sospensione che come trascinamento di fondo.

A dispetto dell'ovvia somiglianza al movimento del trasporto di sabbia e polvere da parte del vento ed anche nei flussi di miscele e composti nell'industria chimica, le analisi del trasporto di sedimenti nei fiumi e nei canali aveva proseguito quasi interamente sotto gli auspìci della sola Idraulica, senza alcun contributo da altre discipline.

L'analisi dei moti prossimi al fondo dell'àlveo, dove avviene il trasporto per trascinamento, sino a XX sécolo era rimasta essenzialmente empirica, secondo un approccio di tipo dimensionale, rivolto alla pura organizzazione e classificazione dei fenomeni osservati e dei dati misurati.

La teoria del trasporto dei solidi sedimentabili, quindi mantenuti in sospensione unicamente in funzione della velocità del flusso (a parità di densità), d'altra parte fu sviluppata prima che le misure fossero disponibili; l'accuratezza che ne è risultata era limitata soltanto dalle relazioni della distribuzione e della miscelazione delle velocità, sostenuta dai cardini delle formule sulla distribuzione della velocità stessa. Tuttavia la sua utilità ancora oggi dipende dalla formulazione, caso per caso, delle condizioni al contorno, limitatamente alle zone di sospensione ed alle condizioni del letto stesso, mantenendo, in tale eventualità, un elevato grado di affidabilità.

Lo sviluppo delle macchine idrauliche era iniziato come nuovo tipo di approccio parallelo, se non interferente, con l'Ingegneria Meccanica, sebbene comunque sempre parte della scienza Idraulica. I sistemi per la concentrazione, il controllo, la trasmissione e la gestione della potenza idraulica rappresentano la più approfondìta applicazione industriale dei princìpi elementari del flusso, portando alla produzione di una vastissima varietà di macchine, dalla straordinaria tecnologìa: pompe e turbine d'ogni tipo e dimensioni, accoppiamenti idraulici, congegni di distribuzione, bracci idraulici, ecc. . . . ottenendo elevatissime prestazioni senza neppure giungere alla più rigorosa formalizzazione teòrica delle analisi condotte.

La ricerca idraulica continuerà, così, senza mai fermarsi, principalmente nei laboratorî delle Università e degli Istituti Politecnici di tutto il mondo, né più si può parlare di una qualche primazìa nazionale, in questo mondo, non solo culturalmente globalizzato.

Non dobbiamo comunque ignorare l'attività dei laboratorî industriali, in orìgine organizzati meramente per aumentare le prestazioni dei cicli produttivi e/o dei prodotti finìti, ma in molti casi ormai applicàti anche in quelle ricerche teòriche sul cui cammino si possano intravedere, anche quali risultati collaterali, opportunità pratiche.

Anche nella strumentazione gli sviluppi del XX sécolo sono stati sbalorditivi: l'Elettrònica, la Microelettrònica, le Micromeccànica e le telecomunicazioni digitali hanno portato a disporre di strumenti, nello studio dei fluidi e del loro moto, in grado di indagare, con precisione, spazi ridottissimi in condizioni di grande difficoltà. Oggi è possibile 'vedere', ad esempio, il punto di distacco di ogni singolo vòrtice da una superficie lambìta dal fluido e misurarne i parametri idrodinamici.

Anche nell'àmbito dei modelli sperimentali in scala si è ormai giunti ad un'ottima approssimazione nella simulazione dei fenomeni, al punto da sostenere, con sufficiente sicurezza, le ipotesi progettuali.

Progressi sostanziali si sono così realizzati nell'Idraulica Fluviale, sia nel caso di corsi d'acqua a letto fisso sìa mobile, ma anche nella simulazione dei fenomeni di moto di flussi stratificati di differente densità. Lo studio della formazione e della dinàmica di flussi stratificati, non solo per differente densità ma anche per differente temperatura (un caso particolare del primo) è importante non soltanto nell'analisi del comportamento delle acque negli estuari e nei serbatoi, ma anche nel comportamento delle masse oceaniche, nei moti atmosférici, sino ai processi industriali che hanno, nei propri processi produttivi, fluidi in movimento, in miscelazione, in diffusione, ecc. . .

Il numero degli scritti tecnici e scientifici ha ormai raggiunto un valore impressionante; condurre una cérnita che possa portare ad una classificazione per importanza è impresa ormai impossibile, certo al di fuori della portata di questa Storia. Tale travolgente incremento testimonia della grandissima attenzione che viene data alle ricerche in campo scientifico ed anche della diffusione della conoscenza in ogni parte del nostro pianéta.

Quanto è lontana la seicentesca *Repubblica delle lettere* di Marin Mersénne!

Nel mondo ormai globalizzato, molto già si fatica per tenere il passo della sola catalogazione dei lavori pubblicati, seguendo servizi di ricognizione e recensione curati dalle diverse Accadémie, Università, Istituti, Fondazioni, Enciclopedìe.

Anche molte riviste, alcune di ottima qualità, séguono gli sviluppi della ricerca e non manca il contributo delle reti televisive, alcune specificatamente dedicate alla scienza se non proposti anche in reti di impostazione più generale.

Internet, ùltima arrivata, distende tutta la potenza dell'informàtica del terzo millennio, rendendo comune all'intero mondo ogni documento, non appena esso sìa pubblicato.

Tanto non avrebbero neppure sognato i ricercatori di un tempo; nessuno di loro, per quanto eccelso, avrebbe mai immaginato un tempo nel quale si potesse annunciare all'Umanità tutta ogni informazione nell'immediatezza di un semplice 'clic'.

A fronte di questa globale comunanza di dati, informazioni, esperimenti, osservazioni non troviamo una corrispondente e diffusa crèscita della cultura dell'umanità; sembra quasi che la massima diffusione preluda al distacco, al consumo dell'informazione senza approfondimento alcuno, senza cioè alcuna assimilazione nella cultura di ciascuno.

L'abbondanza dell'informazione, come di ogni bene del quale l'Umanità dovrebbe alimentarsi, sembra cioè produrre assuefazione, noia, disinteresse.

Questo lavoro, così come è stato riproposto, navigherà sulle vie telematiche, con il proposito di suscitare, innanzitutto, l'interesse delle persone ad un tema che ancòr oggi si muove con 'i ritmi dell'acqua' e ne conserva pure tutto il fàscino.

Il futuro dell'Idraulica è oggi assai difficile da prevedere, né sappiamo se essa possa avere un futuro per quanto riguarda nuove scoperte o nuovi sviluppi.

Come abbiamo affermato all'inizio, oggi sembra di conoscere tutto dell'acqua, che è stata la materia prima della nascita dell'Idraulica, come, ovviamente, di tutte le forme di vita.

Tra le nuove scoperte che verranno, l'Umanità troverà il modo di utilizzare l'acqua senza . . . distruggerla?

Nessuno può rispondere.

* * *

Cap. 23 – Il Rasoio di Ockham

"*Entia non sunt moltiplicanda praeter necessitatem*"

Nel XIII sécolo, il frate francescano Guglielmo di Ockham (Ockham 1295 - Monaco di Baviera c.a 1350 – lo abbiamo incontrato nel Capitolo 6) osava sfidare la cultura dominante con simili affermazioni, poi riassunte nell'immagine del '*Rasoio di Ockham*': "*Non si deve moltiplicare il numero delle entità oltre a quelle strettamente necessarie*.".

Un frate francescano che, assieme a pochi altri coraggiosi confratelli, levava alta la luce della Ragione davanti alle fantasìe, quasi sempre strumentali invenzioni, del potere di quel tempo, quando per tali affermazioni si poteva perdere la vita se non addirittura l'anima, allora ben più apprezzata!

"*Entia non sunt moltiplicanda praeter necessitatem*"

Togliamo dalla cultura ciò che cultura non è, perché non riferibile ad alcuna realtà.

Qualsìasi scienza, anche se applicata alla più immateriale delle realtà, come, ad esempio, la Psicologìa, si òccupa comunque di realtà vere, di categorìe che formano la natura delle cose e della Vita, già di per sé complicatissime quindi . . . perché complicarle inutilmente?

"*Entia non sunt moltiplicanda praeter necessitatem*"

Dopo otto sécoli, oggi, nell'ipertecnologico Terzo Millennio, il *Rasoio di Ockham* troverebbe ancòra motivo per 'tagliare'?

Una domanda che, anche senza ricordare questo illustre personaggio, può essere surrogata dalla speculare:

"Esistono ancor oggi, nel Sapere e nella Ricerca, '*entità non necessarie*'?"

Purtroppo, seppur limitàti all'àmbito di questa Storia, siamo convinti che Guglielmo di Ockham avrebbe, ancor oggi, di che preoccuparsi!

Ovviamente, qui non ci riferiamo agli aspetti specifici della alla scienza dei fluidi, che, come tale, resta sempre scienza in continuo progredire; desideriamo accennare ai fattori esterni, che possono gravare sull'Idraulica, prodotti dall'ambiente culturale dominante (con strumenti di inaudita potenza, come, per esempio, la televisione!), al quale risponde, spesso, il colpevole silenzio della Comunità Scientifica, incapace di seguìre l'esempio, come invece dovrebbe, di un coraggioso frate inglese del XIII sécolo ed àbdica ad altri una cultura che, invece, dovrebbe essere prima di tutto posseduta e proclamata, sempre e comunque, dalla Comunità stessa.

Così le ìdee errate ma 'convincenti' trionfano nell'opinione pubblica che, a sua volta e per sua stessa natura, diventa politica e viceversa, scatenando un meccanismo perverso di costruzione della falsa realtà, della notizia più o meno disgiunta dai fatti . . .

