



HAL
open science

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 Etats-Unis

Clément Crastes

► **To cite this version:**

Clément Crastes. 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 Etats-Unis. Education. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLS401 . tel-02615270

HAL Id: tel-02615270

<https://theses.hal.science/tel-02615270>

Submitted on 22 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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 Etats-Unis

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université Paris-Sud

École doctorale n°578 Sciences de l'homme et de la société (SHS)
Spécialité de doctorat : Didactique des Sciences

Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 22 novembre 2019, par

Clément CRASTES

Composition du Jury :

Ludovic MORGE Professeur d'Université, Université Clermont Auvergne (ACTé)	Président et Rapporteur
Valérie MUNIER Professeure d'Université, Université de Montpellier (LIRDEF)	Rapporteuse
Emmanuelle DELEPORTE Professeure d'Université, ENS Paris-Saclay (LPQM-LAC)	Examinatrice
Isabelle DEMACHY Professeure d'Université, Univ. Paris-Sud Université Paris-Saclay (LCP)	Examinatrice
Christian ORANGE Professeur Emérite, Université Libre de Bruxelles	Examinateur
Laurence MAURINES Professeur, Univ. Paris-Sud Université Paris-Saclay (Didasco)	Directrice de thèse
Dominique OBERT Inspecteur Général de l'Éducation Nationale, Doyen du groupe Physique-Chimie (Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse)	Invité

Remerciements

A mes parents et ma famille, pour leur soutien constant tout au long de ce projet.

A mes collègues et amis qui m'ont encouragé et aidé dans ce travail. En particulier Eric, Alex et Rémi pour leur maîtrise de LATEX et leur disponibilité tout au long de la phase de rédaction, Gwen et Mickaël pour leurs remarques pertinentes lors de la préparation de mes présentations à des congrès, la famille Beaune, Damien, Delphine, Léo, Robin, Roland et Véro pour leurs précieux conseils. Un grand merci à Charlotte et Myriam pour leurs relectures patientes et minutieuses des transcriptions des entretiens américains, à Philippe pour ses versions allemandes. A Fred et Mickaël pour m'avoir accueilli si gentiment lors de mes déplacements répétés sur Paris.

A toute l'équipe du *College of Education* de Penn State qui m'a si chaleureusement accueilli et aidé. En particulier, Estella, Greg, Jane, Jen & Jen, Kate, Katsumi et sa famille, Kim, Pete et toute l'équipe de *Global Connections*. Merci à Scott pour avoir accepté de m'encadrer et à toute sa famille pour sa gentillesse.

A toute l'équipe de DidaScO pour son aide et ses encouragements : Véro, pour son amabilité et sa disponibilité, Magali pour ses encouragements réguliers et ses remarques judicieuses, Hélène pour son dynamisme et son entrain, Marie-Noëlle et Isabelle pour leurs remarques.

Aux membres du comité de suivi, Julien et Hélène, et à ceux du jury de thèse qui ont accepté de soutenir et d'évaluer ce travail, en particulier aux rapporteurs, Valérie Munier et Ludovic Morge.

A l'équipe du service des études doctorales de l'université Paris-Sud et à Mme Furbatto en particulier, pour leur soutien répété à chaque réinscription.

Un remerciement particulier aux documentalistes qui m'ont aidé dans mes recherches, patiemment et efficacement. En particulier Aurélie, amie pour la vie, Lucille, atout précieux tout au long de cette enquête ainsi que les équipes des bibliothèques des sciences de Paris-Sud, des SHS de Paris Descartes, des Grands Moulins de Paris Diderot, de l'Université de Reims Champagne Ardenne, de l'Université de Pau Pays de l'Adour et du CDRHE de Montpellier.

A Mme Marquet, aux équipes du rectorat de Reims et du secrétariat du lycée Roosevelt qui m'ont accompagné dans mes démarches de demandes de congé de formation. A Mme Ochem de la MGEN pour ses précieux conseils qui m'ont évité de gros ennuis lors de mon séjour aux États-Unis.

A la communauté des didacticiens qui, via notamment les week-ends jeunes chercheurs de l'ARDIST (WEJCH) m'a permis d'avancer dans mes travaux.

A Wanda qui m'avait fait découvrir ce domaine de recherche et avait accepté de m'encadrer pour le mémoire de Master.

Aux collègues qui, en France et aux États-Unis, se sont prêtés de bonne grace à ces entretiens qui ont parfois duré fort longtemps.

A mes anciens élèves, pour leur soutien et leurs encouragements. Je pense en particulier à Clémence, Justin et Pierre.

Merci Laurence d'avoir cru en moi et de m'avoir si patiemment et si efficacement soutenu tout au long de cette belle aventure.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	5
------------------------------------	----------

PREMIÈRE PARTIE : OBJET ET CADRE DE L'ÉTUDE	11
--	-----------

CHAPITRE 1 COMMENT ANALYSER LES PRATIQUES ENSEIGNANTES ?	13
---	-----------

1.1 LES PCK	13
1.1.1 Origine des PCK.....	13
1.1.2 Définition double et intérêt double des PCK	14
1.1.3 Caractérisations successives des PCK	15
1.1.4 Principales caractéristiques des PCK.....	19
1.1.5 Comment étudier les PCK ?	19
1.2 LES PCK ET L'ARRIÈRE-PLAN DES PRATIQUES ENSEIGNANTES : LES CONVICTIONS (OU 'BELIEFS').....	21
1.2.1 'Beliefs'	21
1.2.2 Rapport au savoir.....	22
1.3 LES PCK ET AUTRES APPROCHES SUR L'EXEMPLE DES TRAVAUX DE ROBERT ET ROGALSKI SUR LES ROUTINES	23
1.4 L'EXPERTISE D'UN ENSEIGNANT	23
1.5 QUELQUES RÉSULTATS SUR LES PRATIQUES ENSEIGNANTES ET QUELQUES PROPOSITIONS POUR LA FORMATION DES ENSEIGNANTS	24

CHAPITRE 2 NOS	27
-----------------------------	-----------

2.1 PRÉSENTATION	28
2.1.1 Une définition de la NOS	28
2.1.2 Historique	28
2.2 CARACTÉRISATIONS DE LA NOS À DES FINS D'ENSEIGNEMENT	29
2.2.1 N'enseigner de la NOS que ce qui fait l'objet de consensus : position défendue par Lederman	29
2.2.2 Contestations de cette position	30
2.3 ENSEIGNER LA NOS	32
2.3.1 Conceptions des élèves sur la NOS : un préalable à connaître pour définir des objectifs d'enseignement sur la NOS	32
2.3.2 Conceptions et pratiques des enseignants sur la NOS.....	33
2.3.3 Pistes pour enseigner la NOS issues de la littérature de recherche.....	34
2.4 DEUX PROPOSITIONS DE COORDINATION POSSIBLE ENTRE LES THÉMATIQUES DE RECHERCHE SUR LES PCK ET LA NOS.....	37

CHAPITRE 3 MODÈLES ET MODÉLISATION	40
---	-----------

3.1 DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES	40
3.1.1 Définitions.....	40
3.1.2 Modèle et réalité	41
3.1.3 Propriétés d'un modèle	41
3.2 APPRENDRE LA PHYSIQUE ET LES MODÈLES	44
3.2.1 Expérience et abstraction	44
3.2.2 La physique de sens commun et la modélisation	45
3.2.3 Importance du contexte pour l'apprentissage	47
3.2.4 Enseigner les modèles et la modélisation.....	48
3.3 CONCEPTIONS ET PRATIQUES DES ENSEIGNANTS SUR LES MODÈLES ET L'EXPÉRIMENTAL.....	50

CHAPITRE 4 PROBLÉMATIQUE	55
---------------------------------------	-----------

4.1 CHOIX DES THÉMATIQUES DE RECHERCHE RÉALISÉS POUR CETTE ÉTUDE	55
4.1.1 Choix 1 : le supérieur, les enseignants et leurs pratiques	55
4.1.2 Choix 2 : la NOS, les modèles et les contextes.....	56

4.1.3	Choix 3 : les modèles dans différentes filières et disciplines	57
4.1.4	Choix 4 : le domaine de la physique étudié	58
4.2	ENONCÉ DE LA PROBLÉMATIQUE ET DES QUESTIONS DE RECHERCHE	60
CHAPITRE 5 MÉCANIQUE DES FLUIDES		65
5.1	ELÉMENTS DE PHYSIQUE : LOIS ET MODÈLES.....	65
5.2	ELÉMENTS D'HISTOIRE DES SCIENCES : CONSTRUCTION HISTORIQUE D'UN MODÈLE EN MÉCANIQUE DES FLUIDES	67
5.2.1	Introduction	67
5.2.2	Une problématique expérimentale.....	69
5.2.3	Une tentative d'interprétation.....	69
5.2.4	Un développement théorique qui présente des limites	70
5.2.5	Un obstacle	72
5.2.6	Un nouveau modèle qui permet de dépasser ces difficultés.....	73
5.2.7	Le cas de l'étude d'un écoulement sanguin.....	76
5.3	CONTEXTES ET LIMITES DE LA PHYSIQUE ET DE LA BIOLOGIE	77
5.4	ELÉMENTS ISSUS DE LA LITTÉRATURE EN DIDACTIQUE ET EN RECHERCHE MÉDICALE LIÉS À LA MÉCANIQUE DES FLUIDES	78
5.4.1	Manuels d'enseignement, programmes et articles de recherche médicale : des inexactitudes, des oublis ...	78
5.4.2	Elèves et étudiants : difficultés et conceptions.....	81
5.4.3	Enseignants.....	83
5.4.4	Propositions.....	84
5.4.5	Exemples de questionnement sur les pratiques en lien avec les modèles et les contextes	87
SECONDE PARTIE : L'ENQUÊTE		91

CHAPITRE 6 MÉTHODOLOGIE		95
6.1	CARACTÉRISTIQUES DE L'ENQUÊTE MENÉE.....	95
6.1.1	Visées : étude de cas et régularités contextualisées.....	95
6.1.2	Une enquête sur les pratiques déclarées d'enseignants	96
6.1.3	Une enquête par entretien	96
6.1.4	Dialectique entre empirie et théorie	97
6.1.5	Une enquête réalisée dans deux pays et dans différentes institutions	98
6.1.6	Déroulé de l'enquête	99
6.2	LA TRAME D'ENTRETIEN ET LES QUESTIONS TRAVAILLÉES DANS LA THÈSE	101
6.2.1	La structure de l'entretien, les thèmes abordés et étudiés	101
6.2.2	Présentation des questions de l'enquête étudiées dans ce manuscrit	102
6.2.3	Les thèmes et sous-thèmes du questionnaire étudiés dans ce manuscrit au travers du cadre des PCK et <i>beliefs</i>	110
6.2.4	Les situations empiriques et questions du questionnaire au travers des dimensions et catégories de PCK	114
6.3	LA POPULATION INTERVIEWÉE.....	115
6.3.1	Les institutions d'enseignement	116
6.3.2	Les profils des enseignants interviewés.....	116
6.3.3	Le choix des enseignants interviewés.....	116
6.3.4	L'élaboration de l'échantillon interviewé : disciplines de cœur et disciplines de service	117
6.4	L'ÉCHANTILLON ANALYSÉ	119
6.5	LE TRAITEMENT DES DONNÉES	123
6.5.1	Panorama du travail réalisé	123
6.5.2	Analyse qualitative des réponses fournies par chaque enseignant.....	123
6.5.3	Analyse <i>a priori</i> des réponses susceptibles d'être fournies par les enseignants	124
6.5.4	La grille d'analyse thématique en termes de PCK et de <i>beliefs</i> pour les modèles et les contextes	125
6.5.5	Le profil d'un enseignant	126
6.5.6	Le profil d'une famille	129
6.5.7	Mise en perspective des résultats associés aux différentes dimensions des PCK	129

