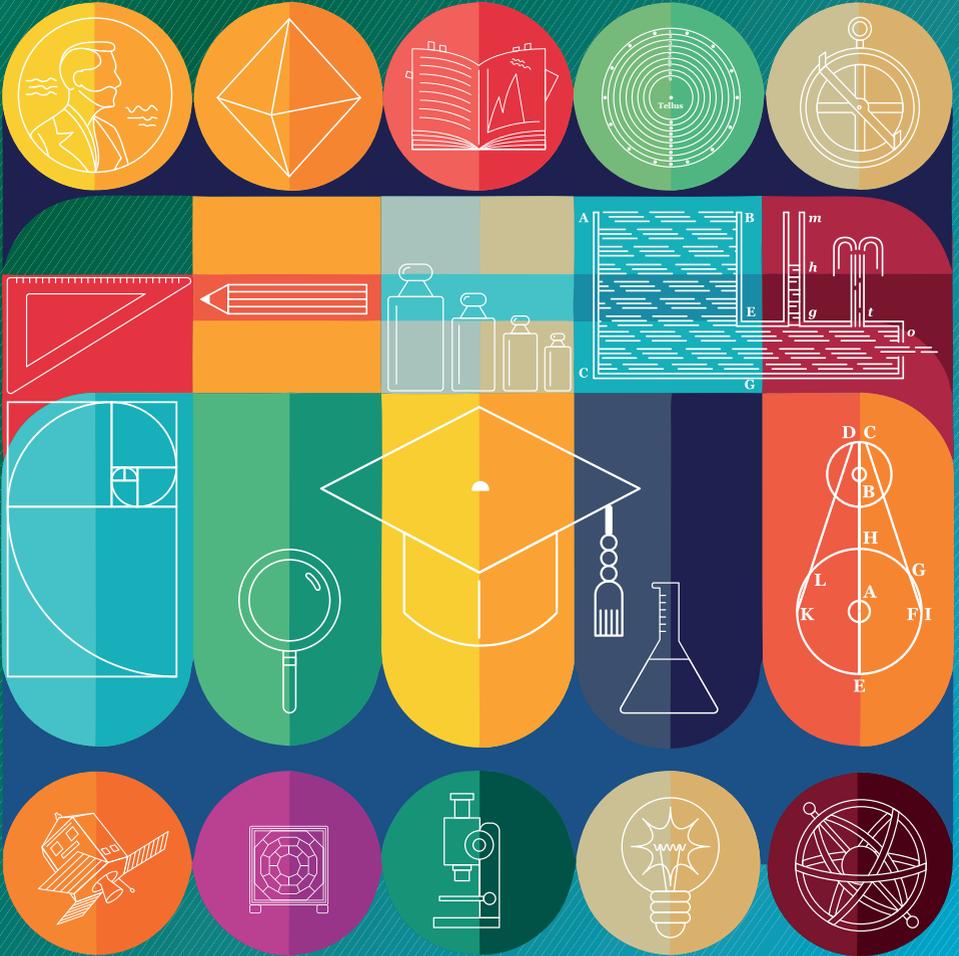




# APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

VERS UNE INTERDISCIPLINARITÉ  
DIDACTIQUE - HISTOIRE DES SCIENCES - ÉPISTÉMOLOGIE



## DIRECTION

Laurence Maurines  
Christian Bracco

## JOURNÉE D'ÉTUDE

3 juin 2021  
MSH Paris-Saclay





13

# APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

*Vers une interdisciplinarité  
didactique – histoire des sciences – épistémologie*

## **JOURNÉE D'ÉTUDE**

3 juin 2021  
MSH Paris-Saclay

## **DIRECTION**

Laurence Maurines  
Christian Bracco





MSH Paris-Saclay Éditions, Université Paris-Saclay, 2024.

4, avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette

[www.msh-paris-saclay.fr](http://www.msh-paris-saclay.fr)

Collection « Actes »

ISSN 2800-7891



Cet ouvrage est publié en accès ouvert selon les termes de la licence Creative Commons Attribution – Utilisation non commerciale – Pas d'œuvre dérivée 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0), qui permet le partage de l'œuvre originale (copie, distribution, communication) par tous moyens et sous tous formats, sauf à des fins commerciales, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée et diffusée sans modification, dans son intégralité.

Pour plus d'informations : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ISBN 978-2-9590898-2-4

# Enseigner la mécanique des fluides au lycée et en début de licence en s'appuyant sur l'histoire des sciences

## *Propositions didactiques*

Clément CRASTES

Inscrit dans le champ de recherche de la *NoS* (*Nature of Science*) et associé au thème de la modélisation, ce texte aborde l'enseignement de la mécanique des fluides dans le secondaire et le supérieur, ainsi que l'appui que peut y apporter l'histoire des sciences (HS). Nous effectuons un court état des lieux sur le recours à l'HS dans l'enseignement de la physique, puis nous rappelons des éléments sur l'enseignement de la mécanique des fluides dans un cours traditionnel de physique, dans le secondaire et en premier cycle universitaire. Enfin, nous présentons des propositions didactiques associées à trois visées : épistémologique, liée au développement de la pensée critique et rattachée à l'apprentissage scientifique. Ces propositions se réfèrent à la construction historique de concepts qui sont abordés dans un cours de mécanique des fluides en lien avec l'étude de l'écoulement d'un fluide. Les éléments historiques sont centrés sur la période allant de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle à la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle.

**MOTS-CLÉS** : modélisation, *Nature of Science* (*NoS*), histoire des sciences, enseignants de premier cycle universitaire, mécanique des fluides

Les programmes de sciences du secondaire et post-bac français ont subi différentes réformes ces dernières années<sup>1</sup>. Parmi les nouveautés thématiques des programmes de l'enseignement de spécialité de physique-chimie

---

<sup>1</sup> On se réfère ici à la réforme de 2014 pour les classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) et à celle de 2020 pour le lycée général et technologique.

au lycée figure la mécanique des fluides : statique des fluides en classe de première, dynamique des fluides en classe de terminale. Ces thèmes seront ensuite repris et approfondis lors du premier cycle universitaire. Ces programmes de première et de terminale, ainsi que ceux de l'enseignement commun de physique-chimie en seconde et de cette même discipline en filière scientifique des CPGE, valorisent l'activité de modélisation. Il est notamment attendu des enseignants qu'ils contextualisent leur enseignement et introduisent des situations expérimentales « authentiques » permettant de confronter les prévisions théoriques aux résultats expérimentaux. Ces programmes, ainsi que ceux de l'enseignement scientifique du tronc commun de lycée, recommandent par ailleurs aux enseignants d'introduire des éléments d'histoire des sciences (HS) afin de mettre en perspective le thème traité lorsqu'il s'y prête.

Ces éléments curriculaires, liés au recours à l'HS et à la modélisation, résonnent avec des recommandations formulées en sciences de l'éducation dans le champ de recherche centré sur la dimension épistémologique de l'enseignement des sciences. Principalement exploré à l'étranger, ce champ est désigné par l'acronyme *NoS* (*Nature of Science*). Les enjeux associés à la compréhension de la nature des savoirs scientifiques et de leurs modes d'élaboration sont nombreux, allant notamment d'un meilleur apprentissage des savoirs et savoir-faire scientifiques à la capacité à se forger un avis argumenté et à agir de manière responsable dans des contextes variés (Allchin, 2011 ; Hodson, 2008).

Si des travaux sur l'HS, en particulier dans le domaine de la *NoS* et de la modélisation, concernent le secondaire, rares sont ceux qui portent sur le supérieur. Si les domaines de la physique enseignés au primaire et dans le secondaire ont été très étudiés en didactique des sciences, c'est moins le cas de domaines plutôt réservés à l'enseignement supérieur, tel celui de la mécanique des fluides (Closset, 1992 ; Martin, Mitchell & Newell, 2003), à l'exception de la statique des fluides.

Face à ces différents constats, nous avons entrepris une recherche afin d'examiner comment les enseignants de physique introduisent la mécanique des fluides au niveau de l'enseignement supérieur et quel appui ils pourraient trouver dans l'histoire de ce domaine. Nous nous centrons ici

sur le second point<sup>2</sup>. Nous évoquerons tout d'abord les éléments de mécanique des fluides au programme dans le secondaire et en premier cycle universitaire en France, puis nous ferons quelques remarques sur la place accordée à une réflexion épistémologique et à l'HS dans ces programmes. Nous aborderons également les difficultés des élèves et étudiants en mécanique des fluides, ainsi que celles associées à la dimension épistémologique de l'apprentissage de la physique. Nous poursuivrons par un panorama de la construction historique des principaux concepts abordés dans l'étude de l'écoulement d'un fluide, en nous centrant sur la période allant de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle à la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, et structurerons notre présentation autour du thème épistémologique empirie/théorie, connu pour être associé à des difficultés. Nous terminerons par quelques propositions de mobilisation de l'HS en classe correspondant à trois visées d'apprentissage, épistémologique, scientifique et critique.

### **Éléments sur l'enseignement et l'apprentissage de la mécanique des fluides dans le secondaire et en premier cycle universitaire**

#### *Les contenus au programme d'un cours « traditionnel » de physique*

Dans les programmes de physique du secondaire français est menée une étude de la statique des fluides et des écoulements dits « parfaits », écoulements pour lesquels les phénomènes de viscosité sont négligeables. En premier cycle universitaire, les thèmes abordés dans le secondaire sont approfondis et on y ajoute l'étude d'un écoulement visqueux.