In una dispensa, che scrissi nel 2003, proposi la seguente '*Premessa necessaria ma . . . non indispensabile*', sapendo che avrebbe avuto accesso alle menti di giovani laureàti, impegnàti in un Master di 2° livello sulla gestione del territorio.

"Sono veramente enormi i fiumi di inchiostro versati sull'argomento 'acqua'; inimmaginabile la quantità di cose dette ed il tempo trascorso per la loro esposizione. Se tutto

quello che è stato detto e scritto fosse stato detto e scritto da persone che conoscono la materia e con scopi veramente orientati a diffondere la 'cultura dell'acqua', dovremmo riscontrare nella società, o almeno in qualche sua parte (la scuola, . . . la Pubblica Amministrazione . . .), una corretta conoscenza ed una diffusa coscienza della situazione e dei reali problemi dell'acqua oggi, almeno ad uno stadio di superficiale informazione. Così non è.

Nella parte di Lombardia e di Italia che conosco, che non definirei 'piccole', trovo difficoltà, ad ogni livello, nel parlar di acqua; difficoltà causata da una profonda non conoscenza dell'argomento se non ad una conoscenza distorta.

Avere la possibilità di parlare dell'acqua, a prescindere dal contesto in cui ci si trovi, per molti vuol dire, infatti, tormentare, se non annojare, l'ascoltatore ed il lettore, con i seguenti argomenti (che tutti già conoscono):

- l'acqua dolce è solo il 2% dell'acqua terrestre;
- solo in piccola parte è utilizzata dall'uomo;
- pochi popoli al mondo ne godono in abbondanza;
- la poca acqua è male utilizzata ed inquinata;
- sterminati territorî languono tutt'oggi in una sete drammatica;
- l'acqua disponibile è condannata ad una costante diminuzione;
- ecc ……

Non elenco poi gli *slogan* che nascono ad ogni convegno, congresso, summitt, 'forum': "*L'acqua è l'oro del terzo millennio*"…. è uno dei più 'gettonati'!

(Digressione: la sindrome da palcoscenico può arrivare ad ottenebrare la mente, soprattutto nel mondo d'oggi in cui 'l'apparire' pare essere un valore importante a volte quasi essenziale nella vita di una persona. Apparire e dire qualcosa, poter vedersi citato 'sul giornale', compiacersi di pensare (e poter dire) 'd'esserci stato da protagonista', sono desideri diffusissimi. Quando diventano necessità mi pare assomiglino a vere e proprie malattie; sindrome tipica dei politici (soprattutto se poco professionali e pure con scarsa fantasìa): diventa, così, un difetto del mestiere, che purtroppo colpisce ormai tanti ed a tutti i livelli. Risultato: parlare ed apparire; la qualità di ciò che si dice è aspetto secondario, l'importante è moltiplicare le occasioni. Le cose che si dicono diventano più facilmente notizia se attirano l'attenzione della potenziale massa di ascoltatori, attenzione molto più pronta alle notizie più esse sono negative, meglio se catastrofiche . . . Anche di questo soffre l'acqua.)"

Così scrivevo, nel 2003, così . . . scrivo oggi!

Il microfono non attira, quale miele per le api, soltanto i politici . . . la fama obnùbila la mente di tanti, mentre chi è ormai 'famoso' è bramàto, quale preda ambìta, dai *mass media*: giorno nuovo, eroe nuovo . . . ogni giorno ne serve un altro, sempre nuovo, preferibilmente, nel bene e nel male, anzi: 'nel male' è meglio!!

Poter comparìre, anche solo una volta nella ribalta dei *mass media* vuol dire diventare famoso, essere invitato a convegni, pubblici incontri, comparìre nell'olimpo della televisione, . . . essere da tutti conosciuto e riconosciuto: "*Quello lì è quello che ha detto . . . è quello che ha fatto* . . . "; sogni miseràbili nei quali si accomùnano persone per questo disposte anche a rinunciare a qualsìvoglia senso di dignità; a volte, viene spontàneo pensare: "*Da lui non me lo sarei mai aspettato*!".

La Fama: vecchio e nuovo sogno di tanti; chiméra cercata ad ogni costo; mostro demolitore di princìpi ed ideàli!

Devo precisare che scrivo di ciò che conosco, cioè di ciò che avviene nella 'mia terra', lontana e certo diversa da tante altre parti del mondo.

Ma 'del mondo' qualcosa apprendo, dal circuito informativo, e deduco che molto di ciò che scrivo possa adattarsi non solo alla 'mia terra', ma anche altrove, forse, in molti casi, con il semplice aiuto di una buona . . . traduzione!

"*Entia non sunt moltiplicanda praeter necessitatem*"

Si, anche oggi il *Rasoio di Ockham* avrebbe molto da 'tagliare'!

Gioca a sfavore dell'acqua la generale percezione della sua stretta corrispondenza al concetto di vita; quando si grida l'allarme per l'acqua, in ciascuno di noi "*per l'acqua*" e "*per la vita*" hanno il medésimo suono; così l'attenzione sale e meglio assìmila tutto, anche le entità *praeter necessitatem* e qualcuno . . . sùbito ne approfitta.

Gioca, a sfavore dell'acqua, il prevalere, nel mondo mediàtico, delle notizie negative, meglio se catastrofiche. Credo sìa un meccanismo spiegabile con la Psicologìa (scusandomi con gli specialisti): la disgrazia, meglio se tragedia, ci coinvolge con immediatezza, poiché fa scattare spontanei meccanismi di autoprotezione, inconsce reazioni del potentissimo istinto di sopravvivenza, dalle mille e mille connotazioni. "*Per fortuna non è successo a me*" oppure "*M'informo, per evitare che accada anche a me*", e via così . . . Il nostro inconscio 'ci mette in allarme', imponendoci la massima attenzione.

Alla notizia buona ci si applica molto meno: "*Beato lui*!", oppure, nella peggiore dell'ipotesi,: "*Che peccato che non sia capitato anche a me*". Ma sono sempre sentimenti lontani, distaccati: "*Tanto a me non capiterà mai!*".

La notizia positiva non fa sicuramente *audience*! Non attiva alcun spontàneo allarme.

Sbaglio?

Mi lìmito a constatare un fatto: cronaca nera e cronaca politica, quest'ùltima preferibilmente e soprattutto farcìta di asprezze e scandali (quindi comunque negativa), dòminano gli spazi dei *mass media*, a fianco della cronaca ambientale, rigorosamente dedicata alle tragedie che avvengono e, se possibile con maggior énfasi, che 'sicuramente avverranno'.

Gioca a sfavore dell'acqua l'evidente silenzio della Comunità Scientifica, che a volte addirittura si concede ad una rumorosa eco delle teorìe più popolari, poco o per nulla scientifiche, proprio sulle tragedie che avvengono o che, meglio, 'sicuramente avverranno', addirittura proponendo rimédi irrealizzabili . . . ma per l'opinione pubblica e, purtroppo, anche politica, soluzione d'ogni problema per il solo fatto d'essere proclamate da un 'uomo di scienza' . . . : "*Lo ha detto . . . un Premio Nobel*!".

Neppure mi pare esservi il dignitoso sforzo di farsi sentire nei modi adeguàti per fronteggiare il generale schiamazzo

.

"*Ci attendono soltanto immani tragedie*": da oltre mezzo sécolo, questo è il messaggio che rimbomba, spesso assordante, in ogni 'àngolo del mondo mediàtico'; messaggio catastrofico o, meglio, catastrofistico, assimilàto da tutti, che ormai aspéttano, trepidanti, . . . da oltre mezzo sécolo! 'Dietro', ogni volta e comunque, c'è qualcuno che ne trae profitto . . .

Il mondo è sempre più in mano ai poteri forti, oggi soprattutto econòmici, che si aliméntano e si accrescono orientando i consumi . . . del mondo, e la Comunità Scientifica tace oppure . . . aiuta, ma non sé stessa, né, quindi, la cultura, né, quindi, l'Umanità. Con i 'poteri forti' è sempre meglio non scontrarsi!

Emblemàtico il caso della '*Febbre dei polli*', portatrice della mondiale pandemìa, imminente ed immane tragedia, improvvisamente annunciata, prossima e certa, dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (l'OMS) in un convegno, il 13 settembre 2003, tenùtosi nel meraviglioso scenario turistico dell'ìsola di Malta, . . . organizzato a cura e spese delle due o tre multinazionali in grado di produrre il vaccino per gli esseri umani (!).

La colossale macchina commerciale era già pronta a fornire qualsìasi quantità che ogni Capo di Governo avesse deciso di acquistare, allo scopo di poter dire, davanti all'opinione pubblica: "*La popolazione stìa tranquilla: abbiamo il vaccino*!" . . . .

Queste aziende, ovviamente, conoscono assai bene i meccanismi che scaténano paure ed ìncubi dell'opinione pubblica, e dòminano, certo senza gran fatìca, l'amplificazione planetaria del circuìto informativo, impegnato, quotidianamente, a sfornare notizie più che a raccontare realtà!

Irrilevante, soprattutto per i *mass media*, il particolare che il vaccino sarà poi acquistato, in tante nazioni, in un numero di dosi pari al 4÷5% della popolazione (si salveranno solo gli 'eletti'? – intendendo questo términe . . . in ogni senso!), perché i soldi spesi, un vero fiume, erano tutto ciò che si poteva trovare di spendibile, con 'l'urgenza del caso', per riempire magazzini segretissimi e le tasche delle case farmacéutiche. Nessuno alzò la voce a dimostrare l'inutile spreco!