6.5.8	Mise en perspective des résultats avec les variables explicatives	130
CHAPITRE 7 RÉSULTATS SUR LES MODÈLES		131
7.1	GRILLE D'ANALYSE RELATIVE AUX MODÈLES	131
7.1.1	Analyse <i>a priori</i>	131
7.1.2	Présentation de la grille	133
7.1.3	Deux groupes d'enseignants concernant le type de modèle évoqué.....	136
7.2	CAS DES ENSEIGNANTS QUALIFIÉS DE PHYSIQUE : CE QU'ILS DISENT QU'ILS FONT	137
7.2.1	Les modèles introduits et la progression suivie	137
7.2.2	Caractéristiques des modèles introduits : la fonction principale du modèle	139
7.2.3	Caractéristiques des modèles introduits : le domaine de validité du modèle	140
7.2.4	Nature des difficultés des élèves	144
7.3	CAS DES ENSEIGNANTS QUALIFIÉS DE PHYSIQUE : CE QU'ILS SONT SUSCEPTIBLES DE FAIRE.....	147
7.3.1	Utilisation du modèle : couplage de deux situations prototypiques	147
7.3.2	Utilisation du modèle : Une situation prototypique et une question inhabituelle.....	153
7.3.3	Utilisation du modèle : attitude face à une situation prototypique et une question inhabituelle	161
7.4	CAS DES ENSEIGNANTS QUALIFIÉS DE BIOMÉDICAL (MB).....	166
CHAPITRE 8 RÉSULTATS SUR LES CONTEXTES		181
8.1	GRILLE D'ANALYSE RELATIVE AUX CONTEXTES.....	181
8.1.1	Contextes empiriques et pédagogiques : analyse <i>a priori</i>	181
8.1.2	Présentation de la grille	183
8.2	CONTEXTES EMPIRIQUES : OBJETS ET PHÉNOMÈNES PROPOSÉS PAR LES ENSEIGNANTS INTERROGÉS	186
8.2.1	Mondes de référence retenus	186
8.2.2	Objets et phénomènes mentionnés	189
8.2.3	Justifications avancées par les enseignants	191
8.3	CONTEXTES EMPIRIQUES : RECOURS À UN CONTEXTE EXPÉRIMENTAL	198
8.3.1	Visée d'un recours à l'expérimental.....	198
8.3.2	Présence de Travaux Pratiques (TP)	204
8.3.3	Justifications proposées pour le recours à un contexte expérimental	207
8.4	CONTEXTES PÉDAGOGIQUES : RECOURS À UN CONTEXTE HISTORIQUE.....	214
8.4.1	Connaissances en histoire des sciences introduites par les enseignants interrogés.....	214
8.4.2	Visée associée à l'histoire des sciences	218
8.4.3	Justifications proposées pour la visée associée à l'histoire des sciences	222
8.5	CONTEXTES PÉDAGOGIQUES : NOMBRE DE SUPPORTS.....	229
CHAPITRE 9 DISCUSSION.....		239
9.1	RAPPROCHEMENT DES RÉSULTATS DES CHAPITRES 7 ET 8 PAR FAMILLE.....	239
9.1.1	Représentation du bilan général des PCK par famille	239
9.1.2	Commentaires sur les tendances observées dans les familles et les sous-familles	241
9.1.3	Commentaires sur les hypothèses de recherche	242
9.2	RAPPROCHEMENT DES RÉSULTATS DES CHAPITRES 7 ET 8 PAR 'PÉRIMÈTRE D'EXPERTISE' RELATIF AUX MODÈLES ET AUX CONTEXTES.....	243
9.2.1	Tableau comparatif des enseignants en termes de modèles et de contextes	243
9.2.2	Commentaires généraux.....	244
9.2.3	Remarque sur la comparaison des enseignants en termes d'attitudes et de périmètre d'expertise sur les modèles.....	245
9.3	RAPPROCHEMENT DES RÉSULTATS DES CHAPITRES 7 ET 8 EN LIEN AVEC LES ÉLÈVES.....	246
9.3.1	Commentaire général sur la place des élèves dans le discours des enseignants interrogés	246
9.3.2	Commentaires sur les justifications évoquées aux chapitres 7 et 8 en lien avec les élèves	247
9.3.3	Confrontation des choix d'un enseignant aux propos d'un de ses étudiants	253
9.4	RAPPROCHEMENT DES RÉSULTATS AVEC LES VARIABLES EXPLICATIVES.....	255
9.4.1	Variables explicatives abordées : tableaux récapitulatifs	255
9.4.2	Plusieurs variables à considérer.....	261
9.4.3	Spécificités locales et nationales	262
9.5	RAPPROCHEMENT DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA LITTÉRATURE.....	264

9.5.1	Rapprochement en lien avec les modèles	264
9.5.2	Rapprochement en lien avec les contextes empiriques	266
9.5.3	Rapprochement en lien avec le recours à l'histoire des sciences ou à des cas contemporains.....	267

CONCLUSION **273**

BILAN DE L'ÉTUDE.....	275
DES PISTES POUR LA FORMATION DES ENSEIGNANTS	278
LIMITES DU TRAVAIL RÉALISÉ ET PISTES POUR DES RECHERCHES ULTÉRIEURES	279

ANNEXES..... **287**

ANNEXE A : ÉLÉMENTS DE LITTÉRATURE EN LIEN AVEC DES STRATÉGIES D'ENSEIGNEMENT DE L'HISTOIRE DES SCIENCES.....	289
ANNEXE B : ÉLÉMENTS D'HISTOIRE DE LA MÉCANIQUE DES FLUIDES	295
ANNEXE C : EXTRAITS DE SOURCES DIVERSES (OUVRAGES, MANUEL, JOURNAL.....)	325
ANNEXE D : DONNÉES SUR L'ENQUÊTE	329
ANNEXE E : TRAME DES ENTRETIENS	345

BIBLIOGRAPHIE **357**

Introduction générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la didactique des sciences. Aux États-Unis, au *College of Education* de Penn State University, où j'ai eu l'opportunité de partir pendant 5 mois en 2015, le terme de didactique n'avait pas de sens pour les doctorants avec lesquels je travaillais. Nous débutons donc ce manuscrit en présentant ce champ de recherche.

Puis nous exposons les raisons personnelles à l'origine de ce travail de thèse. En effet, Vigour (2005) souligne l'importance pour le chercheur d'avoir conscience à la fois de ses valeurs, en l'occurrence le choix du thème et l'influence du contexte, et de leur impact sur la formulation de la problématique, sur l'orientation du regard et sur les conclusions de la recherche qu'il mène.

Enfin, nous présentons la trame du travail présenté dans ce manuscrit.

Poursuivant des « *visées très pragmatiques au départ* », les didactiques disciplinaires se sont construites dans les années 1970-1980 « *en réaction aux sciences de l'éducation, jugées trop déconnectées des questions pratiques, à cause des théories de référence d'alors* » (Develay, 2001, p.92). La prise en compte des contenus d'enseignement distingue en effet les didacticiens des autres chercheurs en éducation.

Selon Chevallard (2002, p. 14), la didactique est « *la science de la diffusion des connaissances et des pratiques dans les groupes humains* ». Plus précisément, il s'agit de « *s'intéresser aux processus d'acquisition et de transmission des connaissances dans un champ de connaissances déterminé* » (Develay, 2001, p.54). On parle ainsi de la didactique des mathématiques, de la didactique de la physique, etc.

Trois fonctions de la recherche en didactique sont repérées par Martinand : « *ouvrir des possibles (fonction d'invention), prendre du recul pour comprendre le sens des processus d'enseignement et d'apprentissage (fonction critique) et apporter des preuves (fonction de validation)* » (Martinand, 1988, p.911). Ainsi, la recherche en didactique peut consister à établir ou adapter des curriculums (« *visée d'aide à la décision* ») ou encore à étudier des processus de pensée, d'apprentissage, d'enseignement d'un contenu donné (« *visée de connaissance* »).

De là, la didactique de la physique et de la chimie peut être perçue « *comme une discipline de transfert entre les disciplines universitaires, qui devraient donner des éléments pour la compréhension de la physique et de la chimie telles qu'elles se pratiquent, et l'exercice du métier d'enseignant de sciences physiques au lycée et au collège, voire à l'école.* » (Martinand, 1993, p.97).

La didactique de la physique est une science jeune, elle apparaît en France vers la fin des années 1970. Si à l'origine les recherches se développent selon deux axes, l'étude des difficultés et modes de raisonnement des élèves et des étudiants d'une part, l'élaboration et la validation de dispositifs d'enseignement d'autre part, un troisième axe apparaît dans les années 1990, celui de la formation des enseignants.

Au début, les recherches se concentrent sur le sujet cognitif. Cela conduit Develay à remettre en question les approches de la didactique des sciences autour des années 2000, notamment sur deux points.

D'une part, il note que la question de l'éthique est mise de côté : « *paradoxalement, la référence à Piaget conduira les didacticiens à ne pas intégrer la réflexion éthique, le point de vue de cet auteur sur le développement de l'intelligence, ouvert à la communication, à l'expression, au*

conflit, au débat d'idées permettant, en un raccourci saisissant, une impasse sur une réflexion éthique que de nombreux didacticiens feignent d'oublier fréquemment, ne conceptualisant pas des processus d'éducation, mais d'enseignement. » (Develay, 2001, p.94).

D'autre part, serait mise de côté la question du désir : « *La didactique doit avoir pour projet de s'intéresser à la question du désir dans l'apprentissage, et donc aux dimensions fantasmatiques qu'un savoir recèle pour un apprenant particulier.* » (Develay, 2001, p.101).

Des études considèrent à présent le sujet (élève ou enseignant) également sous différentes dimensions (sociale, affective, corporelle). D'autres explorent des questionnements sur des formes scolaires, qui visent la formation des élèves en tant que personnes et futurs citoyens, et intègrent une dimension éthique (champs des éducations à, des questions scientifiques socialement vives).

Présentons maintenant nos valeurs.

Un goût personnel pour les sciences humaines et sociales, peu présentes dans ma pratique professionnelle et délaissées dans ma vie privée, m'a poussé vers les sciences de l'éducation : aborder l'enseignement sous un angle autre que disciplinaire m'a semblé éclairant et intellectuellement stimulant.

Je vois également cette thèse comme une tentative de contribution personnelle à la réflexion collective sur l'enseignement. Cette contribution présente une visée de recherche, qui est la compréhension des pratiques enseignantes. De là, à termes, il s'agit pour nous de fournir aux enseignants des pistes de réflexion pour enrichir leur pratique professionnelle.

C'est un contexte de réforme curriculaire en France, pensé dans la continuité didactique secondaire-supérieur, qui m'a conduit à débiter une recherche sur l'enseignement. En effet, consécutivement à la réforme des programmes de physique-chimie de lycée entre 2010 et 2012, une réforme des programmes de Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles (CPGE) a été engagée à la rentrée 2013. **La réflexion sur la nature des savoirs scientifiques et leur mode d'élaboration est une dimension nouvelle des programmes de CPGE.** Par exemple, dans le programme de PC, qui est une des filières de CPGE, on lit qu'analyser et **modéliser** figurent parmi les quatre « *compétences propres à la pratique de la démarche scientifique* » attendues de la part des étudiants en fin de formation, que la **formation expérimentale** de l'étudiant est considérée comme étant d'« *une importance essentielle, au même titre que sa formation théorique* » et que **contextualiser** figure parmi les trois grands principes directeurs recommandés à l'enseignant par les programmes pour l'organisation de son enseignement (l'enseignant « *doit savoir recourir à la mise en contexte des contenus scientifiques* »). C'est dans ce cadre que le programme fait référence à **l'histoire des sciences et des techniques**, afin de « *mettre en perspective* » le thème traité.

C'est cette dimension de nature épistémologique mise en avant à présent par les programmes de CPGE qui a retenu notre attention. Elle est au centre d'un vaste courant de recherches en éducation désigné par l'expression 'Nature of Science' et l'acronyme NoS, particulièrement développé à l'étranger et dans les pays anglo-saxons. Les enjeux associés aux connaissances en ce domaine sont pluriels, allant 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, sans oublier ceux en lien avec l'image des sciences et l'orientation vers les métiers scientifiques.

C'est au maillon essentiel de la mise en place d'une réforme que constituent les enseignants que

nous avons choisi de nous intéresser (Van Driel, 2002 ; Henze, 2007).

Nous avons souhaité étudier ces pratiques sur un thème original de la physique.

La mécanique des fluides, à l'exception notable de la statique des fluides, la mécanique quantique et la relativité figuraient parmi les thématiques en physique qui étaient peu abordées en didactique quand j'ai débuté ma thèse. N'ayant pas eu l'occasion d'enseigner la mécanique quantique et la relativité, j'ai préféré m'orienter vers le premier thème, à savoir la mécanique des fluides.

