

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"* .

Capitolo 17 – I progressi agli inizi del XIX sécolo

Cremona 23 aprile 2007

Capitolo 17 – I progressi agli inizi del XIX secolo

Lo slancio della ricerca in Idraulica alla fine del XVIII secolo continuò nel successivo Ottocento. La Scuola Francese era ancora 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 remoto passato della storia umana: il proliferare di studi e di studiosi; chi e cosa meritano d'essere ricordati?

Le necessità del racconto, così come è stato concepito, impongono non soltanto la scelta selettiva, nella valutazione dell'importanza dei fatti da ricordare, ma l'estrema sintesi.

Di conseguenza, d'ora in poi l'attenzione sempre più si limiterà a proporre isolati 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, seguite dalle proporzionali, inevitabili ma sempre positive critiche.

L'Idraulica proseguì dunque nella sua sempre più rapida e completa crescita, secondo tre direzioni:

- la produzione di dati sperimentali;
- l'interpretazione dei dati e la formulazione di empiriche formule di applicazione pratica;
- l'elaborazione dei principi 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 principi 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 empiriche sui fenomeni del moto dei fluidi, tratte dai dati esclusivamente sperimentali, che produssero, grazie all'affidabilità dei procedimenti, a nuove ed utili indicazioni nelle pratiche applicazioni.

L'inizio del XIX secolo vide la fase terminale 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 Martinica (tra il 1764 ed il 1766), a Cherbourg (1776) ed a Rochefort (1779); mentre si occupava di queste opere, 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 teoria delle macchine semplici gli valse un premio della *Académie royale des sciences*, 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 Termodinamica, 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 très 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 secolo, al cui inizio attirano 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 opere edilizie') nell'ambito 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 François Claire Marie Riche de Prony (Chamelet, Lione 1755- Asniè 1839); professore di Matematica all'École Polytechnique di Parigi, fu primo direttore del Bureau du Cadastre, 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 sferica della Terra (il cosiddetto 'schiacciamento').

Questo scienziato francese, nel 1821, ideò il freno dinamometrico ad attrito che porta, ancor oggi, il suo nome, e che è utilizzato per misurare la coppia motrice applicata ad un albero in rotazione.

Nel 1835 Gaspard François Claire Marie Riche de Prony ricevette l'onorificenza di *Pari di Francia*.

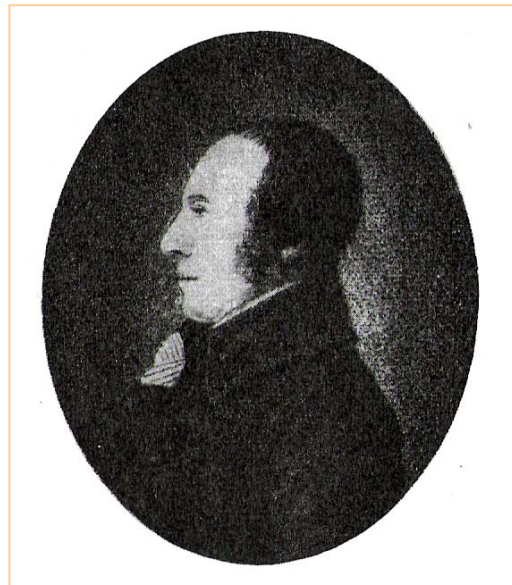


Nel 1801 Eytelwein pubblicò a Berlino la prima edizione del suo "Handbuch der Mechanik fester Körper und der Hydraulick.", reso famoso, in particolare, dalla formula della velocità per i canali a pelo libero:

$$U = \chi \sqrt{R_m i}$$

Nella quale si indica 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 dominano il moto a pelo libero: la pendenza ed il rapporto tra l'Area

Bagnata ed il Perimetro 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'alveo, 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:

$$U = \sqrt{0,25 + 8047R_m i} - 0,50$$

Anche Gaspard François Claire Marie Riche de Prony, nel suo lavoro "*Recherches physico-mathématiques su la théorie des eaux 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 sia 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: $c+aV+bV^2+gV^3+\dots$. Dopo aver analizzato ogni dato disponibile, con i metodi suoi e di Laplace, Prony propose alcune formule del tipo seguente, da utilizzarsi per tubazioni e per canali a cielo libero:

$$\begin{aligned} DS &= a_1 V + b_1 V^2 \\ RS &= a_2 V + b_2 V^2 \end{aligned}$$

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 meritano la citazione a questo punto: Giorgio Bidone (Casalnocéto 1781 - Torino 1839), dal 1815 professore di Idraulica all'Università di Torino, e Giuseppe Venturòli (Bologna 1768 – Roma 1846), professore di Matematica 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'ultimo proposito, lo scienziato italiano fu il primo a definire il profilo del pelo libero dell'acqua che tracima 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*.

