

*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"* .

**Cap. 9 – Il Seicento: prime certezze e nuove frontiere**

**Cremona 23 agosto 2006**

## 9. Il Seicento: prime certezze e nuove frontiere

In Italia, tra il Cinquecento ed il Seicento, attorno al movimento scientifico/culturale che nacque dal lavoro di Galileo Galilei, si può individuare una 'Scuola Italiana di Idraulica', che, nella sua pur breve vita, fu il principale riferimento per gli studiosi d'Europa, molti dei quali ebbero la possibilità di frequentare quell'ambiente, arricchendo la propria esperienza.

In questa 'scuola' troviamo uno dei più prestigiosi allievi di Galileo, che poi fu il suo più valido collaboratore: Benedetto Castelli (Brescia 1577 – Roma 1644).

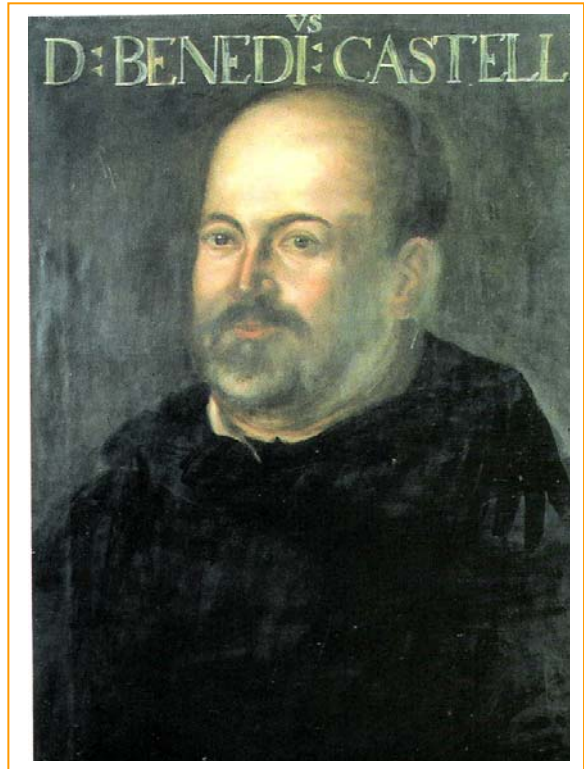
Nato a Brescia, entrò nell'ordine dei Benedettini e insegnò Matematica a Pisa ed a Roma.

Il suo maggior lavoro fu il libro "*Della misura delle acque correnti.*", pubblicato nel 1628.

Quest'opera gli valse il riconoscimento più prestigioso: Benedetto Castelli è considerato il 'padre' della scienza Idraulica.

Il libro contiene le seguenti tre proposizioni:

1. *Sezioni dello stesso fiume portano uguali quantità di acqua nell'eguale tempo, anche se le sezioni stesse sono differenti.*
2. *Date due sezioni di un fiume, la misura della portata che passa nella prima sezione rispetto a quella che passa nella seconda è in proporzione alla dimensione della prima e della seconda sezione e della prima e seconda velocità.*
3. *Date due sezioni diverse attraverso le quali passano uguali quantità di acqua, le sezioni sono reciprocamente proporzionali alle rispettive velocità.*



Quali principi della legge di continuità, oggi detta '*Prima Legge dell'Idraulica*' ed a quei tempi ben presto chiamata '*Legge del Castelli*', queste proposizioni non contengono nulla che Leonardo da Vinci non avesse già espresso oltre un secolo prima, a sua volta preceduto di ben quindici secoli da Erone di Alessandria. Il frate benedettino, però, si trovò nella fortunata situazione di poter diffondere velocemente il proprio lavoro, associando alla scoperta la necessaria comunicazione. L'opera di Castelli, tradotta ben presto in francese, uscì dai confini italiani, approdando in paesi dove erano singolarmente frequenti i contatti tra i diversi studiosi.

Castelli seppe assimilare il lavoro dei suoi grandi predecessori e nel contempo si trovò nell'ambiente propizio per diventare la fonte originaria di principi in realtà non del tutto nuovi; egli proseguì nello studio di altri aspetti dell'Idraulica, ancora partendo da precedenti risultati, come, ad esempio, il problema del moto del fluido che esce da un foro posto nella parete verticale di un contenitore, detto *Problema dell'efflusso*, in questo assimilando le considerazioni di Leonardo da Vinci.

Inoltre, lo scienziato bresciano, assieme a Galileo Galilei, condusse molti esperimenti sul galleggiamento dei corpi ed in particolare del ghiaccio; i due scienziati giunsero alla considerazione che il ghiaccio galleggia per causa del suo minor peso rispetto al peso dell'acqua, per unità di

volume (cioè il *Peso Specifico*, che si misura in peso/volume, cioè, per esempio, in  $\text{kg/m}^3$ ) e non, come sino ad allora si riteneva, a causa della forma che assume sulle acque d'inverno, generalmente in lastre.

Un mérito singolare, poco riconosciuto e completamente originale di Benedetto Castelli fu l'invenzione del *Pluviómetro*, del quale progettò il prototipo mentre era residente nel monastero di San Pietro a Perugia, nel 1639.

Castelli fu così il primo a concepire di misurare la pioggia, in un certo intervallo di tempo, esprimendola con la misura di un'altezza in millimetri d'acqua caduta sul suolo; informazione di base dell'Idrologia, della quale, a ben maggior ragione, può essere considerato il fondatore. Questa nuova informazione fu utilizzata dal Castelli nello studio del comportamento del lago Trasiméno, in rapporto ai differenti eventi di pioggia.

La grandezza di Benedetto Castelli rende doveroso il ricordare altre sue scoperte, sebbene non collegate all'Idraulica.

Lavorando con Galileo Galilei trovò ed utilizzò il método per osservare l'evoluzione delle macchie solari, tra l'altro dimostrando il moto di rotazione del Sole, progettandone l'immagine su un foglio di carta, metodo ancor oggi utilizzato.