De plus, étant en poste en CPGE, aborder ce thème me permettait une éventuelle utilisation des résultats dans mon quotidien d'enseignant.

Nous avons alors décidé de nous centrer sur les pratiques enseignantes mises en oeuvre au niveau du premier cycle de l'enseignement supérieur, ce qui nous permettait tout à la fois d'aborder un environnement scolaire proche du nôtre et d'examiner des disciplines et filières de formation différentes. Ouvrir la réflexion à d'autres cursus universitaires que les CPGE, notamment au cursus médical où les modalités de sélection en PACES (Première Année Commune aux Etudes de Santé) posent question en France, constituait en effet une autre source de motivation pour ce travail de thèse

Réseau d'eau, circulation sanguine, montée de la sève, sont quelques-uns des phénomènes dont la compréhension repose sur celle du mouvement des fluides et qui sont abordés dans des filières d'enseignement et des domaines scientifiques différents (physique, biologie, géologie, santé, ingénierie).

Peu présente dans l'enseignement secondaire, à l'exception de quelques filières techniques, la mécanique des fluides apparaît dans différents cursus universitaires scientifiques, en sections de deuxième année de classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) dénommées PC, PSI, PT et BCPST, en cursus de licences et d'écoles d'ingénieurs, en formations de techniciens supérieurs (en STS, Sections de Technicien Supérieur et en IUT, Instituts Universitaires de Technologie), au concours de première année de médecine (PACES).

Il s'agit donc pour nous de comprendre les pratiques enseignantes sur le thème de la modélisation, questionnée sous l'angle des modèles et des contextes, dans un domaine précis de la physique, la mécanique des fluides, au niveau du premier cycle de l'enseignement supérieur, dans différentes filières d'enseignement et disciplines. La contrainte principale durant cette thèse étant le facteur temps, nous avons choisi d'explorer les pratiques déclarées des enseignants et non les pratiques effectives et de nous centrer sur des situations d'écoulement interne.

Afin de croiser les regards, nous avons réalisé cette enquête dans deux pays aux cultures éducatives différentes, à savoir la France et les États-Unis. Les structures d'enseignement étudiées sont, volontairement, de profils variés, et ce au sein de chacun des pays : d'une part, aux États-Unis, des universités de recherche, des *College* et *Community College*, d'autre part, en France, des universités, des CPGE, des STS et des IUT.

Cette diversité de populations nous a conduits à nous interroger sur l'existence ou non de spécificités disciplinaires et/ou liées aux filières de formation.

La première partie de ce manuscrit est consacrée aux différents volets de l'étude théorique que nous avons réalisée en interaction constante avec l'étude empirique et à la construction de la

problématique.

Dans le premier chapitre, nous présentons des thèmes de réflexion sur les pratiques enseignantes et les ancrons dans le cadre des *Pedagogical Content Knowledge* (PCK). Dans le deuxième chapitre, nous introduisons le champ de recherche de la NOS (*Nature of Science*) et le développons sous l'angle des modèles et de la modélisation dans le chapitre suivant. Nous retraçons la construction de la problématique dans le quatrième chapitre et présentons nos questions de recherche. Nous consacrons le cinquième chapitre à des éléments théoriques et historiques relatifs à la mécanique des fluides.

Dans le premier chapitre de la seconde partie, la méthodologie de l'enquête est explicitée. Nous présentons la trame d'entretien et la grille d'analyse de contenus que nous avons élaborées et les mettons en perspective avec les cadres des PCK et de la NOS.

Les deux chapitres de résultats suivants abordent principalement les modèles et la modélisation retenus par les enseignants interrogés, leur prise en compte des difficultés des élèves, les contextes empiriques et pédagogiques qu'ils déclarent employer et les raisons influençant leurs choix. Nous cherchons également à mettre en évidence leurs périmètres d'expertise dans ces domaines. Les résultats présentés dans ces deux chapitres sont ensuite rapprochés et l'influence de différentes variables explicatives (ancienneté, formation par exemple) est examinée. Nous mettons en perspective nos résultats avec la littérature et concluons par les limites de cette étude et des pistes de recherche ultérieures ainsi que des pistes pour la formation des enseignants.

Première partie : objet et cadre de l'étude

Chapitre 1 Comment analyser les pratiques enseignantes ?

1.1 Les PCK

L'expression *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) désigne un courant de recherches portant sur les enseignants. Il est particulièrement développé dans la communauté anglo-saxonne, la quantité d'articles de recherche se référant aux PCK est en effet plus que conséquente (Evens, 2015). Un important colloque s'est tenu à l'Université du Colorado en 2012 pour effectuer un état des lieux de la recherche dans ce domaine (Gess Newsome, 2015).

Par ailleurs, depuis une dizaine d'années, ce courant de recherche a diffusé dans la communauté francophone (Kermen, 2008 ; Cross, 2010 ; Jameau, 2013). En 2014, est publié un livre avec plusieurs contributions de chercheurs francophones (Grangeat, 2014), dont certains mettent en perspective les PCK avec d'autres cadres d'analyse de pratiques enseignantes développés en France.

Après avoir rappelé les origines de ce courant de recherche, nous le présentons puis nous indiquons ce que nous en retenons dans le cadre de ce travail de thèse.

1.1.1 Origine des PCK

Dans le débat sur **la certification des enseignants** qui anime les États-Unis dans les années 1980, la qualité de l'enseignant est vue comme la variable la plus importante dans l'apprentissage des élèves (Lessard, 2006).

Deux conceptions de l'enseignant s'opposent alors : celle de l'enseignant compétent (courant professionnaliste), contre celle de l'enseignant efficace (courant dérégulationniste). Pour les dérégularisationnistes, la priorité est la performance et le chiffrage par des résultats à des tests standardisés. Un courant antagoniste, *Evidence-based policy*, vise à fonder la politique éducative sur les résultats de la recherche pédagogique. Y est rappelé l'importance de l'enseignant ainsi que la nécessité d'une recherche de qualité, concernant la façon d'apprendre ce métier de manière efficace. Les apports de l'enseignant seraient liés à son expérience, jusqu'à une valeur de saturation, à son habileté verbale ainsi qu'à sa formation disciplinaire.

Mais parmi les critères de recrutement d'un enseignant à cette époque ne figurent ni sa maîtrise du contenu disciplinaire ni sa capacité à enseigner. L'accent est mis sur sa capacité à gérer la classe. Shulman, entre autres, cherche à contrebalancer cette tendance, en soulignant **l'importance du contenu disciplinaire** (Magnusson, 1999) et des recherches sur les enseignants. Il considère en effet que ce qui manque dans la communauté de recherche dans les années 1970-1980 « *ce sont les questions posées aux élèves, et les explications offertes* » et note que « *la psychologie cognitive de l'apprentissage s'est centrée presque exclusivement sur de telles questions, mais strictement dans la perspective des apprenants. Les recherches sur*

l'enseignement ont tendu à ignorer ces questions pour ce qui concerne les professeurs » (traduction de Sensevy, 2007a, p.103).

Le champ de recherche sur les enseignants et les PCK émerge ainsi.

1.1.2 Définition double et intérêt double des PCK

L'acronyme des PCK est polysémique.

Il désigne tout d'abord **les connaissances professionnelles liées à l'enseignement d'une discipline donnée, voire d'un contenu disciplinaire donné** : ce ne sont pas les mêmes PCK qui sont développées en physique et en géographie par exemple (Bishop, 2007a).

Dans la définition proposée par Shulman, les PCK comportent deux dimensions, pédagogique et disciplinaire. Elles apparaissent comme étant « *that special amalgam of content and pedagogy that is uniquely the province of teachers, their own special form of professional understanding* » (Shulman, 1987, p.8), ce que Cross traduit en indiquant que « *pour Shulman, les PCK peuvent se voir comme un amalgame entre des connaissances pédagogiques et des connaissances disciplinaires* » (Cross, 2010, p.41).

Cette idée d'**amalgame** pour qualifier les PCK fait consensus.

Il s'agit d'un domaine nouveau résultant de la « *transformation d'au moins deux domaines de connaissances* » (pédagogiques générales et disciplinaires), dont le développement est lié à un processus intégré enraciné dans la pratique (Kermen, 2008). Les PCK permettent « *to describe the knowledge that teachers create by transforming their content into a teachable form* ». (Rollnick, 2008, p.1365)

L'acronyme PCK désigne également le champ de recherches lui-même et est associé à **un paradigme de recherche**, au sens de Kuhn : « *PCK is approaching the status of a paradigm (Kuhn, 1970) that is shared among the research community and guides our thinking about teacher learning* » (Abell, 2008a, p.1410). La proposition de Shulman est en effet « *une référence adoptée pour de nombreuses recherches, et ses principes généraux de construction théorique sont reconnus* » (Calmettes, 2014, p.50). Notons que Shulman évoquait déjà cette notion de paradigme lors d'une intervention à l'*American Educational Research Association (AERA)* en 1985 : « *Mes collègues et moi-même considérons que l'absence de centration sur le contenu, au sein des divers paradigmes de recherche sur l'étude de l'enseignement, renvoie au problème du paradigme manquant. Les conséquences de ce paradigme manquant sont importantes, à la fois pour la politique et pour la recherche* » (traduction de Sensevy, 2007a, p.100).

Les PCK constituent ainsi un cadre de questionnement et d'analyse des connaissances professionnelles des enseignants (Abell, 2008a).

Selon Cross, « *Shulman (1986, 1987) est parti du constat que les investigations sur les connaissances des enseignants portaient soit sur les connaissances disciplinaires, soit sur les connaissances pédagogiques, et de l'idée que ces recherches ne permettaient pas de répondre à une question essentielle : quelles connaissances sont nécessaires pour enseigner la chimie ? l'histoire ? etc. Il a donc proposé un modèle des connaissances des enseignants permettant de répondre à cette question* » (Cross, 2010, p.40), modèle consistant à distinguer différents types de connaissances de l'enseignant et à les catégoriser.

A travers une réflexion sur les PCK, il peut s'agir de répondre aux questions suivantes concernant l'enseignant : « *comment utilise-t-il sa connaissance du contenu pour produire de nouvelles explications, représentations, ou clarifications ? Quelle est l'origine des analogies, métaphores, exemples, démonstrations, et reformulations qu'il mobilise ? Comment le professeur novice (ou bien même le vétéran expérimenté) se sert-il de son expertise disciplinaire lorsqu'il enseigne ?* » (traduction de Sensevy, 2007a, p.103).

Etudier les PCK présente donc un double intérêt :

D'une part, se référer aux PCK permet de **structurer la réflexion sur les pratiques enseignantes** : « *Identifying discrete categories is useful for researchers ; they can design research protocols, including interviews and questionnaires, to uncover knowledge within specific categories* » (Abell, 2008a, p.1407) ; « *Developing deeper understandings of the phenomenon that is PCK may also help to create new ways for appropriately discussing issues inherent in the intricacies and application of content knowledge in the growth of practice* » (Rollnick, 2008, p.1366).

D'autre part, les résultats trouvés sur les pratiques enseignantes via les PCK constituent **une aide à la formation des enseignants** : « *these educational ideas, in turn, can be taught to other teachers in workshops and courses and in this way flow into these teachers' Individual Teaching Practice* » (Van Dijk, 2007, p.893), « *If expertise can be captured and portrayed, it may then be passed on to inexperienced teachers and thus assist them in their progress toward enhanced competence in teaching* » (Rollnick, 2008, p.1366).

1.1.3 Caractérisations successives des PCK

Structuration dans les années 1980-1990

C'est dans les années 1980 que se structure ce champ de recherche que sont les PCK. Sont proposées des catégories de connaissances sur ce que sont estimés être des « *practical knowledge* » que devrait posséder un enseignant (Grossman, 1990, p.5).

Le nombre de ces catégories varie en fonction des chercheurs comme indiqué dans le tableau 1.1.3.1.

Contributeurs	Elbaz	Leinhardt et Smith	Shulman <i>et al</i>	Grossman	Magnusson
Année de publication	1983	1985	1987	1990	1999
Nombre de catégories de <i>practical knowledge</i>	5	7	7	4	4

Tableau 1.1.3.1
Evolution du nombre de catégories de « practical knowledge »
retenues du début des années 1980 à la fin des années 1990

L'équipe de Stanford (Shulman, Wilson et Richert) s'appuie sur les travaux d'Elbaz et de Leinhardt pour proposer en 1987 une ligne directrice pour une catégorisation des « *practical knowledge* ». Il s'agit d'aborder les connaissances des enseignants sous différents angles : disciplinaire, pédagogique et curriculaire.

