

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 18 – I primi passi dell'Aerodinàmica

Cremona 23 maggio 2007

Capitolo 18 – I primi passi dell'Aerodinamica

Eccetto Benjamin Franklin, del quale abbiamo già citato i primitivi test di resistenza e di Idrodinamica 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, Massachusetts 1892).

Inglese di nascita, Francis decise di emigrare negli Stati Uniti in giovane età, giungendo a Lowell, nel Massachusetts, dove fu assunto in un gruppo di compagnie manifatturiere, del quale divenne in seguito direttore, che controllava le acque del fiume Merrimac.

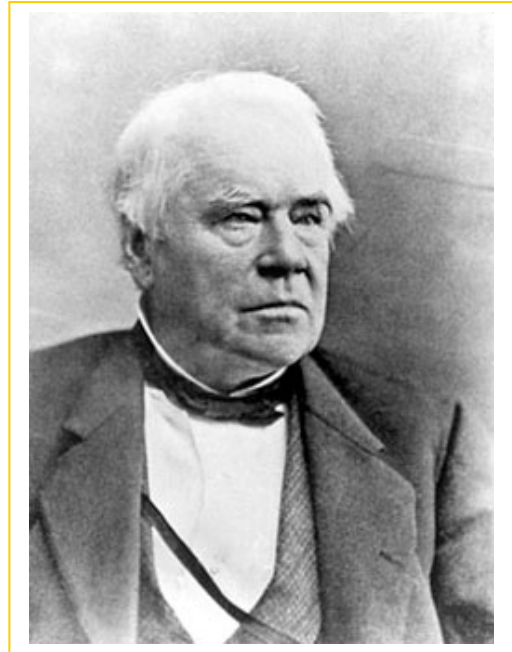
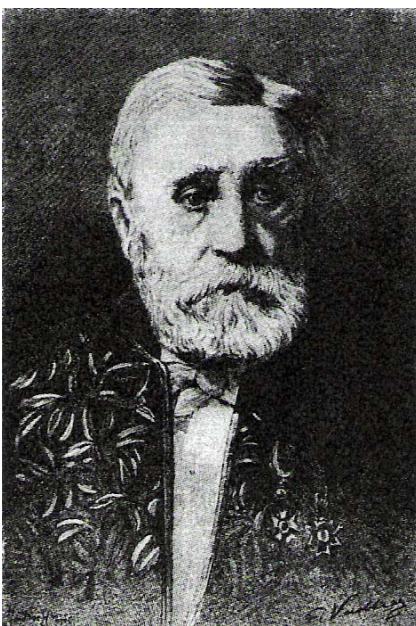
Queste compagnie avevano acquisito i diritti di costruzione di turbine disegnate, nel 1844 da Uriah A. Boyden.

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 centripeto; il vano di uscita della corrente era seguito da un semplice diffusore sommerso, quasi dieci anni prima del brevetto di Fourneyron del suo modello di diffusore, del quale vennero proposte soluzioni coniche sempre più efficienti.

Un'installazione 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 centripeto 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 secolo, 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 Briel 1797 – Saint Ouen 1886) fu certamente il più stupefacente.

Educato 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 Agronomico di Versailles (dal 1848 al 1854), alla ricerca ed alla redazione di trattati in diversi campi della Meccanica, della Geometria Analitica e della

Matematica.

Dal 1868 fu nominato tra i quaranta membri della *Académie Royale des Sciences*.

Lavoratore infaticabile, 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, restituita 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 problèmes 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 (Isère, Vienna 1822-Parigi 1883), che finalmente completò l'integrazione analiticamente.

Bresse, nativo di Isère 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 Matematica.

Il suo principale interesse, come per Saint-Venant, fu il campo dell'elasticità; ma il suo libro "*Cours de mécanique appliquée*"., del 1860, contiene sia la prima corretta formulazione del



risalto idraulico, dalla quale Bresse dedusse tabelle ancora 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 ancor oggi utilizzata: Emmanuel Joseph Boudin (1820-1893), un membro del *Belgians Corps des Ponts et 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 ultimi 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 transita; 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 qualsiasi 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 transita, calcolandola, meno immediato è lo stabilire 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 siano sufficienti a contenere le acque, con l'adeguato margine 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 energia che dipende dalle condizioni 'al contorno'.

Nella situazione ideale, il consumo di energia 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 con sezione circolare (ovvero di forma cilindrica) e di lunghezza infinita; il tale situazione Boudin indicò il movimento del fluido con il termine di *Moto Uniforme*.