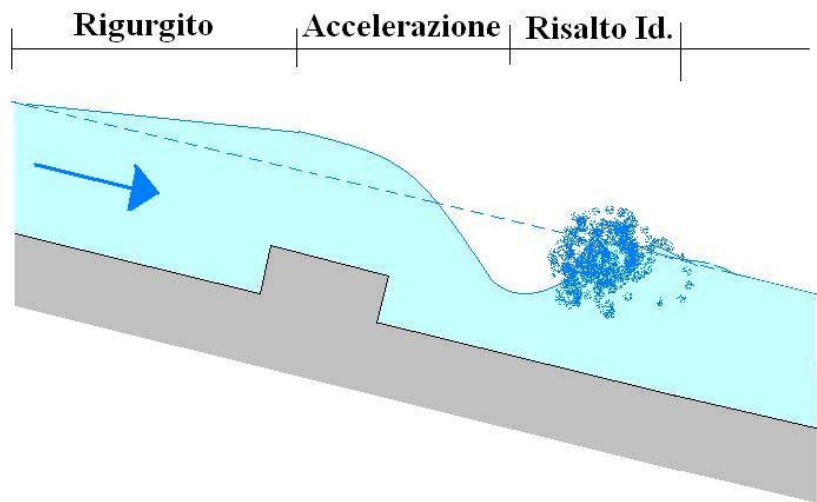
Il Risalto Idraulico è un fenomeno molto frequente nelle correnti a pelo libero, sia in canali che nei corsi d'acqua naturali. Quando il flusso incontra un ostacolo che riduce la sezione della corrente, il livello del pelo libero, prima di questo ostacolo, si innalza, per accumulare quella maggiore energia 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'alveo tornano alle medesime caratteristiche precedenti al salto.

In entrambi i casi, dovendo ridurre la velocità, il fluido deve dissipare parte dell'energia 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.

Salto di Bidone o Risalto Idraulico



Come i titoli indicano, non fu il Rialto Idraulico il principale oggetto di studio di Bidone, bensì i fenomeni prodotti da una istantanea 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 Principio del Momento.

Tuttavia, notando che il sovrizzo 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:

$$h = \frac{2H + h}{h} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

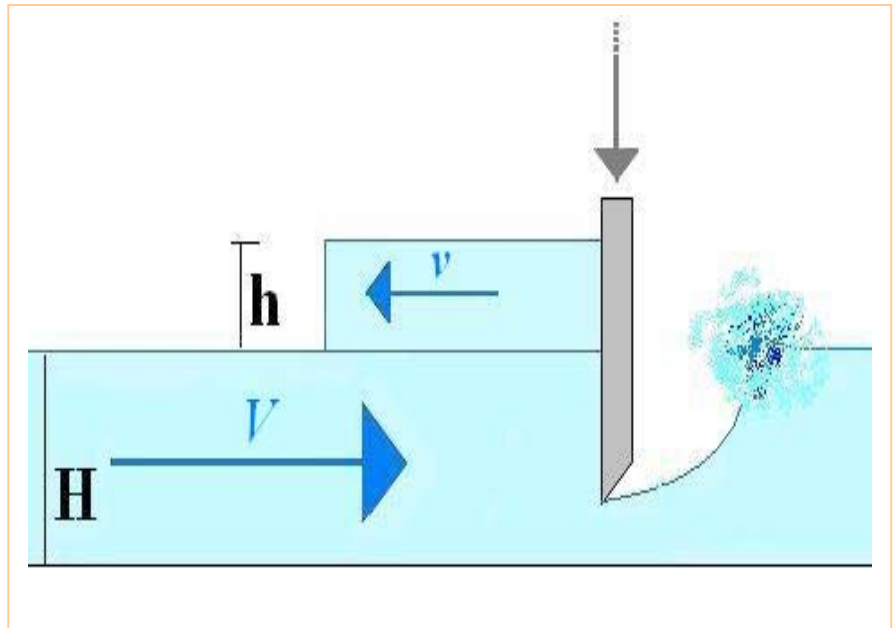
Giuseppe Venturòli, si laureò in Filosofia a ventuno anni ed a ventitre era già accolto nell'Accadèmia delle Scienze di Bologna; nel 1795 l'Università più antica della storia lo vide titolare di *Lettura Onoraria* di Matematica e poi, tre anni dopo, di *Lettura Stipendiaria*, nella stessa materia; nel 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 teorica 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'opera 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, ancora a Gottinga.