Leur catégorisation constitue « *un cadre de classification comprenant à la fois les domaines et les catégories de ce savoir, d'une part, et les formes de représentation de cette connaissance, d'autre part* » (traduction de Sensevy, 2007a, p.106).

Il s'agit notamment de concilier des connaissances sur les buts et objectifs d'apprentissage, sur les étudiants et leurs difficultés ainsi que sur les méthodes d'évaluation et les stratégies d'enseignement.

La catégorisation que Shulman propose est ensuite reprise et complétée par différents chercheurs dans la décennie suivante (notamment Grossman en 1990 et Magnusson en 1999).

Comme indiqué dans le tableau 1.1.3.2 sur l'exemple des catégorisations proposées par Shulman puis Grossman, les dénominations des catégories évoluent, leur structure s'affine : ainsi, le vocable PCK constitue pour certains la réunion de différentes catégories et non plus une catégorie en soi (Grossman, 1990 ; Bishop, 2007a). C'est donc progressivement que se construit cette catégorisation des connaissances des enseignants.

Catégorisation proposée par Shulman 7 domaines	Catégorisation proposée par Grossman 4 domaines
☐ Content knowledge	☐ Subject matter knowledge
☐ General pedagogical knowledge	☐ General pedagogical knowledge
☐ Knowledge of educational contexts	☐ Knowledge of context
☐ Pedagogical content knowledge	☐ Pedagogical content knowledge incluant : Curricular knowledge Knowledge of students' understanding Knowledge of instructional strategies
☐ Curriculum knowledge	
☐ Knowledge of learners and their characteristics	
☐ Knowledge of educational ends, purposes, and values, and their philosophical and historical grounds	

Tableau 1.1.3.2
Catégorisations des « *practical knowledge* » proposées par Shulman et Grossman

Sur l'exemple de la catégorisation de Grossman, 4 domaines de connaissances de l'enseignant représentent « *the cornerstones of the emerging work on professional knowledge for teaching* » (Grossman, 1990, p.5) : les connaissances du contenu disciplinaire (*Content Knowledge*), les connaissances pédagogiques (*General Pedagogical Knowledge*), les connaissances sur le

contexte (*Knowledge of educational contexts*) et les connaissances pédagogiques liées au contenu (*Pedagogical Content Knowledge, PCK*).

Cross (2010, p.40) précise que ces quatre catégories sont « *en relation entre elles* » et que les connaissances du contenu disciplinaire (*Subject Matter Knowledge*) ne se limitent pas aux connaissances que l'enseignant transmet aux élèves.

Les connaissances pédagogiques (*General Pedagogical Knowledge*) « *font référence aux connaissances générales de l'enseignant à propos de l'enseignement, sans être liées à un contenu disciplinaire, par exemple savoir qu'il faut varier les activités pour maintenir l'intérêt des élèves* » (*ibid.*, p.40). Les connaissances sur le contexte (*Knowledge of context*) « *regroupent les connaissances que possède l'enseignant à propos de l'origine de ses élèves (classe sociale etc.), du type d'établissement dans lequel il enseigne etc. et qu'il prend en compte dans son enseignement* » (*ibid.*, p.40). Enfin, les connaissances pédagogiques liées au contenu (*Pedagogical Content Knowledge*) sont « *les connaissances que développe un enseignant pour aider les élèves à comprendre et apprendre un contenu* » (*ibid.*, p.41).

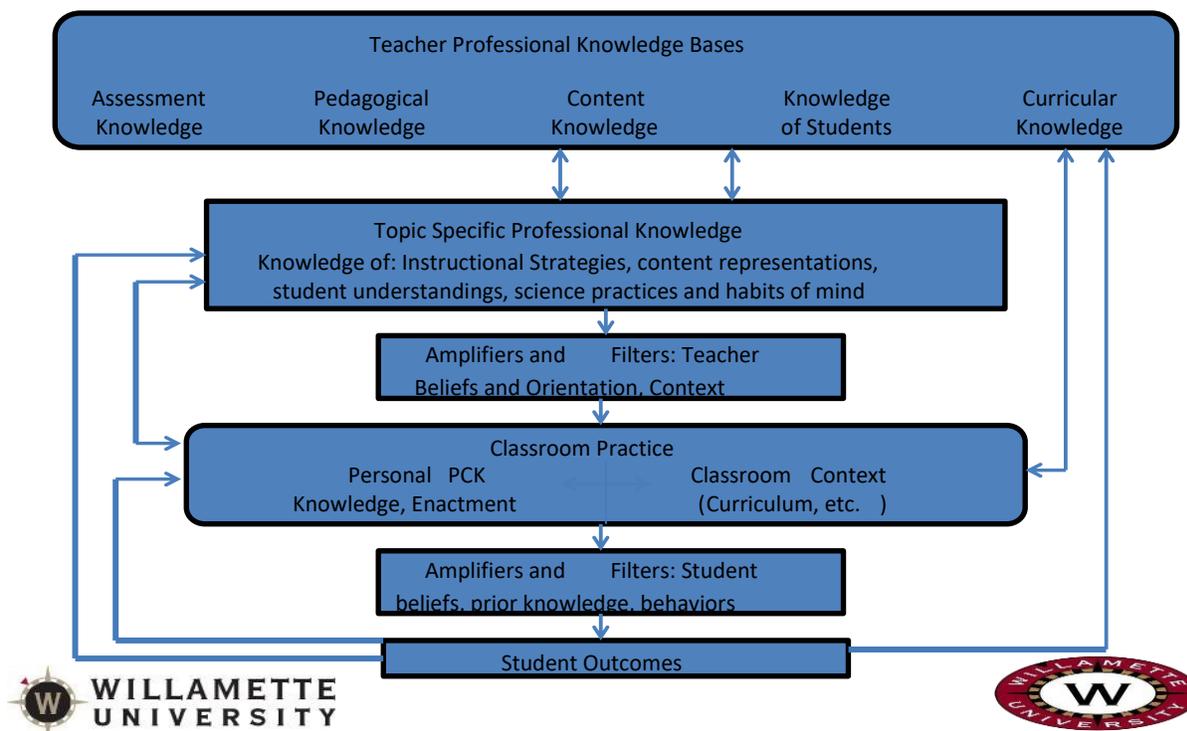
La structure de la catégorisation continue à se complexifier par l'introduction de sous-catégories ou d'éléments supplémentaires dans les catégories : par exemple, Magnusson (1999) reprend des intitulés de catégories proches de ceux de Grossman mais ajoute le terme '*belief*' à '*knowledge*' pour décrire les catégories caractérisant les connaissances de l'enseignant. Magnusson considère ainsi les '*Pedagogical Content Knowledge and beliefs*', '*Subject Matter Knowledge and beliefs*', '*Pedagogical Knowledge and beliefs*' et '*Knowledge and beliefs about Context*'. Nous reviendrons sur ce point plus loin dans ce manuscrit.

Pour autant, l'ossature principale des catégories de PCK reste sensiblement la même que celle de Shulman. En 2009, Janik estime que « *There is no universally accepted model of PCK* » (Janik, 2009, p.49).

Sommet sur les PCK de 2012

En 2012, à l'Université du Colorado, se déroule un congrès international réunissant les spécialistes des PCK, dont Shulman, qui cherchent à proposer une synthèse des recherches menées jusqu'alors sur les PCK.

Un nouveau modèle, indiqué dans le document 1.1.3.1, est proposé et fait référence depuis. Grangeat (2014) en a proposé une variante.



Document 1.1.3.1
Modèle de Gess-Newsome (version de 2013)

On retrouve dans ce modèle une partie des éléments de connaissances des catégorisations précédentes. Ils figurent dans la rubrique *Teacher Professional Knowledge Bases : Pedagogical Knowledge, Content Knowledge, etc...*

Ces éléments de connaissances interagissent avec les *Topic-Specific Professional Knowledge* (TSPK), qui sont des connaissances liées aux stratégies pédagogiques, aux représentations du contenu à enseigner, à la compréhension du contenu par les étudiants, aux pratiques scientifiques et habitudes de pensée sur un thème donné. Ces connaissances, appelées parfois *Canonical PCK* (Garritz, 2015), sont (ou pourraient être) structurées par les experts de la discipline considérée et de son enseignement ainsi que par la communauté enseignante (Doyle, 2019). Elles pourraient correspondre à des contenus de programmes et de référentiels de formation d’enseignants.

Ces TSPK sont filtrés et amplifiés en fonction des convictions de l’enseignant (*Teacher Beliefs and Orientations*) et du contexte d’enseignement, qui sont indiqués dans la case *Amplifiers & Filters*.

Ils aboutissent à des *Personal PCK* (ou *Believed PCK*) qui sont des connaissances et des compétences que le professeur développe lors de sa pratique enseignante, dans le contexte de la classe.

L’apport de ce modèle est double : il met en avant la **distinction, sur un cas donné, entre les connaissances communes *a priori* à tous les enseignants, les TSPK (ou *Canonical PCK*), et les connaissances propres à chaque individu, les *Personal PCK*.**

Ce modèle met également en avant l’importance des convictions de l’enseignant (*‘Amplifiers & Filters’*) associant les TSPK aux pratiques de l’enseignant en situation.

Néanmoins, un flou persiste d'une part sur les interactions entre les éléments du modèle et d'autre part sur ce que contiennent les *Amplifiers & Filters* sur un cas donné (aucune catégorisation détaillée n'est encore proposée (Garritz, 2014)).

1.1.4 Principales caractéristiques des PCK

Les contributions évoquées ci-dessus révèlent la variété de catégorisations proposées dans le cadre des PCK. Les dénominations des catégories fluctuent d'un chercheur à l'autre mais consistent néanmoins à expliciter la ligne directrice de Shulman.

En 2008, Abell dresse un bilan des PCK, plus de 20 ans après leur élaboration (Abell, 2008a).

Quelle que soit la dénomination retenue, il existe un consensus dans la communauté de recherche sur **l'importance du contenu à enseigner** (« *Content (science subject matter) is central to PCK* » (Abell, 2008a, p.1407)).

De plus, il est important **de prendre en compte les connaissances des enseignants mais aussi leurs convictions** (terme retenu ici pour traduire l'appellation anglo-saxonne de 'beliefs').

Il y a également **un consensus sur la possibilité de catégoriser les connaissances attendues d'un enseignant et sur l'aspect dynamique de ces catégories** qui sont connectées et interagissent entre elles (Cross, 2010) : « *PCK is more than the sum of these constituent parts (...)* *PCK is dynamic, not static* » (Abell, 2008a, p.1408). Bishop propose l'analogie d'une toupie pour expliquer qu'en situation d'enseignement, ces catégories de PCK s'entre-mêlent (Bishop, 2007a) et Magnusson suggère, « *pour marquer ces aspects dynamiques, de changer PCK en PCKg (Pedagogical Content Knowing)* » (Calmettes, 2014, p.55). Pour autant, qu'un enseignant évolue dans une catégorie de PCK n'aboutit pas nécessairement à une évolution dans les autres catégories (Magnusson, 1999).

Comme évoquée précédemment, il y a une variété de catégorisations proposées par les chercheurs depuis la ligne directrice énoncée par Shulman. **Les catégories qui apparaissent comme faisant consensus sont qualifiées des termes génériques de 'Representations & strategies' et de 'Student learning & conceptions'** (Van Dijk, 2007 ; Cross, 2014 ; Kirschner, 2016). Janik (2009) les jugent cruciales. On retrouve ces notions dans le modèle de Gess-Newsome (voir le Document 1.1.3.1) sous les appellations de '*instructional strategies*', '*content representations*' et '*student understandings*'.

1.1.5 Comment étudier les PCK ?

Pour étudier les PCK des enseignants, Shulman propose comme piste de recourir à l'étude de cas, de tracer la biographie intellectuelle des enseignants, « *cet ensemble de connaissances, conceptions, et orientations qui constitue la source de la compréhension des sujets qu'ils enseignent* » (traduction de Sensevy, 2007a, p.8).

Il précise que « *la généralisabilité n'est pas inhérente aux cas, mais réside dans l'appareil conceptuel de celui qui explique le cas. Un évènement peut être décrit ; un cas doit être expliqué, interprété, argumenté, disséqué, et réorganisé* » (traduction de Sensevy, 2007a, p.109).