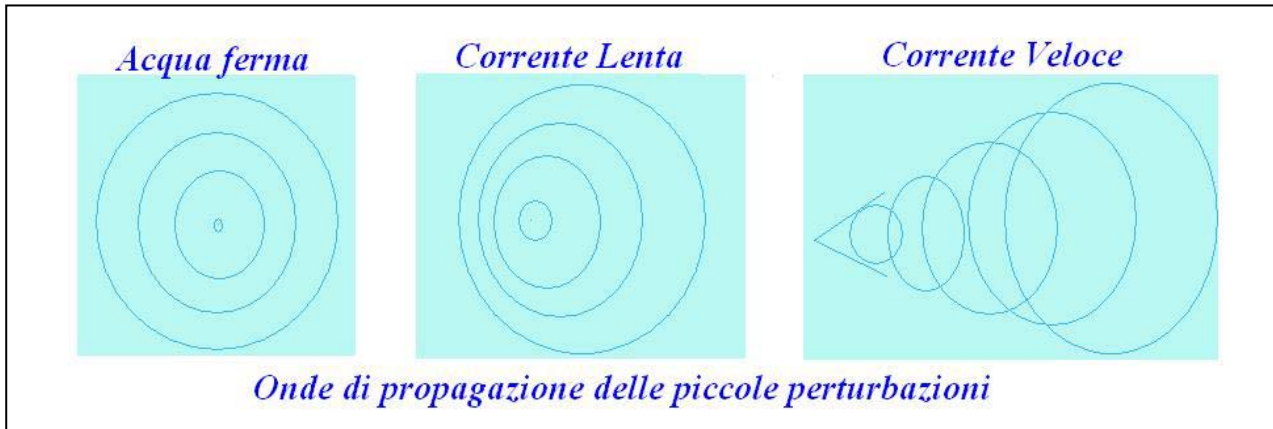
Nel *Moto Uniforme*, la corrente, quindi, 'consuma' soltanto quella parte di energia potenziale corrispondente alla variazione di quota rispetto alla quota 'zero' di riferimento; ma, come già detto, si tratta di una situazione ideale, teoricamente mai verificata, anche se costituisce il riferimento al quale tendono i fluidi in movimento.

È infatti possibile, in qualsiasi 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'ultima rappresenta uno stato della corrente, instabile, nel quale l'acqua, in movimento, ha la minima energia 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 categorie: *Correnti Lente* e *Correnti Veloci*, nelle quali balzano 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 *Correnti Veloci*, la *celerità*

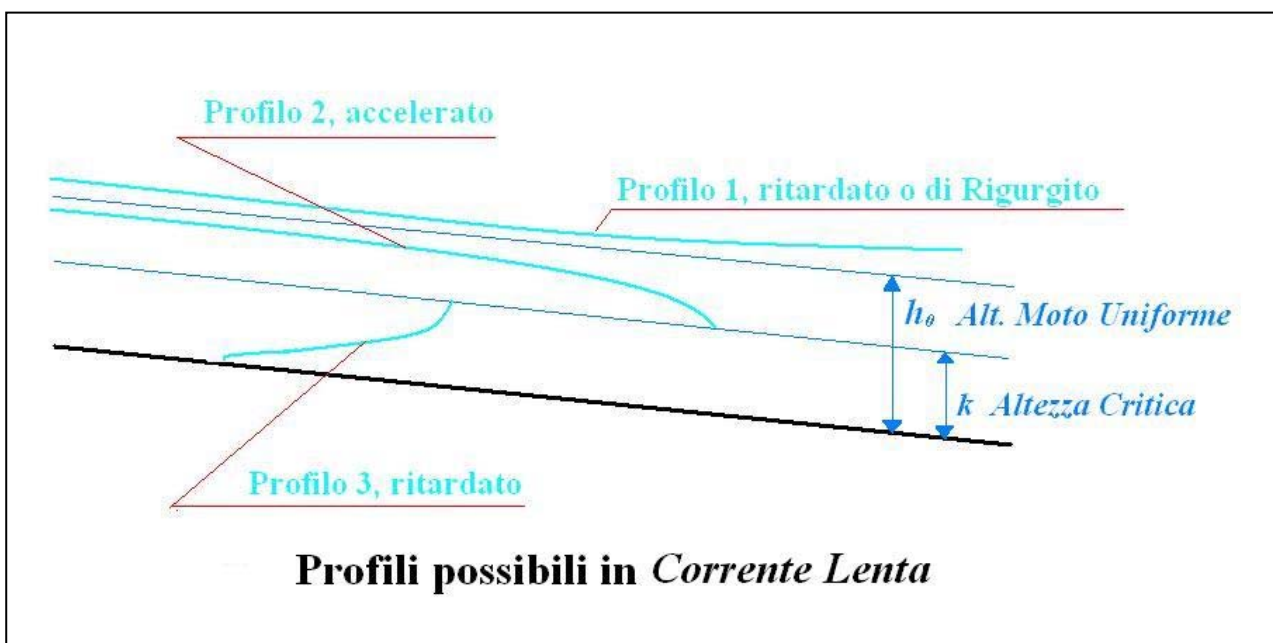
è minore del moto. Ne consegue che le onde concentriche create da un sasso che cada nell'acqua ferma, sono in grado di risalire la *Corrente Lenta* ma non la *Corrente Veloce*;