Wilhelm Eduard Weber si dedicò principalmente in studi su aspetti dell'energia elettrica, elaborando una teoria unitaria dei fenomeni elettrostatici ed elettrodinamici, 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 della luce, dal quale prese spunto J. C. Maxwell per formulare la teoria delle onde elettromagnetiche.

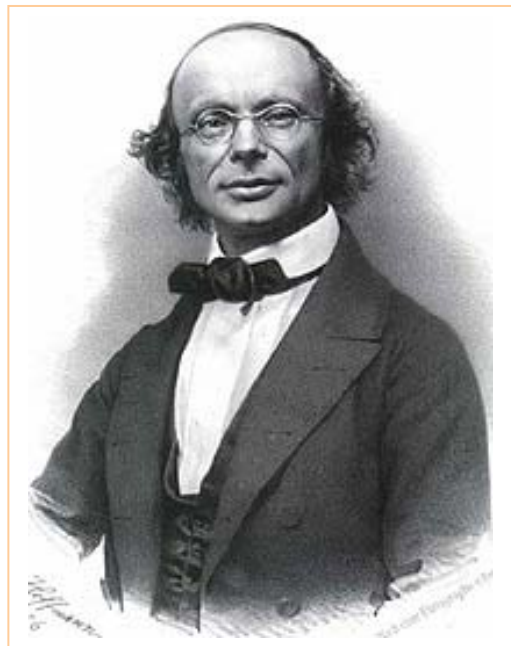
Da questa descrizione dell'attività di Weber non sembra potersi cogliere collegamenti con i temi dell'Idraulica, ed il suo libro è in effetti poco noto nella letteratura idraulica, sebbene contenga un dettagliato resoconto di ciò che sino ad allora era stato scritto sul moto dell'onda ed un ampio panorama 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 polvere 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 contemporanei ad un'altra novità particolarmente stravolgente. In quel periodo, infatti, comparve per la prima volta il termine *'turbina idraulica'* ad indicare la macchina idraulica alla quale lavorarono con grande impegno due ingegneri francesi: Claude Burdin (Saint Étienne 1790-1873), professore della *Ecole des Mines* a Saint Étienne, e Benoit Fourneyron (Saint Étienne 1802- Parigi 1867), studente di Burdin.

Nel 1824 Claude Burdin sottopose alla *Académie royale des sciences* la memoria *'Des turbines hydrauliques ou machines rotatoires à grande vitesse'*, che descrive la nuova tipologia di apparecchiatura che indicò con il termine *'turbina'*, che divenne subito comune nella terminologia 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 meritato 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 Metallurgia e, nel 1827, poté 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 costruii 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 dinamométrico, per misurare la potenza della rotazione, dando prima applicazione all'invenzione di Prony, e le sue prime pratiche realizzazioni di turbine idrauliche gli valse, nel 1833, il premio offerto, e non ancora assegnato, dalla *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nazionale*; la sua *“Mémoire sur l'application en grand dans les usines et manufactures, 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.”