Détaillons une partie des nouveautés des programmes appliqués à la rentrée 2020 dans le secondaire français. En première générale est abordée la description d'un fluide au repos (notion de forces pressantes, loi fondamentale de la statique des fluides) et, en terminale, la modélisation de l'écoulement d'un fluide (poussée d'Archimède, débit volumique, relation de Bernoulli et effet Venturi). On retrouve ces contenus dans la filière technologique sciences et technologies de l'industrie et du développement durable, dénommée STI2D.

---

<sup>2</sup> Pour le premier, voir : Crastes, 2019 ; Crastes & Maurines, 2021.

L'étude de ces notions est prolongée au sein du continuum bac-3/bac+3<sup>3</sup>. Ainsi, en sections de formation de techniciens (brevet de technicien supérieur [BTS] et institut universitaire de technologie [IUT]), on étudie les pertes de charge<sup>4</sup> et le fonctionnement des pompes hydrauliques, *via* notamment l'étude d'abaques et l'expérimentation. En CPGE et en licence scientifique, on peut aller jusqu'à aborder l'équation de Navier-Stokes, qui est associée à l'écoulement visqueux et incompressible d'un fluide. Dans un cursus biomédical, l'accent est mis sur la modélisation de l'écoulement sanguin, avec l'étude des pertes de charge et des échanges sanguins.

L'ordre pédagogique traditionnel de présentation des équations régissant un écoulement incompressible en premier cycle universitaire est celui indiqué ci-dessous. En notant  $\vec{v}$  le champ de vitesse et  $P$  le champ de pression lors de l'écoulement d'un fluide de masse volumique  $\rho$  et de viscosité dynamique  $\eta$  dans un champ de pesanteur  $\vec{g}$ , la première équation introduite est l'équation générale de Navier-Stokes :

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})(\vec{v}) \right] = \rho \vec{g} - \text{grad}(P) + \eta \Delta \vec{v}$$

L'équation de Navier-Stokes se simplifie en l'équation d'Euler, lorsque les phénomènes dissipatifs sont négligeables :

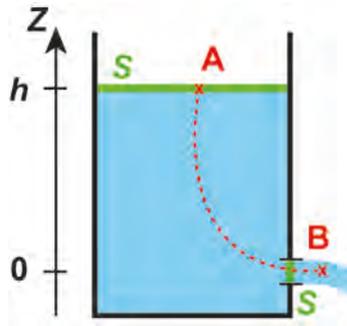
$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})(\vec{v}) \right] = \rho \vec{g} - \text{grad}(P)$$

L'équation d'Euler est elle-même simplifiable en la relation de Bernoulli, si on se limite à un écoulement permanent, parfait et que l'on travaille avec deux points  $A$  et  $B$  d'altitudes  $z_A$  et  $z_B$  d'une même ligne de courant (voir Document 1) :

$$P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \rho g z_B$$

<sup>3</sup> Projet ministériel visant à lisser les modes d'apprentissage de l'élève du début du lycée (bac-3) à la fin du premier cycle universitaire (bac+3).

<sup>4</sup> Les pertes de charge dans une canalisation correspondent à la baisse de pression due à la viscosité de l'écoulement et à la géométrie de la canalisation.



**Document 1** – Exemple d'un réservoir percé d'un trou

Source : Barnett, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toricelli.png>>.

Dans le cas de l'écoulement à travers l'orifice (où se situe le point *B*) d'un réservoir de surface libre très grande devant la surface de l'orifice (où se situe le point *A*), on peut simplifier la relation de Bernoulli et obtenir la relation dite de Torricelli :

$$v_B = \sqrt{2gh}$$

### *Les difficultés des élèves en mécanique des fluides*

Concernant les sources de difficulté des élèves en mécanique des fluides, la statique des fluides a été massivement traitée (Kariotoglou, Koumaras & Psillos, 1995 ; Psillos, 1999, 2004 ; Besson, 2001, 2004). C'est moins le cas de domaines propres à l'enseignement supérieur comme la cinématique et la dynamique des fluides. Nous n'avons pas repéré d'autres travaux que ceux de Jean-Louis Closset (1992 ; Blondin, Closset & Lafontaine, 1992) et de chercheurs de l'Université du Wisconsin avec leur *Fluid Mechanics Concept Inventory (FMCI)* (Martin, Mitchell & Newell, 2003), repris notamment par Duncan M. Fraser et ses collaborateurs (2007). En statique des fluides, Dimitris Psillos (2004) insiste sur la différenciation entre l'aspect extensif et l'aspect intensif des grandeurs associées : l'aspect non additif de la pression, indépendant de la

quantité de matière, ne semble pas évident pour tous les élèves. Pour certains élèves, c'est la pression qui est transmise à travers les liquides et pour d'autres, c'est la force. Les propriétés vectorielles de la force sont attribuées à la pression.

Concernant la dynamique des fluides, l'équipe de Closset (Blondin, Closset & Lafontaine, 1992) l'aborde dans l'objectif d'améliorer l'enseignement de l'électricité. Notant que Samuel Johsua (1989) rend compte des raisonnements d'élèves en électricité selon la métaphore du fluide en mouvement, ils examinent la possibilité de proposer l'écoulement d'un liquide dans un circuit fermé, c'est-à-dire bouclé sur lui-même, comme analogie possible pour l'étude d'un circuit électrique. L'étude de Closset et de ses collaborateurs est menée *via* des questionnaires crayon-papier auprès d'une centaine d'étudiants de première année universitaire scientifique ayant déjà reçu un enseignement d'hydrodynamique et auprès d'une cinquantaine de novices. Les situations envisagées concernent un circuit hydraulique constitué d'une canalisation fermée qui est reliée à une pompe et qui présente un ou plusieurs rétrécissements, une ou plusieurs ramifications.

Les chercheurs s'intéressent aux tendances de « raisonnement spontané », au sens décrit par Laurence Viennot (1979). Non appris en tant que tel, ce raisonnement se manifeste par des erreurs et peut s'ériger en obstacle lors de l'apprentissage de concepts scientifiques. Les chercheurs signalent que les élèves ont des difficultés à appréhender le problème dans son ensemble : ils ne voient pas l'importance de l'aspect fermé du circuit. Ils repèrent trois idées reçues liées à un raisonnement qualifié de séquentiel : d'une part, la section diminue donc le débit volumique diminuerait, d'autre part, la section diminue et une même quantité d'eau doit traverser une section donnée donc le débit volumique augmenterait (il y a confusion entre le débit volumique et la vitesse moyenne) et, enfin, le rétrécissement n'aurait pas d'influence sur l'amont du circuit. Par ailleurs, ils repèrent que les quatre principaux modes de raisonnement dégagés antérieurement par Closset (1992) pour les circuits électriques se manifestent dans des proportions différentes en hydrodynamique : un raisonnement local (peu présent dans les deux cas), un raisonnement séquentiel qui est minoritaire en mécanique des fluides et majoritaire en électricité, un raisonnement à

débit constant qui est majoritaire en mécanique des fluides et minoritaire en électricité et enfin un raisonnement systémique. Même avec ce dernier mode de raisonnement, plus de la moitié des élèves interrogés pensent que la pression est la même dans tout le circuit hydraulique fermé étudié. Enfin, Closset estime qu'il existe une hiérarchie entre ces modes de raisonnement, hiérarchie qu'il s'agit d'accepter et de faire franchir à l'élève pour espérer, à terme, une assimilation correcte du contenu scientifique. Closset parle de « chemin cognitif » :

Les modes de raisonnement peuvent être hiérarchisés et constituent alors un passage obligé dans la construction de la connaissance scientifique de nos élèves et de nos étudiants. Les rencontrer et les dépasser en ne tentant pas de bousculer leur hiérarchie naturelle serait la garantie de l'acquisition des compétences cognitives nécessaires à une connaissance scientifique stable d'un sujet déterminé. Nous parlerons à ce propos de « chemin cognitif ». (Closset, 1992 : 155)

Terminons en signalant qu'au cours d'entretiens réalisés auprès d'étudiants français et américains (Crastes, 2019), est ressortie l'idée que lors d'un rétrécissement de canalisation, la pression serait plus forte là où la section serait la plus étroite, les particules de fluide y ayant moins de place. Précisons également que certaines difficultés susceptibles d'être rencontrées par les élèves et étudiants nous semblent devoir varier d'une filière à une autre (technicité mathématique, capacité d'abstraction, recours à l'informatique pour rechercher une solution approchée, etc.), tandis que d'autres paraissent communes à l'ensemble des filières (choix du modèle, détermination des termes négligeables dans l'équation régissant le phénomène, confrontation des prévisions théoriques aux résultats expérimentaux).

*Les éléments épistémologiques et historiques dans l'enseignement et l'apprentissage de la physique, en particulier de la mécanique des fluides*

Après les concepts scientifiques, lois et modèles au programme d'enseignement, abordons à présent les savoirs épistémologiques et historiques mentionnés dans les programmes.

Si les préambules des programmes mettent en avant la modélisation et l'HS, les objectifs qui leur sont assignés restent généraux, implicites

et non opérationnalisés dans les tableaux de contenus. Par exemple, en CPGE, il est question uniquement dans le programme « d'acquérir des éléments de culture », de mettre le thème étudié « en perspective avec l'HS et des techniques » dans le cadre d'une « mise en contexte des contenus scientifiques ».

Dans les manuels scolaires, l'HS est souvent peu abordée en mécanique des fluides. Cela est particulièrement vrai en France. Et ce, contrairement à d'autres domaines comme la mécanique quantique ou l'optique, où cette approche est davantage mise en avant. Cela surprend d'autant plus qu'il existe une littérature en histoire de la mécanique des fluides qui est riche et qui fait l'objet de recherches actuelles (par exemple Olivier Darrigol et Alexandre Guilbaud en France).

