

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 16 – Misura della velocità e della pérdida di energia nel moto:
le prime prove sperimentali**

Cremona 23 marzo 2007

Capitolo 16 – Misura della velocità e della perdita di energia nel moto: le prime prove sperimentali

All'inizio del XVIII secolo, l'importanza delle ricerche in Idraulica attraverso gli esperimenti si stava prepotentemente affermando quale integrazione e supporto essenziali per l'analisi teorica; lo abbiamo già visto nel Capitolo 10, trattando delle ruote idrauliche.

In Italia, in quel periodo, spicca per originalità il marchese Giovanni Poléni (Venezia 1685 – Padova 1761), già ricordato nel precedente Capitolo 14, che condusse notevoli prove sperimentali, utilizzandole per verificare particolari aspetti e prestazioni delle opere di Idraulica Fluviale da lui stesso progettate e poi realizzate.

Poléni, all'età di ventiquattro anni, era già professore di Astronomia all'Università di Padova. Rivolse grande interesse alle lingue straniere, alla Filosofia, alla Teologia, e fu associato a molte delle società scientifiche in Europa. È curioso ricordare che, pur insegnando la scienza degli astri, questo scienziato veneziano si pose decisamente contro le teorie copernicane, tentando di spiegare il moto apparente dei pianeti con ragionamenti che portassero a negare la rivoluzione e la rotazione della Terra.

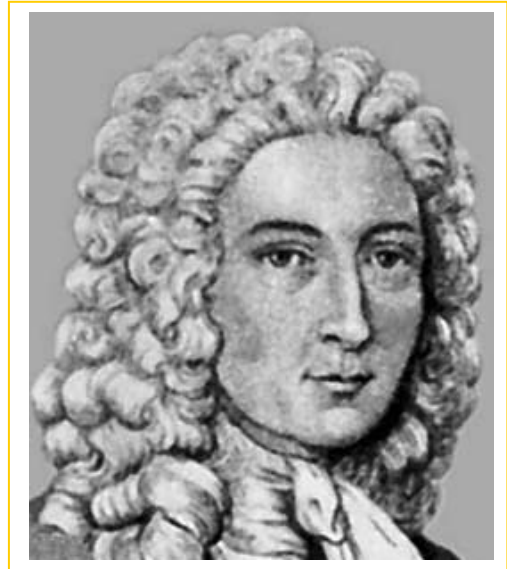
Poléni ebbe maggior successo come ingegnere idraulico che professore, assumendo molti incarichi dalla Serenissima Repubblica di Venezia che lo incaricò di risolvere molti problemi legati all'approvvigionamento d'acqua, al controllo delle alluvioni, al deposito di sedimenti nella Laguna di Venezia, ma anche quale arbitro nelle dispute tra Stati confinanti.

L'aspetto più importante dell'attività di Poléni, per la ricerca in Idraulica, è costituito dall'utilizzo sistematico di prove sperimentali, al fine di verificare le principali grandezze che caratterizzavano le opere dallo stesso progettate; egli, così, introdusse la verifica sperimentale quale elemento essenziale, in sede di progettazione, per adeguare le previsioni teoriche alle reali situazioni, financo a giungere alla definizione di relazioni in tutto empiriche, laddove la teoria risultasse inadeguata se non assente.

Con Poléni la via dell'Idraulica giunse ad un bivio distinguendosi, sempre più marcatamente, tra Teorica e Sperimentale.

Già nello stesso secolo, lo abbiamo visto nel Capitolo 13, l'Idraulica Teorica trovò altissimi esempi in Daniel Bernoulli, Leonhard Euler e Jean-Baptiste Le Rond d'Alembert, ma ancora lontani e non indispensabili per l'Idraulica Sperimentale; nel 1727 lo stesso Poléni, seppure ben preparato in Matematica, ammetteva la grande difficoltà nel comprendere le ricerche di Daniel Bernoulli.

Ciononostante, anch'egli si occupò di studi teorici. Nel suo trattato "*De moto aquae mixto*", del 1717, Giovanni Poléni trattò dell'efflusso che tracima da un serbatoio attraverso un'apertura rettangolare, incisa sul bordo, quindi nel caso di efflusso 'a pelo libero', indicando la velocità totale dell'acqua, per unità di larghezza, corrispondente all'area della curva parabolica delle traiettorie, espressa dalla formula:



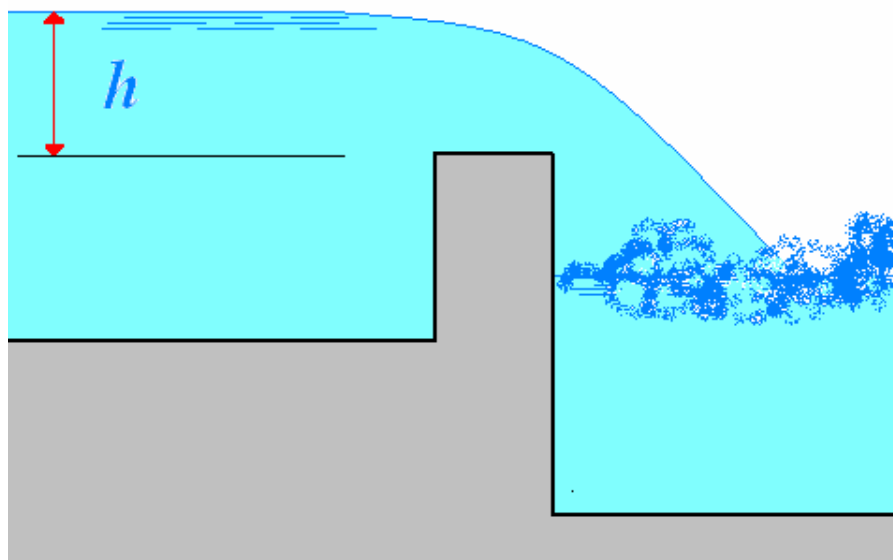
$$Q = \frac{2}{3} hb\sqrt{2gh}$$

... nella quale h e b rappresentano,

rispettivamente, l'altezza dell'acqua nel serbatoio rispetto al bordo inferiore dell'apertura e la larghezza dell'apertura stessa.

Questa formula è una delle prime espressioni ormai giunte alla loro stabilità definitiva, tant'è che ancor oggi è utilizzata, per esempio, nel calcolo della portata che tracima dalle creste delle dighe.

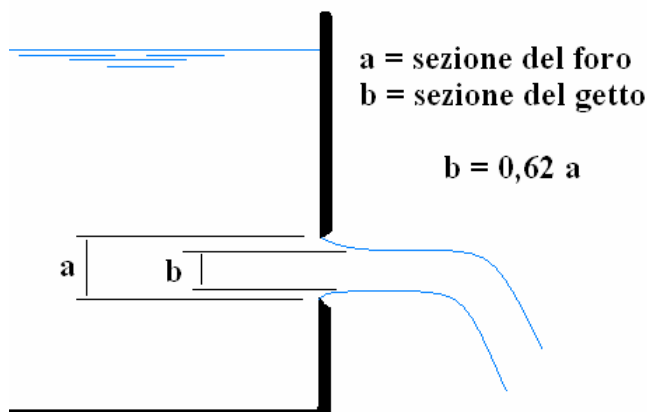
La sua più generale espressione:



$$Q = \frac{2}{3} C \cdot hb\sqrt{2gh} \quad \text{oppure} \quad Q = \frac{2}{3} C \cdot bh^{\frac{3}{2}}\sqrt{2g}$$

... è spesso indicata come “Formula del Poléni”, nella quale C è un coefficiente il cui valore, nei diversi casi, è riportato nei manuali, frutto di numerose prove sperimentali, a dimostrazione della necessità dell'approccio sperimentale, sistematicamente utilizzato, per la prima volta, dallo scienziato veneziano.

Nel suo trattato “*De Castellis per quae derivantur fluviorum aquae habentibus latera convergentia liber*”, pubblicato nel 1718, Giovanni Poléni si interessò del fenomeno della contrazione del getto che esce da un orifizio a spigolo vivo; concluse che l'area della sezione contratta del getto era il 62% dell'area dell'apertura, individuando così il valore del Coefficiente di Contrazione pari a 0,62. Questa determinazione costituì un considerevole progresso rispetto al valore di 0,707 (pari a $\frac{1}{\sqrt{2}}$) determinato da Isaac Newton, che per primo analizzò il fenomeno.



Di Poléni giova ricordare la trascrizione dell'òpera di Sesto Giulio Frontino, '*De aquis urbis Romae*', poi data alle stampe a Padova nel 1772 e della quale abbiamo ampiamente parlato nel Capitolo 4.

Nel XVIII sécolo pochi, come Giovanni Poléni, si distinsero al di fuori della Francia, la cui Scuola di Idraulica divenne, infatti, il riferimento primo per l'intera Europa, certo a scápito (o a causa) del 'rallentamento' della Scuola Italiana.

Molto si deve, senza dubbio, al grande lavoro che Edme Mariotte realizzò nel sécolo precedente, ma a completamento del substrato culturale francese all'inizio del Settecento, in Idraulica, non possiamo omettere di ricordare Claude Antoine Couplet (Parigi 1642 –1722) ed il suo figlio, Pierre Couplet des Tortreaux (Parigi ? – 1743), entrambi membri della *Académie Royale des Sciences* della quale furono, in successione, i Tesorieri, mentre Claude Antoine ne fu anche uno dei primi associati, quando venne rifondata, nel 1666, ad òpera del Segretario di Stato di re Luigi XIV, Jean Baptise Colbert (Reims 1619 – Parigi 1683).

Claude Antoine Couplet, costretto dal padre Antoine agli studi ed alla professione di avvocato, ben presto si dedicò alle scienze che tanto lo appassionavano e per le quali possedeva una singolare predisposizione, che non passò inosservata allo sguardo di Jacques Buot; fu quest'ultimo che, quando venne scelto da Colbert, nel 1666, tra i primi membri della nuova *Académie Royale des Sciences*, si adoperò perché, nello stesso anno, venisse accolto anche Couplet, al quale, nel 1670, cedette la cattedra dell'insegnamento di Matematica presso la reggia di Versailles.

Claude Antoine Couplet si occupò anche di Architettura ed Astronomia, lavorando al fianco dell'astrònomo italiano Gian Doménico Cassini, fondatore e primo Direttore dell'Osservatorio Astronòmico, sorto all'interno della stessa accadémia parigina.

A Versailles, incaricato di soprassedere ai lavori per l'approvvigionamento d'acqua dell'enorme complesso, Claude Antoine Couplet poté condurre numerosi esperimenti nell'analisi della resistenza dell'acqua al moto; per questo realizzò sistemi di tubazioni di diametro variabile, da dieci e quarantacinque centimetri, e di lunghezze comprese tra ottocento metri e tre chilòmetri circa, in differenti condizioni di càrico, cioè variando l'altezza del livello dell'acqua posta all'inizio delle condotte e misurando, lungo le stesse, velocità e pressione.