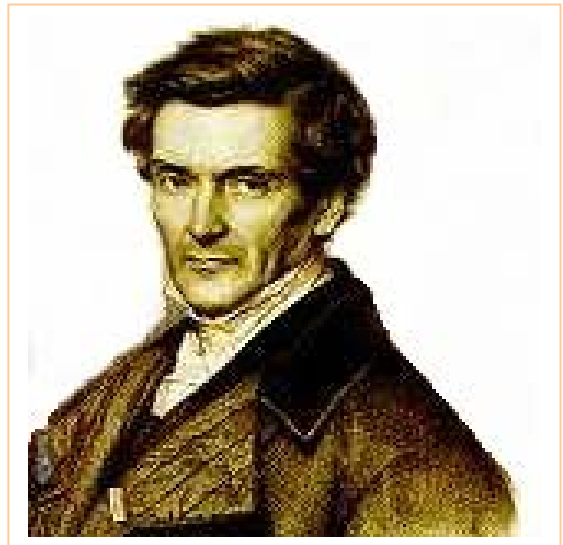
Nella prima metà del XIX secolo, nel *Corps des Ponts et Chaussées* v'erano un certo numero di idraulici degni di nota, dei quali tre ora meritano una particolare menzione: Pierre Vauthier (Boulogne 1784 - Parigi 1847), Jean Baptise Belanger (Valenciennese 1789 - 1874) e Gaspar Gustave de Coriolis (Parigi 1792 - 1843).

Pierre Vauthier, entrato nella *Ecole des Ponts et Chaussées* 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 seguito 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 Manufactures*, alla *Ecole des Ponts et Chaussées* 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 nobile 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 Chaussées* ed alla *Ecole Polytechnique*, diventando alla fine direttore del *Corps des Ponts et Chaussées*.

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 problèmes 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'energia 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 carico 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 problèmes hydrauliques.*" Attraverso meno tediose (ed allo stesso tempo meno esplicite) 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, siano 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 ancora 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 calcoli 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.

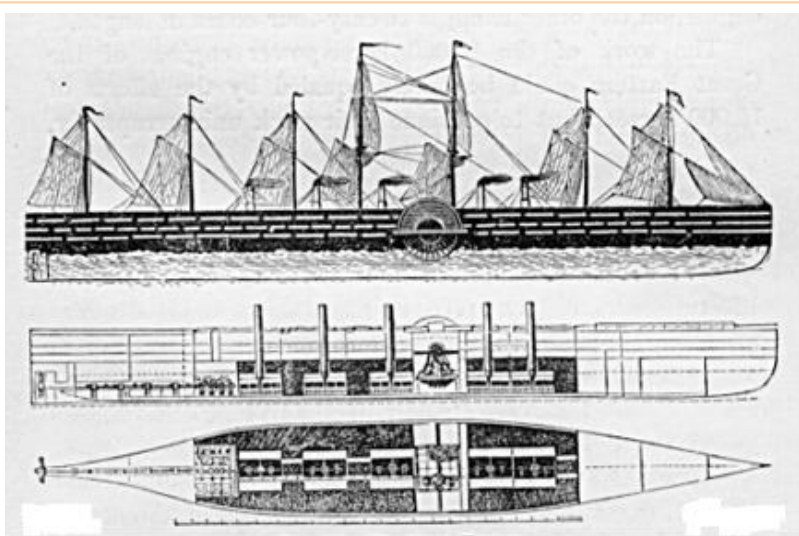
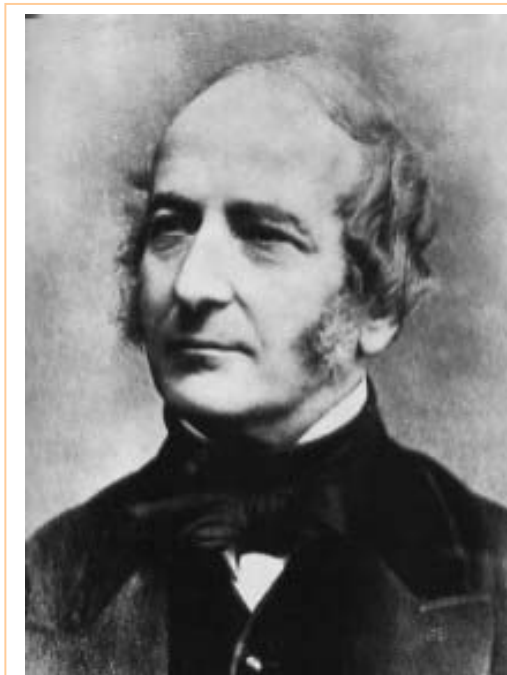
Così cominciò un dibattito che è continuato, tra gli idraulici, sino a tempi recenti.

I calcoli di Coriolis si sono rivelati essenziali nel caso di un flusso che subisca il rapido 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 seguito 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*’, varata 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 opera 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; poté 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 indicare 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 riferiti all'ampiezza dell'onda sollevata dalla chiglia in movimento sono tuttora un valido 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 fenomeno 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 origine, fu per molti anni professore di Matematica – 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 principi basati sulle leggi del moto di Isaac Newton.