Pagare il Convegno a Malta è stato proprio un bell'investimento, ma non credo che nei corsi di Economìa sarà portato ad esempio! La "*Pandemìa*, *certamente in arrivo*', non è arrivata: anche l'OMS qualche volta sbaglia o . . . compiace il *vil denaro*?

Intanto i vaccini, come al sòlito, avranno certo una data di scadenza; . . . è già tutto pronto per la prossima 'puntata'? (Anche qui, il significato del tèrmine è moltéplice!)

Non màncano casi ancor più sbalorditivi.

Negli anni Ottanta dello scorso sécolo s'accende all'improvviso il bisogno di eliminare la benzina 'al piombo' e riconvertire il parco macchine mondiale alla benzina 'verde', colore certo scelto non a caso: l'iniziativa è sostenuta, a spada tratta, anche dall'intero mondo ambientalista: "*W la benzina verde*!".

Il piombo fa male, certo, come fanno male i vapori di vernice, il fumo delle sigarette, l'acool, le droghe o . . . gli Idrocarburi Policiclici Aromàtici, che sostituirono il piombo, con funzione di antidetonante, rendendo 'verde', e politicamente da tutti ben accolta, la benzina delle nuove automobili.

Idrocarburi Policiclici Aromàtici che l'Organizzazione Mondiale della Sanità (l'OMS) aveva, da decenni, classificato come sostanze scuramente cancerogene (altro errore?)!

Ma tutti hanno decìso che la 'benzina verde' è 'verde', quindi buona, e le marmitte catalitiche faranno il resto, almeno così garantiscono . . . le case automobilistiche! Intanto gli Idrocarburi Policiclici Aromàtici sono prodotti, diversamente dal piombo, dalle multinazionali del petrolio, che hanno così l'intero mercato in loro mano, ancor più libere di dettar legge. La benzina, però, senza piombo è un po' troppo 'secca', quindi oltre agli Idrocarburi Policiclici Aromatici bisogna aggiungere un altro componente che la renda più fluida . . . una benzina sempre più 'verde'?

E l'acqua?

È un fatto: il pianéta si sta riscaldando, il ghiaccio al polo Nord si riduce progressivamente e l'Europa del Sud è in avanzata fase di tropicalizzazione.

Seimila anni or sono esisteva la '*Mezza Luna Fértile*', che abbracciava gli attuali Israele, Libano, Giordania, Iran e Iraq: terre che, a quei tempi, erano ricoperte di flòride pianure, oggi di sabbia e nude rocce.

Il deserto del Sahara guadagna spazi al ritmo di migliaia di chilòmetri quadrati all'anno.

Il pianéta si sta riscaldando, da sécoli e sécoli, periodi per noi lunghissimi ma, negli spazi temporali geologici, poco più che àttimi.

Il pianéta si è riscaldato e raffreddato mille e mille volte, nei miliardi di anni della sua esistenza: i mari hanno lasciato tracce inequivocàbili di escursioni periòdiche del proprio livello, nell'òrdine di decine, se non centinaia, di metri, eppure qualche organismo scientifico internazionale lancia l'allarme: "*I mari, tra un sécolo, saranno più alti di venti centimetri*." . . . c'è 'in giro' qualcuno pronto a vendere il rimedio?

Certo che c'è, sempre!

Se la Terra si riscalda, dobbiamo ridurre l'inquinamento; giusto!

Se la terra si riscalda e si deve ridurre l'inquinamento è necessario . . . rinnovare il parco macchine e comprare tante belle e nuove automobili con certificato '*Euro4*' (come si chiama in America, in Asia, in Africa o in Oceania?), che potranno circolare anche in città, nelle giornate di blocco del traffico, perché non producono le Polveri Sottili, delle quali nulla più si dice se non che sìano *micidiali*! . . . Poi avremo bisogno delle *Euro5*, poi delle *Euro6*, poi . . .

Nessuno osserva che le Polveri Sottili si trovano ovunque, basta trovarsi in una zona quando sìa in atto il naturalissimo fenòmeno atmosférico dell'Inversione Térmica. Sono *micidiali* e vanno combattute, punto e basta; intanto il mercato delle automobili fa affari e tutti son contenti.

Il pianéta si sta scaldando e dobbiamo correre ai ripari, è evidente; ma le nuove automobili riparo certo non sono.

Anche il solo lontano sospetto che l'emissione di gas possa accrescere l'Effetto Serra (di per sé fenòmeno che consente la Vita sul pianéta) è dovere di ogni essere umano lavorare per ridurla, prima di tutto evitando il più possibile di bruciare combustibili fossili: questa è certo una necessità certa!

Ma se il manifesto riscaldamento in atto fosse dovuto all'anidride carbònica che già è stata emessa . . . siamo già tutti belli che morti! Come si fa ad invertire una tendenza climàtica planetaria tanto ràpida da manifestarsi in un tempo geologicamente immediato, giacchè è rilevato manifestarsi negli ùltimi decenni?

Certo, ridurre l'emissione di anidride carbonica è cosa positiva, ma - per poter capìre e, quindi, prevedere in che direzione ci si debba muovere e, soprattutto, a che velocità - dobbiamo porre alcune domande ed ottenere, dalla Comunità Scientifica, risposte scientifiche, tra le quali, non sarebbero scandaloso ma semplicemente segno di serietà ed onestà, trovarvi risposte del tipo: "*Non lo sappiamo*" oppure "*Non abbiamo sufficienti dati*":

- quando è cominciata la fase di riscaldamento della Terra?
- interessa tutto il globo?
- la velocità del riscaldamento sta aumentando?
- qual è la composizione dell'atmosfera preistorica, rilevata nei ghiacci del polo Sud?
- quanto è il maggior calore, rispetto ai valori narurali, trattenuto oggi dall'atmosfera?
- qual è la capacità di assorbimento del calore della aree coperte da foreste o dalle acque?

Quest'ultimo aspetto non è mai toccato nei dibattiti scientifici, eppure lo credo importante. Della foresta ci si attarda a valutare il bilancio tra carbonio immagazzinato ed anidride carbonica prodotta, senza mai considerare che la foresta è in grado di produrre grandi masse di vapor acqueo, assorbendo una proporzionale quantità di calore; per questo nella foresta fa più fresco ma c'è più umidità. Sono millenni che l'Umanità sta distruggendo le foreste: i Romani rasero a suolo sterminate lande boschive quali, ad esempio, la grande valle del fiume Po. Dal sécolo scorso, la distruzione è diventata sistemàtica e onnipresente: non sarà che la Terra si stìa scaldando anche perché non c'è più foresta che assorbe calore? Ma la foresta è distrutta da poteri economici forti e, forse, anche per il bene di intere popolazioni, salvate dalla fame: al posto della foresta si pianta il grano; noi Europei lo abbiamo fatto per primi!

Se fosse vero, altra soluzione, in tempi brevi, non vedrei che creare nuovi sistemi di evaporazione, collegando, per esempio, le grandi depressioni desertiche, dove si raggiungono le temperature più elevate, con il mare: nuove grandi evaporazioni, assorbimento di calore e piogge, forse abbondanti. E' una follìa? Certo non più folle che fermare il riscaldamento globale comprando . . . nuove automobili!

Basterebbe che qualcuno, di potente, fiutasse l'affare e . . . il gioco è fatto!

Così è.

Ora che ho deragliato completamente, debbo scusarmi e rimettermi sul binario lungo il quale m'attende il capolìnea di questo lavoro.

"*Entia non sunt moltiplicanda praeter necessitatem*"

Ho contato, nella regione Lombardìa dove vivo, quanti sìano gli enti pubblici le cui decisioni si possano estendere anche sulla gestione dell'acqua: ventitrè! . . . e credo d'averne dimenticato qualcuno!

Tagliamo?

No, moltiplichiamo! Già, perché tra questi ventitrè stanno sorgendo, ad ogni occasione, accordi, tavoli, consulte, cabine, *forum*: "*Per garantire un maggiore coordinamento ed una migliore gestione della risorsa 'acqua'* . . . ".

Le motivazioni son sempre le stesse ed ormai si ripétono; chi vuol essere originale, ormai, 'esce dal vocabolario' e cònia nuovi términi, anche brutti: fisiografìa, impadulare, inputtare, assurdismo, infrastrutturazione, . . .

"*Entia non sunt moltiplicanda praeter necessitatem*"

Nella 'moltiplicazione delle entità' si nasconde un fine ben più deleterio: la fuga dalle responsabilità.

Non esiste in Italia (ma credo anche in gran parte del mondo) alcun aspetto della vita sociale che non sìa previsto e regolato in qualche legge, compresi, ovviamente, lo sfruttamento e la tutela della risorse fisiche del territorio.

Còmpiti e poteri sono elencàbili in ogni dettaglio, in questo unìtì, ovviamente, alle conseguenti responsabilità. Se le cose non vanno come dovrebbero, quindi, sarebbe fàcile individuare chi non svolge i còmpiti assegnati, cioè: chi non fa il proprio dovere. Allora è meglio cercare la condivisione, moltiplicando le occasioni 'di confronto', cioè 'di confusione': c'è qualcosa che non va? Parliàmone, confrontiamoci, analizziamo insieme, troviamo 'un accordo' . . . intanto ciò che va male continua ad andar male, se non peggio, soprattutto nel caso dello sfruttamento di risorse fisiche territoriali, . . . l'aumento dell'Effetto Serra insegna!

Che c'entra tutto questo con l'acqua, con l'Idraulica?

C'entra, poiché, in questo terzo millennio, ciò che si debba fare per il bene dell'acqua deve necessariamente passare attraverso il consenso, quanto più ampio possibile, quindi non scontrarsi, cioè evitare di dar fastidio, ai tanti che dell'acqua ne fanno un uso ingrato (!).