In queste esperienze, Pierre Couplet des Tortreaux continuò il lavoro del padre, utilizzando condotte non rettilinee, con curve e gòmiti, e di differente stato d'usura (nuove o con progressive incrostazioni), giungendo alla conclusione, come già aveva fatto Edme Mariotte, che il grande divario tra i risultati sperimentali ed i càlcoli, secondo le teorie di Torricelli, fossero dovuti al fenòmeno della resistenza al moto del fluido prodotta dalle pareti delle tubazioni.

I due Couplet però non si impegnarono nel cercare un'espressione che rappresentasse questa resistenza, ma produssero una tale mole di dati sperimentali che ancòra nel 1886 i loro risultati erano considerati affidabili per la progettazione di sistemi di condotte con bassa velocità dell'acqua.

Le esperienze dei Couplet costituiscono la prima sperimentazione condotta con modelli a grande scala per analizzare fenòmeni, come la resistenza al moto (detta, in linguaggio tecnico, *scabrezza*, o *pérdita di càrico*), che erano determinati da tante variabili, da grandezze indeterminabili singolarmente e con valori tanto piccoli da essere difficilmente misurabili utilizzando modelli in dimensioni ridotte.

Il 'gigantismo' nella modellistica in Idraulica che, come abbiamo già visto, stava avviandosi in quel periodo, ha trovato, sino agli anni Ottanta dello scòrso sécolo, un proprio spazio, laddove il problema posto fosse caratterizzato da innumerevoli variabili e grandi superfici.

L'esempio più eclatante si trova ancor oggi a Vicksburg, nello Stato del Mississippi USA, a circa duecento chilometri da New Orléans, dove è stato riprodotto, su una superficie di quasi un milione di metri quadrati, il bacino idrografico del fiume Mississippi, di tutti i suoi affluenti, di tutte le opere idrauliche e degli sbarramenti idroelettrici in grado di influenzarne il regime delle acque. Costruito dal *Army Corps of Engineers* intorno al 1940, utilizzando anche prigionieri di guerra tedeschi, vide concludere la propria utilità nel 1980; oggi è destinato a parco pubblico, di proprietà dell'esercito americano, mantenendo ancora visibili le strutture, ormai superate, nello scopo originario, dalle simulazioni al *computer*: quale, tra i due 'modelli', dia i migliori risultati è un delicata questione che lasciamo . . . ad altri!

* * *

Può sorgere, da tale citazione, la curiosità di conoscere i motivi per i quali l'esercito degli Stati Uniti d'America (*U.S.A. Army*) si trovi impegnato in attività di ricerca che, per quanto possa a noi risultare, non hanno dirette applicazioni alle 'cose di guerra'. Così lo spiega l'ing. Benedetto Dal Bosco, nella prefazione del libro, dallo stesso tradotto "*Le nuove formole sul moto dell'acqua e negli alvei sistemati dei fiumi.*", di W. A. Kutter, Milano 1873: ". . . il Congresso votò i necessari mezzi, acciocché la questione venisse risolta mercè uno studio . . . che venne affidato agli Ingegneri dell'Arma Federale, come di solito si suole praticare da quel Governo, il quale non solo occupa questo insigne corpo in opere pubbliche, cioè in miglioramenti di strade, in tracciati di canali, di strade militari, e di reti di ferrovie, ma anche trae profitto dalle facoltà intellettuali degli Ufficiali e Graduati, impiegandoli in osservazioni concernenti la fisica e la storia naturale durante il tempo di occupazione militare in certe regioni.". Prima ancora che fossero Uniti, gli Stati Federali d'America disponevano, quindi, di una struttura militare in grado di svolgere attività pratiche e teoriche di assoluto livello; tradizione che continua ancor oggi . . . certo è un caso di 'buon uso delle armi'!

* * *

Di Claude Antoine Couplet dobbiamo proporre ancora un'importante sottolineatura: l'elogio funebre, scritto per le sue esequie, ricorda l'episodio nel quale egli venne chiamato a risolvere la drammatica scarsità d'acqua della città di *Coulanges la Vineuse*, in Borgogna.

I cittadini di quel borgo, che doveva il nome all'eccezionale ricchezza della propria viticoltura, erano obbligati ". . . ad andare molto lontano a cercare un pozzo, anch'esso spesso asciutto, per cui erano costretti a spostarsi di una lega [3,898 chilometri] per trovare una fontana.". Dopo molti insuccessi, nel 1705 venne affidato a Claude Antoine Couplet l'incarico di trovare una soluzione al problema che risolse, potremmo dire, 'in quattro e quattr'otto'!

L'elogio funebre riferisce che Couplet iniziò ad osservare l'andamento del terreno ben prima d'essere in vista della città, ". . . evidenziando con picchetti i punti dove avrebbe fatto scavare e predicendo nello stesso tempo a quale profondità precisamente si sarebbe trovata l'acqua; mentre qualcun altro al suo posto si sarebbe potuto dare un'aria divinatoria, egli spiegò semplicemente i principi della sua arte e si privò di ogni apparenza di meraviglioso.". Date le necessarie istruzioni, Couplet tornò alle sue occupazioni a Parigi. Quando fu nuovamente a Coulanges, a lavori ultimati, trovò la città in preda ad un festoso e collettivo delirio per l'abbondante acqua che, proprio in quel giorno, iniziò a fluire nei canali fatti appositamente costruire.

Nulla pretese lo scienziato parigino per quell'opera e la cittadinanza, riconoscente, volle dedicargli un'iscrizione:

*Non erat ante fluens populis sitientibus unda
Ast dedit eternas arte Cupletus aquas*

Ecco come, nel medesimo testo, sono ricordati i principî illustrati da Couplet: “. . . In una infinità di luoghi della Terra corrono vene d'acqua . . . Se queste acque trovano delle terre sabbiose, esse si infiltrano attraverso di esse e si perdono; occorrono dei terreni che le fermino, come sono i letti di argilla. Esse [acque] sono in maggior quantità secondo la disposizione dei terreni. Se, per esempio, una grande pianura ha pendenza verso una costa, contro la quale termina, tutte le acque che la pianura riceverà dal cielo saranno obbligate a colare verso questa costa, che maggiormente le raccoglierà ed esse si troveranno in abbondanza al suo piede. Così la ricerca e la scoperta delle acque dipende da un esame molto preciso ed approfondito dei terreni, serve un colpo d'occhio esatto e guidato da una lunga esperienza. “. . . ecco le prime osservazioni e le prime applicazioni di una nuova scienza: l'Idrogeologia.

Procedendo nell'analisi della Scuola Francese di Idraulica del XVIII siècle, incontreremo molti personaggi che abbiamo già richiamato nel precedente Capitolo 10, dedicato ai primi passi compiuti in Idrodinamica nello studio delle ruote idrauliche.

Tra questi, ecco Bernard Forest de Bélidor (Parigi 1693 – 1761), che occupa un posto singolare perché fu il primo a concepire trattati tecnico/scientifici quali compendî di teoria e pratiche applicazioni, organizzati con formule, esempi, tabelle, illustrazioni, esemplificazioni dei problemi e relative risoluzioni; con lui nacquero così i primi *Manuali*.

Di Bélidor qui citiamo nuovamente, ed a tal proposito, la sua “*Architecture hydraulique*.”, in quattro volumi, pubblicata a Parigi tra il 1737 ed il 1753, che descrive lo stato dell'arte dell'Ingegneria Idraulica; di notevolissima qualità, nel testo e soprattutto nelle rappresentazioni grafiche, questo manuale costituì un riferimento che influenzò grandemente e per lungo tempo il modo di stendere e rappresentare le ricerche tecniche e scientifiche. Bernard Forest de Bélidor oltre che un ottimo scienziato fu anche, utilizzando un termine moderno, un eccellente divulgatore.

Henri de Pitot (Aramon-Gard 1695 – Tolosa 1771), il cui nome è legato alla terminologia strumentale, fu un contemporaneo di Bernard Forest de Bélidor.

Nato ad Aramon, nel sudovest della Francia, giovane molto promettente, divenne, attorno ai vent'anni, un appassionato studente delle scienze fisiche e matematiche alla scuola di Réamur a Parigi. Nel 1740 tornò alla natia provincia della Linguadoca, come Ingegnere Capo e Sovrintendente del *Canal du Midi*, dove rimase per il resto della sua vita, durante la quale curò la realizzazione di molte opere idrauliche: drenaggi di paludi, ponti ed acquedotti, argini e difese fluviali per contenere le esondazioni.

A supporto delle ricerche in Idraulica, Henri Pitot si applicò alla Geodesia, all'Astronomia, alla Matematica, alla Medicina; condusse anche studi di ingegneria navale che gli valsero l'ammissione alla *Royal Society* e alla *Académie Royale des Sciences*, dove, però, i suoi studi sul moto dei fluidi non furono accolti con quella considerazione che ad essi, oggi, riconosce la Storia.

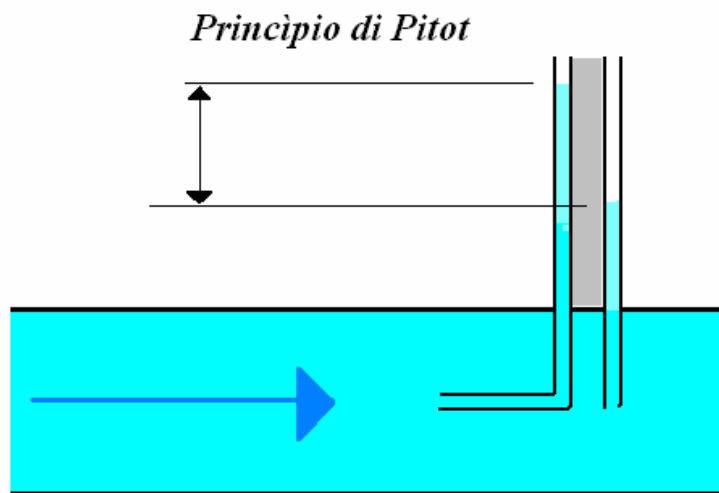


La sua òpera piú rilevante, in Idraulica, fu “*Description d’une machine pour mesurer la vitesse del eaux courantes et le sillage des vaisseaux*”, del 1732, nella quale riferì della sua invenzione: un dispositivo per misurare la velocità del moto dei fluidi, poi detta *Macchina di Pitot*, che sfrutta un principio, ancòr oggi chiamato con il suo nome.

Questo dispositivo consiste in due brevi tubi paralleli montati su un sottile telaio con una scala graduata. Uno dei due tubi è rettilineo mentre l’altro ha un tratto a novanta gradi alla sua estremità inferiore. Immergendo verticalmente i due tubi nell’acqua in movimento, mantenendo quello con il tratto orizzontale opposto alla corrente, lo scienziato francese osservò che in essi il liquido raggiungeva due differenti altezze; con múltiplici prove Pitot riuscì a dimostrare come questa differenza fosse proporzionale alla velocità che l’acqua possedeva nel punto di immersione delle estremità dei tubi.