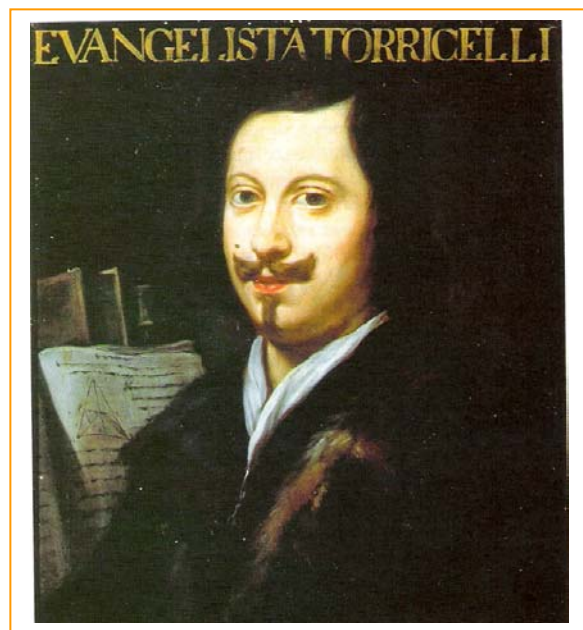
Ancòr più sensazionale, per l'epoca, è il fatto che Benedetto Castelli giunse per primo ad ipotizzare l'esistenza del continente australe, non ancora scoperto, studiando la variazione della luce cinérea del disco lunare. Nella fase di '*Luna Nuova*', l'unico satellite del nostro pianeta è illuminato da quella parte della luce del Sole riflessa dalla Terra. Partendo dal principio che la superficie del mare ha maggiore capacità di riflessione rispetto alle superfici dei continenti, nel suo trattato "*Sopra il candore della luna*", pubblicato nel 1640, Castelli dimostrò che l'osservata variazione della luce della *Luna Nuova*, detta '*cinérea*' perché '*grigiastra*', non poteva che essere collegata ad una grande massa terrestre posta nell'emisfero australe: l'Australia, la cui esistenza fu rivelata, con la necessaria certezza, da James Cook soltanto nel 1771.

È ora il tempo di introdurre un altro grande scienziato italiano, dal quale non ebbe impulso soltanto l'Idraulica ma nacque anche un'altra disciplina scientifica: la Meteorologia.

Evangelista Torricelli (Roma 1608 – Firenze 1647), nato a Roma il 15 ottobre 1608 da Gaspare e Caterina Angetti, originari di Faenza, si distinse presto per lo straordinario talento matematico. Studiò presso i Gesuiti per diventare, poi, allievo e segretario di Benedetto Castelli, quando questi era già titolare della cattedra di Matematica all'Università '*La Sapienza*' di Roma.

Lo stesso Castelli ben presto ammise la superiorità di Torricelli, sia nell'apprendimento che nelle realizzazioni pratiche.

Nel 1632 Torricelli scrisse la sua prima lettera a Galileo Galilei, con la quale gli esprimeva tutto il suo entusiasmo per il trattato "*Dialoghi sopra i massimi sistemi del mondo*", opera della quale iniziò un approfondimento che lo portò a generalizzare l'analisi delle traiettorie del proiettile, dimostrando che si potevano tutte descrivere come curve appartenenti alla famiglia delle parabole, che tra loro si differenziavano solo per il diverso valore della velocità iniziale e dell'inclinazione.



Gli studi di Torricelli sul moto dei gravi furono l'argomento principale del trattato "*De motu gravium naturaliter descentium et proiectorum*", pubblicato nel 1641, dove egli riconosce apertamente il proprio debito nei confronti del "*Dialoghi . . .*" di Galileo. Questo trattato contiene molte dimostrazioni di principi fisici, tra i quali che qualsiasi sistema materiale si trova in una posizione stabilmente in equilibrio, cioè tende a tornare spontaneamente nella posizione stessa se da essa mosso, a condizione che in questa posizione il suo baricentro sia alla quota minima rispetto al centro della Terra: questa osservazione è chiamata oggi *Principio di Torricelli*.

Nel "*De motu gravium naturaliter descentium et proiectorum*" Torricelli giunge ad una osservazione che si rivelerà il primo significativo passo verso la corretta interpretazione della legge fisica, già indagata da Leonardo, da Galileo e da Castelli, che governa l'efflusso di un liquido da un serbatoio attraverso un foro nella parete: il '*Problema dell'efflusso*':

"Le quantità di acqua che scorrono in tempi uguali attraverso un foro praticato alla base di un recipiente stanno fra loro come le radici quadrate delle altezze del liquido in esso contenuto."

Nella successiva "*Opera geometrica*", pubblicata nel 1644, nella parte "*De motu aquarum*", troviamo il passo successivo che costituisce la *Legge di Torricelli*. Dalla proporzionalità tra le rispettive grandezze (radice quadrata delle altezze e velocità di efflusso) Torricelli giunge a dimostrare il legame tra le stesse in ogni caso studiato: la velocità con cui un liquido esce da una foro in un serbatoio è proporzionale alla radice quadrata dell'altezza dell'acqua nel serbatoio stesso rispetto al centro dell'orifizio, detta, *Carico Idraulico*, usualmente indicato con la lettera *h*.

Ecco quindi, per la prima volta, collegata la portata che esce da un foro in un recipiente e la radice quadrata dell'altezza del livello dell'acqua, nel recipiente stesso, oggi chiamata *carico idraulico* o *battente*, usualmente indicato con *h*. Dalla quantità d'acqua fluita attraverso un foro, in un tempo fissato – misurata, ad esempio, colmando un contenitore graduato - si può infatti dedurre il valore di velocità del flusso conoscendo l'area del foro stesso (anche se, per l'effetto del restringimento della sezione liquida – fenomeno codificato da Newton nel 1713 – l'area effettiva di passaggio dell'acqua è minore dell'area del foro).

Usando il metro (*m*) ed il secondo (*s*):

$$Q \text{ (quantità o portata)} \quad \frac{m^3}{s} = V \text{ (velocità)} \quad \frac{m}{s} \times A \text{ (area del foro)} \quad m^2$$

Il passo è assai importante, perché per la prima volta suggerisce di indagare il fenomeno dell'acqua in movimento attraverso la relazione tra altezza *h* d'acqua e velocità *V* nella forma:

$$\sqrt{h} \text{ proporzionale alla velocità } V$$

. . . . nonché alla conseguente:

$$h \text{ proporzionale alla velocità al quadrato } V^2$$

. . . . prospettiva che diverrà, circa cent'anni dopo con Daniel Bernoulli e Leonhard Euler, eco costante nell'Idraulica; ma per giungere a quella conquista il cammino è ancora lungo.

Evangelista Torricelli però, come fece Galileo per il moto dei gravi (lo abbiamo evidenziato nel Capitolo 7), non riuscì a considerare, nel fenomeno dell'efflusso, alcuna componente legata all'accelerazione di gravità ( $g$ ), che noi oggi sappiamo partecipare alla determinazione della velocità di efflusso secondo l'espressione:  $V = C \cdot \sqrt{2gh}$ , dove  $C$  è un coefficiente che assume differenti valori a seconda delle diverse situazioni di efflusso.