Allora, anche la Ricerca, sempre più àvida di denaro prima che di sapere, si adégua, e cerca laddove 'qualcuno coi soldi' ritiene che si possa cercare e quindi sìa 'ùtile' finanziare.

Laddove c'è l'errore, nel fare ma soprattutto nel non fare, è bene non guardare, oppure, semplicemente, tacere: mai recare disturbo al potere; si esce dal giro degli incarichi, dei contributi, della pubblica ribalta!

Intanto càpita che sìa la stessa acqua, sempre sincera, a farsi 'sentìre sonoramente', con disastri, nel 'troppo poco' e nel 'troppo', tra siccità ed inondazioni; allora, ecco pronto il colpevole, scelto, a seconda dei casi, dai seguenti: il sig. Cambiamento Climàtico; il dott. Dissesto Idrogeologico; la signora Furia de' Elementi (certo di nòbile orìgine!), il signorino Niño (ragazzino terribile!), il comm. Buco de' Ozono (altro nòbile, in questo periodo probabilmente 'in ferie'!).

Ah già dimenticavo: ci sono anche le signorine Polveri Sottili. In casi eccezionali, possiamo trovar colpévoli alcuni gruppi di facinorosi, non meglio identificati: Terremoti, Maremoti (in 'mondialese': *Tsunami*), Vulcani . . .

Di tutti 'costoro', una stessa caratteristica: sono sprovvisti di Codice Fiscale, quindi non rispondono mai dei danni arrecati!

Troppo pessimismo? . . . anche noi siamo scivolati nel catastrofismo, rinnegando le nostre ìdee nello stesso momento in cui le formuliamo?

Può essere, ma il timore del giudizio altrui non deve mai essere ostacolo alle opimioni.

Noi, qui, accenniamo all'océano culturale del mondo moderno – spesso più sìmile ad una palude – nel quale, quantunque, emérgono ìsole felìci.

Già, ci sono ancòra, per fortuna, Scienziati seri, che si òccupano e si preoccupano di territorio, di uso del suolo, di sfruttamento delle risorse fisiche, . . . di acqua. Purtroppo per loro - . . . e per tutti noi! – non possono che giungere a proclamare la necessità di porre freni a quello che 'il resto del mondo' chiama 'Sviluppo', al quale oggi si associa la chiméra della Sostenibilità.

Sostenibile o meno, quel che è certo è che deve essere compatibile con la nostra Terra che, è bene ricordarlo!, dell'Umanità farebbe volentieri a meno!

Per concludere il nostro lavoro con un pensiero ben pertinente all'argomento, scriviamo queste poche ùltime righe.

Sono innumerevoli le esigenze della moderna Idraulica, rivolta soprattutto all'acqua che, quando manca o quando ce ne è troppa, è sempre una terribile tragedia: l'acqua territoriale.

L'Idraulica Fluviale, l'Idrologìa, l'Archeoidrologìa, l'Idrogeologìa, la Climatologìa non possono ignorare le situazioni di pericolo, di squilibrio, di crisi; coloro che, in esse, sono 'i Sapienti', se sanno, hanno il dovere (morale, professionale, ético, . . .) di parlare, 'forte e chiaro'; se non sanno, debbono continuare la ricerca del sapere, incessantemente, per il bene dell'Umanità, per il bene della Vita su questa Terra e, in ùltima anàlisi, anche per . . . questa Storia . . .

* * *

È ora dei ringraziamenti

Non so se sìano apparse evidenti le mie aggiunte al testo di Rose ed Ince; non so neppur dire se sìano di adeguata, cioè dignitosa, qualità, anche se non ho mai abbandonato il 'noi', non certo quale *plurale majestatis*.

Ora, ovviamente, tocca solo a me ringraziare chi mi è stato di aiuto in questo lavoro, dandomi, spesso involontariamente, occasioni, stìmoli, motivazioni, ìdee, . . . coraggio.

Li elenco e Li ringrazio, ricordandoLi ora qui, come, per sempre, nel mio cuore.

Severino Rossetti, Presidente del Consorzio Irrigazioni Cremonesi, che mi volle come Direttore, nel 2000, e che ha lasciato questa Terra, per sempre, il 4 febbraio del 2005. Fu così lui che mi assicurò la possibilità di fare tutto ciò che ho fatto in questi anni al Consorzio Irrigazioni Cremonesi; accolse senza indugio la mia candidatura, riponendo in me tanta fiducia; credo di non averlo deluso. Grazie, Severino.

Enrico Giacomo Larcan, professore ordinario di Idraulica al Politecnico di Milano: nel 2003 mi procurò una copia della '*History of Hydraulics*', sapendo del mio desiderio di conoscere questo argomento. Da lui venne, quindi, l'iniziale delusione nel pensare: "*Peccato: è già stata scritta*.", ma, contemporaneamente, egli mi dimostrò una inaspettata stima, della quale vado molto fiero, che mi aiutò a credere che forse potevo farcela.

Pier Luigi Paolillo, professore ordinario di Urbanistica al Politecnico di Milano: insieme al prof. Larcan, promotore e con-direttore del corso di Master di 2° livello in '*Ingegnerìa del Suolo e delle Acque*', tenùtosi, in quattro edizioni, nella sede di Cremona del Politecnico, nel quale ebbi l'onore di tenere un corso in '*Organizzazione e pianificazione delle risorse fisiche*'. Insegnare in un corso post-laurea? Credevo fosse per me impossibile, ma Pier Luigi fu di parere opposto, ritenendomi all'altezza: mi impegnai, al meglio delle mie capacità; credo di non averlo deluso, né d'aver sfigurato. Lui ebbe ragione su di me ed io più fiducia nei miei mezzi; cosa importante nel pensare di realizzare l'ìdea di questo lavoro.
Voglio qui rendere omaggio all'amico Pier Luigi, sottolineando che questo *Master* rappresentò non solo un'ìdea geniale, con tutti gli attributi che a questa categorìa si possono associare, ma un'occasione nuova ed ùnica per produrre specialisti nel settore più importante per progettare lo Sviluppo Sostenibile: la gestione del territorio e delle sue risorse fisiche; oggi in mano a tanti, molti dei quali assolutamente impreparati, anche per mancanza . . . di specifici *Master*! Cremona, lasciò morire l'iniziativa, perdendo un'occasione ùnica, originale, utilissima, quindi non meno di tre volte preziosa!

Livio A.R. Mazzolini, responsabile del Centro Cartografico del Settore 'Ambiente' della Provincia di Cremona e Consulente Informàtico del Consorzio Irrigazioni Cremonesi. Quanto oggi diffuso, nel mondo, dal nostro sito www.consorzioirrigazioni.it , quindi non solo questa Storia, lo devo a lui, alle sue professionalità, pazienza, passione, amicizia. Già; è un Informàtico che si è fatto contagiare dalla passione per le 'cose d'acqua', sapendo calare in esse le stupefacenti prestazioni del mondo 'dei computer'. Tradizioni secolari e modernità corrente hanno così trovato uno spazio comune, credo ùtile ad entrambi.

Claudio Gandolfi, professore ordinario di Idraulica e Direttore del Laboratorio di Idraulica Agraria dell'Università Statale di Milano; ho avuto la fortuna di conoscerlo; l'onore di lavorare al suo fianco; il privilegio di essere per lui un riferimento oltre che un amìco; ne ho apprezzato la professionalità mai disgiunta dall'umiltà di chi vuole, prima di tutto, capìre bene e poi agìre. Oggi è senz'altro il più esperto conoscitore, a livello universitario, del sistema irriguo lombardo, tutt'ora tra i migliori al mondo; provo un sano orgoglio nel pensare d'avergli dato qualche ùtile contributo.

CONSORZIO IRRIGAZIONI CREMONESI
(ente morale)
www.consorzioirrigazioni.it

Il Consorzio Irrigazioni Cremonesi, che ho l'onore di dirigere, dove ho trovato l'ambiente, gli amministratori ed i colleghi ideali per vivere, nel quotidiano impegno del lavoro, con quella serenità indispensabile per trovare, nel tempo libero, le residue energìe per portare a términe questa impresa.

L'ùltimo pensiero è per la mia Nunzia
che mi ha seguìto in questo lavoro
leggendo le bozze e dandomi ùtili consigli,
ma soprattutto sopportando i miei silenzi,
aspettandomi, con affettuosa pazienza,
tante sere, a volte sino a tarda ora,
quando rientravo nel mondo dei miei affetti
e lasciavo questa Storia con qualche pagina in più,
se non, a volte, soltanto poche nuove righe.