Pitot stesso si sorprese della semplicità dello strumento:

“*L’idea di questa macchina è così semplice e naturale che il momento nel quale io la concepì còrsi immediatamente sulla riva del fiume per condurre il primo esperimento con un tubo di vetro, ed il risultato confermava completamente le mie previsioni. Dopo questo primo esperimento, potei immaginare quali semplici e nello stesso tempo molto utili cose potevano generarsi ad òpera di così tanti sapienti personaggi che avevano scritto e lavorato sul moto dell’acqua.*”



Nonostante la fortunata applicazione di questo dispositivo (che sfrutta il principio oggi detto *Principio di Pitot*), come spesso avviene per molte invenzioni utili nella pratica, Henri de Pitot interpretò il fenomeno non correttamente:

“*Ora, in accordo con gli esperimenti, l’impatto, in direzione perpendicolare, di un fluido contro un piano resta essenzialmente uguale al peso di una colonna, di questo fluido, che ha per base la superficie dell’impatto e per altezza l’altezza della velocità con la quale questo impatto si realizza. Così se P è la pressione, s^2 la superficie, h l’altezza dovuta alla velocità, e w il peso specifico del fluido, noi abbiamo, approssimativamente:*

$$P = w s^2 h$$

e h può essere determinata dalle leggi della caduta dei gravi.”

Pitot, quindi, neppure si avvicinò alla corretta interpretazione del fenomeno, cosa che poi riuscì a Pierre Varignon (Caen 1654 – Parigi 1722), al quale Pitot stesso riconobbe essere “*. . . il primo che ottenne la gloria di dimostrare questo principio.*”

Sebbene lontano dalla comprensione dei principî della sua scoperta, Henri de Pitot, per semplificare l’uso dello strumento, elaborò una serie di tabelle, senza però procedere ad alcuna misura, per altra via, della velocità che si deducevano dal suo manuale. Ad ogni modo nulla toglie valore all’originalità dell’invenzione, non disgiunta da estrema semplicità; lo stesso suo scopritore

ne dimostrò la grande utilità sia nel determinare le velocità in un canale, sia per misurare la velocità di una imbarcazione.

Sfruttando il *Principio di Pitot* oggi si realizzano numerosi dispositivi; tra i più comunemente noti, detti anche *Tubi di Pitot* o *Pitometri*, per la misura della velocità di oggetti in movimento attraverso fluidi, per valori comunque superiori ad un metro al secondo; a velocità minori, infatti, la precisione della misura cala bruscamente. Il Tubo di Pitot, alle alte velocità, è lo strumento più usato; accessorio indispensabile su tutti i tipi di aeromobili, sulle macchine di Formula Uno, . . .

La risoluzione del problema di misurare la velocità dei fluidi in movimento si unisce, indissolubilmente, all'analisi della resistenza al moto stesso: infatti, la velocità calcolata teoricamente è maggiore di quella misurata nella realtà, còmplici le forze che ad essa si oppongono, prodotte dal tipo di fluido e da numerose condizioni al contorno: il tipo di moto; la natura e lo stato delle pareti della condotta o dell'álveo (in un ùnico tèrmine: le condizioni della *sezione idraulica*); la stessa velocità; l'andamento del percorso; le irregolarità improvvise (spigoli, diramazioni, cambiamenti della stessa sezione idraulica, ostacoli, . . .).

Secondo il *Principio di reciprocità*, per la prima volta enunciato da Isaac Newton (Capitolo 11), le medésime considerazioni si possono condurre, *mutatis mutandis*, per un oggetto che si muova in un fluido in quiete: l'oggetto in movimento incontra una resistenza dovuta, oltre che alle caratteristiche del fluido attraversato, ai proprî peso, forma, natura della superficie.

Troviamo lo stesso problema, semplicemente con 'segno opposto', nel caso in cui l'oggetto sia fermo ed immerso in un fluido in movimento.

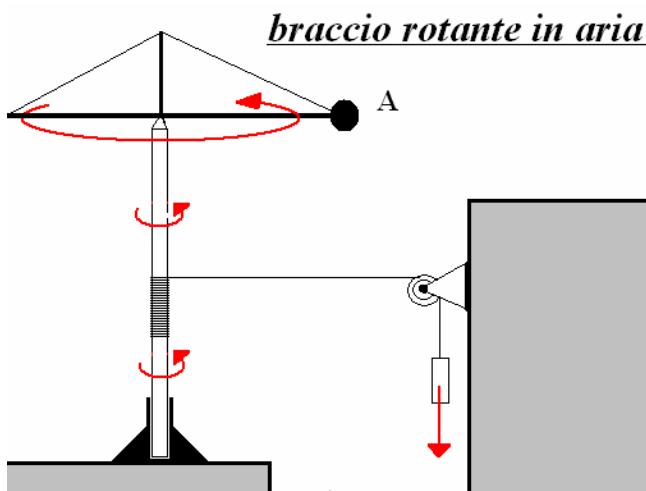
Nella corrente di un fluido, nello scorrere dell'acqua numerosissime sono le variabili che si oppongono al moto, o, meglio, che càusano la dissipazione di una parte dell'energia contenuta nel fluido all'inizio del movimento. Prove sperimentali ed analisi tèoriche, nel XVIII sécolo, furono i nuovi e necessarî strumenti per individuare le soluzioni al problema che, in alcuni casi, è ancòr oggi oggetto di studio, sia nei liquidi che nei gas, cioè, rispettivamente, in Idrodinàmica ed in Aerodinàmica.

All'inizio del XVIII sécolo erano disponibili tre métodos sperimentali per misurare la resistenza al moto dei corpi:

- per analogia con la misura del tempo di caduta dei corpi pesanti (*dei gravi*), originato dalla Scuola di Galileo Galilei e seguito da Isaac Newton;
- l'analisi della fase di risalita nel moto pendolare, smorzata dalla resistenza del fluido nel quale il péndolo oscilla;
- lo studio sperimentale del comportamento di corpi immersi in acqua corrente, utilizzato per primo da Edme Mariotte.

Nel Settecento fu introdotto un altro método, detto '*del braccio rotante*' introdotto, pare indipendentemente, da due inglesi: Rouse di Harborough e Benjamin Robins (Bath 1707 – Madras 1751), inventore, nel 1742, del *Péndolo Balistico*, strumento atto a misurare la velocità di un proiettile, elemento essenziale per gli studi della nuova scienza, detta, appunto, Balistica, disciplina nella quale lo stesso Robins fu uno dei pionieri. In questo, Robins per primo osservò la deviazione laterale che subivano le traiettorie dei proiettili e la attribuì, erroneamente, al moto di rotazione su se stessa della palla ed anche alla resistenza dell'aria.

Il *Braccio Rotante* di Benjamin Robins fu presentato alla *Royal Society* nel 1746; costituito da un braccio lungo quattro piedi (pari a metri 1,219) in grado di ruotare attorno ad un asse verticale grazie ad una corda, una puleggia ed un peso in caduta.



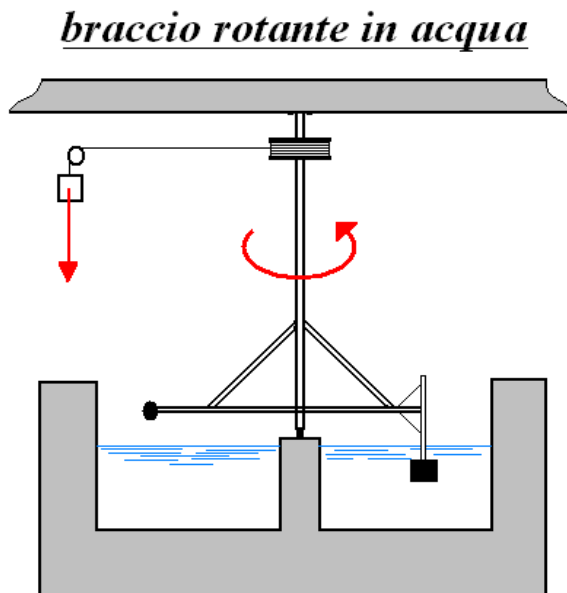
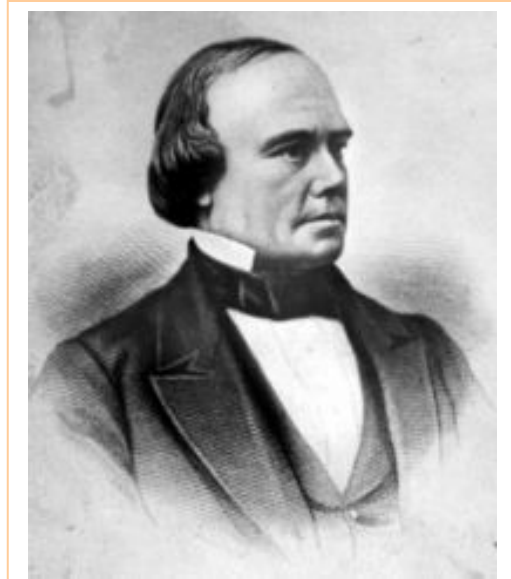
Lo strumento, utilizzando pesi diversi sino ad ottenere la velocità costante di rotazione, permise all'inglese di determinare la resistenza al moto del braccio al quale era applicato un corpo.

Una volta definito il peso che assicurava al braccio una velocità di rotazione costante, l'inglese applicò alla sua estremità oggetti dello stesso peso e della medesima posizione del baricentro ma di differente forma, al fine di indagare come quest'ultima influisse sulla resistenza al moto nel fluido nel quale essi avanzavano,

grazie al moto del braccio stesso, soprattutto nell'aria e nell'acqua. Adeguando il peso in caduta sino ad ottenere la velocità costante di rotazione, Benjamin Robins poté così giungere alle prime corrette valutazioni sull'importanza della forma dei corpi che si muovono in un fluido, sia esso liquido o gassoso.

Il *Braccio Rotante*, così, fu utile in Idraulica e nella nascente Aerodinamica ma, per quanto più interessava lo scienziato inglese, nella Balistica.

Gli effetti della resistenza al movimento di un fluido erano di particolare interesse non soltanto



all'interno delle tubazioni, per la prima volta sperimentalmente indagati dai Couplet, ma anche nel caso di correnti a pelo libero nei canali artificiali, potendosi essi intendere quali casi particolari dei più complessi corsi d'acqua naturali. Proprio al séguito delle prime osservazioni di Idraulica Fluviale, vennero condotti iniziali sforzi nella Scuola Italiana, dove si era giunti ormai alla consapevolezza che la resistenza al moto, in correnti a pelo libero, fosse uno dei principali fattori nel determinare le caratteristiche della corrente (altezza e velocità, quindi portata).

Ma i primi significativi contributi non vennero, nel XVIII sécolo dall'Italia.

In un documento del 1749, pubblicato da Cornelius Velsen ad Amsterdam, si giunse alla conclusione che la velocità fosse proporzionale alla radice quadrata dell'inclinazione dell'alveo, ovvero della pendenza del suo fondo; l'affermazione era corretta ma priva di dimostrazione perché

*Misura della velocità e della perdita di energia nel moto:
le prime prove sperimentali*

basata, come spesso in quel periodo, sull'impropria applicazione della legge di Torricelli sull'efflusso, che manteneva ancora una notevolissima influenza nella scienza dei fluidi.