Non aver introdotto, nel moto dei gravi come nell'efflusso dei fluidi, l'accelerazione di gravità ha impedito a Galileo Galilei ed ai suoi allievi e successori di valutare i fenomeni osservati analizzandone il significato fisico di movimenti provocati dall'attrazione terrestre; cioè da quell'accelerazione che Isaac Newton, in seguito, dimostrò essere la medesima che muove l'intero universo.

Nei propri studi, Evangelista Torricelli riconobbe l'interferenza al moto del getto di un fluido causata dall'aria, osservando che un getto che sgorga dalla base di un bacino, per quanto grande, se rivolto verso l'alto . . . “ . . . è rotto in minute gocce come una nebbia, e non può salire una metà, forse nemmeno un terzo o una quarta parte della distanza attraverso la quale, parlando teoricamente ed assumendo tutti gli impedimenti al moto rimossi, possiamo aspettarci che esso risalga attraverso la sua originale velocità . . . ”

Evangelista Torricelli si rese conto che l'aria era una sostanza che, come tutte le altre, possiede caratteristiche proprie, in particolare dotata di una tale densità da essere in grado di interagire con gli oggetti ed i fluidi che in essa si muovono. Se l'aria possiede una propria densità è evidente che deve avere un'altra caratteristica, che dalla densità discende: il peso. L'universale fama che Torricelli meritò fu proprio dovuta all'aver dimostrato che l'aria ha un peso proprio, che si manifesta sotto forma di pressione, che poté dimostrare e misurare attraverso uno strumento di sua invenzione: il barometro. Questa scoperta diede il via ad una nuova scienza: la Meteorologia, della quale lo scienziato italiano è considerato il fondatore.

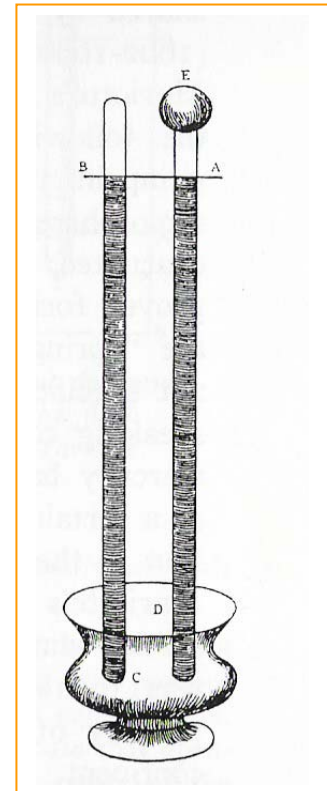
La frequentazione dell'ambiente galileiano ha certo favorito Torricelli in questa scoperta, aiutato da osservazioni di altri studiosi di quella scuola, degni di un ricordo: Viviani, Maggiotti e Berti, che furono i primi a fare degli esperimenti sull'argomento.

Tuttavia i risultati furono da Torricelli correttamente interpretati, come dimostra una sua lettera del 1644 all'amico Ricci; documento che lo accredita come lo scienziato che completò, in via definitiva, il lungo lavoro di demolizione della nozione aristotelica della non esistenza del vuoto:

“ . . . Abbiamo preso vasi di vetro  $A$  e  $B$  lunghi due cubiti. Riempiamoli di mercurio e poi, chiudiamo l'estremità con un dito e capovolgiamoli in un recipiente contenente mercurio, sembrerà che comincino a vuotarsi . . . Il livello  $AD$  tuttavia rimane sempre pieno sino all'altezza di un cubito ed un quarto ed un pollice in aggiunt . . . ”

Questo esperimento è significativo quando il vaso è pieno di mercurio, liquido assai pesante, portato sino al livello  $AD$ . La forza che trattiene su il mercurio contro la sua natura di cadere giù è ritenuta fin qui essere una cosa interna al vaso  $AE$ , e per essere attribuita al vuoto o a questo materiale (il mercurio) molto rarefatto, ma io ritengo che la forza giunga dall'esterno.

Sulla superficie del liquido che è nel bacino gràvita una massa di aria alta cinque miglia, è così dunque da essere stupefacente se nel vetro  $EC$ , dove il mercurio non è attratto né respinto, fino a quando non c'è nulla esso entra



*e sale in tale modo sino a che raggiunge un equilibrio con il peso dell'aria che all'esterno preme sul livello del bacino. L'acqua anche, in un similare ma molto più lungo vaso, salirà per almeno otto cubiti che è in proporzione quanto il mercurio pesa più dell'acqua, per ottenere l'equilibrio con la stessa forza che preme ugualmente."*

Applicando tale fenomeno al funzionamento delle pompe aspiranti, Torricelli dimostrò perché esse non potessero funzionare se poste più in alto dell'acqua di una misura pari a 10,7 metri.

Con l'osservazione " . . . Sulla superficie del liquido che è nel bacino gràvita una massa di aria alta cinque miglia . . . ", lo scienziato italiano diede la prima misura della pressione atmosferica, riuscendo anche a dimostrare che essa era variabile nel tempo e con l'altitudine; la Meteorologia mosse da qui i suoi primi passi.

Il primo idraulico del XVII secolo degno di nota e non appartenente alla scuola italiana fu Edme Mariotte (Digione 1620 – Parigi 1684).

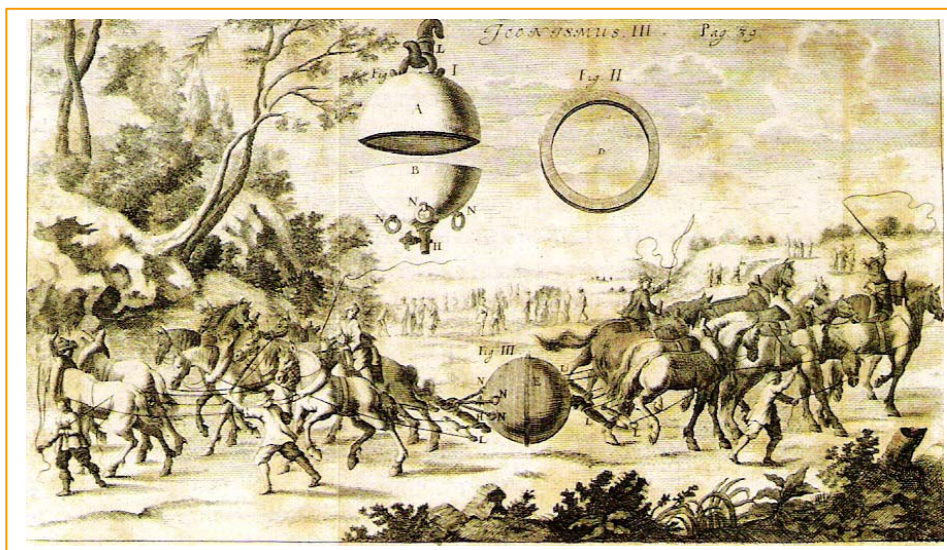
Abate e Priore del monastero di *Saint-Martin-sus-Beaune*, presso Digione, Mariotte fu uno dei primi membri dell' *Académie royale des sciences* di Parigi, quando fu nuovamente fondata, da Colbert, nel 1666 (lo abbiamo visto nel precedente Capitolo 8). Il primo volume delle *'Storie e memorie dell'Accademia'* contiene molte sue memorie che trattano argomenti diversi: la natura dei colori; il barometro; la solubilità dell'aria in acqua; il congelamento dell'acqua; la differenza tra caldo e freddo.