Le même constat peut être fait à propos des revues dédiées aux enseignants et aux chercheurs, comme *Le Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie* en France ou *l'American Journal of Physics* aux États-Unis. Très peu d'articles ont été publiés en lien avec l'histoire de la mécanique des fluides sur la période allant du XVIII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle. À ce jour, à notre connaissance, aucun article dans *Le Bup* et un seul dans *l'American Journal of Physics*, datant de 1953 (Seeger, 1953).

Si l'HS n'est pas explicitée, elle inspire néanmoins certains dispositifs et expériences proposés dans les manuels et ressources pour enseignants et élèves/étudiants, comme celui qui sera discuté dans la dernière section de notre texte.

Par ailleurs, les études dans le champ de la *NoS* montrent que les enseignants partagent des conceptions de la science/des sciences voisines de celles des élèves et étudiants. Semblables à une mosaïque, elles relèvent d'une vision réaliste naïve et empirico-inductive de la science (Lederman, 2007 ; Roletto, 1998). De plus, selon cette vision, la théorie serait pour beaucoup découplée des résultats expérimentaux et les modèles décriraient la réalité (Tiberghien, 1994 ; Van Driel & Verloop, 2002 ; Soler, 2013). Par ailleurs, les connaissances en HS des enseignants du secondaire et du supérieur sont limitées (Martinand, 1993 ; Crastes, 2019<sup>5</sup>).

---

<sup>5</sup> À quelques rares exceptions dans l'échantillon étudié, les connaissances en histoire des sciences des enseignants interrogés dans le cadre de notre thèse sont lacunaires et se limitent à la citation de quelques noms, couplés à des portraits et des dates.

Ces différents constats interrogent sur les objectifs que les enseignants sont susceptibles de se fixer. En effet, recourir à l'HS lors d'un enseignement de physique nécessite au préalable de la part de l'enseignant de réfléchir à ce qu'il cherche à travailler avec les étudiants et à ce qu'il prend en charge dans son cours de physique.

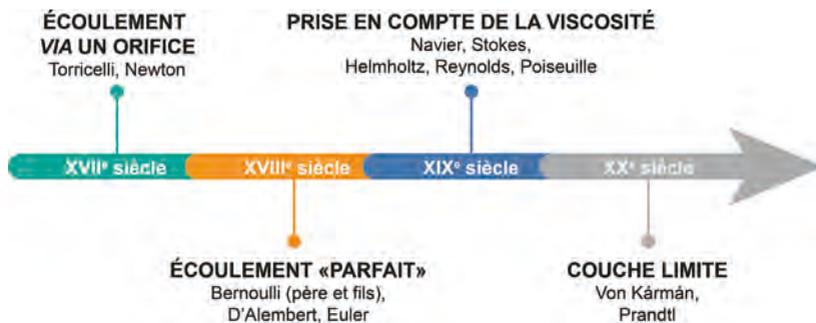
N'utiliser l'HS que pour aider à l'apprentissage de concepts scientifiques au programme risque d'aboutir à son appauvrissement. En revanche, comme le soulignent Jean-Louis Martinand (1993) et d'autres didacticiens de la physique (Hosson, 2004 ; Maurines & Beaufils, 2011), y recourir peut être l'occasion d'étudier les conceptions de scientifiques d'autrefois et leur évolution au sein d'une communauté de recherche, d'y déceler des pistes permettant d'émettre des hypothèses sur les difficultés des élèves, d'élaborer des dispositifs d'enseignement adaptés, en ravivant le questionnement scientifique, à la fois pour l'enseignant et l'élève.

Introduire l'HS dans l'enseignement peut être aussi l'occasion de développer la réflexion des élèves sur la nature des savoirs scientifiques et de leurs modes d'élaboration, et plus largement sur la *NoS*. Ainsi, Laurence Maurines et Daniel Beaufils (2013) proposent de définir des objectifs précis d'apprentissage épistémologique liés au recours à l'HS, comme faire comprendre, entre autres, l'évolution des connaissances au cours du temps, par continuité et rupture, la relation forte entre questions techniques et évolution des idées, l'interdépendance entre sciences et société, le fait que les savants d'une époque donnée ont rencontré des difficultés conceptuelles, les interactions entre sciences et croyances, le fait que l'activité scientifique est source de controverses. Dans la lignée des investigations documentaires à caractère historique fondées sur des dossiers de textes spécifiquement conçus pour chaque objectif et contexte historico-scientifique proposés par ces chercheurs, a été élaboré et expérimenté en classe un dispositif d'enseignement centré sur l'histoire de la loi de la réfraction (Slăima & Maurines, 2017). Celui-ci vise notamment à travailler les interactions entre théorie et empirie et à s'interroger sur la démarche suivie (la construction de la pensée scientifique débute-t-elle ou non systématiquement par de la théorie ?, la démarche suivie est-elle systématiquement hypothético-déductive ?, etc.).

## Histoire de la mécanique des fluides

Le travail mené ici s'inscrit dans un cadre de didactique et non d'HS. Nous n'avons pas la prétention d'avoir suivi une méthodologie d'historien. Il n'y a pas eu de travail sur les textes originaux, même si une partie d'entre eux a été consultée. Nous débutons par une description historique (Crastes, 2019) qui découle de travaux préalables, riches et fournis, d'historiens des sciences (Hahn, 1965 ; Nordon, 1992 ; Darrigol, 2005 ; Guilbaud, 2007). Puis nous ouvrons dans la section suivante quelques pistes pédagogiques d'utilisation de cette description.

La frise du document 2 retrace les principales étapes de l'histoire de la mécanique des fluides qui ont eu lieu entre le xvii<sup>e</sup> siècle et la première moitié du xx<sup>e</sup> siècle.



**Document 2** – Principales étapes de l'histoire de la mécanique des fluides du xvii<sup>e</sup> siècle à la première moitié du xx<sup>e</sup> siècle

Source : Réalisation de l'auteur.

Nous nous centrons sur la période allant de la fin du xvii<sup>e</sup> siècle à la première moitié du xix<sup>e</sup> siècle, dont les avancées correspondent à l'essentiel du contenu enseigné en premier cycle universitaire.

Nous proposons une périodisation en trois stades, reconstruite *a posteriori* à partir de la discipline telle qu'elle est actuellement enseignée, chacun de ces stades correspondant à des questionnements spécifiques :

1. une **problématique expérimentale** et une **tentative d'interprétation** au XVII<sup>e</sup> siècle, qui correspondent aux prémisses,
2. un **développement théorique qui présente des limites** et aboutit à des difficultés au siècle des Lumières,
3. et enfin un **nouveau modèle qui permet de dépasser ces difficultés** dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle.

### Stade 1

Au XVII<sup>e</sup> siècle, en lien avec le développement des fontaines dans les cités italiennes, Evangelista Torricelli (1608-1647) étudie le mouvement de l'eau à la sortie d'un vase percé d'un trou étroit. Il choisit un vase large de niveau d'eau maintenu constant, permettant d'assurer un écoulement quasi-permanent, et indique :

Je suppose que les eaux, qui sortent avec violence, ont au point de leur sortie la mesme impétuosité, ou le mesme degré de vistesse, qu'auroit acquis un corps pesant ou une goutte de la mesme eau, si elle estoit tombée naturellement, de la plus haute surface de la mesme eau, jusques à l'ouverture par où elle sort. (Torricelli, *De Motu Aquarum* [1644], traduction de 1664, citée par Nordon, 1992 : 14)<sup>6</sup>

En ce qui concerne les conditions expérimentales dans lesquelles il se place pour obtenir un tel résultat, il précise choisir un récipient « d'une capacité convenable » et « percé d'un petit trou » (Torricelli, cité par Nordon, 1992 : 14).

L'enjeu est alors d'expliquer pourquoi l'eau, en sortie du trou, a une vitesse égale à celle qu'elle aurait eue si elle était tombée en chute libre depuis la surface libre du réservoir. Torricelli réalise une expérience où le jet d'eau, en sortie du réservoir, est pointé vers le haut. Le jet d'eau devrait alors parvenir à monter jusqu'au niveau de la surface libre du réservoir, ce qu'il ne constate pas expérimentalement. Il reprend alors l'expérience avec du mercure et les résultats lui paraissent un peu plus

---

<sup>6</sup> La formulation moderne de ce texte, nommée loi de Torricelli, se résume en  $v = \sqrt{2gh}$  avec  $v$  la vitesse du fluide considéré au niveau de l'orifice,  $g$  le champ de pesanteur au sol et  $h$  la hauteur entre l'orifice et la surface libre du fluide dans le récipient.

en accord avec ses prévisions. Il en conclut que : « L'expérience mesme semble en quelque façon prouver ce principe, bien qu'aussi elle semble en quelque façon le détruire » (Torricelli, cité par Nordon : 122). Christian Huygens (1629-1695) reprend les travaux expérimentaux de Torricelli, mais ils ne sont toujours pas concluants. Huygens indique alors que la loi de Torricelli n'a pu être « desmontrée par raison, mais seulement prouvée par expérience » (Huygens, cité par Nordon, 1992 : 123).

Marcel Nordon considère que Torricelli « ouvre une porte de cinématique sans savoir que la dynamique est derrière » (Nordon, 1992 : 54) et pointe l'état de la réflexion à cette époque : « Les difficultés sont considérables car une telle démarche impose le développement d'une science du mouvement dépassant largement l'étude du point matériel ou même des systèmes de corps » (Nordon, 1992 : 54). C'est au siècle suivant qu'une preuve théorique de ce résultat est obtenue.