Il s'agit d'un « *moyen de développer la compréhension stratégique, pour étendre les capacités vers le jugement professionnel et la prise de décision* » (traduction de Sensevy, 2007a, p.110).

L'étude de cas consiste à capturer les composantes des pratiques analysées par les PCK que possède un enseignant, ces 'Personal PCK' dont il s'agit de réaliser un portrait (Lehane, 2016). Cette tâche est décrite comment étant difficile à mener (« *it is complexity and difficult to capturing and portraying* » (Chordnork, 2014, p.421)), ce qui pose la question de la façon de les étudier.

Il s'agit généralement d'observer les enseignants au cours de leur enseignement et de coupler ces observations d'entretiens *ante* et *post* séances.

Deux outils sont de plus en plus employés : les CoRe (*Content Representations*) et les PaP-eRs (*Pedagogical and Professional-experience Repertoires*), proposés par Loughran (Eames, 2011 ; Park, 2012 ; Chordnork, 2014 ; Bertram, 2014 ; Lehane, 2016).

Pour un enseignant donné, à travers un CoRe, on vise à identifier ses *Personal PCK* et à identifier leur articulation en recherchant leurs connexions (Chordnork, 2014). Il s'agit d'**explicitier les liens entre le contenu du savoir, son enseignement et son apprentissage** (Eames, 2011). Un CoRe se construit en répondant à une série de questions fermées pour chaque concept à enseigner ('*Enduring idea*'), comme indiqué dans le tableau 1.1.5.1.

	Enduring idea 1	Enduring idea 2
What do you intend the students to learn about this idea?		
Why is it important for the students to know this?		
What else do you know about this idea that you do not intend students to know yet?		
What difficulties/limitations are connected with teaching this idea?		
What do you know about student thinking which influences teaching about this idea?		
Are there any other factors that influence your teaching of this idea?		
What teaching procedures would you use, and why, for this idea?		
How would you ascertain student understanding of, or confusion about, this idea?		

Tableau 1.1.5.1
Un exemple de tableau à remplir lors d'un CoRe

Un PaP-eR, outil complémentaire du CoRe, est un compte-rendu sous forme narrative d'une séquence d'enseignement, du point de vue de l'enseignant. L'enseignant raconte ce qu'il a fait et le justifie. Un PaP-eR n'est pas suffisant en soi pour identifier complètement les *Personal PCK* associés à un contenu donné mais l'obtention de plusieurs PaPeRs pourrait aider (Bertram, 2014). L'association d'un CoRe et de PaP-eRs est supposé représenter un « *solid, concrete portrayals of science teachers' PCK* » (Bertram, 2014, p.293).

1.2 Les PCK et l'arrière-plan des pratiques enseignantes : les convictions (ou 'beliefs')

Une fois présentées les catégorisations liées aux PCK, il s'agit d'expliquer les choix effectués par les enseignants quant au recours ou non à ces éléments. Lors de cette prise de décision, outre la maîtrise des connaissances disciplinaires et les impératifs institutionnels (programme ou syllabus imposés, contenus des examens ou concours nationaux eux aussi imposés...), interviennent également des convictions propres à chaque enseignant et relatives à des aspects pédagogiques mais aussi épistémiques (« *PCK involves the transformation of other types of knowledge* » (Abell, 2008a, p.1407).

Ces convictions conditionneraient fortement les pratiques enseignantes (« *beliefs emerged as one of the most influential components shaping the participants' PCK* » (Rice, 2017, p.208)). Elles impacteraient la manière dont l'enseignant utilise et organise le savoir à enseigner (Gess-Newsome, 1999).

Nous explicitons ici deux variantes de ces convictions, à savoir le concept anglophone de '*beliefs*' et le concept francophone de 'rapport au savoir'.

1.2.1 '*Beliefs*'

Dans la littérature anglo-saxonne, est fait référence aux appellations plutôt vagues de '*belief*', '*view*' ou '*attitudes (towards)*' (Lavonen, 2004 ; Van Driel, 2005 ; Van Dijk, 2007 ; Havdala, 2007 ; Henze, 2007 ; Karaman, 2016), tant pour les élèves (« *The prior knowledge and beliefs of the learners definitely play a significant role in their subsequent learning experiences* » (Karaman, 2016, p.170)), que pour les enseignants.

Un flou entoure encore ce concept de '*belief*' : « *Much research has been conducted into teachers' beliefs, although there seems to be no common use or definition of the concept of 'belief'* » (Lavonen, 2004, p.309). Les adjectifs associés à ce concept (à savoir 'subjectif' ou 'affectif' par exemple) aident à percevoir la coloration de ce concept qui se réfère aux éléments non cognitifs du savoir propre à chaque individu.

En français, '*belief*' se traduit par croyance mais aussi conviction, certitude, voire dogme. Cette appellation de '*belief*' est donc associée à un parti pris (pas toujours conscient) de l'enseignant dans ses décisions pédagogiques.

Shulman n'utilise pas l'appellation '*beliefs*' dans son article de 1987. Néanmoins, lors de son discours inaugural au sommet de 2012 sur les PCK, il évoque les aspects influençant la pratique enseignante qu'il avait négligés dans son article de 1987, à savoir la vision du monde de l'enseignant, l'importance de son état affectif et de ce qu'il juge important d'enseigner ainsi que sa capacité à impacter la motivation de ses élèves (Berry, 2015). En ce qui concerne la vision du monde, il ne s'agit pas là de connaissances à proprement parler mais plutôt d'éléments qualifiés de '*beliefs*'. Il y a également parmi les '*beliefs*' des éléments liés à la vision de l'enseignement et de l'apprentissage.

Nous avons déjà indiqué que Magnusson ajoute le terme '*belief*' à '*knowledge*' pour décrire les catégories caractérisant les connaissances de l'enseignant. En effet, les connaissances de l'enseignant n'ont pas toutes le même statut : certaines sont des connaissances, au sens de savoirs

incorporés, tandis que d'autres sont des opinions, c'est-à-dire des connaissances non étayées. Signalons par ailleurs que Cross indique que Magnusson propose 4 catégories de PCK tandis que Magnusson en fournit en fait 5. Celle non indiquée par Cross est '*Orientation to teaching science*', qui se réfère aux '*purposes and goals for teaching science at a particular grade level*' (Magnusson, 1999, p.97). Cross (2010, p.43) indique compléter le modèle de Magnusson : « *Nous ajoutons à cette composante un élément qui nous semble essentiel mais qui n'apparaît pas dans le modèle de Magnusson : l'épistémologie de l'enseignant. Nous entendons par là ses connaissances sur le fonctionnement des sciences* ». Nous ne souscrivons pas à ce point. En effet, il nous semble que l'épistémologie de l'enseignant, proposée par Cross, peut être vue comme un '*belief*' de Magnusson, dans la mesure où Cross indique que « *ce nouvel élément (...) va venir influencer directement les buts qu'accorde l'enseignant à l'enseignement des sciences et les valeurs d'un tel enseignement* » (*ibid.*, p.43). Se référant aux « *buts* » et aux « *valeurs* » de l'enseignement, l'épistémologie de l'enseignant de Cross nous semble présenter une intersection avec la cinquième catégorie de Magnusson (*orientations to teaching science*), du moins en partie, via les '*beliefs*'. La critique de Cross sur le modèle de Magnusson ne nous semble donc pas pertinente.

1.2.2 Rapport au savoir

En France, il est question de 'rapport au savoir' plutôt que de '*beliefs*'.

Le concept de rapport au savoir, introduit par Charlot (1997) en sciences de l'éducation, a été initialement importé en didactique des sciences pour comprendre les difficultés d'apprentissage des élèves dont l'origine est autre que cognitive (Lamine, 1999 ; Venturini, 2007 ; Venturini, 2007a ; Venturini, 2009).

Charlot (1997) voit dans le rapport au savoir un rapport au monde, à soi et aux autres. Il s'agit de prendre en compte la dimension socio-affective de l'apprentissage (Lamine, 1999).

C'est un processus dynamique, permettant à l'individu de produire de nouveaux savoirs à partir de ceux déjà acquis (*ibid.*). Il ne s'agit pas d'une caractéristique immuable d'un individu donné : pour Charlot, il s'agit d'éviter l'amalgame entre savoir et 'rapport au savoir'. Il n'y a pas différents types de savoir (abstrait, concret par exemple) mais différents types de rapport au savoir, dans la mesure où un rapport au savoir peut être modifié, un savoir non : « *un esprit 'concret' et 'pratique', cela ne se change pas, ou fort difficilement, alors qu'un rapport au savoir, cela se construit* » (Charlot, 1997, p.41). Dès lors, on peut tenter d'infléchir ce rapport au savoir dans le cadre d'une formation par exemple, même si cette perspective a ses limites (Estrela, 2005). La perception de la marge de manœuvre d'un enseignant vis-à-vis d'un élève en est donc profondément modifiée : c'est une opportunité, selon Charlot, pour construire un cours 'intéressant', à savoir « *un cours où se noue, en une forme spécifique, un rapport au monde, un rapport à soi et un rapport à l'autre* » (*ibid.*, p.48).

Depuis, ce concept de rapport au savoir est également mobilisé dans les recherches sur les enseignants (Calmettes, 2005a ; Lorillot, 2007 ; Mairone, 2007 ; Maulini, 2012). Il permet notamment d'étudier les convictions qui interviennent dans leurs choix pédagogiques (Caillot, 2003 ; Charlot, 2006 ; Bernard, 2014). Ces convictions dépendent de l'individu et concernent les conceptions de l'enseignement et de l'apprentissage et aussi les conceptions de ce qu'est la science. Ces convictions peuvent évoluer dans le temps et sont liées à la nature du savoir mis en jeu (Venturini, 2007a).

1.3 Les PCK et autres approches sur l'exemple des travaux de Robert et Rogalski sur les routines

En France, une approche autre que celle des PCK a été développée en didactique des mathématiques pour étudier les pratiques d'enseignants (Robert, 2002). Cette approche a été reprise ensuite dans certains travaux de didactique de la physique et de la chimie (équipe du LDAR à l'université Paris 7).

Robert et Rogalski emploient une approche équivalente à celle des PCK mais utilisent, non pas le terme de *categories*, mais celui de « *composantes des pratiques* » qui « *permettent d'approcher sous divers angles un système cohérent* » (Robert, 2002, p.518).

Elles abordent également les contraintes et marges de manœuvre des enseignants dans l'élaboration de leurs cours. Un élément important de leur interprétation est **l'influence des routines sur les choix des enseignants**. Ces routines relèveraient d'une recherche d'économie de la part des enseignants (Robert, 2002). A ma connaissance, la notion de routine n'est pas mise en avant dans la littérature anglo-saxonne sur les *Personal PCK* et sur les *Beliefs*.

Ces routines s'expliquent par des **contraintes sociales**, qui peuvent être **institutionnelles** (par exemple, les programmes) ou **locales** (par exemple, les habitudes de fonctionnement dans un établissement donné). A ces contraintes s'ajoutent une **composante personnelle** pour expliquer les routines éventuellement observées. Cette composante personnelle est liée notamment au vécu de l'enseignant et à sa vision de l'enseignement. Son rapport aux autres intervient également : « *outre les programmes (...) L'existence d'habitudes dans un métier, la nécessité d'apparaître légitime aux yeux de tous les acteurs impliqués, même les parents, une certaine obligation de conformité ont des conséquences non seulement sur les pratiques à un niveau global mais aussi sur les apprentissages. (...) Cette composante (...) est plus reliée à des contraintes qu'à des marges de manœuvre* » (*ibid.*, p.516).

1.4 L'expertise d'un enseignant

Analyser les PCK d'un enseignant permet de caractériser sa valeur ajoutée par rapport à un spécialiste du domaine scientifique à enseigner (Grossman, 1990). Cette valeur ajoutée est liée à l'efficacité des savoirs professionnels qu'il construit (Magnusson, 1999) : « *It does not matter how good a teacher's knowledge is, if he or she cannot use it to design and execute effective teaching* » (Bishop, 2007a, p.12).