Per la precisione, per l'ampiezza e per la diversificazione dei suoi lavori, Mariotte è considerato il padre del metodo sperimentale in Francia e l'originalità delle sue osservazioni sul moto dei fluidi ne fanno anche il capostipite della scuola degli idraulici francesi, alla pari con i contemporanei in Italia.

Uno dei maggiori interessi di Mariotte fu lo studio della natura elastica dell'aria, stimolato dalle osservazioni di Torricelli ed in comune con altri scienziati del suo tempo, come il tedesco Otto von Guericke, l'irlandese Robert Boyle e Blaise Pascal, concittadino e collega di Mariotte, di cui sarà detto molto nei successivi Capitoli.



Otto von Guericke (Magdeburgo 1602 – Amburgo 1686), fisico tedesco, coinvolto nella disputa filosofica sull'esistenza del vuoto, sviluppò una rudimentale ma efficace pompa a vuoto, nel 1650, che poteva raggiungere una depressione pari ad un decimo di atmosfera (oggi abbiamo macchine in grado di raggiungere il milionesimo della pressione atmosferica).



Con questa sua invenzione lo scienziato tedesco dimostrò la forza della pressione atmosferica, calcolandola e spiegando così l'esperimento delle *'Semisfere di Magdeburgo'*,

compiuto a Ratisbona nel 1654, alla presenza dell'imperatore Ferdinando III d'Asburgo: due grandi semisfere che, quando unite e poste sotto vuoto, non potevano essere separate nonostante gli sforzi di otto cavalli per parte.

Dei suoi studi sul vuoto, Otto von Guericke lasciò l'opera "*Esperimenta nova (ut vocantur) magdeburgica de vacuo spatio*", pubblicata nel 1672.

Robert Boyle (Lismore 1627 – Londra 1691), iniziò gli studi ad Eton ed in seguito viaggiò a lungo in Europa, soggiornando a Ginevra ed a Firenze, dove frequentò i circoli galileiani.

Stabilitosi ad Oxford, nel 1654, vi attrezzò un laboratorio e raccolse attorno a sé un gruppo di scienziati antiaristotelici, l' '*Invisibile College*', primo embrionale nucleo della *Royal Society*, come abbiamo già visto nel precedente Capitolo 8.

Boyle perfezionò la pompa a vuoto di von Guericke, utilizzandola in diversi esperimenti sull'origine dell'aria, e nella sua opera '*New Experiments Physico-Mechanical*' (1662) enunciò la legge sui gas, oggi nota come '*Legge di Boyle-Mariotte*', della quale, nel 1676, Mariotte ne diede questa originale formulazione, nel suo saggio '*Sur la nature de l'air*':

*"Una legge certa di natura che l'aria è condensata in proporzione al peso con cui è caricata."*

. . . tradotta in termini oggi usuali: "*A temperatura costante, il volume di una data quantità di gas è inversamente proporzionale alla pressione alla quale è sottoposto.*"

Nella certezza che i due scienziati operarono indipendentemente l'uno dall'altro, la contesa dell'attribuzione della scoperta si è risolta nel modo migliore: la legge reca il nome di entrambi . . . in rigoroso ordine alfabetico!

Questa è la sede per ricordare che Robert Boyle è il primo ad avere utilizzato la parola 'Idraulica', nella letteratura scientifica, per indicare la scienza della quale qui si traccia la Storia. (Non perdiamo l'occasione per citare nuovamente - lo abbiamo fatto nel Capitolo 2 - il primato di Ctesibio, scienziato greco vissuto tra il III ed il II secolo prima di Cristo, che per primo utilizzò l'aggettivo 'idraulico', per indicare l'organo ad acqua, strumento musicale da lui stesso ideato.)

Torniamo ad esaminare, con maggior dettaglio, l'opera di Edme Mariotte che principalmente interessa in questa storia, il "*Traité du mouvement des eaux*", pubblicato per la prima volta nel 1686, due anni dopo la sua morte.

Ripetendo ed ampliando le esperienze e le considerazioni di Torricelli, egli cercò in questo lavoro la regola generale che comprendesse il comportamento dei fluidi e dei gas.

L'opera è divisa in cinque parti.

La prima parte si occupa delle proprietà dei fluidi, con l'origine delle sorgenti e la causa dei venti. La seconda tratta dell'equilibrio delle sostanze liquide attraverso il peso, la compressione elastica e l'urto. La terza discute della misura dell'acqua in movimento. La quarta tratta le traiettorie dei liquidi spruzzati. La quinta, la distribuzione dell'acqua e la resistenza alla pressione delle tubazioni.



Tutte le parti furono basate, per quanto possibile, sulle osservazioni sperimentali dell'autore, che spesso sviluppò tecniche originali per tradurre i risultati in regole quantitative che fossero espresse con formulazioni matematiche a tutti accessibili.

La prima sezione della seconda parte contiene l'analisi di ciò che è conosciuto come il 'Fiasco di Mariotte' (un contenitore cilindrico chiuso con un orifizio in alto ed un tubo passante nel foro che si prolunga oltre il coperchio del contenitore), usato per illustrare il peso dell'atmosfera.