## Stade 2

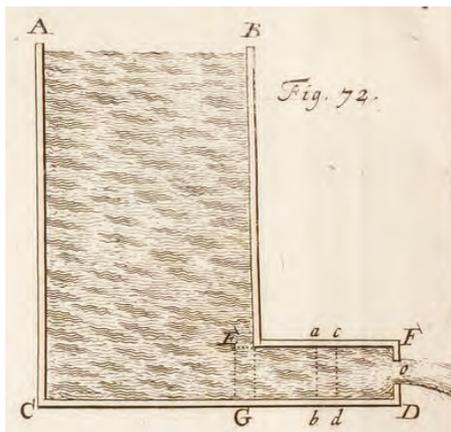
Dans *Hydrodynamica* (1738), Daniel Bernoulli introduit deux idées nouvelles : le principe de conservation des forces vives (*vis viva* : « La descente réelle est égale à la montée potentielle » [Bernoulli, cité par Nordon, 1992]<sup>7</sup>) et le découpage du fluide en tranches transversales pour étudier l'écoulement. La pression est présentée comme un effort exercé sur les parois (le rôle de la pression à l'intérieur du fluide n'est pas encore perçu) et est reliée à la vitesse aux frontières du volume global de fluide en régime permanent.

Le principe des forces vives et le découpage du fluide en tranches permettent à Daniel Bernoulli de prouver théoriquement la loi de Torricelli.

---

<sup>7</sup> Daniel Bernoulli énonce en ces termes le principe des forces vives dans *Hydrodynamica* : « Nous considérerons la montée potentielle d'un Système, dont les différentes parties se meuvent avec des vitesses quelconques, comme représentée par la hauteur susceptible d'être atteinte par le centre de gravité du système dans le cas où les différentes parties, prenant avec leur vitesse acquise une direction ascensionnelle, atteignent chacune leur altitude maximale ; et la descente réelle comme représentée par la différence d'altitude parcourue par le centre de gravité du système après que ses différentes parties aient retrouvé le repos » (Bernoulli, cité par Nordon, 1992).

Il reprend la situation étudiée par Torricelli. Sur la gravure du document 3 figure un récipient  $ABGC$  rempli, de surface libre  $AB$ .



**Document 3** – Gravure, extraite de Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica, sive de Viribus et motibus fluidorum commentarii, opus academicum...*, Argentorati, sumptibus J. R. Dulseckeri, 1738, Tab. XI, Fig. 72.

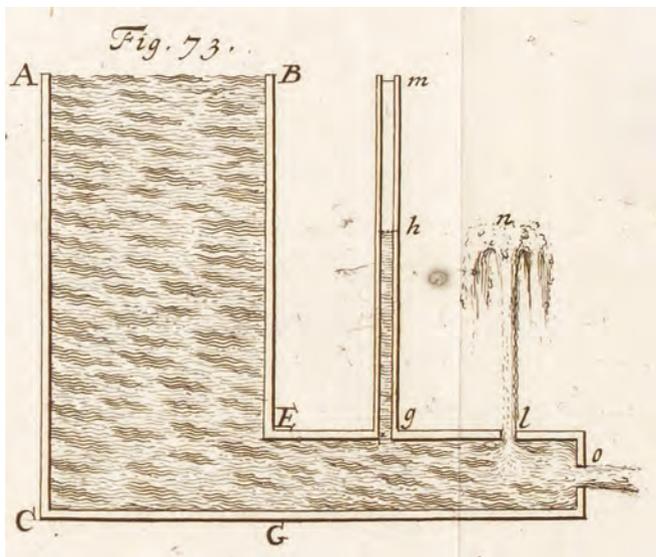
Source : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

Via un rétrécissement  $EG$  lui est associée une canalisation horizontale  $EFDG$  présentant un orifice  $o$ . Daniel Bernoulli introduit la démarche novatrice de découper le fluide en tranches perpendiculaires à la direction du mouvement et de suivre leur mouvement (voir sur la gravure du document 3 la portion notée  $abdc$ ). La notion de pression n'est associée qu'aux parois : il n'y a pas la notion de champ de pression comme on peut la trouver dans les travaux ultérieurs de son père et de Leonhard Euler. Par ailleurs, Daniel Bernoulli se limite à l'étude d'écoulements stationnaires. Il réussit à retrouver théoriquement la loi de Torricelli et il en précise les conditions de validité. Il évalue la pression  $P$  s'exerçant sur les parois  $FD$  du tube et obtient :

$$p = a \frac{n^2 - 1}{n^2}$$

Avec  $n$  le rapport entre la section du tube et la surface de l'orifice et  $a$  la charge d'eau au-dessus de l'orifice  $o$ . Il s'agit d'une variante de ce que l'on

nomme désormais la « relation de Bernoulli »<sup>8</sup>. On constate la différence de formulation entre la version historique et celle actuellement enseignée. Bernoulli aborde également le cas d'une canalisation horizontale avec deux orifices supplémentaires placés en  $g$  et  $l$  (voir Document 4).



**Document 4** – Gravure, extraite de Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica, sive de Viribus et motibus fluidorum commentarii, opus academicum...*, Argentorati, sumptibus J. R. Dulseckeri, 1738, Tab. XI, Fig. 73.

Source : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

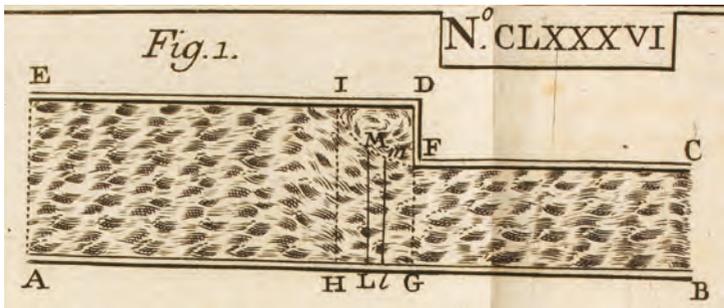
En  $g$  est inséré un tube ; en  $l$ , rien. On observe que dans le tube placé en  $g$ , le niveau d'eau se stabilise au point  $h$  et non au point  $m$  qui, lui, est situé à

<sup>8</sup> Dans l'expression historique  $p = a \frac{n^2 - 1}{n^2}$ , la « pression »  $p$  correspondrait à la grandeur actuelle  $\frac{P - P_{atm}}{\rho g}$ , avec  $P$  la pression dans le tube,  $P_{atm}$  la pression atmosphérique et la « charge »  $a$  correspondrait à la grandeur actuelle  $h$ , différence d'altitude entre la surface libre et l'orifice  $o$ .

L'expression historique s'écrirait alors  $\frac{P - P_{atm}}{\rho g} = h \left( \frac{n^2 - 1}{n^2} \right) = h \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right)$ , avec  $v_o^2 - 2gh \leftrightarrow h = \frac{v_o^2}{2g}$  et  $n = \frac{S_{tube}}{S_o} = \frac{v}{v_o}$ ,  $v$  étant la vitesse moyenne de l'eau dans le tube et  $v_o$  celle au niveau de l'orifice  $o$ , soit  $\frac{P - P_{atm}}{\rho g} = \frac{v_o^2}{2g} \left( 1 - \frac{1}{\left( \frac{v}{v_o} \right)^2} \right) = \frac{v_o^2}{2g} - \frac{v^2}{2g} \leftrightarrow P + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_{atm} + \frac{1}{2} \rho v_o^2$ , ce qui correspondrait à la formulation actuelle de la relation de Bernoulli.

la même hauteur que la surface libre du réservoir *ABGC*. Le niveau d'eau a baissé lors de l'écoulement dans la canalisation horizontale. En *l*, le niveau atteint par le jet d'eau est sensiblement le même qu'en *g*.

Dans *Hydraulica* (1742), Jean Bernoulli aborde la même thématique que son fils Daniel. Il décompose le fluide en un ensemble de veines (voir Document 5) et retrouve des résultats similaires à ceux de son fils. La valeur ajoutée de son travail est qu'il introduit la notion de pression à l'intérieur du fluide et non plus uniquement sur les parois, et qu'il aborde le cas d'un écoulement non permanent.



**Document 5** – Gravure, extraite de Jean Bernoulli, « *Hydraulica* », *Opera omnia, tam antea sparsim edita quam hactenus inedita*, cura G. Cramer..., tome IV, 1742, Tab. LXXXIX, N° CLXXXVI, Fig 1.

Source : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

D'Alembert, dans le *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744) et dans l'*Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides* (1752), remet en cause la légitimité du principe de conservation des forces vives. Ses principales contributions sont l'analyse du travail de ses prédécesseurs et des questions qu'il soulève. Il note ainsi que, sans l'hypothèse du parallélisme des couches de fluide, « il n'y aurait plus alors d'autre moyen pour déterminer ce mouvement que d'examiner celui que chaque particule devrait avoir » (D'Alembert, cité par Hahn, 1965). D'Alembert perçoit la statique des fluides comme un cas particulier de dynamique des fluides. Son travail constitue une étape dans la généralisation et l'unification de la mécanique, les solides et les fluides étant vus

comme des supports différents de mêmes lois. Par ailleurs, il apporte une contribution à l'étude des marées et des alizés : il introduit l'outil des équations aux dérivées partielles, qui sera ensuite repris par Pierre-Simon de Laplace, et signale un terme lié au mouvement de rotation de la Terre (dénommé plus tard « force de Coriolis »). Ce type d'étude est lié aux problèmes économiques de l'époque, en l'occurrence ici le transport maritime.