Cette efficacité des savoirs qu'il construit impacte l'apprentissage des élèves, l'enseignant ayant un rôle de médiateur dans l'apprentissage de l'élève (Calmettes2014). Plusieurs enquêtes empiriques en lien avec les PCK indiquent ainsi que plus que la maîtrise du contenu disciplinaire (du *content knowledge* ou *subject matter knowledge*) par l'enseignant, c'est sa maîtrise des PCK

qui a un effet positif sur la motivation des étudiants et sur leur progression (Evens, 2015). La capacité à s'adapter aux profils de ses élèves est une des marques de cette efficacité : « *Effective teachers are aware of students' differing needs and can respond appropriately* ». (Grossman, 1990). Il s'agit notamment de prendre en compte les modes de raisonnement des élèves et leurs difficultés (Magnusson, 1999).

Le développement des PCK chez un enseignant dépend de plusieurs facteurs dont son vécu d'étudiant, qui pourrait le restreindre à reproduire les schémas pédagogiques qu'il a vécus. Intervient également sa maîtrise du contenu disciplinaire (« *the crucial role played by depth of understanding of content in the development of PCK* » (Rollnick, 2008, p.1375)).

Le développement des PCK dépend aussi de son vécu en tant qu'enseignant, les PCK s'améliorant fortement dans les premiers mois de la carrière.

Différents facteurs aident l'enseignant à mieux s'appropriier le curriculum, à développer une démarche réflexive sur ses pratiques : un travail collaboratif avec ses collègues et des cours dédiés aux PCK (Evens, 2015).

Par ailleurs, précisons que la progression dans la maîtrise par un enseignant d'une catégorie de PCK (connaissances sur les élèves ou sur le curriculum par exemple) n'implique pas pour autant une progression dans les autres catégories (Magnusson, 1999).

De plus, les écarts entre enseignants novices et enseignants confirmés concerneraient davantage l'organisation du savoir (classification des problèmes et stratégies de résolution structurées ou non), que les connaissances disciplinaires en soi (Ferguson Hessler, 1987).

Dans la littérature, on trouve la notion d'expertise, associée à la maîtrise des PCK (Garritz, 2014). Bishop (2007a, p.10) propose une distinction entre '*crystallized*' et '*fluid expertise*'. Une expertise 'cristallisée' est associée à un enseignant efficace uniquement dans des situations auxquelles il est habitué tandis qu'une expertise 'fluide' est associée à un enseignant réussissant à s'adapter à une situation inhabituelle, « *knowing what to do when you don't know what to do* » (*ibid.*, p.10).

Cette fluidité de l'enseignant expert qui s'adapte à une situation inhabituelle, évoquée par Bishop, peut être rapprochée de la capacité à connecter les catégories de PCK pour caractériser un enseignant expérimenté, signalée par Abell (2008a, p.1408) : « *Lee and Luft found that experienced teachers thought about both individual components and interactions among the components* ».

1.5 Quelques résultats sur les pratiques enseignantes et quelques propositions pour la formation des enseignants

Des résultats sur les convictions (ou 'beliefs')

Alors que les convictions des enseignants sont souvent pointées comme étant la principale raison

de la non-application par les enseignants des réformes curriculaires (Lavonen, 2004), elles ne sont généralement pas prises en compte lors de ces réformes. Il apparaît donc important d'analyser ces convictions (Kirschner, 2016).

A ce propos, Van Driel (2005) indique il y a dix ans environ qu'il y a peu de résultats sur les convictions des enseignants liées au contenu et sur leurs liens avec des convictions plus générales sur l'éducation. Lors d'une étude sur les convictions de professeurs de chimie du secondaire aux Pays-Bas, il note des écarts non significatifs entre les enseignants expérimentés interrogés (plus de 15 ans d'ancienneté) et ceux débutant (moins de 5 ans d'ancienneté) (*ibid.*).

Calmettes compare lui aussi les convictions d'enseignants stagiaires et d'enseignants confirmés. Il aborde 3 dimensions de leurs représentations professionnelles, pédagogiques, contextuelles et liées à leur 'idéal' professionnel. Les résultats d'une enquête ministérielle sur les enseignants du second degré sont signalés : il y est indiqué que la physique serait perçue par les enseignants de physique comme étant une discipline ouverte sur le monde, l'environnement et le quotidien. De plus, la physique permettrait de développer d'une part des valeurs comme la rigueur et l'esprit critique, d'autre part des méthodes spécifiques liées à l'articulation entre la théorie et le concret et s'appuyant sur le recours à l'expérimental.

Lorillot (2007) aborde les convictions sous l'angle de la discipline de rattachement. Elle interroge des enseignants d'arts appliqués et des enseignants de physique en série technologique, au lycée. Les enseignants de physique attribuent une double fonction à l'enseignement des sciences : universelle (acquisition de connaissances) et intellectuelle (manière particulière de penser). Les enseignants d'arts appliqués interrogés présentent une plus grande variété de types de rapport au savoir que les enseignants de physique : culturel, professionnel, disciplinaire et cognitif pour les premiers, uniquement culturel et cognitif pour les seconds.

Des résultats sur la prise en compte des élèves par les enseignants dans leurs pratiques

L'absence de prise en compte des difficultés des élèves par les enseignants du secondaire et du supérieur apparaît dans plusieurs enquêtes (Van Driel, 2002 ; Van Dijk, 2007 ; Lebrun et de Hosson, 2017).

Plus récemment, Kermen (2008), lors d'une enquête auprès de 15 enseignants en lien avec le programme de chimie de terminale S, constate qu'autant les enseignants interrogés sont nombreux à mentionner les points du programme pouvant poser problème, autant ils sont peu nombreux à reconnaître les erreurs détectées chez les élèves associées à ces points du programme.

Kermen propose alors comme aide aux enseignants l'explicitation dans les programmes des objectifs, des points de vue sur l'apprentissage et des idées communes présentes chez les élèves : on constate ainsi que les propositions formulées dans le cadre des PCK dans les années 1990 apparaissent comme étant encore d'actualité.

Des propositions pour la formation des enseignants

L'approche retenue dans la formation des enseignants dans les années 1970 aurait davantage

reposé sur l'intuition et la répétition des pratiques déjà existantes que sur une démarche analytique et explicite fondée sur des principes pédagogiques (Grossman, 1990). Par ailleurs, une étude de Katz et Raths des années 1980 met en avant la sensation chez les enseignants interrogés qu'une réussite professionnelle en tant qu'enseignant serait due davantage à des qualités personnelles qu'à la formation méthodologique universitaire reçue (Grossman, 1990).

Face à de tels constats, introduire une réflexion sur les PCK dans la formation des enseignants serait utile : « *La question des connaissances nécessaires pour enseigner un contenu de savoir est cruciale lorsqu'il s'agit de former des enseignants et de comprendre le lien entre ce qu'ils savent et leur agir en classe* » (Cross, 2010, p.39). Le modèle de composantes des PCK formulé par Magnusson (1999) aboutit à suggérer d'inclure dans la formation des enseignants des éléments en lien avec les buts de l'enseignement des sciences, des stratégies propres à l'enseignement des sciences, des modules centrés sur l'analyse de ce que les élèves comprennent d'un enseignement scientifique et sur l'élaboration d'évaluations associées.

Par ailleurs, la réalisation de CoRe par des enseignants novices les aiderait à développer leurs PCK (Bertram, 2014). Participer au processus d'élaboration de CoRe, en collaboration avec des experts du contenu à enseigner et des experts en pédagogie, leur permettrait de saisir les idées fondamentales des sujets à aborder en séquence d'enseignement et d'accéder au savoir des experts (Eames, 2011). Le travail collaboratif est aussi mis en avant lors de « *la conception collective de leçon [entre enseignants qui] permet de mieux prendre en compte les difficultés des élèves en démultipliant les expériences des enseignants* » (Cross, 2014, p.102).

Conclusion

Dans le modèle de Gess-Newsome, la catégorisation proposée met en avant les *Topic-Specific Professional Knowledge* (TSPK), qui aident à décrire ce qu'un enseignant est sensé savoir. Il s'agit d'éléments-clés, susceptibles de servir de référence pour la formation d'enseignants, tandis que les *Personal PCK* sont des connaissances propres à chaque individu, auxquelles on peut tenter d'accéder via les CoRe et les PaP-eRs par exemple.

Les pratiques enseignantes sont conditionnées par des convictions (*'Beliefs'*) et sont fondées en partie sur des routines. Ces convictions de l'enseignant, figurant dans les *'Amplifiers & Filters'*, jouent un rôle important dans les interactions entre les TSPK et les *Personal PCK*.

La variété de catégories de PCK maîtrisées par l'enseignant et la richesse des interactions entre ces catégories qu'il construit contribuent à caractériser son expertise, qu'il apparait utile de développer en formation initiale et continue.

Dans ce travail de thèse, nous couplons les PCK à un autre courant de recherche, celui sur la NOS (*'Nature of Science'*), que nous présentons dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 NOS

Nous abordons ici des aspects généraux liés au champ de recherche qui s'intéresse à la dimension épistémologique de l'enseignement des sciences, celui désigné par l'acronyme NOS dans les pays anglo-saxons (*Nature of Science*). Ce n'est qu'au chapitre suivant que nous nous intéressons plus en détail aux modèles et à la modélisation, thème central de ce travail de thèse.

Ce courant de recherche a été initié aux États-Unis dans les années 1950 et s'y est développé ensuite, grâce notamment aux travaux de Lederman (Lederman, 1992). La communauté nord-américaine des chercheurs en sciences de l'éducation s'y est fortement impliquée, comme l'atteste la quantité d'articles associés. Une revue y est quasiment dédiée (*Science & Education*). Ce courant a également diffusé hors des États-Unis : nous allons évoquer par exemple les travaux du Canadien Allchin, du Turc Irzik et du Néo-Zélandais Nola.

Il apparaît pertinent de s'intéresser à l'enseignement de la NOS, dans la mesure où l'image des sciences impacte notamment les choix d'orientations des élèves. En effet, une image de la science et des scientifiques peu flatteuse, une image ambivalente de la science, à la fois source de progrès et d'inquiétude ainsi qu'une image peu enthousiasmante de l'enseignement scolaire de ces disciplines avec des programmes inadaptés et une démarche pédagogique plus orientée vers la sélection que vers la formation à la pratique scientifique figurent parmi les causes mises en avant pour justifier la désaffection des jeunes pour les cursus scientifiques, en France et dans d'autres pays occidentaux (Van Driel, 2005 ; Hodson, 2008 ; Musset, 2009).

Driver propose en 1996 cinq raisons pour justifier le fait de s'intéresser à la dimension épistémologique de l'enseignement des sciences : les connaissances en ce domaine présentent un aspect utilitaire (comprendre la NOS est nécessaire pour donner du sens à la science), démocratique (comprendre la NOS est nécessaire pour se positionner lors de controverses socio-scientifiques), culturel (comprendre la NOS est nécessaire pour percevoir la science comme étant un élément de la culture contemporaine), moral (comprendre la NOS aide à saisir les normes de la communauté scientifique dont certaines sont utiles plus largement dans la société) et sont une aide pour apprendre les sciences (comprendre la NOS facilite la compréhension du savoir scientifique disciplinaire). Ces enjeux, rappelés dans Abell (2007), font consensus au sein de la communauté de recherche sur la NOS.

Elaborer une preuve scientifique et évaluer sa solidité, comprendre la nature du savoir scientifique et comment il se développe, suivre une démarche scientifique et construire un discours adapté font partie des compétences liées à des connaissances épistémologiques qui seraient à développer chez l'élève (Duschl, 2013). Maîtriser les connaissances épistémologiques nécessaires à la conduite de travaux expérimentaux a été également soulignée (Séré, 1997 ; Ryder, 2000 ; Lavonen, 2004 ; Havdala, 2007).

Nous présentons le courant de recherche sur la NOS et en rappelons quelques caractéristiques générales. Puis, à travers des résumés d'articles et d'ouvrages, issus principalement des travaux de cinq chercheurs (Lederman, Irzik et Nola, Allchin et Duschl), nous nous proposons d'évoquer les principales questions débattues dans ce courant de recherche et les positions soutenues. Nous abordons enfin des interactions possibles entre un questionnement sur les PCK et sur la NOS.

2.1 Présentation

2.1.1 Une définition de la NOS

Un des intérêts de ce champ de recherche est de s'intéresser à ce qui caractérise les sciences, à ce qui les distingue d'autres disciplines, comme l'histoire par exemple. Sont notamment abordées les caractéristiques du savoir scientifique qui sont intrinsèquement liées à la manière dont le savoir scientifique est construit (Abell, 2007) ainsi que les institutions et les pratiques sociales associées (Van Dijk, 2014).