Fu nella terza sezione di questa parte che Mariotte cercò di ricavare, partendo dalle scoperte di Evangelista Torricelli, il principio della dinamica dei getti di fluido da un orifizio: sulla base delle misure con un dinamometro, che misurava la forza sviluppata dal getto, egli formulò le seguenti cinque regole:

1. i getti non producono urto attraverso l'azione di ogni loro parte come fanno i corpi solidi;
2. l'acqua che è scaricata dall'alto di un serbatoio attraverso un'apertura circolare potrà mantenersi in equilibrio nell'impatto con un peso uguale a quello del cilindro di acqua che ha per base la stessa apertura e per altezza la stessa altezza d'acqua nel recipiente;
3. due getti d'acqua d'uguale larghezza che emergono da piccole aperture alla base di numerose tubazioni piene d'acqua a differenti altezze produrranno equilibrio con i pesi in proporzione alle loro altezze;
4. getti d'acqua di velocità disuguali sosterranno nel loro impatto pesi che sono in proporzione al quadrato di queste velocità;
5. getti della stessa velocità da aperture differenti sosterranno dal loro impatto pesi che sono in proporzione con i quadrati dei diametri delle aperture.

Il primo di questi enunciati, sebbene imperfetto, riconosce il fatto che l'energia del getto è solo in parte tradotta in forza nell'impatto con una superficie, perché una quota dell'energia stessa inevitabilmente si disperde.

E' il quarto enunciato di maggior interesse, perché è la prima indicazione, in letteratura, che la forza esercitata da una corrente d'acqua varia con il quadrato della sua velocità.

Da queste deduzioni sperimentali prese il via lo studio di un problema che, sino ad allora e per millenni, non aveva granché attirato l'interesse degli studiosi di Idraulica; la forza di un getto d'acqua (ovvero, più in generale, di un fluido, liquido o gassoso) contro una superficie, sebbene vi fossero numerosissimi esempi in tutto il mondo: i mulini, . . . ad acqua o a vento!

Tale argomento sarà oggetto di attenzione nel prossimo Capitolo 10.

Edme Mariotte cercò di includere nella sua analisi le forze esercitate da una corrente d'acqua su una superficie immersa sospesa perpendicolarmente al flusso; concluse, attraverso semplici misure dinamometriche, che la forza della corrente era equivalente al peso di un prisma d'acqua avente un'area di base uguale a quella della superficie, contro la quale la corrente preme. Da qui egli si adoperò per stimare la forza del vento sulle piante e la forza del vento e dell'acqua sulle pale inclinate delle ruote dei mulini a vento ed ad acqua.

Nelle sue règles per la misura della portata di una corrente d'acqua, Mariotte mostrò una conoscenza non solo dell'interdipendenza della velocità e dell'area della sezione trasversale, ma anche l'effetto della non uniformità del flusso, perché, come aveva già osservato Leonardo da Vinci, la velocità del fluido non ha lo stesso valore in tutta la sezione della corrente.

Lo scienziato francese si propose così di definire la misura della velocità in canali aperti (cioè, come si dice oggi, 'a pelo libero') attraverso la misura del tempo impiegato da galleggianti a percorrere, nella corrente, una distanza nota, come già avevano tentato Leonardo e Castelli. I



galleggianti erano dotati di pesi che li mantenevano anche al di sotto del *pelo libero* dell'acqua, dando così la possibilità di valutare le velocità nei diversi punti della sezione, anche in profondità.

I risultati ottenuti portarono Mariotte a concludere che la velocità normalmente decresce verso l'alto, lungo ciascuna sezione verticale della corrente, ad eccezione dei punti dove la sezione stessa ha un restringimento, caso nel quale può accadere che la velocità invece aumenti nella parte alta della sezione.

Oggi sappiamo, invece, che la velocità dell'acqua, in una sezione regolare, ha un andamento parabolico lungo la verticale, avvicinandosi a zero in prossimità del fondo; Mariotte quindi non comprese questa corretta distribuzione, ma ad essa molto si avvicinò, intuendo una regola pratica ancor oggi utilizzata quando si vuol condurre una prima valutazione della portata di una corrente: per ottenere una buona approssimazione egli propose, infatti, di assumere, come valore medio della velocità dell'acqua, in un canale a sezione regolare, i due terzi del valore della velocità misurata in superficie.

Nel valutare le altezze raggiunte dai getti verticali, Mariotte misurò e codificò in tavole l'altezza della quota alla quale il getto riesce a risalire, ritenendola dipendente soltanto dal carico iniziale, attribuendo – come fece Torricelli – alla resistenza dell'aria il fatto che il getto verticale non raggiungesse mai la stessa quota del livello d'acqua nel serbatoio che lo alimentava.

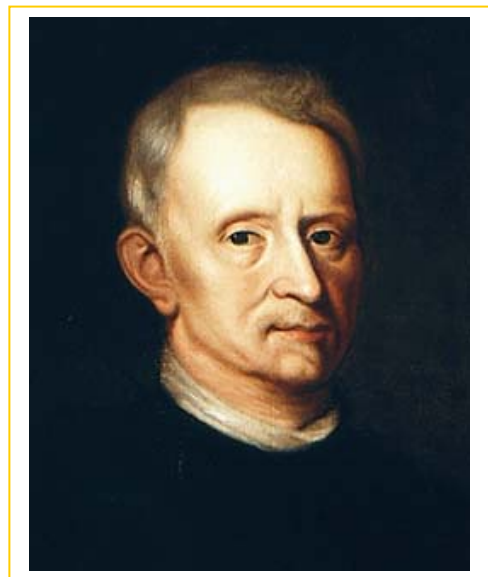
La analisi di Edme Mariotte delle traiettorie paraboliche dei getti progettati con differenti inclinazioni si basarono sull'ingegnosa soluzione di Galileo-Torricelli della traiettoria di un proiettile. Egli eseguì i suoi test sulle traiettorie sia con il mercurio che con l'acqua, concludendo, come Torricelli aveva previsto, che l'effetto dell'aria si fa sentire di meno in proporzione alla densità del liquido: più il fluido è denso e maggiore è la distanza della traiettoria.

Mariotte si applicò anche al problema del flusso nelle tubazioni, cioè del moto dei fluidi in pressione. Sulla resistenza alla pressione delle tubazioni e delle giunzioni, egli si limitò ad un'analisi quantitativa, evidenziando la necessità di evitare bruschi cambiamenti di direzione che portavano a notevoli problemi di ancoraggio e tenuta, senza però indagare sulla vera causa. Assumendo che la resistenza della corrente dipendeva soltanto dalla velocità, egli raccomandò di scegliere le tubazioni in modo che la velocità - e quindi, suppose, la pressione – dovesse essere la stessa di quella nei sistemi già noti ed efficienti; considerazione invero ben poco scientifica!