In essa leggiamo:

“Così nel caso che si sia 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 $u=\sqrt{l}$, per il nuovo sistema di funzione simile 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 secolo, numerose applicazioni come propulsione di integrazione alla spinta delle vele, della quale fu uno degli esempi più importanti il già ricordato piroscifo 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 chilometri da New York a Clermont, alla velocità media di 4,6 nodi, poco meno di nove chilometri 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 secolo diciannovesimo.

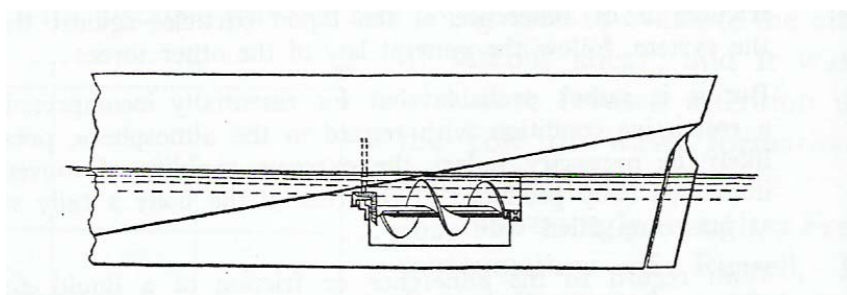
Il primo battello che svolse una normale attività spinto da un motore a vapore, con una doppia elica, fu realizzato da John Cox Stevens (1749-1838) e fece servizio regolare nel porto di New York nel 1804.

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.

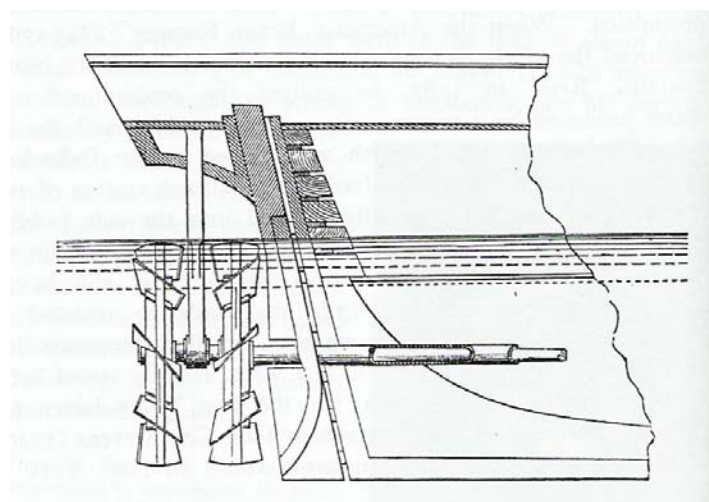
È assodato che Francis Pettit Smith (1808-1874), inglese, e John Ericsson (1803-1889), di origine svedese, sono coloro ai quali debba essere attribuito il merito della definitiva adozione dell'elica navale, così come oggi noi conosciamo, detta 'a opposizione a largo raggio'.

I relativi brevetti, sia di Smith che di Ericsson, furono ottenuti in Inghilterra nel 1836, il primo per l'elica a forma di vite elicoidale singola, simile ad una Vite di Archimède, ma limitata a due sole volute.

Spesso la fortuna, perché sempre bendata, può aiutare la Scienza; durante gli esperimenti un'elica di Smith si ruppe, restandone in rotazione una sola parte; Smith poté notare che la spinta del propulsore migliorò, aprendo la strada per studiare eliche corte, ad una sola voluta, e trovando nella diminuzione della lunghezza valori più alti della spinta.



Il modello di Ericsson era costituito 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 minima 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 principio 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.