Lederman signale qu'il n'y a pas d'accord sur une définition unique de la science au sein de la communauté de recherche qui réfléchit sur les sciences (philosophes, historiens, sociologues, etc...). De même, il n'y a pas de définition unique de la NOS au sein de la communauté qui s'intéresse à la dimension épistémologique de l'enseignement. Bell (2008, p.1) évoque la NOS comme étant « *a multifaceted concept* »: les sciences sont tantôt vues comme un ensemble de savoirs, tantôt comme une « méthode » à suivre, tantôt comme une attitude de l'esprit à adopter.

Cependant, Lederman défend l'idée qu'il est possible de trouver un consensus sur ce qu'est la science à des fins d'enseignement, qu'il présente en ces termes : « *NOS typically refers to the epistemology of science, science as a way of knowing, or the values and beliefs inherent to scientific knowledge and its development* » (Abell, 2007, p.833).

Signalons par ailleurs que Lederman insiste sur la distinction entre la recherche sur la NOS et la recherche sur l'enquête scientifique. Elles sont certes liées, mais elles ont été initialement confondues. Lederman estime que la confusion aurait pu être évitée en définissant la NOS par 'nature du savoir scientifique' et non par 'nature de la science'. Précisons que la NOS se réfère aux caractéristiques du savoir scientifique et aux fondements épistémologiques de l'activité scientifique tandis que l'enquête scientifique se réfère aux activités des scientifiques (rassembler des données, les analyser et construire des conclusions). A ce propos, Duschl constate qu'en un siècle, l'évolution des techniques a induit une évolution de ce qu'est l'enquête scientifique. Les scientifiques ne font pas qu'observer les phénomènes : souvent, ils les produisent. Nouveaux outils, nouvelles technologies, nouveaux modèles explicatifs induisent de nouvelles méthodologies. Pour Duschl, la part la plus importante du travail du scientifique semble être désormais de concilier développement théorique et anomalies observées dans les données.

2.1.2 Historique

Le courant de recherche sur la NOS émerge aux Etats-Unis suite à la fondation de la *National Science Foundation* (NSF), en charge des curricula (mathématiques et sciences) et au *G. I. Bill* (Duschl, 2013). A la sortie de la guerre, de nombreux vétérans sont envoyés à l'université. Cet afflux soudain d'étudiants nécessite de repenser les modes d'enseignement. Conant, le président de l'époque de l'université d'Harvard, est force de proposition à cette occasion. Il suggère de centrer l'éducation en sciences des G. I. sur l'étude de cas historiques (loi de Boyle, lois de Newton), qui sont depuis référencés comme étant les *Harvard Case Studies*.

C'est à la fin des années 1950 qu'un test pour évaluer la NOS est construit : *Test On Understanding Science* (TOUS). Il s'agit d'un QCM de 60 questions autour de trois thèmes : les scientifiques, la démarche scientifique, les méthodes et buts de la science (Duschl, 2013). L'enquête la plus ancienne à laquelle Lederman se réfère lorsqu'il présente un état des lieux de la conception de la NOS des enseignants est celle de Miller de 1963 (Abell, 2007).

Le champ de recherche sur la NOS est influencé par les recherches sur l'apprentissage, qui visent notamment à développer les liens de coordination entre les pratiques cognitives, épistémiques et sociales qui leur sont associées (Duschl, 2013).

De 1950 à 1980, parmi les influences majeures figurent celles de Piaget et de Vygotsky, qui aboutissent au courant du socio-constructivisme et du courant dit du changement conceptuel (l'élève ne serait pas un réservoir vide que l'enseignant remplit de connaissances. Les élèves arrivent en cours avec des préconceptions dont l'enseignant devrait tenir compte).

Le champ de recherche sur la NOS est également influencé par les recherches en lien avec la philosophie et l'histoire des sciences. Là aussi trois influences majeures sont à noter (Duschl, 2013) : le modèle hypothético-déductif, les études en histoire des sciences sur le développement des théories (contribution de Kuhn) et le point de vue sur les dynamiques cognitive et sociale agissant au sein des communautés de chercheurs (contribution de Latour notamment).

Ce champ de recherche, présent aux États-Unis, se développe parallèlement dans d'autres pays occidentaux (Allchin, Laroche et Désautels au Canada, Driver en Grande-Bretagne, Maurines en France par exemple). Les résultats diffusent plus ou moins rapidement dans les documents institutionnels relatifs à l'enseignement des sciences. Ainsi, depuis une trentaine d'années environ, la NOS apparaît dans les standards élaborés par la NSF.

2.2 Caractérisations de la NOS à des fins d'enseignement

Nous présentons la contribution de Lederman qui défend l'idée de n'enseigner de la NOS que ce qui fait l'objet de consensus, puis nous évoquons les contributions d'Irzik et Nola, d'Allchin et de Duschl, dont les travaux complètent ceux de Lederman. Il y a en effet des débats sur la manière d'enseigner la NOS et sur le contenu de cet enseignement. Une évolution des approches et des accents différents apparaît d'un chercheur à l'autre : par exemple Allchin met l'accent sur l'aspect social de la construction du savoir et Duschl évoque également l'importance de la modélisation pour comprendre la construction du savoir scientifique.

2.2.1 N'enseigner de la NOS que ce qui fait l'objet de consensus : position défendue par Lederman

Lederman propose une liste d'objectifs d'enseignement en lien avec la NOS qui doivent faire l'objet d'un enseignement explicite aux lycéens et aux étudiants de premier cycle universitaire. Il

s'agirait de n'enseigner que **les caractéristiques du savoir scientifique** pour lesquels il existe un consensus parmi les différents experts (**point de vue dit 'consensuel'**).

Lederman s'intéresse à la science et non aux sciences. La science serait à présenter comme étant **une activité caractérisée par sept éléments ('seven tenets')** : la science est empirique, fondée mais provisoire (un même résultat expérimental peut être interprété différemment selon l'état des connaissances au moment où on l'étudie), en partie le fruit de l'imagination de l'homme, fondée sur des théories, subjective (au sens où ce qui est étudié dépend d'un ancrage théorique qu'il est impossible d'éliminer), influencée par le contexte socio-culturel (les thématiques de recherche dépendent des modèles en vigueur à une époque donnée. La science est un produit de la culture d'une époque donnée) et il n'existe pas une unique méthode scientifique fournissant un savoir certain.

Lederman met en place **un questionnaire sur la NOS, les 'Views of NOS' (VNOS)**, constitué de plusieurs items posant des questions décontextualisées sur ce que serait la science (par exemple : 'y a-t-il une différence entre une connaissance scientifique et une opinion ? Donner un exemple pour illustrer votre réponse'). Ce test papier-crayon est posé à des étudiants, des enseignants et des chercheurs.

Le groupe de Lederman travaille également sur **l'élaboration des savoirs scientifiques**, en particulier sur **la démarche scientifique** (Lederman, 2014). Huit aspects de cette démarche sont mis en avant : toute démarche expérimentale débute par une question, il n'y a pas qu'une méthode scientifique, les démarches d'investigation mises en place sont guidées par la question posée, tous les scientifiques exécutant une même procédure n'obtiennent pas nécessairement les mêmes résultats, les démarches d'investigation peuvent influencer les résultats obtenus, les conclusions formulées suite à une recherche doivent être compatibles avec les données collectées, données scientifiques et preuve scientifique ne sont pas synonymes, les explications sont développées à partir d'une combinaison des données collectées et de ce qui est déjà connu sur le thème étudié.

Lederman met en place, là encore, des questionnaires, les **'Views of Science Inquiry' (VOSI)**, puis les **'Views about Science Inquiry' (VASI)**. Les VOSI sont des tests papier-crayon constitués initialement de 5 questions ouvertes qui sont reformulées et complétées dans les VASI pour aborder l'ensemble des aspects caractérisant la démarche scientifique.

2.2.2 Contestations de cette position

Les travaux de Lederman ont consisté en une recherche d'un consensus sur ce qui est à enseigner en lien avec la NOS. Ses travaux ont été très repris, contestés par la communauté des didacticiens. Allchin, par exemple, estime que les principales propositions de Lederman ne sont pas les plus adaptées (Allchin, 2011a), d'une part pour des raisons épistémologiques et d'autre part pour des raisons de méthodologie de recherche, que nous évoquons successivement dans ce paragraphe.

Remise en cause épistémologique du travail de Lederman

Irzik et Nola (2010) estiment que l'approche de Lederman ne permet pas de **caractériser les spécificités disciplinaires**. En effet, dans l'analyse de Lederman de 2007 il ne serait pas fait mention de la diversité des buts et des règles méthodologiques en science. C'est pour Irzik et

Nola une vision trop étroite et monolithique de la science. Ils soulignent par exemple que le raisonnement hypothético-déductif n'est pas la seule démarche de raisonnement retenue en science, les démarches statistiques étant employées par exemple en biologie et en médecine, ce que Lederman n'aborde pas. Il y aurait à chercher en quoi les différentes disciplines sont ou non semblables : les chercheurs parlent de « *family resemblance* » (Irzik et Nola, 2010, p.10).

Irzik et Nola caractérisent une discipline scientifique à l'aide de quatre catégories ouvertes, une telle décomposition ayant été complétée depuis (Erduran et Dagher, 2014) : activité, buts et valeurs (prévoir et fournir des explications), méthodologie et règles de méthodologie, ainsi que produits (les produits peuvent être des hypothèses, des lois ou des données expérimentales par exemple). Penser la méthodologie retenue dans une communauté de recherche permettrait de saisir comment la science réussit à s'auto-corriger, comment le processus subjectif de critique assure l'obtention de résultats scientifiques objectifs.

Irzik et Nola (2010) ainsi que Duschl (2013) évoquent l'omission par Lederman de **l'importance de dynamiques** cognitives, épistémiques et sociales dans le développement du savoir scientifique. L'activité scientifique apparaîtrait figée dans la version consensuelle de Lederman (Irzik et Nola, 2010).

Duschl insiste aussi sur l'importance des représentations visuelles, des mécanismes d'échange du savoir et des interactions entre pairs dans l'amélioration des connaissances. Ce dernier point, déjà présent dans les recommandations de Lederman, traduit **l'aspect social de la construction du savoir**.

Duschl (2013) signale également l'omission par Lederman de **la place de la critique et des pratiques de communication** dans le discours et les pratiques scientifiques.

Allchin (2014 ; 2012a) pointe que **la notion de crédibilité** est absente des critères retenus par Lederman, alors qu'elle **est importante dans le débat scientifique**.

De plus, Duschl (2013) insiste sur **l'importance des modèles et de la modélisation pour comprendre la construction du savoir scientifique** ce qui n'apparaît pas dans les travaux de Lederman. Les modèles sont vus comme des outils cognitifs, situés entre théories et expériences.

Il s'agirait donc de mettre en avant le rôle des modèles et de la construction des données dans les pratiques scientifiques de développement d'une théorie, de considérer la communauté scientifique comme un élément essentiel des pratiques scientifiques (ce qui incite à mettre en avant les pratiques de représentation et d'argumentation), ainsi que d'inclure les pratiques cognitives scientifiques dans un système incluant les instruments et les formes de représentation.

Remise en cause méthodologique du travail de Lederman

Pour Allchin (2011a), les questionnaires employés par Lederman (les 'VNOS') ne sont pas suffisants comme outil de recherche en didactique. Le **manque de référence au contexte** lui semble être un problème important, la réponse d'un étudiant pouvant dépendre du contexte proposé.

Par ailleurs, les VNOS ne donnent pas accès à la complexité d'un problème donné. Dans la taxonomie de Bloom, les VNOS correspondraient aux niveaux 1 ou 2 (se souvenir et comprendre) et non aux niveaux 3 à 5 (appliquer, analyser, évaluer), comme annoncé par

Lederman. Il s'agit pour Allchin de **viser une compréhension fonctionnelle** et non pas seulement déclarative de la NOS, autrement dit il s'agit de viser la capacité des élèves et étudiants à mobiliser les connaissances sur la NoS dans un contexte donné.

2.3 Enseigner la NOS

2.3.1 Conceptions des élèves sur la NOS : un préalable à connaître pour définir des objectifs d'enseignement sur la NOS

Des conceptions sur la NOS éloignées de celles de l'épistémologie contemporaine

Dans les années 1960, aux États-Unis et ailleurs (Lederman cite par exemple une étude en Australie), les chercheurs constatent des conceptions inadaptées de la NOS chez les étudiants (Abell, 2007).