Un contemporaneo di Boyle e Mariotte, l'inglese Robert Hooke (Freshwater 1635 – Londra 1703) qui merita almeno una breve citazione; non soltanto diede un decisivo contributo a Boyle nello sviluppo della pompa a vuoto, ma fu tra i fondatori della *Royal Society* (1662), divenendone curatore degli esperimenti e Segretario nel 1677; carica che mantenne sino al 1682.

Hooke si impegnò in un'ampia gamma di ricerche, delle quali il prodotto più noto è la '*Legge dell'elasticità*', detta '*Legge di Hooke*'; condusse inoltre originali osservazioni nei campi della Meccanica, dell'Ottica, della Meteorologia e dell'Astronomia.

Nel 1666, annunciò ai membri della *Royal Society* di aver formulato "*un modello del mondo molto differente da ogni altro già concepito*". Fu invero differente perché Hooke fu il primo a radicarsi nell'affermazione che tutti i corpi pesanti si attraggono gli uni verso gli altri. Intuì che il moto ellittico dei pianeti fosse dovuto ad una forza di attrazione centrale, proporzionale



all'inverso del quadrato della distanza dal Sole, ma non ne seppe trarre le conseguenze come avvenne poi con Isaac Newton, che però non mancò di ricordarlo.

Lo stesso Hooke ammise di non essere in grado di portare conclusioni più che qualitative sulla legge di gravità. Più tardi, tuttavia, egli e l'astronomo Edmund Halley (Londra 1656 – Greenwich 1742), presumibilmente dalla analogia con l'intensità della luce, conclusero che la forza attrattiva esercitata da un corpo variava inversamente con il quadrato della distanza da questo.

Di particolare interesse, per questo lavoro, sono i suoi contributi allo studio della propulsione, condotti tra il 1670 ed il 1680. In questo periodo Hooke stava sperimentando diversi dispositivi per indagare il moto relativo dei fluidi e nel 1681 egli lesse un documento, davanti alla *Royal Society*, sull'impennaggio delle pale dei mulini a vento e suggerì che lo stesso tipo di macchina poteva essere usata per l'acqua.

Inoltre i documenti della *Royal Society* segnalano che nel 1683 Robert Hooke mostrò ai suoi membri un mulinello, regolabile a quattro pale, per misurare la velocità del vento ed una vite da usare nell'acqua come misuratore della velocità delle navi, entrambi applicabili anche alla misura della velocità dell'acqua.

Il suo contributo fu, così, essenziale nello sviluppo dell'anemometro, dei misuratori di corrente e dei misuratori di velocità per le navi. Da questi studi ne trasse i primi principi della propulsione ad elica, della quale è considerato il padre.

Di Robert Hooke ricordiamo inoltre che, assieme a Christiaan Huygens, ideò il bilanciere a molla, meccanismo che introdusse un assoluto progresso nella tecnica dell'orologeria, quindi nella misura del tempo.

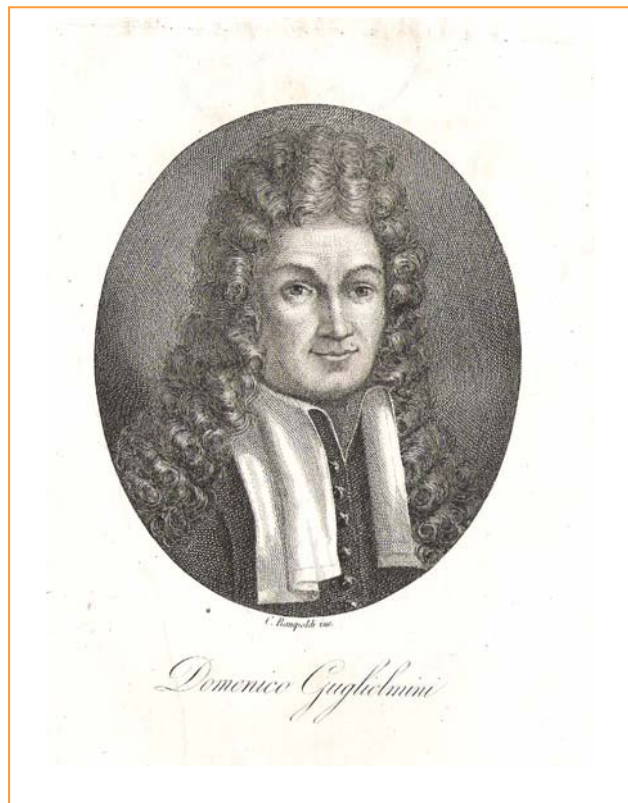
Torniamo in Italia per parlare di Doménico Gugliemini (Bologna 1655 – Padova 1710), contemporaneo di Edme Mariotte, è considerato l'iniziatore dello studio dell'Idraulica Fluviale, scienza i cui primi accenni, risalenti al VI secolo prima di Cristo, si devono al greco Ctesias, lo abbiamo incontrato nel Capitolo 2.

Nacque a Bologna dove studiò sia la Matematica che la Medicina; scrisse alcune cose di Astronomia, ma ben presto volse la sua attenzione all'Idraulica. Mentre era professore di Matematica all'università di Bologna, egli compilò il suo primo trattato in questo campo "*Aquarum fluentium mensura nova methodo inquisita.*", pubblicato nel 1690.

Due anni più tardi fu nominato Soprintendente delle acque per il distretto e professore di Idrometria all'università. In questo periodo Gugliemini si impegnò in studi di Idraulica pratica e nel 1697 pubblicò il suo lavoro più importante "*Della natura dei fiumi.*" che ricevette una vasta diffusione.

L'anno successivo ottenne la cattedra di Matematica di Padova, ma fu costretto a praticare l'attività di medico per mantenersi una vita confortevole.

Nel 1701 lasciò l'Idraulica accettando la cattedra di Medicina, argomento delle sue successive sedici