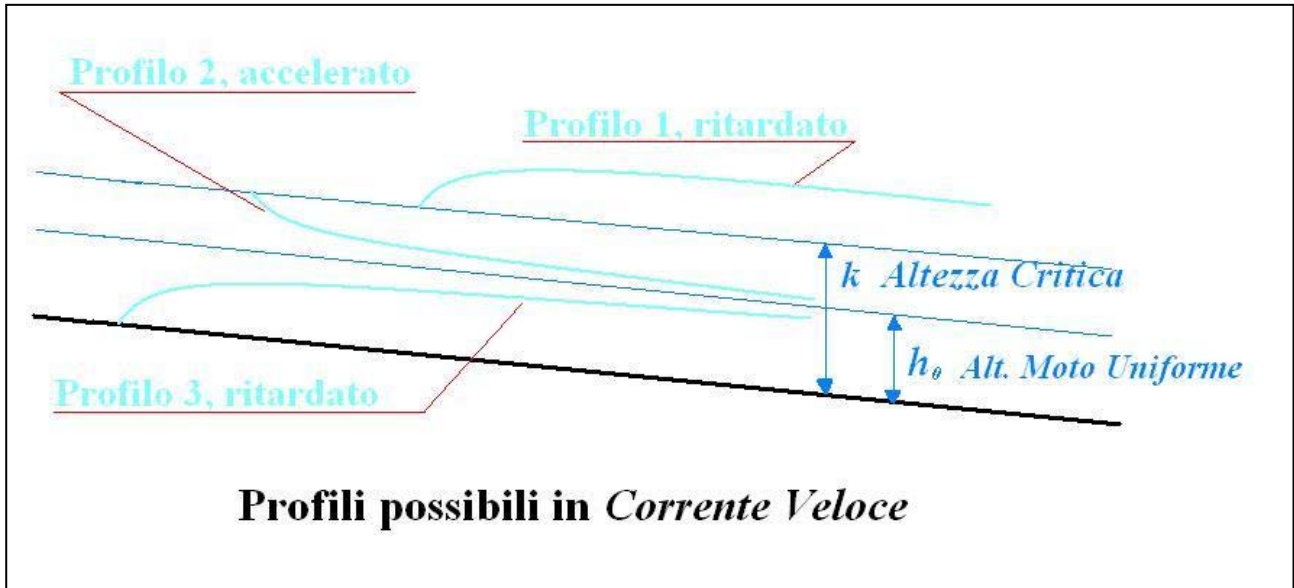


- la *Corrente Lenta* assume caratteristiche determinate dalle situazioni che ne limitano il flusso in sezioni poste verso valle; la *Corrente Veloce*, al contrario, è definita da condizioni poste a monte.

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 un 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 corrispondente 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: ancora oggi i possibili profili che assume il pelo libero si possono riconoscere nei casi individuati da Boudin.