In Germania, l'ingegnere tedesco Albert Brahms scrisse nel suo "*Anfangs-Gründe der Deiche und Wasserbaukunst*", pubblicato in Aurich-Hannover nel 1757, che l'azione di contrasto al movimento di un liquido era non soltanto determinata dalla gravità ma anche proporzionale al quadrato della velocità; in questa corretta direzione, però, il tedesco non andò oltre.

Di Albert Brahms è importante ricordare la sua formulazione di una semplice relazione empirica che consentiva di calcolare, in un corso d'acqua con alveo naturale, il valore della velocità al quale aveva inizio il trascinamento dei sedimenti del fondo e delle sponde: questa espressione, primo prodotto nello studio del *trasporto solido* dei liquidi in movimento (aspetto relevantissimo nell'Idraulica Fluviale e Marina), mantiene tutt'oggi una propria validità.

Come spesso avviene nella ricerca, molti tentano di interpretare un fenomeno ma uno solo trova la via giusta o, quantomeno, apre la strada sulla quale poi gli altri maturano i progressi della conoscenza.

Nel campo della resistenza al moto dei fluidi questo merito va senza dubbio all'ingegnere francese Antoine de Chézy (Châlons-sur-Marne 1718 – Parigi 1798), anche se questo relevantissimo contributo alla scienza Idraulica non gli valse il riconoscimento che avrebbe meritato durante la vita terrena.

Chézy nacque a Châlons-sur-Marne da una famiglia non nobile, sebbene il cognome sia preceduto dalla preposizione 'de', probabilmente aggiunta su iniziativa del figlio. Studiò e poi insegnò nella scuola della locale parrocchia, poi, all'età di trent'anni (1748), ricevette l'incarico di insegnamento nella nuova Scuola Federale che fu più tardi chiamata la *Ecole des Ponts et Chaussées* (che abbiamo ricordato nel Capitolo 8), nella quale ottenne molti riconoscimenti, raggiungendo crescenti posizioni di responsabilità in quella struttura.

Antoine Chézy lavorò al fianco di Jean Rodolphe Perronet (Suresnes 1708 – Parigi 1794) fondatore e primo Direttore della *Ecole des Ponts et Chaussées*, Ispettore Generale delle Strade, nel 1750, e poi Primo Ingegnere Reale, nel 1763, realizzando grandi opere civili, in particolare i ponti di Neully e della Concorde, sulla Senna, e di Saint-Maxence sull'Oise, ma anche opere idrauliche, come il grande canale navigabile della Borgogna.

Nel 1790, Chézy si ritirò dalla *Ecole des Ponts et Chaussées*, trovandosi in condizioni di estrema povertà e fu soltanto nel 1797, un anno prima della morte, che ottenne nuovamente la carica di insegnante in questa istituzione, grazie alle insistenze di uno dei suoi studenti, il barone Gaspard François Claire Marie Riche de Prony, scienziato che incontreremo tra poco.

Antoine Chézy si trovò coinvolto, nel 1768, assieme al Perronet, nell'incarico, assegnato dalla *Académie royale des sciences*, di garantire maggior apporto d'acqua alla città di Parigi, in crisi a causa dell'ormai insufficiente sistema di approvvigionamento. Ai due studiosi dell' *Ecole des Ponts et Chaussées* si propose di utilizzare le



acque del fiume Yvette, che scorre in posizione elevata rispetto al centro urbano. Fu compito specifico di Chézy il determinare la sezione ed il carico idraulico del nuovo canale.

Quanto esistente nella letteratura idraulica non forniva alcun elemento per progettare con sicurezza un canale artificiale in grado di assicurare il trasporto della portata desiderata e non era certo il caso di procedere con tali ampie possibilità di errore: quando un canale è ormai scavato, è ben difficile, e soprattutto costoso, doverlo modificare in ampiezza e, soprattutto, nella pendenza!

Il compito, ormai, era assegnato ed allora Chézy costruì un modello in scala ridotta di un canale, lungo duecento metri, largo 1,3 metri e profondo 52 centimetri, con il quale condusse numerosi esperimenti, individuando i parametri che ne determinavano la quantità d'acqua trasportata, cioè la portata. Concluse, così, che qualsiasi formula dovesse esprimere la portata di un canale dovesse contenere la velocità della corrente, l'inclinazione, l'area della parte di sezione occupata dall'acqua (detta *Sezione Bagnata*) ed il perimetro della stessa sezione, cioè la lunghezza delle sponde e del fondo della Sezione Bagnata (detto, quindi, *Perimetro Bagnato*).

Tutti gli esperimenti condotti furono da Chézy raccolti in una relazione che non fu più rinvenuta negli archivi della *Ecole des Ponts et Chaussées*; è certo, però, che venne consegnata al Perronet.

Nella *Ecole des Ponts et Chaussées* si conservano molti altri documenti di Antoine Chézy, nei quali si può trovare il seguente passo:

“Quando si deve condurre una corrente d'acqua ed anche provvedere acqua in un sito dove non ce n'è, oppure drenare un terreno dove ve ne è troppa, quasi sempre bisogna realizzare la più grande corrente con la minor pendenza possibile.

Dopo aver disegnato un canale, e dopo averne determinato la giusta sua pendenza, è assai interessante conoscere se questo canale sarà sufficiente per l'acqua che si vuole farvi passare. Per questo è necessario conoscere la velocità che l'acqua assumerà nel canale che si è assunto con la pendenza uniforme. Questa non è una questione di velocità iniziale o momentanea, che può essere molto grande a causa di un alto carico dell'acqua Qualunque sia la velocità iniziale, essa diminuisce abbastanza rapidamente per ridursi ad una uniforme e costante velocità che è dovuta alla pendenza del canale ed alla gravità, l'effetto delle quali è contrastato dalla resistenza dell'attrito contro la sezione del canale.

E' essenziale conoscere questa velocità almeno approssimativamente.

Il problema così proposto presenta in sé medesimo la soluzione, perché è evidente che la velocità dovuta alla gravità, che agisce continuamente (escludendo quella che può venire da qualche altra causa e che, presto esaurita, non agisce abbastanza a lungo nel nostro problema), è solo uniforme quando non è più a lungo accelerata, e la gravità non può cessare di accelerare eccetto quando la sua azione sull'acqua sia uguale alla resistenza causata dalle pareti e dal fondo del canale; ma la resistenza è proporzionale al quadrato della velocità, perché prodotta dal numero e dalla forza delle particelle che collidono in un dato tempo; è anche proporzionale alla parte del perimetro della sezione della corrente che tocca il contorno del canale. Si può trascurare la resistenza dell'aria contro la superficie libera.

Chiamando la velocità V e la parte del perimetro P la resistenza per attrito sarà così come VVP [‘come’ è da intendersi in ‘proporzionale a’, ndr].

Da un altro lato, l'effetto della gravità è come l'area della sezione della corrente, e come la pendenza del canale o come l'altezza che discende da ogni passo di pendenza. Chiamando così l'area della sezione A e la pendenza del canale H , l'effetto della gravità sarà come AH .

Così supponendo, se da una buona osservazione si conosce:

- la pendenza del canale H
- l'area della sezione della corrente A
- la velocità della corrente V
- il perimetro bagnato P

dovrebbe essere facile trovare la velocità v di un altro canale del quale si conosce:

- la pendenza h
- l'area della sezione a
- e le parti fisse del perimetro p

perché si avrebbe la proporzione:

$$VVP/AH = vvp/ah$$

pertanto

$$VVPah = vvpAH$$

e quindi

$$v = V \cdot \sqrt{\frac{Pah}{pAH}}$$

Si vede che per poter usare tale formula si deve disporre di una osservazione nella quale ogni cosa sia conosciuta Potrebbe inoltre essere interessante avere simili osservazioni in differenti torrenti e correnti, ma è importante notare che queste osservazioni richiedono la grandissima cura e che è difficile eseguirle con sufficiente precisione; se ne può fare affidamento soltanto se sono condotte da persone conosciute e della massima scrupolosa attenzione.”

Questa prima formula di Chézy nasce da un processo di comparazione tra un canale del quale tutto è noto ed un altro, in fase di progettazione, del quale si ipotizzano tutte le grandezze geometriche. Non c'è, in questa espressione, alcun fattore che si riferisca alla effettiva resistenza al moto, prodotta sia dalla stessa velocità che dalla natura delle pareti.

Antoine Chézy applicò il metodo di misura anche ai casi di flussi nei tubi, rimarcando la proporzione dell'area della sezione trasversale con il perimetro del tubo.

Malgrado la semplicità e la logicità dell'analisi di Chézy nulla di essa compare nel rapporto finale di Jean Rodolphe Perronet, che si limitò ad utilizzare i soli risultati ottenuti dal collega.

Poi giunse la Rivoluzione e . . . il grande progetto venne abbandonato.

Il manoscritto di Chézy fu riportato alla luce soltanto nel 1804, ad opera di due ingegneri francesi, Girard e Prony, ma trovò ben maggior interesse in Germania piuttosto che in Francia, e non fu pubblicato che alla fine dell'Ottocento, prima in Europa e poi negli Stati Uniti d'America, a cura del già ricordato Clemens Herschel.

Il grande merito di Antoine Chézy, nel campo dell'Idraulica, è racchiuso nell'intrinseco valore della sua analisi, che indicava corretti principi, piuttosto per l'influenza, scarsa in verità, che ebbe, nell'immediato, sullo sviluppo dell'Idraulica. Legare la portata di un canale a pelo libero alla velocità, all'inclinazione, alla sezione bagnata ed al perimetro bagnato fu il penultimo passo per giungere alla méta: un passo certo importante.

Chézy fu anche inventore di uno strumento topografico, detto *Livello di Chézy*, che perfezionò in modo significativo la precisione dei rilievi altimetrici, fondamentali nella costruzione dei canali.

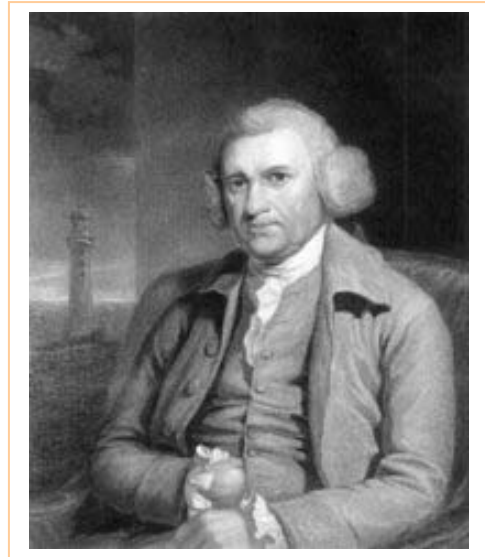
Il titolo di *Ingegnere* riconosciuto presso la *Ecole des Ponts et Chaussées* non era tale in Inghilterra, dove era soltanto utilizzato per indicare il lavoratore che operava direttamente nella costruzione dei manufatti.