* * *

B I B L I O G R A F Í A

- **Barattieri Giovanni Battista** – "*Architettura d'acque*", Stampa Ducale di Lealdo Leandro Bazachi, Piacenza, 1699;
- **Bigatti Giorgio** – "*La provincia delle acque*", Franco Angeli – Storia – Milano, 1995;
- **Bordoni Antonio** - "*Lezioni di Càlcolo Sublìme*", tip. P.E. Giusti Fonditore-Tipografo, Milano, 1831;
- **Boyer Carl B**. – "*Storia delle Matemàtica*", Arnoldo Mondadori editore – Milano, 1980;
- **Brunacci Vincenzo** – "*Compendio del Càlcolo Sublìme*", Stamperìa Reale – Milano, 1811;
- **Brunacci Vincenzo** – "*Memoria sulla Dispensa delle Acque e diverse altre operette*", tip. Giovanni Silvestri, Milano, 1827;
- **Cambridge University Press** – "*Storia del Mondo Moderno*", ed. italiana Garzanti Editore S.p.A., Milano, 1988;
- **Castelfranchi Gaetano** – "*Prodigi della tecnica nel mondo d'oggi*", terza edizione – Ulrico Hoepli, Milano, 1960;
- **Castelli-Avolio Giuseppe** – "*Commento alle leggi sulle acque e sugli impianti elettrici*", Casa Editrice Dott. Eugenio Jovene, Napoli, 1936;
- **Chilò Luigi** – "*Agricoltura e irrigazione nel Milanese – La conoscenza del passato segnavia del presente*", Provincia di Milano, stabilimento Grafico Scotti S.p.A., Milano, ottobre 1992;
- **Da Vinci Leonardo** – "*Della Natura, Peso e Moto delle Acque*", Codice *Leicester*, ed Electa, Milano, 1995;
- **De' Regi Francesco Maria** - "*Uso della tavola parabolica per le bocche d'irrigazione*", Tipografìa Giuseppe Borsani e Comp., Corso di Porta orientale num. 637, Milano - 1804, Edizione '*corretta ed accresciuta sulle memorie lasciate dall'Autore con nuove aggiunte*';
- **Du-Satoy Marcus** - "*L'enìgma dei numeri primi*", ed. RCS Libri S.p.A., Milano - 2004;
- **Euclìde** – "*Degli Elementi di Euclide, esattamente riveduti e corretti ed in questa quarta edizione accresciuti del trattatello sopra le figure isoperimétriche del rinomatissimo padre Pietro Cossali*", eredi Moroni, tip. Torchj Moroniani, Verona, 1805;
- **Guglielmini Domenico** – "*Della natura de' fiumi*", Bologna, 1697;
- **Istituto della Enciclopedìa Italiana fondato da 'Giovanni Treccani'** – "*Lessico Universale Italiano*", ed. Istituto Poligràfico e Zecca dello Stato, Roma , 1968;
- **Istituto della Enciclopedìa Italiana fondato da 'Giovanni Treccani'** – "*Storia della Scienza*", ed. Istituto Poligràfico e Zecca dello Stato, Roma , 2004;
- **Istituto Geogràfico De Agostini** – "*Grande Enciclopedìa*", ed. Istituto Geogràfico De Agostini, Novara, 1986;
- **Kline Morris** – "*Storia del pensiero matemàtico*", Giulio Einaudi editore, Torino, 1996;
- **Kutter Wolfgang R.** – "*Le nuove formole sul moto dell'acqua e negli àlvei sistemati dei fiumi*.", traduzione dal tedesco, con permessa dall'Autore, di Benedetto Dal Bosco, Tipografìa e Premiata Litografìa degli Ingegneri, via Lupetta Num. 7 e 9, Milano, 1873;
- **Landriani Ernesto** – "*Pincipii di calcolo infinitesimale*", Voghera Carlo Tipografo, Roma, 1878;
- **Laureano Pietro** – "*Atlante d'acqua*", Bollati Boringhieri, Torino, 2001;
- **Loffi Bruno** – "*Antiche misure cremonesi dell'acqua irrigua*", Bollettino Storico Cremonese, Cremona, 1969 (Scaricàbile in www.consorzioirrigazioni.it rubrìca DOCUMENTI);
- **Loffi Bruno** – "*Appunti per una storia delle acque cremonesi*", Camera di Commercio, Industria, Artigianato ed Agricoltura, Cremona, 1990;

- **Loffi Bruno** – "*Consorzio Irrigazioni Cremonesi – Cento anni*", Camera di Commercio, Industria, Artigianato ed Agricoltura, Cremona, 1986;
- **Lombardini Elìa** – "*Dell'origine e del progresso della scienza idraulica nel milanese ed in altre parti d'Italia – Osservazioni storico-critiche concernenti principalmente i lavori di Leonardo da Vinci, di Benedetto Castelli e di Gian Doménico Guglielmini*", Letture presso l'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere il 24 maggio, 26 luglio e 9 agosto 1860; Premiata Lit. E Tip. degli ingegneri – Editore B. Saldini, Milano 1872;
- **Lombardini Elìa** – "*Guida allo studio dell'Idrologìa fluviale e dell'Idraulica pratica*", ristampa a cura dell'Associazione Idrotecnica Italiana, Stab. Tipogr di Miglietta, Milano e C. – Casale Monferrato, ristampa 1870;
- **Lombardini Elìa** – "*Sui progetti intesi ad estendere l'irrigazione della pianura nella valle del Po*", estratto dagli Atti del Regio Istituto Lombardo, vol. III, Tip. Bernardoni, Milano, 1862;
- **Lotteri Angelo** – "*Lezioni di introduzione ad Càlcolo Sublìme*", tip. Di P. Bizzoni successore di Bolzani, Pavia, 1822;
- **Luttwak Edward N**. – "*La grande strategìa dell'impero romano*", Rizzoli editore, Milano, 1981;
- **Kramer Samuel Noah** – "*I Suméri*", Newton & Compton editori, Roma, 1997;
- **Mari Gioseffo** – "*Le teorie idrauliche, concordate colle sperienze*" , Regio-ducale stamperìa di Salvatore Costa e compagno, Guastalla – Mantova , 1784;
- **Miquel André** – "*L'Islam - Storia di una civiltà*", Società Editrice Internazionale, Torino, 1973;
- **Noja Sergio** – "*Maometto Profeta dell'Islam*", Storia dei popoli dell'Islam – Volume I, ed. Oscar Mondadori – Arnoldo Mondadori Editore - Milano 2002;
- **Noja Sergio** – "*L'Islam dell'espansione*", Storia dei popoli dell'Islam – Volume II, ed. Oscar Mondadori – Arnoldo Mondadori Editore - Milano 2002;
- **Marsigli Jacopo** editore – "*Raccolta d'autori italiani che trattano del moto dell'acque*", quattro tomi – Bologna 1823;
- **Parrochetti Angelo** – "*Manuale pratico di Idrometrìa*", Galli e Omodei Editori Libraj, Galeria V. Emanuele, N. 17, Milano, 1876;
- **Parrot André** - "*I Suméri*", Librairie Gallimard, Parigi 1960, prima edizione italiana Giangiacomo Feltrinelli, Milano, 1960;
- **Pulci Doria Guelfo** – "*Il corso di Idraulica a partire dallo sviluppo storico-sociale della disciplina*", CUEN 1980, 5ª edizione 1996 – Napoli;
- **Pulci Doria Guelfo** – "*Metodologie moderne di misure idrauliche e idrodinamiche*", CUEN (Cooperativa Universitaria, Editrice Napoletana), Napoli, 1992;
- **Radice Lucio Lombardo** – "*La matematica da Pitagora a Newton*", Franco Muzzio Editore, Roma, 2003;
- **Steward Desmond** – "*L'antico Islam*", ed. Arnoldo Mondadori Editore - Milano 1968;
- **Todhunter I., M. A.** – "*Trattato sul Calcolo Differenziale, con molti esempii*", Libreria Scientifica e Industriale di B. Pellerano, Napoli, 1870;
- **Tölle-Kastenbein Renate** – "*Archeologìa dell'acqua*", Longanesi & C., Milano 1993;
- **Weeber Karl-Wilhelm** – "*Vita quotidiana nell'antica Roma*", Newton&Compton srl, edizione speciale per "Il Giornale", Roma 2003;
- **Torricelli Giacomo** – "*Idraulica pratica*", - Arte Ingegnere – Ed. Vallardi, Bologna 1910;
- **Zeni Edgardo** – "*Idraulica*", Manuali Hoepli - Ulrico Hoepli Editore-Libraio della Real Casa, Milano, 1911.

* * *

Índice dei nomi.