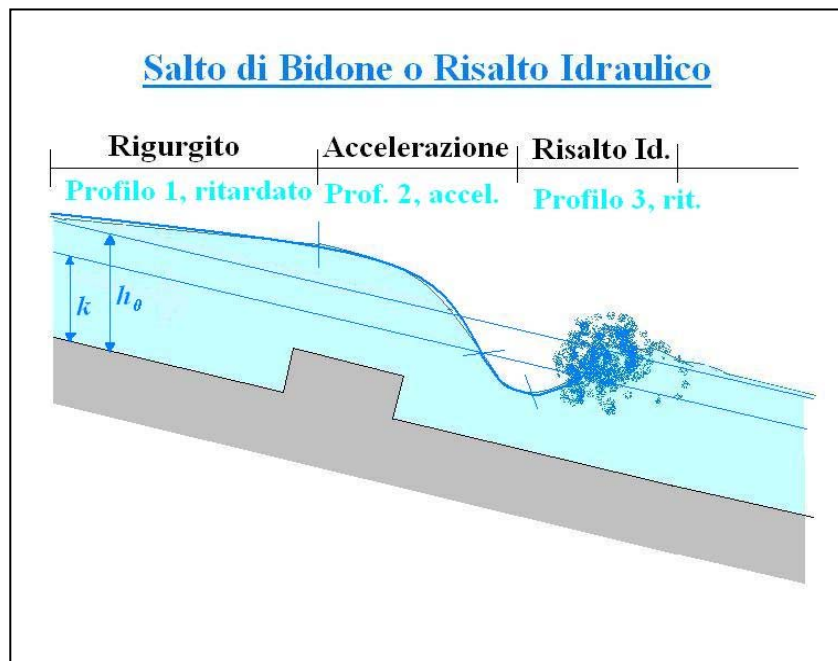
Le illustrazioni che seguono li schematizzano, esagerando nelle pendenze: nella realtà le differenze di altezza si misurano spesso in centimetri ogni chilometro, quindi non percettibili all'occhio. Soltanto nei pressi di brusche variazioni di velocità, in particolare nel passaggio attraverso lo stato 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 medesima 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 termine '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 medesimo problema, apparivano simili.



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 seguito 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 opera 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.*"

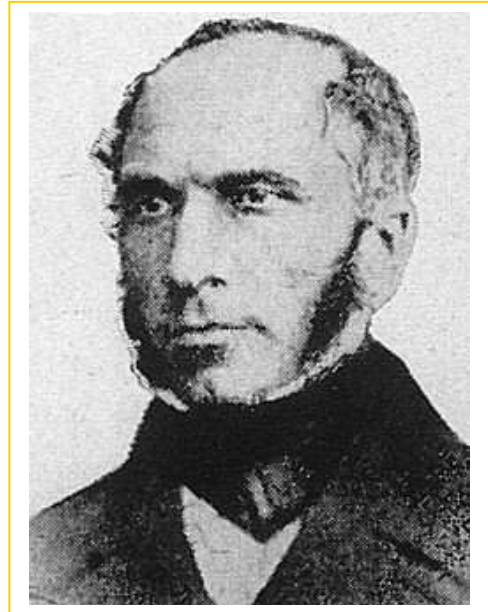
Darcy utilizzò ventidue condotte di differenti materiali: ferro battuto, piombo, ghisa, acciaio con asfalto e vetro; con diametri variabili, da circa 12 a 460 millimetri, ed in differente stato di manutenzione. Il francese riuscì a dimostrare che la resistenza dipendeva sia dal materiale, del quale erano composte le tubazioni, sia 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 termini, 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 lisce, 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 sia 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 simile 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'ambito dello studio dei Moti di Filtrazione, cioè del movimento di un fluido attraverso un materiale permeabile.

L'esempio più tipico e più frequente è il moto dell'acqua nel sottosuolo, laddove costituito da strati di materiali non compatti, significativamente, sabbie, ghiaie ed argille, prodotti dai depositi orogenetici 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 termini proprî dell'Idraulica, come pendenza, cadente, piezométrica, pérdida di carico, . . .

I risultati degli studi su questi Moti di Filtrazione, condotti da Darcy, mostrarono che la pérdida di carico non fosse proporzionale alla radice quadrata della velocità.

Nel suo trattato, édito nel 1856, “*Les fontaine publiques de la ville de Dijon.*”, Darcy enunciò la legge che oggi porta il suo nome (detta anche *Legge 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 término 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 parabolica 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 fenomeno 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 solidi trascinati, dalla forza della corrente, sul letto del corso d'acqua.

Nel suo documento "*Le Rhône et la rivières 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'álveo 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 esito, 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; 2^a partie, recherches expérimentales 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 semicirculari. 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:

$$R = \left(\frac{a + b}{V} \right) V^2$$

Darcy-Bazin si poté giungere alla forma:

$$R = \left(\frac{a + b}{R_i} \right) V^2$$



in séguito ai numerosi esperimenti di

dove, naturalmente, R_i rappresenta il *Raggio Idraulico*, ed i due coefficienti a e b dipendono dalle caratteristiche del materiale costituente l'álveo. 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 stabilita 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, attraverso 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 teoria del Risalto Idraulico, o Salto di Bidone, non trovandosi in sintonia 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 sia orizzontali che inclinate, Bazin poté 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 stramazziante, 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 termini 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 Elia 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 ancor 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 metodi 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 termine che tenesse conto della scabrezza media dell'alveo.