C'est Euler qui structure les équations du mouvement d'un fluide. Il transpose à l'étude d'un écoulement les avancées que lui et d'Alembert ont obtenues au préalable en mécanique des solides déformables, en particulier le recours aux dérivées partielles. Il analyse le fluide comme étant un milieu continu pour lequel on étudie le champ de vitesse et le décompose en couches parallèles reprenant la démarche de d'Alembert. Il introduit le concept de pression interne au fluide et évalue la variation d'un volume élémentaire de fluide en écoulement pendant une durée élémentaire. Il couple cette démarche à la conservation de la masse, puis exprime l'accélération de ce volume et obtient les équations du mouvement. Il aboutit ainsi aux équations<sup>9</sup> « pour un fluide idéal et compressible, dans son mémoire de 1755 intitulé "Principes généraux du mouvement des fluides" et publié dans les Mémoires de l'Académie de Berlin » (Guilbaud, 2007 : 182).

Dans ses écrits, Euler mentionne les difficultés qu'il a rencontrées : « j'espère d'en venir heureusement à bout, de sorte que s'il reste des difficultés, ce ne sera pas du côté du mécanique, mais uniquement du côté de l'analytique » (Euler, cité par Dugas ([1950] 1996 : 288).

Il pointe également l'objectif général qu'il a poursuivi et les liens qui peuvent être établis avec les recherches de ses confrères :

La généralité que j'embrasse, au lieu d'éblouir nos lumières, nous découvrira plutôt les véritables lois de la nature dans tout leur

---

<sup>9</sup> La formulation historique est  $P - \frac{1}{q} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$  avec  $P - \frac{1}{q} \frac{\partial p}{\partial x}$ , la composante selon  $x$  de la « force accélératrice » appliquée à l'élément de volume de fluide considéré,  $q$  la « densité du fluide » au point considéré,  $u, v, w$  les composantes de la vitesse. L'équation d'Euler, réécrite à trois dimensions à l'aide d'opérateurs se noterait de nos jours  $\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})(\vec{v}) \right] = \rho \vec{g} - \text{grad}(P)$ , avec  $\rho$  la masse volumique du fluide considéré,  $\vec{v}$  le champ de vitesse,  $\vec{g}$  le champ de pesanteur et  $P$  le champ de pression.

éclat et on y trouvera des raisons encore plus fortes d'en admirer la beauté et la simplicité. (Euler, cité par Dugas, [1950] 1996 : 287)

Quelques sublimes que soient les recherches sur les fluides dont nous sommes redevables à MM. Bernoulli, Clairaut et d'Alembert, elles découlent si naturellement de nos deux formules générales qu'on ne saurait assez admirer cet accord de leurs profondes méditations avec la simplicité des principes dont j'ai tiré mes deux équations et auxquelles j'ai été conduit immédiatement par les premiers axiomes de la mécanique. (Euler, cité par Dugas, [1950] 1996 : 292)

Darrigol voit dans le travail d'Euler l'illustration du cas où la découverte des équations régissant le phénomène est finalement plus simple que leur validation expérimentale :

*general principles and assumptions may lead us to the foundations of a theory and yet leave us in nearly complete ignorance of the phenomena in its field. In such cases, much creative work is needed to truly understand the empirical content of the theory.* (Darrigol, 2005 : 215)

Dugas rappelle néanmoins qu'Euler :

ne devait pas, précisément en raison des difficultés analytiques du problème général, méconnaître la portée et l'intérêt des considérations mi-théoriques, mi-expérimentales utilisées en hydraulique, d'autant plus qu'il s'était intéressé personnellement à la roue Segner, avait analysé le fonctionnement des turbines, et réalisé lui-même une turbine à réaction, en précurseur des techniques modernes. (Dugas, ([1950] 1996 : 292)

Ainsi, assez tôt dans le développement de ce domaine, des équations régissant les phénomènes sont obtenues.

Cependant, leur non-linéarité implique l'absence d'une solution générale connue. La recherche d'une solution va être une des préoccupations majeures des savants du siècle des Lumières. Cette absence de solution mathématique connue, couplée à l'hypothèse du parallélisme des tranches, aboutit à une vision de l'écoulement trop éloignée des résultats expérimentaux de l'époque. Évoquant les travaux de Charles-Augustin Coulomb sur les frottements qui sont à visée purement pratique, Dugas signale que la mécanique des frottements « demeure à l'époque liée à l'art vulgaire des machines, tandis que la mécanique

rationnelle se développait sur le plan mathématique sans égard au frottement » (Dugas, [1950] 1996 :308).

### *Stade 3*

De par la démarche de Charles Bossut et de Jean-Charles de Borda, le rapprochement entre les deux approches, théorique et expérimentale, s'enclenche à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Par exemple, à cette période, en France, les ouvrages dédiés aux écoulements abordent à nouveau ces deux approches. Le changement s'opère définitivement à la génération suivante, grâce notamment à la création de l'École polytechnique en France qui propose un nouveau type d'enseignement contenant, entre autres, de l'hydrodynamique et que suivent Henri Navier, Gaspard-Gustave Coriolis, Adhémar Barré de Saint-Venant. Plus tard, ils y enseigneront, ainsi qu'à l'École des ponts et chaussées, tout en étant membres de l'Académie des sciences. Hydrodynamique et hydraulique sont associées. C'est donc au début du XIX<sup>e</sup> siècle que le fossé entre approche pratique et théorique peut commencer à s'estomper. À l'occasion des interférences entre ces deux approches, chacune d'entre elles évolue sans pour autant fusionner l'une avec l'autre.

Nous résumons ces éléments dans le document 6.

	<b>Contextes et visées/ problèmes</b>	<b>Questions explorées et démarche</b>	<b>Avancées théoriques techniques</b>	<b>Problèmes non résolus</b>
Toricelli (XVII <sup>e</sup> siècle)	Jets d'eau  Rendre compte de la hauteur atteinte par le jet d'eau	Mouvement de l'eau à la sortie d'un vase percé d'un trou étroit  Étude empirique	Première tentative de justification de la loi énoncée	Non prise en compte de la viscosité
Bernoulli père et fils D'Alembert Euler (XVIII <sup>e</sup> siècle)	Étude des alizés (d'Alembert)  Concilier prévisions théoriques et résultats expérimentaux	Prouver la relation de Torricelli  Étude théorique	Justification obtenue de la loi de Torricelli	Non prise en compte de la viscosité et des conditions aux limites  Cas du fluide stagnant (théorie du sillage)

	Contextes et visées/ problèmes	Questions explorées et démarche	Avancées théoriques techniques	Problèmes non résolus
Navier Stokes Poiseuille (xix <sup>e</sup> siècle)	Écoulement sanguin (Hagen, Poiseuille)  Concilier prévisions théoriques et résultats expérimentaux	Justifier l'écart entre les prévisions du modèle d'Euler et les résultats expérimentaux  Études empirique et théorique	Modélisation des forces de viscosité  Modélisation du lien entre débit volumique et différence de pression dans une canalisation cylindrique  Précision remarquable des mesures effectuées par Poiseuille	Résolution de l'équation de Navier-Stokes  La justification théorique de la relation de Hagen-Poiseuille n'est établie que vingt ans plus tard par Hagenbach  Concept de vortacité

**Document 6** – Tableau récapitulatif des principales étapes historiques de construction du modèle aujourd'hui enseigné

Source : Réalisation de l'auteur.

Il y a donc eu deux phases, l'une liée à l'évolution des idées, de Bernoulli à Euler, puis une « étape de retour vers le concret », citation de Roger Hahn rappelée par Guilbaud (2007 : 27). Pour Hahn, si cela n'a pas eu lieu plus tôt, ce n'est pas uniquement pour des raisons sociologiques. Il examine donc de l'intérieur la science de l'hydrodynamique (Hahn, 1965) et se demande si, à cette époque, les instruments expérimentaux à disposition sont assez développés, si le recours à un raisonnement de type milieu continu freine les possibilités et si les théoriciens ne sont pas trop préoccupés par les problèmes d'axiomatisation, au détriment des conditions aux limites des équations trouvées. Précisons quelques aspects de ce rapprochement, *via* l'obtention de l'équation dite de Navier-Stokes, qui illustre la nécessité de la mise en place au xix<sup>e</sup> siècle de nouvelles stratégies pour associer expérience et théorie. Darrigol (2005) constate qu'il n'y a eu aucun progrès en mécanique des fluides dû à une seule approche mathématique. Il justifie ce constat par le fait que les équations régissant la mécanique des fluides sont des équations différentielles non linéaires : il y a donc très peu de cas où on sait les résoudre. Toutes les avancées

du XIX<sup>e</sup> siècle sont dues à des « physiciens-ingénieurs », familiers de problèmes pratiques. La démarche suivie en mécanique des fluides n'est pas une démarche inductive. Elle consiste en l'étude de problèmes pratiques, couplée à un apport de physique théorique. Darrigol estime que se sont mis en place des « schémas conceptuels » liant fondements théoriques et problèmes concrets. Ces schémas nécessiteraient beaucoup de créativité et amélioreraient profondément la compréhension des phénomènes. Pour Darrigol, ces « schémas conceptuels » illustrent la structure modulaire de la physique, où chaque module peut être lui-même une théorie. Ces modules sont de différentes natures, ils sont réducteurs et servent tantôt à définir une notion, tantôt à approximer, à idéaliser ou à illustrer. Grâce à la construction d'une structure modulaire adéquate, l'opposition entre théorie et expérience est dépassée.