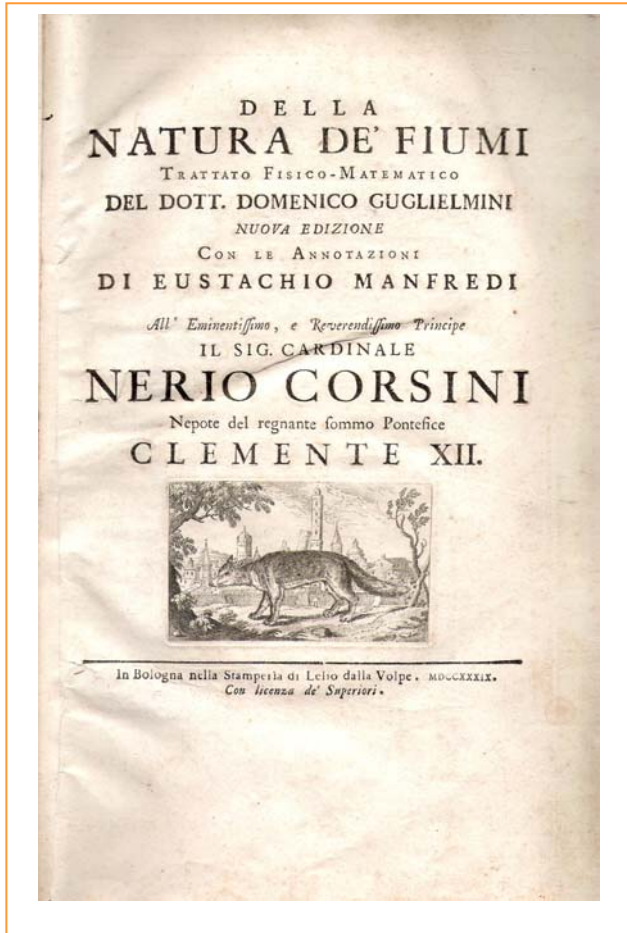


pubblicazioni.

Nello studio dell'Idraulica Fluviale Guglielmini si basò sia sull'osservazione che sull'esperimento, in campo ed in laboratorio. Il suo contributo più rilevante fu l'ampia analisi del ruolo giocato dai torrenti e dai fiumi, nell'ambito del fenomeno che, per primo, chiamò '*Ciclo idrologico*'. Dal punto di vista scientifico, i concetti di Guglielmini furono un aiuto essenziale nel consolidamento dei principi del flusso, tuttavia ancora imperfetti. La sua opera "*Della natura dei fiumi*." costituì un'assoluta e preziosa novità, tanto che Leibniz, in una lettera indirizzata a Jean I Bernoulli, consigliava di premunirsi delle letture dello scienziato italiano ed in particolare di questa.

Domenico Guglielmini antepose alla teoria – ancora insufficiente - le osservazioni dirette dei fenomeni "*tenendo sempre di mira la pratica applicazione, il pratico vantaggio*"; così annota Eustachio Manfredi che curò la pubblicazione dell'edizione del 1804.

Egli fu pienamente d'accordo con le innovative affermazioni di Benedetto Castelli sul principio della Legge di Continuità dell'Idraulica; verificò inoltre che la velocità dell'efflusso cambia con la radice quadrata del carico, come affermato da Evangelista Torricelli, ma, come quest'ultimo, ignorò la partecipazione al fenomeno dell'accelerazione di gravità  $g$ , che invece considerò, anche se soltanto dal punto di vista qualitativo, nel tentativo di spiegare perché una corrente, *a pelo libero*, in un canale o in un fiume, presentasse velocità differenti nei diversi punti di ogni sezione considerata (più veloce al centro, lontano dalle sponde e dal fondo; più lenta presso le sponde ed il fondo).



Doménico Guglielmini fu dapprima tentato di accettare l'ipotesi (più tardi ingiustamente a lui attribuita) che la distribuzione della velocità in un fiume, in ogni sezione trasversale alla corrente, dovesse essere parabolica, tuttavia dedusse che questo non era riscontrabile dalle osservazioni; considerò pertanto che la distribuzione parabolica dovesse essere caratteristica di un fluido 'perfetto'.

L'applicazione di Guglielmini della legge dell'efflusso alle condizioni di flusso da una paratoia parzialmente chiusa o in un tratto di canale inclinato fu il primo passo verso la considerazione che un fluido in movimento, in qualunque situazione si trovi, possiede un contenuto di energia che ne determina le caratteristiche di velocità e pressione, che potevano essere rappresentate attraverso formulazioni matematiche.

Guglielmini osservò che la velocità di una corrente *a pelo libero* varia con la radice quadrata della profondità a partire dalla superficie ma, a causa della difficoltà di comprendere la vera relazione tra velocità, pressione e profondità, egli poté soltanto concludere:

*"Nell'acqua corrente, che ha una certa profondità, la parte superiore comprime la parte inferiore con la forza di gravità a crea un movimento verso differenti livelli, che significa in pratica*

*che ognuno ha un esatto grado di velocità che può essere acquisito discendendo dalla superficie verso il fondo . . .”*

. . . ma giunse soltanto ad intuire, senza esprimere alcuna teoria, quale parte avesse, nel moto dei fluidi, la resistenza opposta dal contorno dell'álveo (sponde e fondo) e quale fosse l'importanza, nello stesso moto, dell'inclinazione del corso d'acqua:

*“L'acqua passante dalla quiete al moto o lasciando un serbatoio . . . acquisisce, mentre discende lungo i fiumi che hanno un piano inclinato sull'orizzontale, qualche grado di velocità, ma questo molto presto si riduce all'uniformità dovuta alla grande resistenza che l'acqua incontra nel suo moto . . . Una volta ridotta all'uniformità, l'acqua deve, tuttavia, mantenere la velocità che ha precedentemente acquisito nel fluire sul piano inclinato e questo è regolarmente più importante quanto è più importante l'inclinazione.”*

Guglielmini fu così il primo ad evidenziare, seppure come semplice indicazione, l'esistenza di uno stato di equilibrio che viene raggiunto da una corrente, a parità di inclinazione, tra la tendenza dell'acqua ad aumentare la propria velocità, per effetto dell'accelerazione di gravità, e l'effetto della resistenza dell'álveo che si oppone al movimento.

Lo studioso italiano ebbe però meno successo nel tentativo di giungere ad una formulazione quantitativa della resistenza al moto della corrente. Sebbene la precedente sua affermazione porti a dimostrare la diretta proporzionalità tra velocità e pendenza, Guglielmini assunse che la velocità stessa fosse proporzionale alla sola radice quadrata della profondità dell'acqua e, per motivi già indicati, che il contenuto energetico (carico idraulico) fosse proporzionale alla potenza  $3/2$  della profondità. Questa indicazione, corretta ma incompleta, lasciò l'argomento nel regno dei principi non ancora dimostrati.