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 Humphreys 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 :

$$C = \frac{\left(a + \frac{b}{n} + \frac{m}{S}\right)}{\left[1 + \left(a + \frac{m}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R_i}}\right]}$$

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 Humpreys 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 liscio;
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:

$$C = \frac{A}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R_i}}}$$

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 Chaussées*, che, invece di cercare una singola formula che potesse descrivere ogni tipo di canale, propose due formule, per altrettanti intervalli di pendenza:

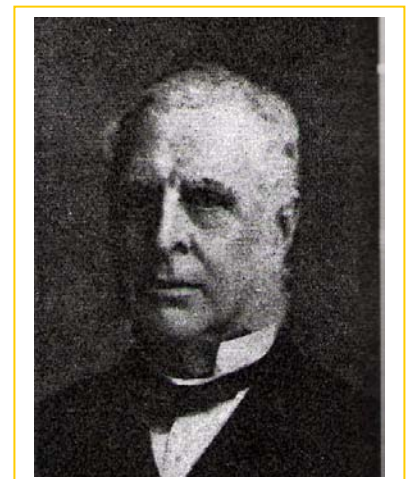
$$V = \lambda_1 R_i^{\frac{4}{3}} S \quad \text{per } S > 0,0007$$

$$V = \lambda_2 R_i^{\frac{2}{3}} S \quad \text{per } S < 0,0007$$

Un'espressione identica alla seconda di queste fu definita da un ingegnere irlandese, Robert Manning (1816-1897), due decenni più tardi.

Manning era nato in Normandia, 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'Idrologia, 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:

$$V = KR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}$$

. . . 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 empiriche . . . 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:

$$V = C\sqrt{gS}\left[R^{\frac{1}{2}} + \frac{0,22}{\sqrt{m}}(R - 0,15m)\right]$$

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 continuano a giocare un ruolo fondamentale nelle pratiche di laboratorio anche oggi: la galleria del vento; il modello di fiume a letto mobile; i bacini 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 sia la curvatura sia 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'idea di dare una sàgoma bombata alle superfici delle pale fu indipendentemente concepita (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 anonima, 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 Venturimetro.

Fu un altro inglese, Frederick William Lanchester (1868-1946), che per primo cercò di spiegare il fenomeno della spinta aerodinamica 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 concepito un modello di fiume a *Letto Mobile* è attribuito al francese Louis Jérôme Fargue (1827-1910), del *Corps des Ponts e Chaussées*, che lo utilizzò per progettare opere 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 opera, ovviamente anch'essa nella medesima scala. Fu nell'idea piuttosto che nella tecnica, che Fargue merita 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 appesantito, 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.

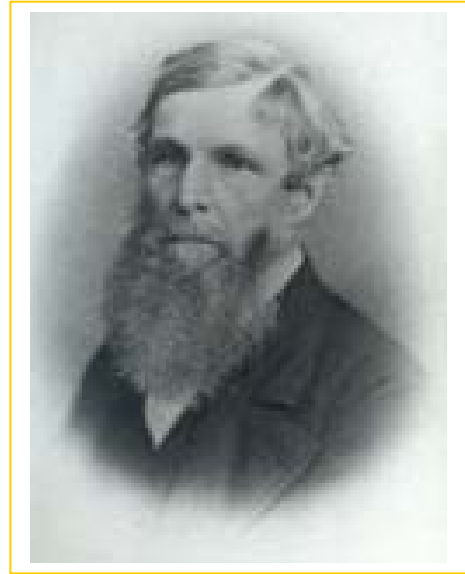
“*Il . . . modello . . . subito mostrò che c'era solo un periodo di tempo nel quale il moto dell'acqua . . . poteva imitare i moti dell'attuale marea nel fiume Mersey, il cui valore era di circa quaranta secondi; un risultato che poteva essere previsto dalla teoria del moto delle onde, secondo la quale 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 approfondito, il problema di migliorare il regime idraulico dell'estuario della Senna. Nell'elaborare la propria teoria dei modelli, Vernon-Harcourt riprese, migliorandole, le

prescrizioni di Reynolds, giungendo ad una forma sostanzialmente seguita ancor oggi nei modelli che simulano 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 opere inserite 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 sia 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'idea:

“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 (n³) . . . “

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 simili 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 termini che anticipavano la teoria dello *Strato Limite*, 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, possiede una qualità decisamente pessima rispetto ad una superficie nuova, appena verniciata . . .”.