### **Propositions didactiques**

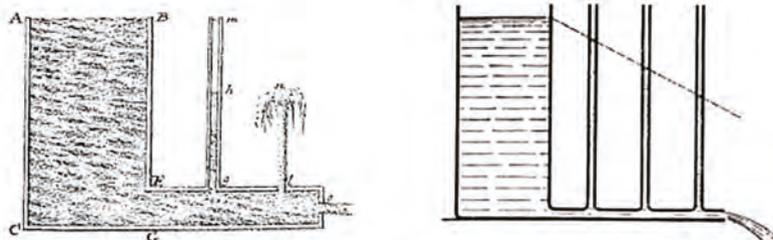
Comme mentionné à la fin de la section II de notre texte, l'HS est susceptible de contribuer au développement des connaissances physiques, épistémologiques et didactiques des enseignants, et de revivifier leur questionnement. Introduite en classe, elle peut être associée à différentes visées, non exclusives, d'apprentissage : épistémologique (Adúriz-Bravo, 2011 ; Maurines & Beaufils, 2011), scientifique (Hosson *et al.*, 2018) et de développement de la pensée critique (Allchin, 2011). Nous nous appuyons sur l'étude précédente pour ouvrir quelques pistes didactiques.

#### *Vivifier le questionnement scientifique*

La connaissance des problèmes explorés par le passé est susceptible d'aider à enrichir les contextes et questionnements introduits dans la classe. Une telle connaissance est également susceptible de faciliter un regard plus critique sur les ressources proposées aux élèves et étudiants. Nous commençons par aborder ce point, avant de montrer comment cette connaissance peut aider à travailler sur les limites des modèles étudiés et leur mise en évidence expérimentale.

### Regard critique sur les ressources pédagogiques

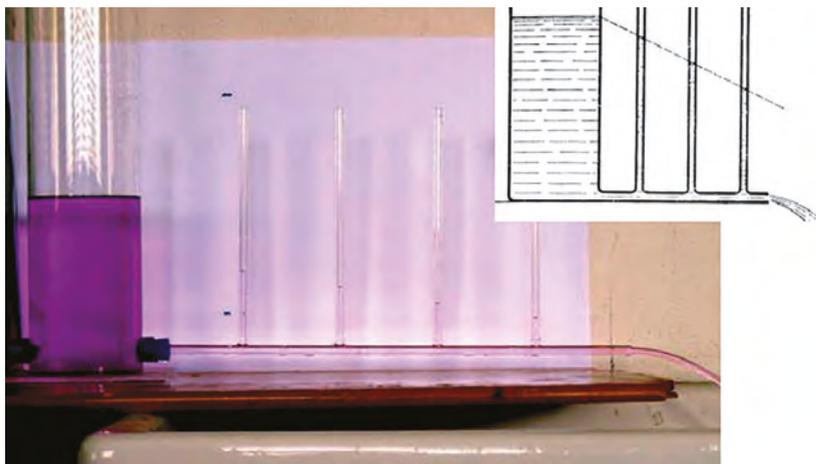
Nous illustrons ce point en prenant l'exemple des schémas du document 7 qui traitent du cas d'un réservoir avec une canalisation ouverte sur un orifice et percés par des tubes verticaux de mesure de la pression, dit tubes de Pitot. Cette situation, traditionnellement employée dans un cours de mécanique des fluides (Craustes, 2019), renvoie à une situation historique proposée dans l'ouvrage *Hydrodynamica* de Daniel Bernoulli et schématisée comme sur la partie gauche du document 7 (qui est une reprise du document 4). On retrouve cette situation dans un polycopié de centre de préparation universitaire au concours de recrutement d'enseignants du secondaire de physique-chimie dans une forme schématisée comme sur la partie droite du document 7. Il pourrait être intéressant, pour l'enseignant, de connaître la version originelle du schéma d'une telle situation. En effet, le rapprochement avec le schéma actuel du polycopié sur lequel est tracée une droite passant par les surfaces libres des tubes de Pitot pourrait l'amener à s'interroger sur cette droite, plus précisément sur sa pente, qui ne correspond pas à celle de la droite que l'on peut tracer par la pensée à partir du schéma de gauche. Avant de développer les aspects théoriques associés à cet écart, intéressons-nous aux aspects empiriques.



**Document 7** - : Deux schémas visualisant l'écoulement d'un fluide dans une canalisation

Source : schéma de gauche : extrait d'*Hydrodynamica* (voir document 4 pour la référence exacte) ; schéma de droite : extrait d'un polycopié d'un centre de préparation au certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement du second degré (CAPES).

Un moyen de savoir si la droite tracée est correcte est de réaliser l'expérience à condition d'avoir comme objectif de confronter théorie et empirie. Nous allons montrer à présent que ce qui était un des aspects marquants de l'histoire de la construction du modèle actuellement employé pour étudier un écoulement incompressible n'est pas mis en œuvre dans le photocopie du centre de préparation au CAPES évoqué à l'instant. Une photographie de l'expérience qu'il est proposé aux étudiants de réaliser est fournie (partie gauche du document 8). La formule de pertes de charge régulière dans une canalisation est ensuite rappelée. En effet, cette manipulation de cours est censée illustrer cette notion de pertes de charge, représentée sur le schéma de droite du document 7 par la droite qui relie les surfaces libres de liquide dans les différents tubes de prise de mesure de pression.



**Document 8** – Une photographie et un schéma en haut à droite liés à l'écoulement d'un fluide

Source : extraits d'un photocopie d'un centre de préparation au CAPES.

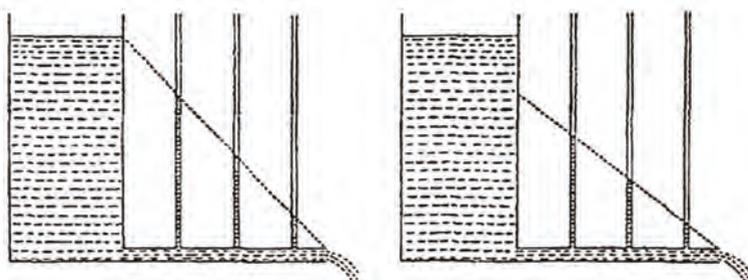
*Note : Le niveau de fluide dans les tuyaux verticaux apparaît via l'ombre projetée sur l'écran blanc derrière les tuyaux*

En reliant par la pensée ces points sur la photographie du document 8, on constate qu'ils ne partent pas de la surface libre du réservoir, à gauche. On constate également qu'ils n'aboutissent pas non plus à l'orifice de

sortie du tube, sur la droite. Cela peut s'expliquer par exemple par les pertes de charge singulière à l'entrée et à la sortie du tuyau horizontal. Il est étonnant d'observer un décalage entre ce qui est observable sur la photographie et ce qui est représenté sur le schéma explicatif associé.

*Les documents historiques comme source de réflexion  
pédagogique sur les modèles*

Une variante du document 7 (voir Document 9) peut être proposée aux étudiants ou à des enseignants lors d'une séquence de formation continue pour les faire travailler sur la notion de modèle et ses limites, et les inciter à recourir à l'expérimental pour confronter prévisions/schématisations et empirie. Nous la décrivons puis résumons les questions qui se posent et pourraient être posées.



**Document 9** – Pertes de charge

Source : Farwell, 1944.

Sur les deux schémas du document 9 est évoquée une perte de charge linéaire dans une canalisation horizontale à section constante, qui se traduit par une baisse du niveau d'eau dans les trois tubes de prise de mesure de pression, régulièrement répartis dans la canalisation horizontale.

La seule différence entre les deux schémas est liée à l'ordonnée du point d'intersection du réservoir et de la droite représentée : cette droite atteint-elle ou non la surface libre du réservoir ? En pratique, qu'obtient-on ? Si on se réfère par exemple à la photographie du document 8, la courbe, qui relie les surfaces libres des tubes de prise de mesure de pression dans la

canalisation horizontale, est quasi-droite dans une portion de la canalisation. De plus, elle n'atteint pas en amont la surface libre du réservoir. Le schéma de gauche du document 9 paraît donc moins adapté que celui de droite pour schématiser la situation.

La perte de charge attendue dans le tuyau horizontal n'est linéaire que dans la zone d'écoulement dite *fully-developed* : cela découle de la propriété du champ de vitesse d'être du type  $\vec{v} = v(y)\vec{u}_x$  dans cette zone de l'écoulement. Cette zone ne démarrant pas à l'entrée du tuyau, il n'y a pas de raison *a priori* que la courbe représentant la hauteur d'eau dans les tubes de prise de mesure de pression atteigne la surface libre du réservoir. Une autre manière de le justifier est de considérer le rétrécissement brutal lors du passage du réservoir au tube horizontal : à ce rétrécissement brutal peut être associée une perte de charge dite singulière. Il n'y a donc pas *a priori* continuité de la pression à cet endroit-là, entre la valeur de la pression dans le réservoir, juste avant le rétrécissement et la valeur de la pression au sein de la canalisation horizontale dans la zone d'écoulement dite *fully-developed*. La zone du rétrécissement brutal du réservoir au tube horizontal ne correspond pas à une zone d'écoulement *fully-developed*. La décroissance de la pression n'y est donc pas *a priori* linéaire. On attend donc une courbe de décroissance de la pression non linéaire *a priori*, suivie d'une droite décroissante mais ce, uniquement dans la zone d'écoulement dite *fully-developed*.

Le schéma de droite apparaît donc plus plausible que celui de gauche. Pour autant, sa validité nécessiterait de réfléchir aux conditions opératoires retenues : viscosité du fluide, tailles caractéristiques du problème pour évaluer si on est ou non dans la zone d'écoulement « *fully-developed* » par exemple, si on est en régime permanent, etc.