Fu così che John Smeaton (Austhorpe-Leeds 1724 – 1792), già incontrato nel Capitolo 10, è oggi considerato il capostipite dell'Ingegneria inglese alla quale, grazie al suo esempio, venne riconosciuta la dignità di professione a sé stante.

Nato a Leeds da padre avvocato, formatosi necessariamente da autodidatta, John Smeaton poté presentare, all'età di ventisei anni, il suo primo lavoro alla *Royal Society* che lo premiò con la medaglia d'oro, nove anni dopo, quando illustrò la sua quarta opera.

Smeaton deve certo la sua fama alla ricostruzione del faro di Eddystone Rock, particolarmente impegnativa per la profondità del mare e la violenza delle acque, occasione che gli permise di condurre importanti studi sui cementi idraulici. Realizzò ponti, tra i quali quello ad arco di Perth, e porti.

Nel campo delle opere idrauliche, progettò il canale Forth Clyde ed anche reti di drenaggio di terre paludose prossime al mare. Per primo propose l'utilizzo del fenomeno detto del 'Colpo d'ariete', per sollevare l'acqua, chiamato poi 'Ariete idraulico' da Joseph Michel de Montgolfier (Vidalon-les-Annonay 1740 – Balaruc-les-Bains 1810), che realizzò per la prima volta, nel 1796, un sistema di pompaggio sfruttando questo fenomeno. Joseph Michel de Montgolfier deve, a sua volta, imperitura e mondiale fama, assieme al fratello Jacques-Etienne, per l'invenzione del pallone aerostatico, poi chiamato, in loro onore, mongolfiera.



La memoria di Smeaton, premiata dalla *Royal Society* nel 1759, “*Una ricerca sperimentale sulla naturale potenza dell’acqua e del vento per muovere i mulini ed altre macchine, dipendenti dal moto circolare.*” è di particolare interesse, perché contiene indicazioni e raccomandazioni per la realizzazione dei modelli con i quali poter condurre prove in laboratorio che possano, poi, essere rappresentative della realtà del fenomeno studiato.

Ecco una parte della sua illustrazione:

“Quanto ho comunicato su questo argomento fu originariamente dedotto da esperimenti fatti lavorando su modelli, che io considero i migliori strumenti nelle ricerche in meccanica.

Ma in questo caso è assolutamente necessario distinguere le caratteristiche che collegano il modello alla macchina in scala reale, altrimenti il modello può allontanarci dalla verità piuttosto che condurci verso di essa.

È evidente che un buon modello può meglio illustrare il fenomeno che si vuole studiare. Infatti, sebbene si debba utilizzare in questo la massima prudenza, la miglior struttura di macchine non può essere completamente accertata, se non utilizzando modelli costruiti nelle corrette proporzioni. È per questa ragione dunque che i modelli e gli esperimenti dei quali ho parlato, furono realizzati tra il 1752 ed il 1753; oggi giungo ad illustrarli alla Royale Society dopo aver raccolto considerazioni derivate dalla pratica applicazione dei risultati, in una varietà di casi e per diversi scopi; così come sono in grado di assicurare d’aver trovato per tutti una spiegazione.”

John Smeaton, lo abbiamo già visto al Capitolo 10, condusse numerosi e vari esperimenti su modelli di ruota idraulica, mossa dall’acqua che la lambiva nella parte inferiore, e di ruote di mulini a vento, deducendo, dai risultati, le seguenti conclusioni:

“Mantenendo uguale il carico virtuale od effettivo, l'effetto sarà proporzionale alla quantità di acqua utilizzata.

A parità di acqua utilizzata, l'effetto sarà proporzionale all'altezza del carico virtuale od effettivo.

A parità di acqua utilizzata, l'effetto sarà proporzionale al quadrato della sua velocità.

Mantenendo uguale l'apertura, l'effetto sarà prossimo al cubo della velocità dell'acqua.”

Per i suoi studi sui mulini a vento, John Smeaton usò una ingegnosa combinazione dei bracci rotanti di Rouse e di Robins. Una serie di nove massime, dedotte da questi test, ebbero la stessa validità generale di quelle sulle ruote idrauliche.

È probabilmente più che una mera coincidenza il fatto che la Francia assunse la sua prevalenza negli esperimenti di Idraulica proprio intorno al periodo della Rivoluzione.

Molti dei responsabili di questo predominio furono, a dire il vero, vittime piuttosto che sostenitori della sollevazione politica e sociale; tuttavia la scienza francese nel suo complesso non sembrò soffrirne in modo rilevante. La *Académie royale des sciences* fu sciolta nel 1793, ma due anni dopo fu fondato l'*Institute de France* che ne prese il posto, assicurando la continuità alla Comunità Scientifica francese.

Uno dei più rilevanti prodotti del diffuso spirito di rinnovamento fu la creazione del Sistema Métrico Decimale dei pesi e delle misure, ma la tensione al rinnovamento creò anche occasione di rifugio per molti scienziati, assorbiti nelle organizzazioni alle quali tale rinnovamento era affidato.

Jean Charles de Borda (Dax, Landes 1733 – Parigi 1799) fu un caso tipico, per quel periodo, di ingegnere/scienziato. Egli nacque a Dax e fu educato nel convento gesuita di La Flèche, il luogo delle precoci esperienze di Mersénne e di Descartes.

Dopo un breve intervallo come istruttore di matematica, cominciò la sua carriera professionale come ingegnere militare, dedicandosi per primo alla costruzione di porti, poi all'analisi dei problemi balistici ed infine agli esperimenti in Idraulica ed in macchine idrauliche.

Già ricordato, nel Capitolo 10, per il suo contributo allo studio delle ruote idrauliche, qui è necessario ricordarlo perché, dopo aver iniziato, a soli vent'anni, i suoi primi esperimenti di Idraulica nel 1763 Borda presentò alla *Académie royale des sciences* il documento “*Expériences sur la résistance des fluides.*”, con il quale descrisse i test con i

Bracci rotanti, ideati da Benjamin Robins, sulla resistenza al moto dell'aria; del 1767 è un documento, con il medesimo titolo, che descrive brevemente analoghe sperimentazioni nell'acqua.

Per gli studi sulla resistenza, Borda applicò ai *Bracci rotanti* non solo sfere e pale, come era pratica comune, ma anche prismi, cilindri, coni e cunei. I valori assoluti che calcolò sono maggiori di quelli oggi accertati, ma le sue valutazioni, stante la precisione degli strumenti utilizzati, erano corrette, con ogni fluido che utilizzò.



Borda così seppe verificare la ormai diffusa teoria che lo sforzo di trascinamento di un corpo immerso in un fluido varia con il quadrato della velocità relativa, ed inoltre dimostrò che esso può essere maggiore in presenza di moto ondoso in superficie; non fu però in grado di legare il valore trovato della resistenza con l'area della sezione trasversale e con la densità del fluido.

Sebbene provò, in modo conclusivo, che la variazione della forma del corpo ha un pronunciato effetto sullo sforzo di trascinamento – in opposizione alla teoria che era a quel tempo in voga – condusse l'erronea tesi che una sfera ed una semisfera con la parte convessa verso la corrente, di stesso diametro, provocavano la stessa resistenza al trascinamento, ignorando l'influenza della parte posteriore, cioè quella che non si oppone direttamente alla corrente, che oggi sappiamo essere assai importante nell'aerodinamicità (o idrodinamicità) del profilo.

La validità delle ricerche di Borda non gli valse riconoscimenti, né immediati né successivi. Il suo nome, tuttavia, è oggi associato in diversi aspetti dell'Idraulica per scoperte contenute nel suo lavoro, presentato nel 1766 alla *Académie royale des sciences*, sotto il titolo “*Mémoire sur l'écoulement des fluides par les orifices des vases.*”. In questo documento cercò, sia teoricamente che sperimentalmente, di rimuovere alcune discrepanze tra le analisi di Daniel Bernoulli e di d'Alembert:

“... Non si può attribuire un eccessivo mérito ai due lavori che ho appena citato, ma deve essere riconosciuto che la soluzione trovata da uno non è sempre in accordo con l'altro; resta ancora una grande incertezza in questa parte delle teoria dei fluidi; e trovo stupefacente che alcuno non abbia ancora tentato di rimuovere tale incertezza, esaminando più particolarmente le ipotesi e l'uso dei principii sui quali le soluzioni sono fondate.”

Borda per primo esaminò la corrente suddividendola in elementi tubolari longitudinali, ai quali attribuire caratteristiche medie comuni, e non dividendo il flusso in sezioni normali alla corrente, come avvenuto sino ad allora.

Egli, inoltre, per primo chiarì che in un fluido in movimento esiste una costante e continua dissipazione dell'energia inizialmente contenuta nel fluido stesso (allora detta Momento o, dai leibniziani, *Vis Viva*, oggi: energia cinética).

“Il moto dell'acqua . . . può essere considerato come un sistema di corpi solidi che si muovono gli uni contro gli altri in infiniti modi; ora noi sappiamo che, in base al principio delle forze vive, il moto dei corpi si mantiene soltanto se la loro mutua interazione produce minimi effetti ma che c'è sempre e necessariamente una perdita di forza viva nel sistema appena un corpo si scontra con un altro.”

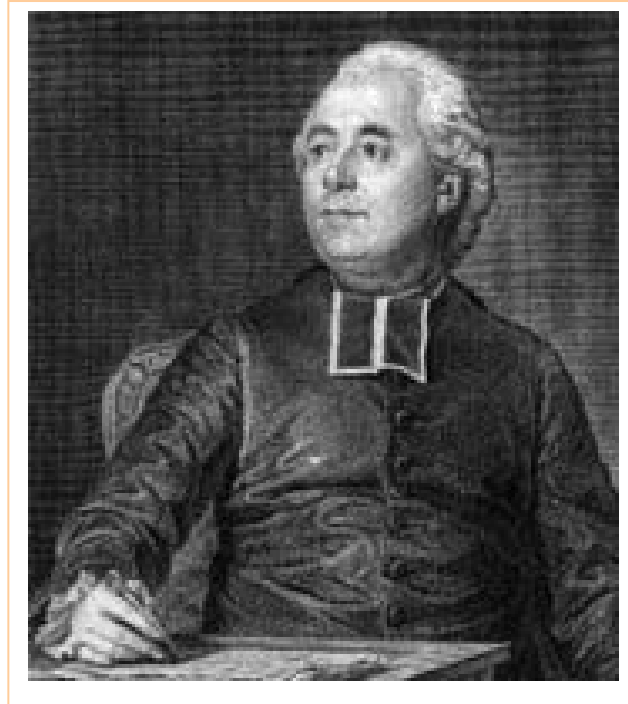
Trattando poi del caso di una tubazione che subisce un improvviso allargamento della sezione, Jean Charles de Borda dimostrò esservi, in quel punto, una perdita di energia concentrata (cioè una Perdita di carico) pari a:

$$\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

Nella quale V_1 è la velocità di arrivo, nella sezione minore, e V_2 quella successiva all'allargamento improvviso. Tale perdita, concluse Borda, è uguale a quella subita da una corrente che da una tubazione si immette in un serbatoio in un punto sommerso, cioè sotto *Battente*. Ancora oggi questa espressione è detta *Formula di Borda*.