- Abd al-Rahmān al-Hāzinī (séc. XI): Cap. V – pag. 47
- Abu Bakr (séc. VII): Cap. 5 – pag. 42
- Adalberto Pallavicino (? - † 1570): Cap. XV – pag. 183
- Adhémar-Jean-Claude de Barré de Saint Venant (Villier en Brie1797 – Saint Ouen 1886): Cap. XVIII – pag. 231, 232
- Adud al-Dawla (séc. X): Cap. V – pag. 48
- Ahmad Banū Mūsā (séc. IX): Cap. V – pag. 49, pag. 50; Cap. XII – pag. 133
- Albert Brahms (séc. XVIII): Cap. XVI – pag. 197
- Albert di Sassonia (Rickmersdorf ca 1316- Halbertstadt 1390): Cap. VI – pag. 60, 61
- Albert Johan Betz (1885 - ?): Cap. XXI, pag. 285
- Alberto Pitentino (séc. XIII Bergamo ? - ?): Cap. XV – pag. 179, 180
- Al-Bīrūnī (séc. VIII): Cap. 5 – pag. 44
- Alexandre Gustave Eiffel (Digione 1832 - Parigi 1923): Pag. XXI, pag. 288
- Alexander Koch (Steinach 1853 - Berlino 1923): Cap. XX – pag. 275
- Alexis Claude Clairaut (Parigi 1713 – 1765): Cap. XIII – pag. 153, 160
- Al-Hasan Banū Mūsā (séc. IX): Cap. V – pag. 49, pag. 50; Cap. XII – pag. 133
- Al-Karaǵī (séc. X d. C.): Cap. III – pag. 24
- Al-Ma'mūn (séc. IX): Cap. V – pag. 40, pag. 44, pag. 49
- Al-Manşūr (séc. VIII – pag. 43, pag. 45
- Al-Masudi (séc. X): Cap. III – pag. 25
- Al-Muqaddasī (séc. XI): Cap. V – pag. 48
- Al-Mutawakkil (séc. IX): Cap. III – pag. 25
- Antoine de Chézy (Châlon-sur-Marne 1718 – Parigi 1798): Cap. XVI – pag. 197-199
- Antoine de Parcieux (Clotet-de-Cessous 1703 – Parigi 1768): Cap. X – pag. 105
- Antoine Parent (Parigi 1666 – 1716): cap. X – pag. 102-105
- Antonio Lecchi (Milano 1702 – 1776): Cap. XIII – pag. 167; Cap. XV – pag. 179, 187
- Antonio Tadini (Romano di Lombardia, Bergamo, 1754-1830): Cap. XVII – pag. 214
- Apollonio di Pérge, o di Pérgamo (ca 262 – ca 180 a.C.): Cap. XII – pag. 132
- Archiméde (Siracusa 287–212 a.C.): Cap. II – pag. 13; cap. XII – pag. 131, 132
- Aristòtele (Sagìra 384 – Càlcide 322 a.C.): Cap. II – pag. 11; Cap. VI – pag. 56-59
- Arnold Hartley Gibson (1878): Cap. XX – pag. 276
- Arsene Jules Emile Juvenal Dupuit (Fossano, Cuneo 1804-Parigi 1860): Cap. XVIII - pag. 232
- Augustin Louis de Cauchy (Parigi 1789 - Sceaux 1857): Cap. XIX – pag. 253
- Benedetto Castelli (Brescia 1587 – Roma 1643): Cap. II – pag. 18; Cap. IX – pag. 84
- Benjamin Robins (Bath 1707 – Madras 1751): Cap. XVI – pag. 195, 196;
- Benjamin Feland Groat (1867-1949): Cap. XX – pag. 278
- Benoit Fourneyron (Saint Ĕtienne 1802 - Parigi 1867): Cap. X – pag. 108, 109; Cap. XVII pag. 219
- Bernard Forest de Bélidor (Parigi 1697 – 1761): Cap. X – pag. 103
- Bernardino Baldi (Urbino 1553 – 1617): Cap. VII – pag. 70
- Bernardino Zendrini (Saviore-Brescia 1679 – Venezia 1747): Cap. XV – pag. 179
- Blaise Pascal (Clermont Ferrand 1632 – Parigi 1662): Cap. XI – pag. 113-115
- Bonaventura Cavalieri (Milano 1598 – Bologna 1647): Cap. XII – pag. 135

- Boris Alexandrovich Bakhmeteff (1880-1951): Cap. XXI, pag. 290
- Brahmagupta (séc. VII): Cap. V – pag. 44
- Carlo Magno (? 742 – Aquisgrana 814): Cap. VI – pag. 55-57
- Carl Wieselberger (1887-1941): Cap. XXI, pag. 286
- Charles Augustin de Coulomb (Angoulême 1736-Parigi 1806): Cap. XVII – pag. 212, 213
- Charles Bossut (Tartaras – Saint Ětienne 1730 - Parigi 1814): Cap. X – pag. 104; Cap. XVI – pag. 203, 204
- Charles Camichel (1877 - ?): Cap. XX – pag. 276;
- Charles Metcalf Allen (1871-1950): Cap. XX – pag. 276
- Christiaan Huygens (L'Aia 1629 – 1695): Cap. IX – pag.92; Cap. XI – pag. 115, 116
- Christophe Bernoulli (Basilea 1782 – 1863): Cap. XII – pag. 144
- Christopher Polhem (Visby 1661 – Stoccolma 1751): cap. X – pag. 104
- Chrisopher Wren (East Knoyle 1632 – Hampton Court 1723): Cap. XI – pag. 118
- Claude Antoine Couplet (Parigi 1642 –1722): Cap. XVI – pag. 191-193
- Claude Burdin (Lepin, Savoia 1790- Clermont 1873): Cap. X – pag. 108; Cap. XVII – pag. 219
- Claudio Toloméo (Alessandria, intorno al II sécolo d.C.): Cap. VI – pag. 57
- Clemens Herschel (1842-1930): Cap. XVI – pag. 209; Cap. XVIII – pag. 247
- Cornelius Velsen (séc. XVIII): Cap. XVI – pag. 196
- Cosroe I Anosharwan (séc. VI): Cap. V – pag. 44
- Ctesias (Grecia – V sécolo): Cap. II - pag. 9
- Ctesibio (Alessandria – III séc. A. C. ?): Cap. II – pag. 16
- Daniel I Bernoulli (Groningen 1700 – Basiléa 1782: Cap. IX – pag. 95; Cap. X – pag. 103, 107; cap. XII – pag. 144; Cap. XIII – pag. 151-159
- David Ray Yarnell (1833-1937): Cap. XX – pag. 277;
- Demòcrito (Abdera ca 465 – ca 370 a.C.): Cap. II – pag. 10; Cap. VI – pag. 59
- Dietrich Thoma (1881-1943): Cap. XX – pag. 275;
- Dimitri Pavlovitch Riabouchinsky (1882, ?): Cap. XXI, pag. 287
- Dinòstrato (Grecia - IV Sécolo a.C.): Cap. XII – pag. 130
- Doménico Gugliemini (Bologna 1655 – Padova 1710): Cap. IX – pag. 92, 93; Cap. XV – pag. 186
- Duilio Citrini (Milano . . .): Cap. XX – pag. 277;
- Edgar Buckingham (1867 - 1940): Cap. XXI, pag. 289
- Edme Mariotte (Digione 1620 – Parigi 1684): Cap. IX – pag. 88-91; Cap. X – pag. 97, 101, 107
- Edmund Halley (Londra 1656 – Greenwich 1742): Cap. IX – pag. 93; Cap. XI – pag. 118
- Edward Seales Lundley (1882): Cap. XX – pag. 278;
- Elìa Lombardini (La Brogne - Alsazia 1794 – Milano 1878): Cap. XV – pag. 187
- Emile Oscar Ganguillet (1818-1894): Cap. XVIII – pag. 241
- Emmanuel Joseph Boudin (1820-1893): Cap. XVIII – pag. 233
- Erasmo da Rotterdam (Rotterdam ca 1466 – Basiléa 1536): Cap. XI – pag. 126
- Ernest William Schoder (1879 - ?): Cap. XX – pag. 277;
- Ernst Heinrich Webwr (Wittemberg 1795 – Lipsia 1878): Cap. XVIII – pag. 218
- Eròne di Alessandria (Alessandria – I séc. D. C. ?): Cap. II – pag. 16; Cap. IX – pag. 84
- Ettore Scimeni (1895-1952): Cap. XX – pag. 276
- Euclìde (Alessandria IV/III sécolo a. C.): Cap. II – pag. 13; Cap. XII – pag. 128, 132, 133
- Eudémo di Rodi (Grecia – séc. IV a.C.): Cap. XII – pag. 128
- Eudosso di Cnido (408? – 355 ? a.C.): Cap. XII – pag. 128

- Eupalìno di Megàra (Grecia – VI sécolo): Cap. II - pag. 9
- Evangelista Torricelli (Roma 1608 – Firenze 1647): Cap. IX – pag. 85-88; cap. XI – pag. 110, 113, 114
- Federico Cesi (Roma 1586 – Acquasparta 1630): Cap. VIII – pag. 77
- Ferdinand Reech (1805 -1880): Cap. XVII – pag. 224; Cap. XIX – pag. 251
- Floyd August Nagler (1892-1933): Cap. XX –pag. 277;
- Francesco Maria de' Regi (Milano 1720 – 1794): Cap. XIII – pag. 179, 184, 185
- Francis Bacon (Londra 1561 – 1626): Cap. VII – pag. 71; Cap. VIII – pag. 78, 81
- Francis Pettit Smith (1808-1874): Cap. XVII – pag. 225
- Francisco Soto, detto Domingo, (Segovia 1494 - Salamanca 1560): Cap. VII – pag. 69
- François Viète (Fontenay-le-Comte 1540 – Parigi 1603): François Viète (Fontenay-le-Comte 1540 – Parigi 1603): Cap. XII – pag. 136
- Franz Josef Gerstner (Komotau, Boemia 1756-1832): Cap. XIII – pag. 166
- Franz Práŝil (Zurigo1857 - 1929): Cap. XXI, pag. 286, 287
- Fred Charles Scoley (1880): Cap. XX – pag. 277;
- Frederick William Lanchester (1868-1946): Cap. XVIII – pag. 244
- Ǧābir ibn Aflah (séc. IX): Cap. VI – pag. 57
- Ǧābir ibn Hayyān (séc. VIII – IX): Cap. V – pag. 47
- Gabrielle-Émilie Le Tonnellier de Breteuil, marchesa de Châtelet (Parigi 1706 – Lunéville 1749): Cap. XI – pag. 124
- Galileo Galilei (Pisa 1564 – Arcetri 1642): Cap. VI – pag. 62; Cap. VII – pag. 69, 72-76; Cap. VIII – pag. 77; Cap. IX – pag. 84, Cap. XII – pag. 135; Cap XX – pag. 271;
- Garbis Hovannes Keulegan (1890 - ?): Cap. XXI, pag. 290
- Gaspard Françoise Claire Marie Riche de Prony (Chamelet, Lione 1755- Asniè 1839): Cap. XVII – pag. 214, 215
- Gaspar Gustave de Coriolis (Parigi 1792 - 1843): Cap. XVII .- pag. 220-222
- Geoffrey Ingram Taylor (Londra 1886 – Cambridge 1975): Cap. XXI, pag. 288
- George Biddle Airy (Alnwick, Northumberland 1801- Greenwich 1892): Cap. XIX – pag. 257, 258
- George Gabriel Stokes (Skreen 1819 - Cambridge 1903): Cap. XIX – pag. 255, 256
- Gerardo (o Gherardo) da Cremona (Cremona 1114 – Toledo 1187): Cap. V – pag. 50 – 52; Cap. XII – pag. 133
- Giambattista Benedetti (Venezia 1530 – Torino 1590): Cap. VII – pag. 69
- Gilles P. Roberval (Île-de-France 1602 – Parigi 1675): Cap. XI – pag. 113
- Giorgio Bidone (Casalnocéto 1781-Torino1839): Cap. IX – pag.94; Cap. XVII – pag. 216, 217
- Giovan Battista Ramusio (1485 – 1557): Cap. V – pag. 40
- Giovanni Battista Venturi (Bibiano 1746 - Reggio Emilia 1822): Cap. XVI – pag. 208
- Giovanni Domenico Cassini (Perinaldo, Imperia 1625 – Parigi 1712): Cap. VIII – pag. 79
- Giovanni Duns Scoto (Canterbury 1265–1308): Cap. VI – pag. 59
- Giovanni Kepléro (Weil, Wüttemberg 1571 – Ratisbona 1630): Cap. VII – pag. 71, 72, 73; Cap. XII – pag. 135
- Giovanni Filòpono (Alesssandria séc. VI): Cap. VI – pag. 57
- Giovanni Poleni (Venezia 1683 – Padova 1761): Cap. XV – pag. 186; Cap. XVI – pag. 189-191, 208, 209
- Girolamo Cardàno (Pavia 1501 – Roma 1576): Cap. VII – pag. 69
- Giuseppe Mari (Cannéto sull'Oglio 1730 - ?): Cap. XV – pag. 179
- Giuseppe Venturòli (Bologna 1768 – Roma 1846): Cap. XVII – pag. 216, 217

- Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (Königsberg 1797 - 1884): Cap. XVII – pag. 226-228
- Gottried Wilhelm Von Leibniz (Lipsia 1646 – Hannover 1716): Cap. VIII – pag. 82; Cap. X – pag. 106; Cap. XI – pag. 122-124; cap. XII – pag. 140-143; Cap. XIII – pag. 156
- Grove Karl Gilbert (1843-1918): Cap. XX – pag. 277;
- Gugliemo Heytesbury (séc. XIV): Cap. VI – pag. 61
- Guglielmo di Ockham (Ockham 1295 - Monaco di Baviera ca 1350): Cap. VI – pag. 59
- Guido Grandi (Cremona 1671 – Pisa 1742): Cap. XV – pag. 179
- Guillaume-Francǫise-Antoine de l'Hopital: Cap. XII – pag. 146
- Gustav Robert Kirchoff (Könisberg 1824 - Berlino1887): Cap. XIX – pag. 259
- Henri Emile Bazin (Nancy 1829 - Chênove 1917): cap. XVIII – pag. 239-241
- Henri Pitot (Aramon, Gard 1695 – Tolosa 1771): Cap. X – pag. 103; Cap. XVI – pag. 193, 194
- Henry Philibert Gaspard Darcy (Digione 1803 - 1858): Cap. XVIII – pag. 233-239
- Hermann Foettinger (1877-1945): Cap. XX – pag. 274
- Hermann Ludwig Ferdinand von Helmotz (Potsdam 1821- Charlottenburg 1894): Cap. XIX – pag. 258
- Herman Schlichting (1907 - ?): Cap. XXI, pag. 285
- Horatio Frederick Phillips (1845-1912): Cap. XVIII – pag. 244
- Hubert Engels (1854-1945): Cap. XIX – pag.; Cap. XX pag 272;
- Il Calcolatore (séc. XV): Cap. VI – pag. 61
- Ippia di Élìde (Grecia – séc. V a.C.): Cap. XII – pag. 129
- Ippòcrate di Chìo (Grecia – séc. V a.C.): Cap. XII – pag. 127,128
- Isaac Newton (Woolsthorpe 1642 – Kensigton Londra 1728): Cap. XI – pag. 117-122; Cap. XII – pag. 139-143
- Ismā'īl ibn al-Razzā al-Ǧazarī (séc. XIII): Cap. V – pag. 50
- Jacopo Soldati (séc. XVI – Milano): Cap. XV – pag. 183, 184
- Jacques I Bernoulli (Basilea 1654 – 1705): Cap. XII – pag. 127; Cap. XII – pag. 144
- Jacques II Bernoulli (Basilea 1759 – 1789): Cap. XII – pag. 144
- Jalov Ackeret (1898 - ?): Cap. XXI, pag. 285
- Jaques Antoine Charles Bresse (Isére, Vienna 1822-Parigi 1883): Cap. XVII – pag. 232; Cap. XIX – pag. 251
- James Bicheno Francis (Southleigh, Inghilterra 1815 - Lowell, Massachussetts1892): Cap. XVIII – pag. 231
- James Rumsey (1743-1792): Cap. XVII – pag. 224
- Jean II Bernoulli (Basilea 1710 – 1790): Cap. XII – pag. 144
- Jean Baptise Belanger (Valenciennese 1789 - 1874): Cap. XVII – pag. 220, 221
- Jean Baptise Colbert (Reims 1619 – Parigi 1683): Cap. VIII – pag. 79, 80
- Jean-Baptise Le Rond d'Alembert, (Parigi 1717 – 1783): Cap. XIII – pag. 153, 159
- Jean I Bernoulli (Basilea 1667 – 1748): Cap. VIII – pag. 82, 86; Cap. XII – pag. 144
- Jean Buridan (Bethune ca 1300 – ca 1358): Cap. Vi – pag. 60
- Jean-Charles de Borda (Dax, Landes 1733 – Parigi 1799): Cap. X – pag. 106,107; Cap. XVI – pag. 201, 202
- Jean François d'Aubuisson de Voisins (1769-1841): Cap. XVII – pag. 229
- Jean Léonard Marie Poiseuille (Parigi 1799-1869): Cap. XVII – pag. 228
- Jean Louis Lagrange (Torino 1736 – Parigi 1813): Cap. VIII – pag. 82; Cap. XIII – pag. 164, 165
- Jean Rodolphe Perronet (séc. XVIII – XIX): Cap. VIII – pag. 80
- Johann Albrecht Euler (S. Pietroburgo 1734 – Basilea 1800): Cap. X – pag. 106

- Johannes Martinus Burges (1895 - ?): Cap. XXI, pag. 289
- Johan Nikuradse (1894 - ?): Cap. XXI, pag. 285
- John Ericsson (1803-1889): Cap. XVII – pag. 225
- John Fitch (1743-1798): Cap. XVII – pag. 224
- John R. Freeman: (? – 1932): Cap XX – pag. 278
- John Ripley Freeman (1855-1933): Cap. XVIII – pag. 249
- John Scott-Russel (1808-1882): Cap. XVII – pag. 222-224
- John Smeaton (Austhorpe, Leeds 1724 – 1792): cap. X – pag. 105; Cap. XVI – pag. 200
- John Wallis (Ashford 1616 – Oxford 1703): Cap. XI – pag. 117
- John William Strutt, barone di Rayleigh (Langford Grove 1842- Witham 1919): Cap. XIX – pag. 266
- Joseph Michel de Montgolfier (Vidalon-les-Annonay 1740 – Balaruc-les-Bains 1810): Cap. XVI – pag. 197
- Julius Weisbach (1806-1871): Cap. XVII – pag. 229
- Junius Massau (Goselies 1852-1909): Cap. XIX – pag. 269
- Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (Nolay 1753 – Magdeburgo 1823): Cap. X – pag. 107
- Leonhard Euler (Basiléa 1707 – S. Pietroburgo1783): Cap. VIII – pag. 82, 86; Cap. XII – pag. 146; Cap. XIII – pag. 152
- Leonardo da Vinci (Vinci 1452 – Amboise 1519): Cap. VII – pag. 64-68; Cap. IX – pag. 84
- Lester Allen Pelton (1829-1908): Cap. XVIII – pag. 247
- Levison Francis Vernon-Harcourt (1839-1907): Cap. XVIII – pag. 244
- Lewis Ferry Moody (1880-1953): Cap. XX – pag. 278
- Lorenzo Allevi (1856-1941): Cap. XX – pag. 279
- Louis Bergeron (1878-1948): Cap. XX – pag. 279
- Louis Jérome Fargue (1827-1910): Cap. XVIII – pag. 244
- Louis Marie Henri Navier (Digione 1785- Parigi 1836): Cap. XIX – pag. 251
- Luca Valerio (Corfù 1553 – Roma 1618): Cap. XII – pag. 134
- Ludwig Prandtl (Frisinga 1875 - Göttingen 1953): Cap. XXI – pag. 282 - 284
- Mansfield Merriman (1848-1925): Cap. XX – pag. 276
- Marco Porcio Catone (Tuscolo 234 – 149 a.C.): Cap. IV – pag. 27
- Marco Vitruvio Pollione (séc. I a. C. – I d. C. ?): cap. IV – pag. 31
- Mark Beaufoy (1764-1827): Cap. XVI – pag. 204
- Marin Mersénne (Oizé 1588 – Parigi 1648): Cap. VIII – pag. 78,79; Cap. XI – pag. 111-113
- Melville Woodward (1871-1953): Cap. XX – pag. 277
- Muhammad (séc. VI d. C.): Cap. V – pag. 42
- Muhammad Banū Mūsā (séc. IX): Cap. V – pag. 49, pag. 50; Cap. XII – pag. 133
- Muhammad ibn Hasan al-Šaybāni (749 – 803): Cap. V – pag. 46
- Muhammad ibn Mūsā al-Hwārizmī (séc. IX): Cap. V – pag. 46
- Nehemiah Grew (Coventry 1641 – Londra 1712): Cap. VIII – pag. 81
- Nicolai E. Jouwkowsky (1847-1921): Cap. XIX – pag. 268, 269
- Nicolas Bernoulli (Anversa 1623 – Basiléa 1708): Cap. XII – pag. 143
- Nicolas Bernoulli (Basilea1662 – 1716): Cap. XII – pag. 144
- Nicolas I (Basilea 1687 – 1759): Cap. XII – pag. 144
- Nicolas II Bernoulli (Basilea 1695 – 1726): Cap. XII – pag. 144
- Nicole Orésme (Caen ca 1320 – Lisieux 1382): Cap. Vi – pag. 60
- Niccolò Copérnico (Thorn 1473 – Frauenburg 1543): Cap. VII – pag. 68, 69
- Nonio Dato (séc. II d. C.): Cap. IV – pag. 31
- Norman Rothwell Gibson (1880 - ?): Cap. XX – pag. 278