On note également sur la photographie du document 8 que l'extrémité aval de la droite n'atteint pas le point de sortie du tuyau, contrairement à ce qui est représenté sur les deux schémas du document 9. Les deux représentations restent donc des simplifications d'une situation réelle donnée.

Cette situation, inspirée d'une situation historique, apparaît par conséquent comme un outil utile pouvant être proposée aux étudiants ou aux enseignants en formation continue pour les aider à repérer les

problèmes associés à une telle situation, ainsi qu'à réfléchir à leur mode de raisonnement et à leur pratique expérimentale. Le lecteur intéressé par les éléments de réponses donnés par des enseignants du supérieur à qui nous l'avons présentée en entretien peut se rapporter à : Crastes, 2019<sup>10</sup>.

### *Développer la réflexion épistémologique*

Nous nous plaçons ici dans la continuité de Maurines et Beaufiles (2011). La visée épistémologique pourrait consister notamment à donner à voir comment les modèles ont été élaborés au cours du temps (interaction empirie et théorie), les difficultés rencontrées, les avancées liées aux interactions entre communautés.

### *Construction historique du modèle actuellement enseigné*

Comme nous l'avons constaté dans la section III, on observe ainsi sur la période allant de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle à la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle le processus de construction du modèle actuellement retenu pour étudier un écoulement incompressible : à partir d'un questionnement expérimental sur un écoulement à travers un orifice, une structuration des équations aux dérivées partielles régissant ce phénomène est établie qui,

---

<sup>10</sup> Cela n'a pas été pas sans soulever des difficultés et des résistances parmi eux. La situation du document 9 est pourtant représentée dans de nombreux ouvrages, tant à destination d'étudiants physiciens que biologistes ou médecins, mais très souvent sans le prolongement de la droite en amont et en aval. L'aspect abordé dans ces deux schémas (où la droite coupe-t-elle le réservoir ?) sort du cadre habituel de la fonction de ce schéma, qui est d'habitude d'évoquer la linéarité de la perte de charge dans une partie d'une canalisation horizontale. Ce léger décalage aurait pu fournir l'occasion aux enseignants interrogés de réfléchir aux conditions de validité de la linéarité de la perte de charge par exemple : cela n'a pas été le cas. Par ailleurs, la majorité des enseignants ayant rencontré des difficultés pour répondre à la question indiquent ne pas avoir eu recours à des expériences de cours en mécanique des fluides. Signalons que les enseignants n'ayant pas rencontré de difficultés en entretien partagent un fort vécu au quotidien lié à l'expérimental, *via* leur travail de recherche ou leur pratique enseignante. Proposer un travail sur des documents historiques peut être l'occasion de permettre aux enseignants de réfléchir au choix des expériences introduites dans une séquence d'enseignement et aux visées qu'ils leur associent et de constituer une aide au travail de modélisation.

confrontée aux résultats expérimentaux, aboutit à un modèle valable. On a pu constater qu'il s'agissait d'un processus long avec des difficultés théoriques (lors de l'obtention d'une modélisation convenable des forces de viscosité), des difficultés empiriques (décalage entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux ; quantité importante de formules du débit d'une canalisation, environ une centaine selon Nordon [1992] au début du XIX<sup>e</sup> siècle, traduisant le manque d'une vision unifiée du phénomène), difficultés techniques (notamment concernant la mesure précise du débit dans des canalisations de diamètres variés).

Par ailleurs, les historiens parlent de « crise des années 1770 » pour évoquer les tensions entre les approches théorique et expérimentale<sup>11</sup> qui aboutissent à une scission, entre, d'une part, les hydrodynamiciens (académiciens) et, d'autre part, les hydrauliciens (ingénieurs, artisans maritimes). Cette crise n'est surmontée qu'au siècle suivant, avec l'introduction de la viscosité au sein du modèle, par Navier en France et par George Gabriel Stokes au Royaume-Uni, indépendamment l'un de l'autre. Ce dépassement est rendu possible en France par l'avènement de l'École polytechnique, lieu de formation d'ingénieurs où se côtoient l'approche empirique des hydrauliciens et les modèles des hydrodynamiciens régis par des équations différentielles aux dérivées partielles.

Introduire un récit historique et problématisé par l'enseignant pourrait ainsi aider l'étudiant à construire sa pensée sur le mode d'élaboration d'un modèle en physique.

Historiquement, les prémisses correspondent à la relation de Torricelli. Elles sont justifiées par la relation de Bernoulli, puis par l'équation d'Euler, elle-même généralisée par la prise en compte de la viscosité dans l'équation de Navier-Stokes. On constate que cet aperçu historique montre que l'ordre de l'avancée de la réflexion sur l'étude de l'écoulement d'un fluide est à l'opposé de l'ordre pédagogique traditionnellement retenu : le faire constater à un enseignant lui donnerait l'occasion de réfléchir à la transposition didactique à l'œuvre entre le savoir savant et le savoir enseigné (Chevallard, 1985).

---

<sup>11</sup> Les contradictions entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux sont telles que d'Alembert, par exemple, en vient à conclure que « la comparaison de la Théorie et de l'Expérience est peut-être impossible » (D'Alembert, cité par Hahn, 1965 : 19).

*Intérêt de construire des frises historiques*

De plus, se référer à une frise comme celle proposée au document 2 pourrait aider l'étudiant à structurer les étapes de construction du modèle.

De là, des frises pour les autres domaines de la physique au programme pourraient être construites et comparées, ce qui permettrait aussi à l'étudiant de constater les interactions entre domaines de la physique. Par exemple, c'est notamment l'avancée dans la modélisation des contraintes mécaniques d'un milieu élastique continu dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle qui permet à Navier de construire une modélisation des forces de viscosité (Darrigol, 2002). Darrigol (2005) montre aussi comment l'analogie entre l'étude du pendule pesant et celle de l'écoulement d'un fluide permet à Huygens de tenter une première démonstration de la relation de Bernoulli, ou comment l'étude acoustique des orgues permet à Hermann von Helmholtz de proposer le concept de vorticité.

*Registres sémiotiques (différentes expressions d'une loi)*

Recourir à l'HS permet également d'interroger la formulation actuellement retenue pour énoncer ces relations. Par exemple, la formulation moderne de la relation de Bernoulli est  $P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho g z_B$ , alors que dans l'ouvrage *Hydrodynamica*, Daniel Bernoulli l'évoque sous la forme  $p = a \frac{n^2 - 1}{n^2}$ , avec  $p$  la charge d'eau au-dessus de l'orifice  $o$ ,  $a$  la charge et  $n$  la surface de l'orifice (voir document 3).

De plus, la formulation historique de l'équation dite d'Euler fait intervenir un système de trois équations scalaires aux dérivées partielles, la notion d'opérateurs (divergence, gradient, etc.) étant postérieure aux travaux d'Euler. La lecture du texte historique montre l'intérêt de la formalisation mathématique ultérieure pour simplifier l'écriture des équations.

*Mise en parallèle de documents historiques et actuels*

Par ailleurs, la mise en parallèle de la gravure du document 5 et d'images ou de vidéos actuelles met en avant la pertinence de l'approche des Bernoulli qui, dès les prémisses de l'élaboration du modèle, ont cerné la complexité de l'écoulement au voisinage des bordures, comme le montre

la représentation des lignes de courant dans la zone *IDMF* de la gravure du document 5.

La mise en parallèle d'images historiques et actuelles montre aussi la prégnance d'une référence aux situations historiques pour contextualiser un phénomène physique. De nos jours, pour assurer un écoulement dans une canalisation, on aurait recours à un robinet et non à un réservoir comme sur le document 7. Pour autant, la représentation souvent retenue dans les manuels est celle historique, sans pour autant que la référence historique ne soit explicitée par l'auteur du manuel.

## **Conclusion**

Au travers de cet exposé, nous avons cherché à montrer en quoi l'HS est un outil utile pour réfléchir à la *NoS* et pour raviver le questionnement scientifique des élèves, mais aussi des enseignants. Le panorama historique que nous avons dressé sur une période allant du *xvii<sup>e</sup>* au milieu du *xix<sup>e</sup>* siècle montre l'importance de confronter les prévisions du modèle aux résultats expérimentaux. La lecture de polycopiés récents utilisés pour la formation de futurs enseignants nous a conduit à repérer des lacunes sur ce plan et à élaborer des documents inspirés par l'HS, rapprochant des schémas et photographies à proposer aux étudiants et enseignants, afin de rappeler la nécessaire confrontation des prévisions du modèle aux résultats expérimentaux et de travailler les limites des modèles. Le panorama historique nous a également permis de montrer la fécondité des interactions entre communautés et approches différentes. Ce sont autant de points qui peuvent être choisis comme objectifs d'apprentissage épistémologiques et travaillés à l'aide de documents et conduire à la réalisation de frises ou de cartes mentales, telles celle proposées par Maurines et Beaufile (2011).

Restent en question l'élaboration des ressources (choix et rédaction des textes historiques, scénario pédagogique associé), l'appropriation par les enseignants de ces ressources et propositions, et enfin l'impact sur les élèves. Ce sont autant de pistes à explorer.