Importantissimo è il notare che Jean Charles de Borda fu il primo idraulico che espresse esplicitamente il termine $2g$ in una relazione di flusso.

Charles Bossut (Tartaras – Saint Étienne 1730 - Parigi 1814), un contemporaneo di Borda, nacque in un paese prossimo a Lione città dove, rimasto orfano all'età di sei anni, fu educato nel convento dei Gesuiti, divenendone poi monaco e, in seguito, Abate. Il suo precoce talento lo portò a collaborare con Clairaut e d'Alembert; a ventidue anni, nel 1752, ottenne l'incarico quale professore di Matematica nella Scuola di Ingegneria di Mézières.



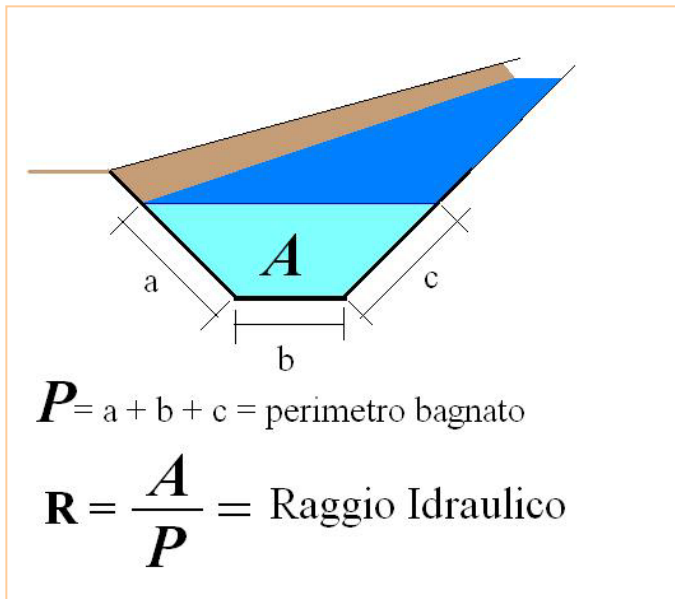
Bossut condivise con Daniel Bernoulli il premio concesso dall'Accademia di Lione e con Euler il premio della *Académie royale des sciences* di Parigi, nella quale fu accolto nel 1768.

Grazie ai suoi studi in Idrodinamica al *Louvre* fu creata, appositamente per lui, una cattedra dove poté insegnare questa branca dell'Idraulica.

Durante la Rivoluzione Francese, Charles Bossut perse entrambe le cariche, alla *Académie* ed al *Louvre*; rinunciò allora all'abito talare e si ritirò temporaneamente dalla vita pubblica; in seguito riapparve, divenendo sottoscrittore della carta costitutiva dell' *Institut de France*, nel 1803, e professore allo *Institut Polytechnique*.

Tra i suoi scritti scientifici vi furono: un "*Cours complet de mathématiques*", pubblicato per la prima volta nel 1765, comprendente sette volumi di Aritmetica, Álgebra, Geometria, Meccanica, Idrodinamica e Cálculo; un libro sulle opere di Blaise Pascal; una Storia della Matematica.

Il principale contributo di Bossut all'Idraulica si realizzò nell'intuire che la resistenza al moto, prodotta dalla forma della sezione in un canale a pelo libero, dipendeva anche da una nuova grandezza: il rapporto tra il valore della superficie della *Sezione Bagnata* A e la misura del *Perimetro Bagnato* P , che Bossut indicò con R e chiamò *Raggio Idraulico*; d'ora innanzi grandezza tipica e frequentissima nell'Idraulica.



Assai importante fu, dello scienziato e professore francese, l'attività dell'insegnamento, che considerò, durante il lavoro alla Scuola di Ingegneria di Mézières, quasi come una missione:

"*Insegnare ai giovani ingegneri la meccanica dei fluidi è necessario per la loro professione*".

All'interno del corso di Matematica, Bossut pubblicò, nel 1771, un lavoro in due volumi, "*Traité théorique et expérimental d'hydrodynamique*", che subì ampliamenti successivi nel 1786 e

poi nel 1795. Nonostante l'esplicito riferimento, nel titolo, all'Idrodinamica, l'argomento principale era riferito a problemi di Idraulica.

Il primo volume era originale soltanto nell'organizzazione dei temi trattati, ma produsse un'eccellente nuova rappresentazione dello stato della conoscenza in quel tempo. Il secondo volume, invece, contiene dati sperimentali, spesso in tutto nuovi e di notevole valore, alcuni ancora validi oggi; sono rilevanti anche le sue considerazioni sulle difficoltà negli esperimenti a larga scala che però mostravano una maggior affidabilità rispetto a quelli a scala troppo ridotta; a tal proposito, annotò:

“Tra queste due sponde, c'è un corso mediano da considerare: operare a scala sufficientemente larga da rendere gli effetti distinti, senza eccedere i limiti compatibili con la precisione.”

Nel 1775 Bossut, d'Alembert ed il marchese di Condorcet furono incaricati dal Governo del re di eseguire una serie di *test* sulla resistenza al moto di oggetti di varie forme nel loro avanzamento nell'acqua, al fine di raccogliere elementi per la progettazione delle chiglie delle navi.

Per questo scopo, sotto la guida di Bossut, furono fatti studi sull'effetto della forma della prua e sulle relative proporzioni delle sezioni trasversali, utilizzando una chiatta rimorchiata lunga circa trentuno metri, larga circa sedici metri e profonda due. La principale conclusione tratta fu che (come aveva già dimostrato, negli U.S.A., Benjamin Franklin con una chiatta in scala ridotta) la resistenza cresce quanto diminuisce la sezione relativa del canale.

Sebbene Bossut cominciò il resoconto congiunto su questi test con il salace commento *“Nulla mi aspetto dalla mente ristretta di colui che si affida alla sola pratica . . . non esiste scienza senza ragionamento . . .”*, non mancarono conclusioni approssimate e generalizzazioni non corrette dei risultati che ebbero, comunque, influenza sulle scienze per molti anni a seguire:

“Noi abbiamo osservato che dal momento che l'attrito diventa minore la forza mette la nave in moto. Da ciò noi possiamo concludere che la tenacità dell'acqua è estremamente piccola e che la sua resistenza può essere considerata assolutamente nulla in paragone a ciò che è dovuto all'inerzia. Lo stesso è vero dell'attrito dell'acqua sui fianchi e sul fondo della nave. Questo attrito è molto piccolo e non può essere separato da quello dell'elica e dalla resistenza dell'aria.”

Certo maggior successo ebbe, circa venti anni più tardi, il colonnello Mark Beaufoy (1764-1827) che condusse una varietà di test con natanti rimorchiati tra il 1796 ed il 1798 al Greenland Dock, di Londra, per organizzare nuovamente la 'Società per lo sviluppo dell'Architettura Navale'. Non solo Beaufoy investigava gli effetti singoli della forma della prua, della coda, la lunghezza e l'area superficiale, ma le sue misurazioni furono sufficientemente precise da fargli concludere che, come la velocità aumenta: *“l'attrito sempre diminuisce in una più piccola parte del doppio [da 1,71 a 1,82].”*

Un terzo – ma non il meno importante – idraulico francese di questo periodo fu Pierre Louis Georges Du Buat (1734- 1809), noto anche per aver codificato il titolo di studio di Ingegnere.

Nato in una antica famiglia della stirpe dei Tortizambert, della Normandia, acquistò il titolo di conte dopo la morte del suo fratello maggiore. Dopo l'educazione a Parigi, divenne ingegnere a meno di vent'anni, per poi condurre esperienze nel campo dello sviluppo di canali e porti; dal 1761 al 1791 esercitò la professione come ingegnere militare.

Nella seconda parte di quest'ultimo periodo si dedicò a condurre numerosi test di Idraulica con il sostegno del governo del re. Nel 1793, allo scoppio della Rivoluzione Francese, il suo titolo nobiliare, acquisito soltanto due anni prima, gli costò la fuga dalla Francia con tutta la sua numerosa famiglia (ebbe undici figli) con la conseguente confisca di tutte le sue proprietà. Rientrò nel 1802, tornando in possesso di una piccola parte dell'originario patrimonio di famiglia. I suoi ultimi anni furono impiegati nella revisione dei suoi maggiori lavori, in particolare *“Principes*

d'hydraulique”, pubblicato in un volume singolo nel 1779, ampliato nel 1786 e pubblicato postumo in tre volumi nel 1816. La seconda edizione fu tradotta in tedesco ed in inglese, e l'ultima versione ottenne i complimenti da George Washington.

Pierre Louis Georges Du Buat è spesso indicato come il fondatore della Scuola di Idraulica francese anche se, come egli stesso indicò nella prefazione del suo libro, quasi tutto ciò che egli riportò era già noto; la sua òpera fu soprattutto un'azione di riordino e di più chiara ed organica illustrazione.

Le osservazioni introduttive di Du Buat sono infatti divulgative e molte di esse possono essere utilizzate ancòr oggi, ma resta evidente la sua critica nei confronti di una Idraulica ancòra incapace di dare quelle risposte certe a molti quesiti progettuali:

“Si sa che le nostre conoscenze di Idraulica sono estremamente limitate; nonostante molte persone geniali si siano applicate ad esse in tempi differenti, noi siamo ancora, dopo così tanti secoli, in una ignoranza quasi assoluta delle vere leggi alle quali è soggetto il moto dell'acqua; dopo centocinquanta anni è stato appena scoperto, con il sostegno dell'esperimento, la durata, la quantità e la velocità del flusso di acqua che esce da un orifizio.

Tutto ciò che riguarda il moto uniforme dell'acqua sulla superficie della Terra è sconosciuto; e per ottenere una idea di come poco noi sappiamo è sufficiente dare un'occhiata in giro su ciò che non facciamo. Per valutare la velocità di un fiume del quale conosciamo la larghezza, la profondità e l'inclinazione; per determinare quale altezza raggiunge in esso l'acqua quando riceve l'afflusso di un altro fiume; per predire come cala l'acqua se viene estratta una portata da esso; per stabilire la giusta pendenza di un acquedotto perché l'acqua mantenga una certa velocità; oppure per definire la capacità di un canale per portare, data una pendenza, l'acqua necessaria ai bisogni di una città; come definire le sezioni di un fiume nel modo che egli non òperi per cambiare il suo corso nel quale è stato confinato; per calcolare la prestazione di una condotta della quale siano noti la lunghezza, il diametro ed il carico; per determinare quanto un ponte, una diga o una paratoia devono essere alti rispetto al livello dell'acqua di un fiume; per indicare a quale distanza un lago debba essere per predire che la campagna sarà soggetta ad inondazione; per calcolare la lunghezza e le dimensioni di un canale che intenda drenare paludi da consegnare stabilmente all'agricoltura; per stabilire l'efficace forma della bocca dei canali ed alla loro confluenza con i fiumi; per determinare la più vantaggiosa forma da dare agli scafi per solcare le acque con il minimo sforzo; per calcolare la forza necessaria per muovere un corpo che naviga sull'acqua.