- Omar (séc. VII): Cap. V – pag. 49
- Omar Shjder (1904): Cap. XX – pag. 279
- Osborne Reynolds (1842-1912): Cap. XVIII – pag. 244; Cap. XIX – pag. 263-266
- Oskar Karl Gustav Titjens (1893 - ?): Cap. XXI, pag. 285
- Otto Flachsbart (1898 - ?): Cap. XXI, pag. 286
- Otto Lilienthal (1848-1896): Cap. XVIII – pag. 243
- Otto von Guerick (Magdeburgo 1602 – Amburgo 1686): Cap. IX – pag. 88, 89
- Paolo Frisi (Melegnano 1728 – Milano 1784): Cap. XV – pag. 179, 181, 182
- Pappo di Alessandria (Egitto – séc. IV d.C.): Cap. XII – pag. 132, 133
- Percy Williams Bridgman (1882 - ?): Cap. XXI, pag. 289
- Philip Forcheneimer (Vienna 1852-1933): Cap. XX – pag. 275
- Philipp Theophrast von Hohenheim – Paracelso (Einsiedel 1493 – Salisburgo 1541): Cap. XI – pag. 126
- Philone (o Philo) di Bisanzio (III séc. A. C. ?): Cap. II – pag. 16; Cap. III – pag. 21
- Pierre Couplet des Tortreaux (Parigi ? – 1743): Cap. XVI – pag. 191
- Pierre de-Fermat (Beaumont de-Lomagne 1601 – Castres 1665): Cap. XII – pag. 136-139
- Pierre Louis de Maupertuis (1698 – 1759): Cap. VIII – pag. 82
- Pierre-Louis-Georges Du Buat (Tortisambert 1734 – Vieux-Condé 1809): Cap. X – pag. 107; Cap. XVI – pag. 204-208
- Pierre Simon Girard (Caen 1765 - 1836): Cap. XVII – pag. 213
- Pierre Simon Laplace (Beaumont-en-Auge1749-Parigi 1827): Cap. XIII – pag. 165
- Pierre Varignon (Caen 1654 – Parigi 1722): Cap. XI – pag. 125; Cap. XVI – pag. 194
- Pierre Vauthier (Boulogne 1784 - Parigi 1847): Cap. XVII – pag. 220, 221
- Pitàgora di Samo (Samo ca 575 – Metaponto ca 497 a.C.): Cap II – pag. 10
- Platone (Atene tra il 428 ed il 347 a.C): Cap. II – pag. 11; Cap. VIII – pag. 77
- Plinio il Vecchio (Como 23 d.C. – Stabia 79 d.C.): Cap. I – pag. 5; Cap. III – pag. 25
- Procopio di Cesaréa (Cesaréa ? – Costantinòpoli 563 d.C.): Cap. X – pag. 100
- Reinhard Woltman (Axtedt1757-Mònaco di Baviera 1837): Cap. XVI – pag. 204, 210
- René Descartes (La Haye - Tours 1596 – Stoccolma 1650): Cap. XI – pag. 111; Cap. XII – pag. 136
- Robert Boyle (Lismore Castle 1627 – Londra 1691): Cap. VIII – pag. 81; Cap. IX – pag. 89; Cap. XI – pag. 116
- Robert Edmund Froude (1846-1924): Cap. XVIII – pag. 245
- Robert Gregg Kennedy (1851-1920): Cap. XX – pag. 278
- Robert Hooke (Freshwater 1635 – Londra 1703): Cap. IX – pag. 91; Cap. XI – pag. 118
- Robert Manning (1816-1897): Cap. XVIII – pag. 242
- Ruggero Bacon (Ilchester Somersetshire 1214 - Oxford 1292?): Cap. VI – pag. 59
- Sesto Giulio Frontino (40 – 103 d. C.): Cap. IV – pag. 32; Cap. XV – pag. 185; Cap. XVIII – pag. 248
- Severo Sebokht (séc. VI): Cap. 5 – pag. 45
- Simeon Denis Poisson (Pithiviers 1781- Parigi 1840): Cap. XIX – pag. 253
- Simon Stevin oSimone di Bruges, (Bruges 1548 – Aia 1620): Cap. VII – pag. 70,71
- Solòne (Atene, ca 630 – 560 a.C.): Cap. III – pag. 23
- Strabone (Amasia, Ponto ca 64 a.C. – 20 d.C.): Cap. IV – pag. 29; Cap. X – pag. 97
- Tābit ibn-Qurra (826 – 901): Cap. XII – pag. 133
- Taléte di Miléto (Miléto 640–546 a.C.): Cap. II - pag. 10
- Theodor Rehbock (Amsterdam 1864 - 1950): Cap XX – pag. 273, 274
- Theodor von Kármán (Budapest 1881 – Aquisgrana 1963): Cap. XXI, pag. 284, 285

- Thomas Edward Stanton (1865 - 1931): Cap. XXI, pag. 288
- Thomas Gresham (Londra 1519 – 1579): Cap. VIII – pag. 80
- Thomas Theodoor Thijsse (1893 - ?): Cap. XX – pag. 276
- Tommaso d'Aquino (Aquino 1225 – Fossanova 1274): Cap. VI – pag. 58, 59
- Tyco Brahe (Knudstruth 1546 – Praga 1601): Cap. VII – pag. 71
- Valentin-Joseph Boussinesq (Saint André de Sangonis 1842-Parigi 1929): Cap. XIX – pag. 260-263
- Victor E. Timonoff (1862-1936): Cap. XX – pag. 276
- Vincenzo Brunacci (Firenze 1768 – Pavia 1818): Cap. XV – pag. 182
- Vincenzo Viviani (Firenze 1622 – 1703): Cap. VIII – pag. 78
- Walter Gustav Johannes Tollmien (1900 - ?): Cap. XXI, pag. 285
- Walter Ludwig Christian Schiller (1882 - ?): Cap. XXI, pag. 285
- Wilhelm Eduard Weber (Wittemberg 1804 – Gottinga 1891): Cap. XVII – pag. 218, 219
- Wilhelm Soannhake (1881 - ?): Cap. XXI, pag. 287
- William Frederick Durand (1859 - 1958): Cap. XXI, pag. 289
- William Froude (1810-1879): Cap. XVIII – pag. 245, 246
- William Thomson (Belfast 1824 - Netherhall 1907): Cap. XIX – pag. 266

Ìndice

- Introduzione ……... pag. I
- Premessa (di *Hunter Rouse*) ……... pag. III
- Indispensàbili considerazioni ……. pag. VI
- Cap.1 - L'Idraulica pratica nell'antichità remòta ……... pag. 1
- Cap.2 - Le conoscenze dei Greci sul comportamento dei fluidi……. pag. 9
- Cap.3 - Le acque sotterranee e gli invasi: pozzi, pompe, *qanāt* e dighe. …... pag. 20
- Cap.4 - Il sistema di approvvigionamento dell'acqua nell'antìca Roma …... pag. 27
- Cap.5 - Continuità e sviluppo nella cultura islàmica ……. pag. 40
- Cap.6 - La Meccànica nel Medio Evo ……..... pag. 53
- Cap.7 - La nàscita del metodo sperimentale …….. pag. 63
- Cap.8 - Le Accadémie e la Comunità Scientifica …….. pag. 77
- Cap.9 - Il Seicento: prime certezze e nuove frontiere …… pag. 84
- Cap.10 - Gli studi sulla forza dell'acqua: le ruote idrauliche …… pag. 97
- Cap.11 - Il contributo della Fisica nel XVII sécolo: pressione, gravità ed Energìa ……... pag. 110
- Cap.12 - Il Càlcolo Sublìme ……... pag. 127
- Cap.13 - L'avvento dell'Idrodinàmica ……... pag. 148
- Cap.14 - Intermezzo ……... pag. 168
- Cap.15 - L'Idraulica italiana del sécolo XVIII, tra scienza, conoscenza ed empirismo ……... pag. 179
- Cap.16 - Misure della velocità e della pérdita di energìa nel moto: le prime prove sperimentali …….. pag. 189
- Cap.17 - I progressi agli inizi del XIX sécolo …… pag. 212
- Cap.18 - I primi passi dell'Aerodinàmica …….. Pag. 231
- Cap.19 - Idrodinàmica classica ed applicata nel XIX sécolo ……. pag. 251
- Cap.20 - L'ormai indispensabile Laboratorio di Idraulica ……. pag. 271
- Cap.21 - L'ascesa della Meccànica dei fluidi …… pag. 282
- Cap.22 - Una valutazione della scienza alla metà del sécolo XX …….. pag. 292
- Cap.23 - Il Rasoio di Ockham …… pag. 297
- Ringraziamenti ……... pag. 304
- Bibliografìa …… pag. 307
- Índice dei nomi ……... pag. 309
- Índice …….. pag. 316