Invece le sue osservazioni qualitative sul comportamento dei sedimenti furono assai corrette:

*“Una corrente con sufficiente velocità scorre nel suo letto e con l'aumento della profondità la inclinazione è minore, e così nel suo moto se essa corre torbida la corrente depositerà i sedimenti nel letto. Così io penso che non c'è altra ragione per cercare quale inclinazione sia necessaria per una corrente per essere certo che non copra di depositi il proprio letto, oppure, se l'inclinazione è ben maggiore del necessario, che essa eroda in modo eccessivo.*

*E' certo che una corrente si allarga e si approfondisce in proporzione alla violenza del moto che erode e porta via la terra che forma le sue sponde ed il fondo; è quindi necessario che la forza di erosione sia ben più grande della resistenza della terra o degli altri materiali che formano il letto, perché altrimenti se l'una è uguale all'altra non ci sarebbe erosione; ed anche se la resistenza è maggiore della forza. E' sempre necessario dire che il processo di erosione di una corrente d'acqua diminuisce gradualmente oppure la resistenza delle pareti aumenta . . . sino ad una raggiunta sorta di equilibrio . . . “*

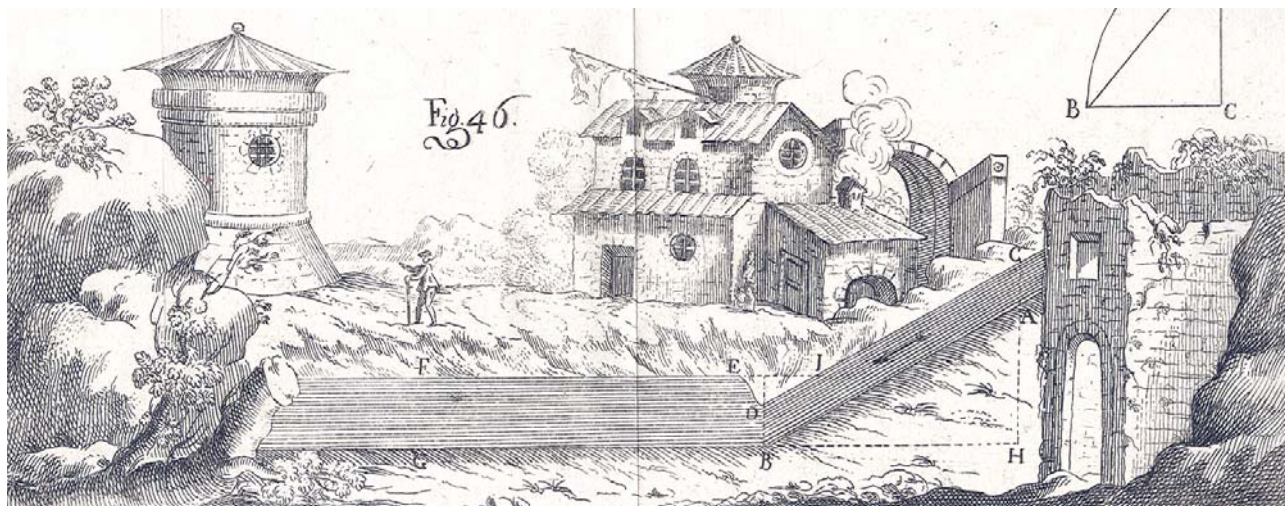
Di Doménico Gugliemini ricordiamo che per primo descrisse il risalto, o salto idraulico, poi rigorosamente trattato da Giorgio Bidone (Casalnocéto 1781-Torino1839) e per questo oggi chiamato 'Salto di Bidone'. È il fenomeno che si riscontra quando una corrente a pelo libero, resa veloce da un passaggio stretto, rallenta nuovamente, per esempio incontrando un nuovo allargamento dell'álveo oppure una brusca diminuzione della pendenza del fondo.

Si forma, così, una sorta di vortice orizzontale, in tutta la larghezza della corrente, che dissipa l'energia contenuta nella situazione precedente di maggiore velocità.

Il Salto di Bidone, o risalto, è molto importante nelle applicazioni delle misure di portata delle correnti a pelo libero.

Ecco come Doménico Guglielmini lo descriveva, avvalendosi di disegni che danno il senso di un modo, antico ma affascinante, di 'fare scienza':

*“Un non so che di simile s’osserva nelle cadute dell’acque per li canali molto declivi e ristretti, i quali terminano in canali molto meno declivi e più larghi. Sia il canale più declive AB (fig. 46) ed il meno declive BG . . . discenda l’acqua per AB, accelerando il suo moto, ed abbia in B quella velocità che è dovuta alla caduta CH . . . s’osserva . . . che l’acqua per AB non porta la*



*sua superficie CD ad unirsi con quella di EF, e l’acqua resta in ED sospesa, conservandosi la superficie dell’acqua corrente in CDEF. . . [L’acqua] arrivata in D è trasportata con maggiore velocità di quella che le possa essere somministrata, cadendo da E in D, essendo maggiore la velocità della discesa CD di quella dell’altezza DI, perciò è necessario che vi resti il vacuo EDI .”*

Il sécolo immediatamente successivo al Rinascimento contribuì in modo apprezzabile alla créscita dell’ancóra neonata scienza dell’Idraulica.

Almeno una scuola si formò ed un’altra già mostrava segni di un futuro vigore.

Gli esperimenti di laboratorio crebbero in frequenza ed affidabilità ed il campo dell’osservazione iniziò ad accettare come un complemento, se non un aiuto, i *test* a scala ridotta.

Il principio dell’efflusso fu unito a quello della continuità; la pressione atmosferica, il vuoto furono accettati definitivamente; alcune prime formulazioni dischiusero la porta all’analisi dinamica e di resistenza del flusso.

Si aprirono nuovi orizzonti della ricerca: l’Idrologia, la Meteorologia, l’Idrodinamica, l’Idrometria, l’Idraulica Fluviale . . .

Ma era ancóra una fase iniziale della ricerca teòrica che, quindi, non trovò immediate applicazioni nella pratica, dove si continuò a lavorare sorretti dalla secolare esperienza, che si dimostrava, nei fatti, più affidabile nei risultati attesi, anche se a volte addirittura in contrasto con le nuove scoperte.

La difficoltà della ricerca teòrica nel conquistare la pratica costruttiva sarà il ‘clima costante’ nel quale si svilupperà il prossimo Capitolo 10, dove affronteremo la storia delle ruote idrauliche, che diedero vita, sin dal lontano passato, ai mulini.

Singolare sarà l'epilogo: mentre le ruote idrauliche, collegate alle macchine, resteranno sostanzialmente invariate sin quasi ai giorni nostri, il loro studio porterà alla più profonda innovazione della scienza Idraulica: l'analisi energetica del flusso.

Il fluido in movimento, cioè, fu interpretato attraverso la nuova prospettiva di analisi dell'energia in esso contenuta, che nel movimento stessa si manifesta, effettiva o potenziale, giungendo così al passo più rilevante, vero salto nell'Idraulica moderna, del quale tutti ricordano il nome più illustre: Daniel Bernoulli.

\* \* \*