Tutti questi problemi, ed infiniti molti altri dello stesso genere, sono ancòra irrisolti: chi potrebbe crederlo? . . . Ognuno ragiona di Idraulica, ma ci sono poche persone che la capiscono . . . Per mancanza di principî, si affrontano progetti il costo dei quali è reale ma il successo è effimero; si portano a fine progetti per i quali lo scopo non viene raggiunto; si caricano lo Stato, le Province ed i Comuni con considerevoli costi, senza ottenere frutti, spesso solo perdite; o, in ultimo, non c'è proporzione tra il costo ed i vantaggi che si riesce ad ottenere.

La causa di tanto grande male, io ripeto, è l'incertezza dei principî, la falsità della teoria che è contraddetta dall'esperienza, la pochezza delle osservazioni condotte sino ad ora, e la difficoltà di condurle bene.”

Il punto di vista di Du Buat fu, così, quello dell'ingegnere idraulico che cerca una concretezza esecutiva che la conoscenza del tempo non garantiva adeguatamente.

Du Buat aveva sperato di trovare negli scritti di Bossut la chiave del problema, ma presto concluse che il materiale era insufficiente; così egli stesso cercò di darsi risposte alle questioni attraverso serie di analisi ed esperimenti basate sull'essenziale equilibrio tra la forza di accelerazione e la resistenza nel moto uniforme, equilibrio che presentò come propria scoperta, sebbene già altri l'avessero individuato, tra i quali il Guglielmini, che Du Buat citò nella prefazione. Non pare che Du Buat fosse giunto a conoscenza delle conclusioni di Antoine Chézy, né del lavoro

che, sulla resistenza al moto, presentò Jean Rodolphe Perronet, che di Chézy riportava i calcoli e le conclusioni.

Anche se Du Buat non riuscì a formulare risposte complete a tutte le questioni da lui stesso poste, molto del suo lavoro resta nuovo ed originale, ed evidente fu l'influenza che produsse sui suoi successori. Per questa ragione è opportuna una dettagliata analisi della seconda edizione del suo libro.

Nella prima parte, dedicata all'analisi della variazione dei fenomeni del flusso in tubazioni ed in canali, Du Buat – come Borda – espresse la velocità dell'efflusso da un orifizio nella forma $V = \sqrt{2gh}$.

Du Buat considerò le perdite di carico in una tubazione in pressione di data lunghezza S , concludendo che esse dovevano essere indipendenti dalla pendenza; perdite che quindi potevano essere analizzate come se la pendenza fosse sempre pari alla variazione di quota dei carichi assoluti, quindi come se si trattasse del caso di un canale a cielo libero; in tale situazione il valore della resistenza era proporzionale al quadrato della velocità ed anche al Raggio Idraulico, definito dal Bossut, attraverso un coefficiente che doveva essere determinato sperimentalmente.

Ma al termine dello studio, i coefficienti correttivi risultarono molteplici e portarono Du Buat a scrivere una formula di tale complessità ed indeterminazione da risultare praticamente inservibile.

Di questa formulazione è interessante notare che Du Buat non inserì alcuna espressione che tenesse conto dell'attrito tra il liquido e la parete bagnata, che dipende dalla grandezza chiamata 'Scabrezza della parete'; l'ingegnere francese, infatti, riteneva che il fluido a contatto con il bordo formasse uno 'strato lubrificante' sul quale la corrente scivolasse senza resistenze di attrito relativo:

“Nel considerare come la stessa acqua prepari la superficie sulla quale scorre si può vedere che pareti di differenti materiali non hanno un'apprezzabile influenza sulla resistenza. Non abbiamo trovato, su tale fatto, variazioni dell'attrito che possono attribuire a questa causa, nei differenti casi quando l'acqua scorre sul vetro, sul piombo, acciaio, legno o altri materiali.”

Questa considerazione è indubbiamente errata, e denuncia l'ancora scarsa precisione negli esperimenti che non consentiva di valutare l'effetto della Scabrezza. In questo, però, Du Buat era influenzato dalla sua convinzione che la viscosità del fluido agisse soltanto nel determinare le differenti velocità relative tra i differenti punti della Sezione Bagnata, senza produrre perdita di energia.

Nonostante la complessità, Du Buat applicò la sua formula a vari problemi delle tubazioni e delle correnti a pelo libero, arricchendo i calcoli con osservazioni condotte direttamente ed indirettamente; produsse conseguentemente una gran mole di dati sulla relazione tra i valori di velocità in superficie ed in prossimità del fondo della corrente, ipotizzando che la velocità, tra questi due estremi, variasse in modo lineare.

Lavorando su altri problemi di Idrodinamica, Du Buat ampliò le analisi del Poleni sul coefficiente degli scaricatori delle dighe, calcolandolo pari a circa 0,65; per far questo, considerò lo spessore dell'acqua che tracima sulla soglia dello scaricatore come fosse composta di due strati sovrapposti: il superiore, da considerare come una soglia sfiorante; la parte inferiore come un'apertura rettangolare sotto battente, caso nel quale calcolò anche la perdita di carico.

Du Buat inoltre:

- elaborò un profilo idrodinamico per le pile e per le spalle dei ponti, calcolando il minimo effetto della resistenza alla corrente;
- definì criteri per individuare il miglior profilo delle chiglie delle navi, perché avessero la minima resistenza al moto;

- elaborò una procedura grafica per tracciare il *Profilo di Rigurgito*, cioè la maggior altezza che l'acqua di un canale deve raggiungere, propagandosi all'indietro, contro corrente, per vincere la resistenza creata da un ostacolo posto nella sezione, quale, ad esempio, le pile di un ponte che, di fatto, riducono l'area di passaggio. In questo caso l'acqua, per poter passare con la medesima portata che giunge sino a quella strozzatura, aumenta il livello appena prima di essa, aumentando il carico idraulico sino al valore che le consente di avere sufficiente energia per superare l'ostacolo. Il sovrizzo dell'acqua si ripercuote all'indietro nella corrente, ed è importante perché può spingersi, in caso di deboli pendenze (qualche unità per mille) anche per chilometri. Se l'aumento di livello, in qualche punto di quel lungo tratto, supera l'altezza delle sponde . . . sono guai seri!

Du Buat attribuiva maggior importanza alla seconda parte del suo '*Principes d'hydraulique*', dove presentava i dati sperimentali. In effetti questi dati – assieme a quelli già ottenuti dai Couplet e da Bossut – vennero utilizzati come base per molte formulazioni della resistenza, elaborate dai suoi successori.

Furono circa duecento gli esperimenti condotti da Du Buat con: tubi di vario diametro e pendenza, curvi, sistemi di tubazioni, canali rettangolari e trapezoidali, correnti in alvei naturali, serbatoi e ponti.

Due gruppi di queste osservazioni sono particolarmente interessanti dal punto di vista storico:

- i dati delle velocità della corrente a diverse profondità, misurate con un dispositivo ad immersione del quale, però, on abbiamo informazioni certe sul principio del suo funzionamento;
- le valutazioni sulla relazione tra la velocità della corrente e la sedimentazione del materiale in essa trascinato, determinando il valore della velocità che dava inizio al deposito nel caso di sette tipologie di materiali naturali suddivisi per classi di granulometria, dall'argilla alle ghiaie di diametro pari a $4 \div 5$ centimetri.

Nella parte finale del '*Principes d'hydraulique*' sono descritti gli studi sulla resistenza dei corpi immersi in fluidi liquidi e gassosi; attraverso un centinaio di esperimenti con corpi di varia forma, Pierre Louis Georges Du Buat dimostrò che i *test* in aria ed in acqua possono correttamente essere tra loro correlati, in funzione dei diversi valori della densità; calcolò, ad esempio, che un paracadute dovesse avere un diametro di 5,68 metri per poter rallentare, a velocità adeguata per un morbido atterraggio, il peso di un uomo.

Ancora: lo scienziato francese introdusse il concetto di *Massa Virtuale*, nella considerazione che la resistenza di un corpo in un fluido in movimento non dipendesse dal proprio peso bensì dalla quantità di fluido che è spostata e resa turbolenta dalla sua sagoma; egli giunse così ad una considerazione di grandissima importanza, forse il suo più rilevante contributo all'Idrodinamica ed anche all'Aerodinamica: dimostrò, infatti, sperimentalmente che la forma della parte retrostante di un corpo, rispetto al verso della corrente del fluido, è tanto importante nell'influire sul valore della resistenza, quanto la parte anteriore; rilevò infatti che il contributo della parte retrostante genera una '*non pressione*' o aspirazione (oggi detta *depressione*) che tende a rallentare il moto; per tale dimostrazione Du Buat utilizzò dei piezometri distribuiti sulla superficie del corpo immerso, connettendoli ad un manometro che rivelava i valori della pressione del fluido lungo l'intera superficie dell'oggetto.

Utilizzando il carico assoluto formulato da Bernoulli-Euler, Du Buat giunse alla conclusione:

“ . . . *Quando l'acqua scorre lungo una superficie, il carico della pressione su ogni punto della superficie è uguale a quello che esisterebbe se il fluido fosse in quiete ad eccezione del carico dovuto alla velocità media del fluido nella componente parallela alla superficie stessa. . .*”

Ma sulla base dei suoi esperimenti egli, poi, concluse erroneamente:

“... la pressione del carico sul centro della superficie piana perpendicolare al flusso è uguale una volta a e mezzo dell'altezza cinetica.”

Le sue osservazioni diedero origine al cosiddetto *Paradosso di Du Buat*:

“La forza esercitata, su un corpo in quiete, dall'acqua in movimento è più grande di quella richiesta per muovere lo stesso corpo alla stessa velocità relativa attraverso la stessa acqua.”

... pur nell'evidente contrasto con l'ormai affermato *Principio di Reciprocità*, formulato da Isaac Newton.

Non è noto se questa conclusione fosse dovuta alla impossibilità di valutare con precisione i fenomeni di turbolenza e l'effettiva distribuzione della velocità, oppure per il suo erroneo método di misura della velocità stessa.

Nonostante alcune errate posizioni, tanto grande fu l'influenza degli scritti di Pierre Louise Georges Du Buat sugli idraulici europei del tardo XVIII secolo e dell'inizio del successivo, da oscurare, almeno in apparenza, l'attività di molti studiosi suoi contemporanei.

Per almeno due di costoro, possiamo tranquillamente affermare che nulla abbiano avuto di minor mérito del Du Buat: il fisico italiano Giovanni Battista Venturi (Bibiano 1746 - Reggio Emilia 1822) e l'ingegnere tedesco Reinhard Woltman (Axtedt 1757 - Mònaco di Baviera 1837).