Una delle ironie 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 cinematica 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 Limite*, 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..

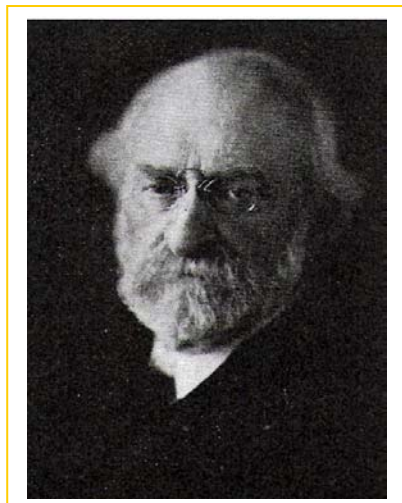
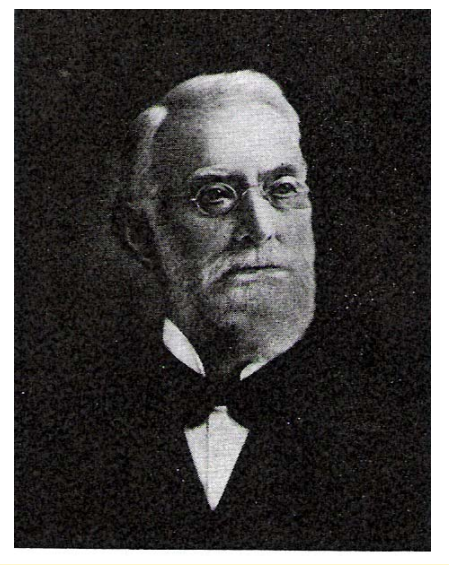
Lester Allen Pelton (1829-1908) lasciò la sua casa di Vermillion - Ohio, all'età di vent'anni per partecipare alla corsa dell'oro.

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 ostriche.

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 bandito 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 Karlsruhe), 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 compagnia Allis-Chalmers.

Sia la *Boston Society* di Ingegneria Civile che l'omologa *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 principio 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 Herschel propose, Venturimetro, sembra sia derivato dalla consuetudine, seguita 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 conìò il nome con il términe ‘*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 principio di Bernoulli_Euler fosse applicabile all'interpretazione del funzionamento del Venturimetro soltanto dopo averlo ampiamente sperimentato; così, per questo, osservò:

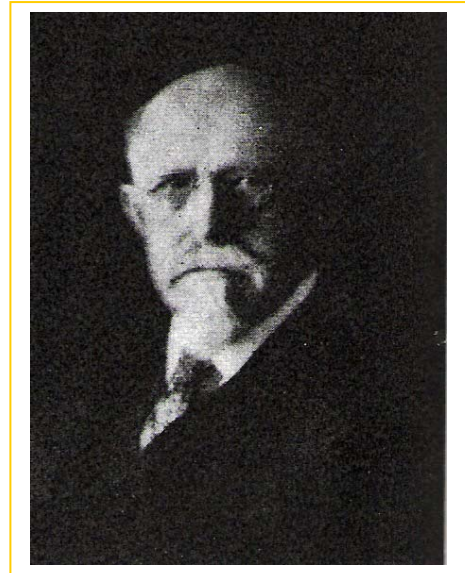
“ . . . abbiamo così visto che la comprensione del principio che presiede alla scoperta di un'invenzione può seguire, invece che precedere, la realizzazione dell'invenzione stessa; infatti un inventore può giungere a sufficienti cognizioni [da concepire l'invenzione e la sua utilità] attraverso i soli 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 Fire 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 nei lavori della *American 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 era per lo sviluppo dei metodi 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'Aerodinamica.

Allo spirare del secolo, inoltre, la via era ormai tracciata per la redazione di qualsiasi trattato di Idraulica (come “*Hydraulique*” di Flamant del 1891), secondo i tre principi ormai assolutamente compresi: continuità, energia e resistenza.

I coefficienti adimensionali entrarono a far parte dell'uso comune.

Innumerevoli dati sperimentali furono ottenuti per la loro corretta valutazione.

Molti tentativi, sebbene non sempre coronati da successo, furono condotti per comprendere e definire 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 poté 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 empirica e qualitativa.

Di questo periodo, così fecondo, piace ricordare una testimonianza di Clemens Herschel sull'eterno confronto tra teoria 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 anticipino 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 . . .”

* * *