## Références bibliographiques

- ADÚRIZ–BRAVO Agustín, 2011. « Fostering Model-Based School Scientific Argumentation Among Prospective Science Teachers », *US-China Education Review*, 8 (5), p. 718-723.
- ALLCHIN Douglas, 2011. « Evaluating Knowledge of the Nature of (Whole) Science », *Science Studies and Science Education*, 95 (3), p. 518-542, <https://doi.org/10.1002/scs.20432>.
- BESSON Ugo, 2001. *Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides. Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Viennot, Université Paris 7.
- BESSON Ugo, 2004. « Students' Conceptions of Fluids », *International Journal of Science Education*, 26 (14), p. 1683-1714, <https://doi.org/10.1080/0950069042000243745>.
- BLONDIN Christiane, CLOSSET Jean-Louis & LAFONTAINE Dominique, 1992. « Raisonnements naturels en hydrodynamique », *Revue française de pédagogie*, 100, p. 71-80, <https://doi.org/10.3406/rfp.1992.1320>
- CHEVALLARD Yves, 1985. *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*, Grenoble, Éditions La pensée sauvage.
- CLOSSET Jean-Louis, 1992. « Raisonnements en électricité et en hydrodynamique », *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 14, p. 143-155, <https://doi.org/10.4267/2042/9089>.
- CRASTES Clément, 2019. *Les enseignants du supérieur et l'écoulement interne d'un fluide : modélisation et contextualisation dans différentes disciplines et filières de formation en France et aux États-Unis*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Maurines, Orsay, Université Paris-Saclay.
- CRASTES Clément & MAURINES Laurence, 2021. « Enseigner l'écoulement interne d'un fluide en France et aux États-Unis : modèles et contextes au travers des pratiques déclarées d'enseignants du supérieur », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 24, p. 59-85, <https://doi.org/10.4000/rdst.3913>.
- DARRIGOL Olivier, 2002. « Between Hydrodynamics and Elasticity Theory: The First Five Births of the Navier-Stokes Equation », *Archive for History of Exact Sciences*, 56 (2), p. 95-150, <https://doi.org/10.1007/s004070200000>.

- DARRIGOL Olivier, 2005. *Worlds of Flow: A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*, Oxford, Oxford University Press.
- DUGAS René, [1950] 1996. *Histoire de la mécanique*, Paris, Éditions Jacques Gabay.
- FARWELL H. W., 1944. « Loss of Head in Fluid Motion », *American Journal of Physics*, 12 (5), 307, <https://doi.org/10.1119/1.1990626>.
- FRASER Duncan M., PILLAY Reneta, TJATINDI Lawrence & CASE Jenni M., 2007. « Enhancing the Learning of Fluid Mechanics Using Computer Simulations », *Journal of Engineering Education*, 96 (4), p. 381-388, <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2007.tb00946.x>.
- GUILBAUD Alexandre, 2007. *L'hydrodynamique dans l'œuvre de D'Alembert 1766-1783 : histoire et analyse détaillée des concepts pour l'édition critique et commentée de ses Œuvres Complètes et leur édition électronique*, thèse de doctorat, sous la dir. de P. Crepel & M. Massot, Université Lyon 1.
- JOHNSA Samuel, 1989. « Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire », *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 8, p. 29-53, <https://doi.org/10.4267/2042/9154>.
- HAHN Roger, 1965. *L'hydrodynamique au XVIII<sup>e</sup> siècle. Aspects scientifiques et sociologiques. Conférence donnée au Palais de la Découverte le 7 novembre 1964*, Paris, Palais de la Découverte.
- HODSON Derek, 2008. « Exploring Nature of Science Issues: Students' Views and Curriculum Images », *Towards Scientific Literacy: A Teachers' Guide to the History, Philosophy and Sociology of Science*, Rotterdam, Sense Publishers, p. 23-40, [http://doi.org/10.1163/9789087905071\\_003](http://doi.org/10.1163/9789087905071_003).
- HOSSON Cécile de, 2004. *Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences. Élaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation*, thèse de doctorat, sous la dir. de W. Kaminski & J. Gayon, Université Paris 7.
- HOSSON Cécile de, MANRIQUE Adry, REGAD Leslie & ROBERT Aline, 2018. « Du savoir savant au savoir enseigné, analyse de l'exposition des connaissances en cours magistral de physique : une étude de cas », *Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur*, 34 (1), <https://doi.org/10.4000/ripes.1307>.
- KARIOTOGLOU Petros, KOUMARAS Panagiotis & PSILLOS Dimitris, 1995. « Différenciation conceptuelle : un enseignement d'hydrostatique, fondé sur le développement et la contradiction des conceptions des élèves », *Didaskalia*, 7, p. 63-90, <https://doi.org/10.4267/2042/23767>.

- LEDERMAN Norman G., 2007. « Nature of Science: Past, Present, and Future », in S. K. Abell & N. G. Lederman (eds), *Handbook of Research on Science Education*, Mahwah, Lawrence Erlbaum Associates, p. 831-879.
- MARTIN Jay, MITCHELL John & NEWELL Ty, 2003. « Development of a Concept Inventory for Fluid Mechanics », in: *33<sup>rd</sup> Annual Frontiers in Education. Conference Proceedings: Engineering as a Human Endeavor: Partnering Community, Academia, Government, and Industry. The Westin Hotel, Westminster, Colorado, November 5-8, 2003. Volume 1*, Champaign, Stipes Publishing L.L.C., p. 23-28, <http://doi.org/10.1109/FIE.2003.1263340>.
- MARTINAND Jean-Louis, 1993. « Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? », *Didaskalia*, 2, p. 89-99, <https://doi.org/10.4267/2042/20187>.
- MAURINES Laurence & BEAUFILS Daniel, 2011. « Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, p. 271-305, <https://doi.org/10.4000/rdst.444>.
- MAURINES Laurence & BEAUFILS Daniel, 2013. « Teaching the Nature of Science in Physics Courses: The Contribution of Classroom Historical Inquiries », *Science & Education*, 22 (6), p. 1443-1465, <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9495-z>.
- NORDON Marcel, 1992. *L'eau démontrée. Du Moyen Âge à nos jours*, Paris, Masson.
- PSILLOS Dimitris, 1999. « Teaching Fluids: Intended Knowledge and Students' Actual Conceptual Evolution », *International Journal of Science Education*, 21 (1), p. 17-38, <https://doi.org/10.1080/095006999290813>.
- PSILLOS Dimitris, 2004. « An Epistemological Analysis of the Evolution of Didactical Activities in Teaching-Learning Sequences: The Case of Fluids », *International Journal of Science Education*, 26 (5), p. 555-578, <https://doi.org/10.1080/09500690310001614744>.
- ROLETTO Ezio, 1998. « La science et les connaissances scientifiques : points de vue de futurs enseignants », *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 26, p. 11-30, <https://doi.org/10.4267/2042/8690>.
- SEEGER Raymond J., 1953. « On Fluid Dynamics in Physics Teaching », *American Journal of Physics*, 21 (1), p. 29-46, <https://doi.org/10.1119/1.1933340>.
- SLAÏMA Mohamed & MAURINES Laurence, 2017. « La diversité des pratiques scientifiques au travers de l'histoire de la dioptrique : expérimentation d'une innovation pédagogique en classe de seconde en Tunisie », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 15, p. 169-201, <https://doi.org/10.4000/rdst.1507>.

- SOLER Léna, 2013. « Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie », *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 52, p. 177-214, <https://doi.org/10.3406/spira.2013.1067>.
- TIBERGHIEEN Andrée, 1994. « Modelling as a Basis for Analyzing Teaching-Learning Situations », *Learning and Instruction*, 4, p. 71-87.
- VAN DRIEL Jan H. & VERLOOP Nico, 2002. « Experienced Teachers' Knowledge of Teaching and Learning of Models and Modelling in Science Education », *International Journal of Science Education*, 24 (12), p. 1255-1272, <https://doi.org/10.1080/09500690210126711>.
- VIENNOT Laurence, 1979. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris, Hermann.



# APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

## VERS UNE INTERDISCIPLINARITÉ

### DIDACTIQUE - HISTOIRE DES SCIENCES - ÉPISTÉMOLOGIE

Le monde contemporain doit relever de nombreux défis qui nécessitent un regain d'intérêt pour les métiers scientifiques, en particulier de la part des femmes. Ils requièrent également l'acquisition, par tout citoyen, d'une culture scientifique qui lui permette de penser et d'agir dans des contextes variés. Parmi les leviers envisagés pour l'enseignement des sciences par les textes ministériels français relatifs aux réformes de ces vingt dernières années figure l'introduction de l'histoire des sciences et d'éléments de nature épistémologique. Les attendus institutionnels de cette introduction restent peu explicites et opérationnalisés.

Ce volume vise à participer au développement, en France, de travaux sur l'introduction de l'histoire des sciences et de l'épistémologie dans l'enseignement et la formation scientifique (amplement documentés à l'étranger), tout en apportant un regard critique. Il discute des enjeux éducatifs et sociétaux de cette introduction et des questions qu'elle soulève quant aux objectifs d'apprentissage à poursuivre et des stratégies à mobiliser en classe, ainsi que des méthodologies de recherche à mettre en œuvre.

La réflexion est conduite dans le cadre d'un champ disciplinaire donné, la physique. Différents thèmes au programme d'enseignement du secondaire ou du début du supérieur (la vision, le principe d'inertie, le mouvement des planètes, le temps en mécanique relativiste, la dynamique des fluides) sont abordés. Divers objectifs d'apprentissage (appropriation des concepts scientifiques, raisonnement des élèves, représentations de la/des science(s), pensée critique) et deux stratégies d'enseignement (implicite et explicite) sont envisagés.

Les didacticiens, historiens et épistémologues des sciences réunis ici proposent des regards croisés et complémentaires, conduisant à simplifier ou au contraire à enrichir le discours historique, selon les objectifs d'apprentissage visés. Ils montrent ainsi la fécondité d'une réflexion interdisciplinaire.