Venturi ebbe una varia e ben documentata carriera. Nato a Bibiano, paese vicino a Reggio Emilia, ricevette la prima educazione, come spesso avveniva allora in Italia, nella locale parrocchia cattolica, dove maturò la scelta di prendere i voti sacerdotali; fu ordinato prete all'età di 23 anni.

Le sue particolari capacità, manifestate negli anni di seminario, lo portarono a coprire la cattedra di Geometria e Filosofia a Mòdena, assumendo poi l'incarico di Ingegnere Ducale e di Revisore dei Conti; infine fu nominato professore di Fisica Sperimentale.

In Francia, giunto in veste di Segretario della delegazione italiana a Parigi, durante la rivoluzionaria Repubblica Francese, si occupò in studi di Fisica e di Chimica, per poi concentrarsi sull'Idraulica, riesaminando le esperienze ed i lavori di Leonardo da Vinci e di Galileo Galilei.

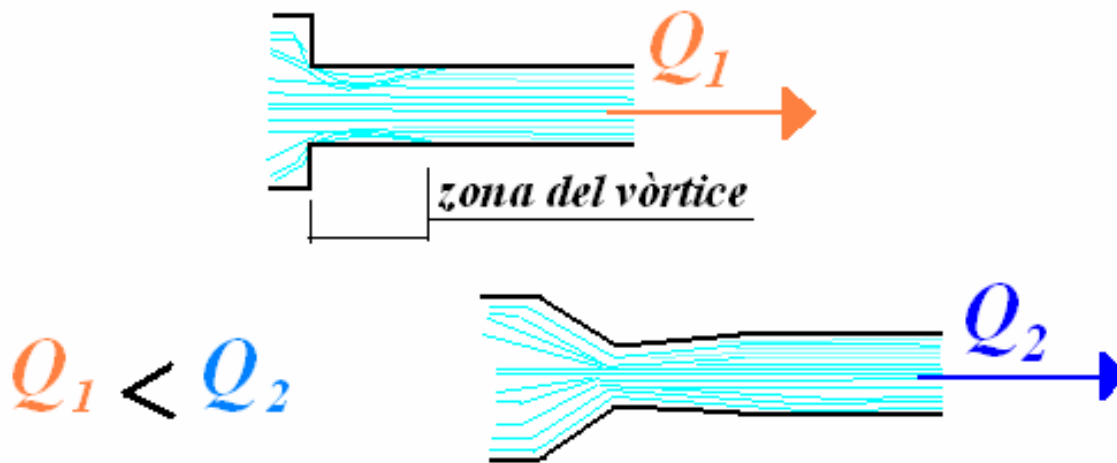
Sotto il patrocinio di Napoleone Bonaparte, rientrò poi in Italia.



L'opera “*Recherches expérimentales sur le principe de communication latérale dans les fluides*”, pubblicata a Parigi nel 1797, contiene una dettagliata descrizione degli esperimenti che aveva precedentemente compiuto in Italia sul fenomeno dell'efflusso da un serbatoio, utilizzando lo stesso método seguito da Giovanni Poléni: applicando, cioè, all'orifizio un tubo con attacco a spigolo vivo. Poléni era riuscito a dimostrare che la portata massima nella tubazione si manifestava quando questa sporgeva dal serbatoio per una lunghezza di 4÷5 diàmetri.

Il fenomeno che si verificava nella tubazione era identico, così intuì Venturi, al caso nel quale una tubazione subisce un improvviso restringimento del diametro senza alcun tratto di raccordo. Le osservazioni e le misure condotte portarono alla conclusione che il brusco restringimento provoca nel flusso un vortice circolare, lungo la parete della tubazione, che si estende per 4÷5 diametri; questo vortice è di fatto una perturbazione al moto che determina una perdita di energia concentrata in quel punto.

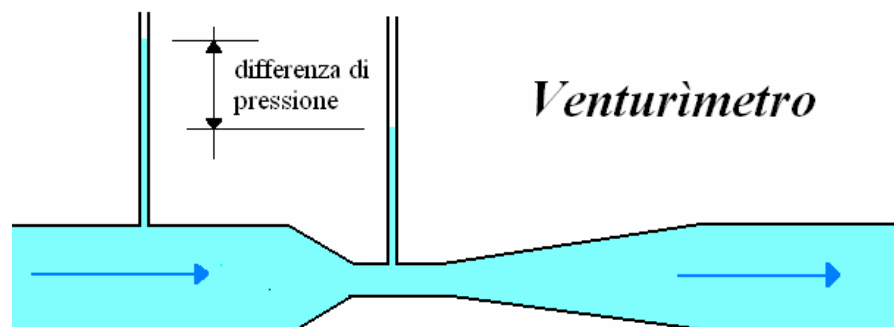
Se invece la tubazione di minor diametro è unita alla precedente più grande con un tronco di cono che restringe ulteriormente la luce per poi raccordarsi gradualmente alla stessa tubazione più piccola, la portata che transita, così dimostra il Venturi, è superiore. La cosa può sembrare assurda, ma lo scienziato emiliano dimostrò che la contrazione brusca del flusso all'ingresso in un tubo cilindrico, causava sia una locale riduzione nella pressione sia la generazione di vortici, che si diffondevano nella corrente, rendendo il moto più turbolento ed aumentando le perdite di carico. Se il tubo era sostituito con due sezioni coniche successive in modo da presentare diametri prima decrescenti e poi crescenti, i vortici non si manifestavano ed aumentava la velocità, quindi la portata, pur non evitando ancora una locale riduzione della pressione. Mediante prove,



Venturi giunse a determinare la geometria dei due tratti conici che, dando la massima portata, provocavano la minima perdita di carico.

Da queste esperienze condotte dal Venturi, l'americano Clemens Herschel realizzò lo strumento di misura delle portate in tubazioni in pressione, che chiamò, in onore dello scienziato italiano, *Venturimetro*, aggiungendo, tra i due tronchi di cono, un tratto rettilineo.

Sfruttando le equazioni di Bernoulli-Euler, viste al Capitolo 13, Herschel dimostrò, pubblicando i risultati nel 1898, che si otteneva una precisa misura di portata semplicemente attraverso la lettura della differenza della pressione del liquido in un punto di corrente indisturbata, nel tratto precedente il raccordo, ed il tratto

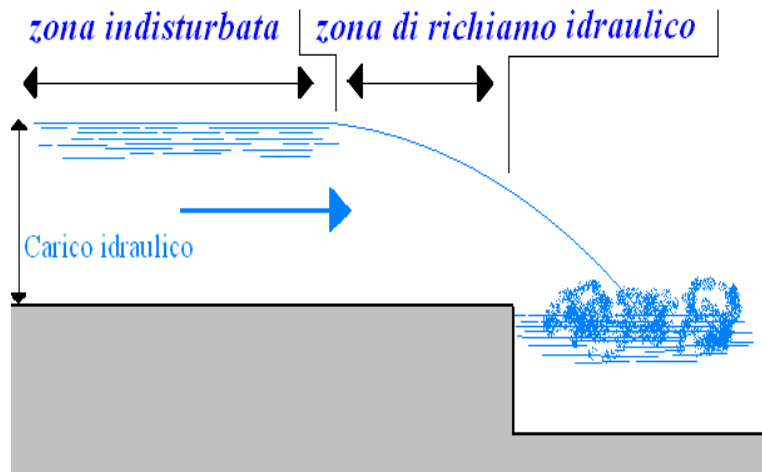


rettilineo, inserito, tra i due tronchi di cono.

Questo strumento, semplice e di grande affidabilità, si diffuse velocemente ovunque.

Venturi condusse anche osservazioni sulla diffusione dei vortici nei canali a cielo libero e ne propose il medesimo meccanismo per i moti dell'atmosfera.

Lo scienziato italiano, inoltre, per primo osservò che una corrente a pelo libero, in prossimità di un salto idraulico, deprime il proprio livello rispetto al fondo, a causa della graduale accelerazione man mano che si avvicina al salto stesso; il cosiddetto *Effetto di richiamo*, dal quale ci si deve mantenere lontani, cioè restare nella zona indisturbata, quando si vuol attribuire, al salto, il carico idraulico che determina la portata transitante.



Poco è noto della vita di Reinhardt Woltman, se non il fatto che sviluppò tutta la sua attività professionale nel Dipartimento dei Porti e della Navigazione della provincia di Hannover, particolarmente a Cuxhaven e ad Amburgo.

I contributi di Woltman all'Idraulica prendono forma in due trattati. Il primo "*Theorie und Gebrauch des hydrometrischen Flügels*", pubblicato in Amburgo nel 1790, descrisse l'applicazione dell'elica a palette come misuratore della corrente dei liquidi, producendo quel progresso nella misura delle velocità atteso da secoli. Sebbene Woltman avesse onestamente ammesso d'essersi ispirato all'anemometro, precedentemente disegnato da Schober, il suo nome è oggi sempre associato a questo tipo di strumento, allora detto *Mulinello di Woltman* ed oggi, semplicemente, *Mulinello*.



Il secondo trattato, "*Beiträge zur hydraulischen Architecture*", consiste nella raccolta delle pubblicazioni uscite a Göttingen tra il 1791 ed il 1799, sull'evoluzione dell'Ingegneria Idraulica – sulla scorta del precedente esempio francese ad opera di Bernard Forest de Bélidor con il suo '*Architecture hydraulique*', già ricordato nei precedenti Capitoli 10 e 13.

Nei citati due lavori del Woltman si trovano alcune esperienze di misura della resistenza in condotte e in canali, sulla base delle quali il tedesco propose una semplificazione della complicata formula della resistenza di Du Buat, con una potenza da applicarsi alla velocità compresa tra 1,75 per le tubazioni, e 2,0 per i canali a pelo libero; valori ancor oggi utilizzati.

Nell'ultimo periodo del secolo, tra i test di Giovanni Poleni e quelli di Giovanni Battista Venturi, è evidente che la sperimentazione idraulica fece decisivi progressi, soprattutto nella Scuola

Francese, anche grazie al fatto che poche delle ambiziose méte, elencate dal Du Buat, erano a quel tempo raggiunte.

Alcune invenzioni, in questo periodo, costituirono passi fondamentali e definitivi per il progresso della scienza dei fluidi:

- il *Piezometro*, per la misura della pressione nelle condotte, per l'appunto, in pressione;
- il *Tubo di Pitot*, per misurare la velocità dei fluidi, alle alte velocità ed in particolare modo dei gas;
- il *Mulinello di Woltman*, misuratore della velocità delle correnti, soprattutto di liquidi per valori anche minimi;
- i modelli in scala;
- le vasche galleggianti, per le esperienze di Idraulica Navale e di Idrodinamica.

In secondo luogo questo periodo segnò l'era di ragionate e precise osservazioni sperimentali sotto condizioni controllate.

Ma il maggior evento, per quanto ci riguarda, si risolse nella prima teorizzazione del fenomeno della perdita di energia dei fluidi in movimento, sia essi in pressione che liquidi a pelo libero, aprendo la via alla risoluzione di questo che, nell'Idraulica ma non solo, è il problema più complesso, al punto che ancor oggi è oggetto di studio.

* * *