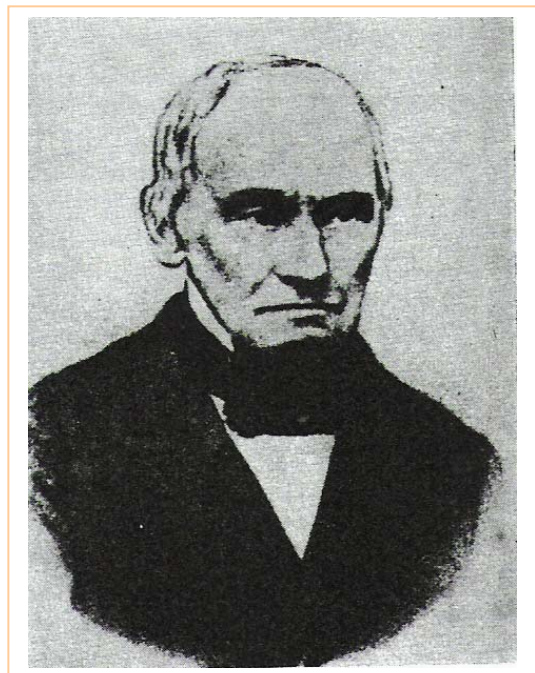
Uno dei suoi maggiori lavori pratici fu il progetto della base navale di Wilhelmshaven e la sua maggiore pubblicazione fu il trattato, in più volumi, sull'Ingegneria Idraulica *“Handbuch der Wasserbaukunst.”*; la prima delle sue numerose edizioni apparve a Berlino nel 1841.

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 ° Centigradi) 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 carico idraulico era letto in continuo sia 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 ancora 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 traiettorie rettilinee e, per questo, parallele; oggi è detto ‘Moto Laminare’. Oltre un certo limite, determinato anche dalle dimensioni della tubazione il fluido si muove anche *in bruschi movimenti*, cosicché una parte significativa della propria energia 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 definire 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 attribuite ad Osborne Reynolds.

A sfavore di chi rivendica 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 opera 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 sciences*, sotto il titolo "*Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres*".

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 calcolati 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 ancora 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 definita 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 partecipi alla distribuzione parabolica della velocità, anche valutando la correzione dovuta alla componente dell'energia cinetica, correzione a volte chiamata *Correzione di Hagenbach*, anche se questi fece un errore di valutazione che invece non fece Neumann. Correttamente oggi è attribuita 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 Geodesia; in entrambe queste materie pubblicò numerosi testi, ma il suo più importante lavoro fu l'opera, 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.

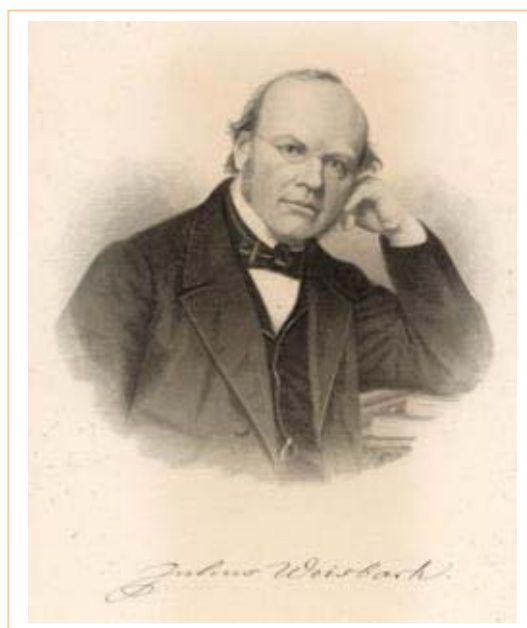
Se Bossut è ricordato per aver introdotto l'insegnamento della Meccanica dei fluidi come argomento della scuola di Ingegneria, fu Weisbach che modernizzò la didattica dell'Idraulica e che scrisse un'originale ed integrale sezione di Ingegneria Meccanica.

Il Capitolo VII del volume sulla Meccanica teorica, trattò i seguenti argomenti: teoria matematica del moto, scienza fisica del moto, statica dei corpi rigidi, elasticità e durezza dei materiali, dinamica dei corpi rigidi e dinamica 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 ancora al giorno d'oggi.

Nell'opera di Weisbach gli argomenti sui fluidi furono più limitati all'Idraulica piuttosto che all'Idrodinamica, 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 opera di autori successivi) che mostrarono un acuto intuito 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 migliorati 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:

$$h = \left(\frac{a}{V} + b \right) \cdot \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

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 secolo: fu Julius Weisbach che per primo riscrisse e diffuse la formula di Daniel Bernoulli nella forma oggi comunemente accettata.

Prove di laboratorio, analisi matematiche, interpretazioni fisiche, all'inizio del XIX secolo 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 conoscono.

* * *