Des tests ont été menés auprès de lycéens et d'étudiants de premier cycle universitaire dans les décennies suivantes sur leur compréhension de la logique de la démarche par hypothèses. Est constaté une croyance que les théories scientifiques ont un statut hypothétique, que ces hypothèses peuvent être testées et prouvées par vérification et acquérir ainsi le statut de loi, entendu au sens de loi de la nature, que la connaissance scientifique est absolue.

Parmi les points de compréhension à améliorer figurent le rôle de la créativité en science, la fonction des modèles scientifiques, le rôle des théories et leurs relations avec la recherche, la distinction entre hypothèses, lois et théories, les relations entre expérimentation, modèles, théories et vérité 'absolue', le fait que la science ne concerne pas que la récolte et la classification de faits et enfin ce qui constitue une explication en sciences et les interrelations et interdépendances entre branches des sciences.

Des similitudes dans les conceptions sur la NOS observées dans des contextes scolaires variés

Les résultats précédents seraient sensiblement les mêmes lors d'enquêtes menées à des époques différentes. De plus, dans les pays occidentaux, quelle que soit la culture, on observerait des points de vue similaires.

Par ailleurs, qu'il s'agisse de lycéens ou d'étudiants de premier cycle universitaire, leur conception des sciences serait en partie semblable : ils ne percevraient pas l'aspect subjectif des sciences et la créativité nécessaire qui leur est associée, leur dimension sociale.

Les sciences seraient perçues par les élèves comme étant une juxtaposition de thématiques (Astolfi, 1992).

Plusieurs niveaux de compréhension de la NOS par les étudiants

Parallèlement aux similitudes précédentes, des différences sont mises en avant.

Ainsi, là où les élèves issus de milieux favorisés saisissent qu'il s'agit de comprendre et d'interroger le monde qui nous entoure, ceux issus de milieux défavorisés assimileraient l'activité scientifique à « faire » et « non comprendre » (citation de Cohen-Azria dans Calmettes, 2014, p.213).

Par ailleurs, Duschl (2013, p.2128) se réfère à Carol Smith qui proposent 3 niveaux de compréhension de la NOS pour interpréter les résultats obtenus au cours d'une enquête réalisée auprès d'étudiants: « *Students at Level 1 (Knowledge unproblematic epistemology) view scientific knowledge as a collection of true beliefs about how to do something correctly or as basic facts. Scientific knowledge accumulates piecemeal through telling and observation which is certain and true.*

At Level 2, science knowledge is seen as a set of tested ideas. Notions of explanation and testing hypotheses appear at this level. Here students view science as figuring out how and why things work and absolute knowledge comes about through diligence and effort. Level 2 is the transition between the epistemologies.

At Level 3 (Knowledge problematic epistemology) scientific knowledge consists of well-tested theories that are used to explain and predict natural events ».

2.3.2 Conceptions et pratiques des enseignants sur la NOS

Les conceptions des enseignants sur la science seraient analogues à un patchwork (Pélissier, 2007). Les enseignants passeraient de l'empirisme « *quant au statut des connaissances, qui leur confère une supériorité par rapport aux autres formes de connaissances* » (*ibid.*, p.1), au réalisme pour le rapport aux objets dont traitent les concepts, au positivisme pour l'existence d'une démarche standard et anhistorique pour en assurer la validité, et à l'induction pour le processus d'élaboration.

Des conceptions erronées sur la NOS, observée chez des élèves, le sont également chez des enseignants du secondaire (Abell, 2007) ou universitaires (Khoury, 2014) : par exemple, plus de 50% des 1000 enseignants de science et 20% des 300 chercheurs en science interrogés pensent qu'une découverte scientifique n'est pas liée à une hypothèse (Lederman, 1992).

Lors d'une enquête auprès de lycéens et d'enseignants américains signalée par Lederman (1992), il est constaté qu'une proportion non négligeable de lycéens aurait une meilleure compréhension de la démarche scientifique que leurs propres enseignants. Lederman estime qu'un certain nombre d'enseignants ne comprennent pas suffisamment la démarche scientifique pour pouvoir l'enseigner. Le **même constat** est réalisé **chez des enseignants universitaires et chez des enseignants du secondaire ayant eu un cursus proche** : de telles conceptions erronées ne seraient donc pas dues qu'aux programmes des cursus de formation propres aux enseignants du secondaire.

Il est constaté que « *les futurs enseignants hésiteraient à remettre en question la « Science » perçue tout au long de leurs études comme objective, neutre, méthodique, prouvée* » (Guilbert, 1993, p.23). L'idée que les théories sont découplées des résultats expérimentaux serait également très prégnante (Abell, 2007). Lors d'une étude où des enseignants de science sont interrogés sur les représentations qu'ils utilisent en cours, 25% des réponses proposées par ces enseignants seraient en fait scientifiquement inexactes (Magnusson, 1999).

L'apprentissage des savoirs est mené dans les cours de physique traditionnels mais la réflexion sur la construction des savoirs le serait moins (Van Driel, 2002 ; Karaman, 2016) : la transmission aux élèves des notions épistémologiques ne serait pas un objectif essentiel (Lederman, 1992 ; Pélissier, 2007). Ainsi, sur les quatre enseignants stagiaires interviewés par Pélissier, les conceptions sur la nature de la science diffèrent d'un enseignant à l'autre mais les idées véhiculées à travers leur enseignement sont à peu près identiques : « *Selon eux, la transmission implicite de notions épistémologiques à travers l'enseignement de savoirs classiques est occultée par la nécessité de transmettre des contenus et des savoir-faire relatifs à ces contenus. En raison de la priorité donnée à la gestion de la classe et le respect de la progression chez des enseignants débutants, la transmission des notions épistémologiques n'est pas un objectif essentiel, d'autant plus que ce savoir constitue une difficulté supplémentaire en raison de son caractère implicite et par l'instabilité des connaissances des enseignants débutants en la matière* » (Pélissier, 2007, p.10).

Même les enseignants pour lesquels la dimension de la construction des savoirs est importante ne la prendraient pas en compte dans leurs pratiques.

Enfin, les exemples proposés par les enseignants pour illustrer en entretien leur pensée à propos de la notion d'hypothèse, d'observation et d'expérience seraient issus de **situations d'enseignement et non de recherche** (*ibid.*). Le contexte de la classe serait important par rapport aux conceptions de l'enseignant et ces conceptions impacteraient leur compréhension de ce qu'est une pédagogie appropriée (*ibid.*).

2.3.3 Pistes pour enseigner la NOS issues de la littérature de recherche

Deux approches en débat : explicite ou implicite

Certains chercheurs, dont Lederman, recommandent un enseignement explicite de la NOS : les caractéristiques de la science, les 'seven tenets', auraient à être travaillées en tant qu'objet d'apprentissage lors de séquences d'enseignement dédiées. Il y aurait à privilégier un questionnement chez l'élève sur la NOS plutôt qu'un énoncé d'une liste de principes sur la NOS. On retrouve également ce point de vue dans les articles de Clough qui constate que « *for the students the tenets become something to know rather than understand (...) something to be transmitted rather than investigated in a science classroom* » (Clough, 2007, p.33).

Pour d'autres, il s'agirait d'incorporer ces notions à transmettre lors d'activités dont la finalité première n'est pas que l'enseignement de la NOS. Duschl, par exemple, insiste sur le fait que sciences et enseignement des sciences sont des pratiques sociales. Un acte scientifique nécessiterait une somme d'actions sociales et cognitives. Il s'agirait de faire découvrir les concepts et les valeurs de la science lors d'une pratique de l'élève, d'**insérer la réflexion sur la NOS dans les séances de cours** (Bell, 2011) : en ce sens il s'agirait d'une **démarche qualifiée d'implicite**.

Allchin recommande de ne pas imposer à l'élève une définition arbitraire de ce qu'est la science. Il ne s'agirait pas de détailler ce que signifie le mot 'théorie' mais de réussir à évaluer l'opérationnalité d'une argumentation. Allchin (2011a ; 2012a ; 2014) conseille de problématiser

une séquence avec NOS, dans une démarche constructiviste, et non de proposer une séquence 'clé-en-main'. Il suggère de pousser les élèves à adopter un point de vue particulier lors d'un débat scénarisé (adopter un genre, un statut social...).

Cet aspect implicite / explicite fait l'objet de débats au sein de la communauté de recherche sur la NOS (Seker, 2005). Il semble cependant qu'un enseignement explicite serait plus efficace qu'un enseignement implicite ne contenant pas de moments réflexifs sur la NOS (Abd-el-khalick, 2013).

Objectifs d'enseignement et méthodes d'évaluation

Duschl (2013) suggère 4 thèmes épistémologiques pour améliorer l'apprentissage des sciences : comprendre que **le savoir scientifique résulte d'une construction** (ce qui renforcerait les interactions entre théorie et preuve), reconnaître la variété des méthodes scientifiques, reconnaître également la variété des formes de savoir scientifique quant à leur pouvoir prédictif et explicatif, enfin, prendre conscience que le savoir scientifique peut varier en degré de certitude (ce qui inciterait les élèves à proposer des idées et à les critiquer de manière argumentée).

La **capacité à argumenter et à communiquer**, mise en avant par Duschl, est également valorisée par Allchin (2012a ; 2014), sa réflexion étant centrée sur les liens entre sciences et société. Ses objectifs sont de rendre l'élève capable d'authentifier la crédibilité d'un discours ('Que croire ?', 'Qui croire ?'), d'apprendre sur la nature de l'expertise scientifique (compte tenu de la place des experts scientifiques dans les sociétés modernes), de faire de l'élève un critique de science et un citoyen bien informé et responsable.

Pour y parvenir, Allchin considère que les questionnaires employés par Lederman, **les VNOS, seraient un outil dépassé pour évaluer une séquence d'enseignement**. Mieux vaudrait tester le degré de compréhension de l'élève sur le poids respectif des facteurs influençant le discours scientifique plutôt que d'avoir la réponse à une question donnée (du type 'oui ou non' par rapport à tel ou tel point des VNOS). Le test papier-crayon serait à proscrire pour évaluer en cours la vision de la NOS des élèves : il y aurait à construire des outils utiles pour la pratique de l'enseignant en classe. Allchin encourage à se concentrer sur des concepts particuliers, à ne pas en rester à des généralités. Il cherche à basculer de 'Comment enseigner la NOS ?' à 'Comment améliorer l'utilisation de la NOS par les enseignants ?'.

Trois types de situations d'enseignement

Dans la lignée de Lederman (Abell, 2008), Allchin suggère 3 types de situations pour aborder la NOS en séquence d'enseignement : recourir à un cas historique, à un cas contemporain ou à des activités d'investigation (Allchin, 2012a ; Allchin, 2014). Concernant les cas historique ou contemporain, il s'agit d'y étudier en profondeur ce qu'est la science et de ne pas se limiter au cas d'une anecdote.

Recourir à un cas historique

Réutiliser du matériel historique serait un outil efficace pour mieux appréhender la NOS (Abell, 2007). L'approche historique est encouragée, dans la mesure où elle permet de révéler l'existence

d'avis divers au sein d'une communauté et l'influence socio-économique sur le choix des théories, la résistance au changement d'anciens concepts et la mauvaise transcription des théories par des phrases formelles statiques. Les théories sont souvent développées dans le temps, par une communauté de chercheurs, en réponse à des preuves les confirmant ou les infirmant (Duschl, 2013). Recourir à un cas historique éclaire également les problèmes présents, la nature des profonds changements conceptuels, l'aspect provisoire du savoir scientifique, les erreurs et incertitudes des scientifiques, le contexte culturel et les biais possibles lors de l'élaboration d'une théorie scientifique (présupposés fondant l'interprétation des données par exemple) (Allchin, 2011a).

Partant de principes généraux, il s'agit de construire des pratiques particulières, sélectionnées, qui influent sur le contenu, l'environnement d'apprentissage et les objectifs de l'apprentissage (Duschl, 2013).

Recourir à un cas historique nécessite de rendre le cas abordé 'présent', ce qui permet d'accéder à de la 'science en train de se faire' (il s'agit alors d'étudier un cas dont l'élève ne connaît pas le dénouement), d'étudier un problème ouvert non reconstruit (Allchin, 2011a), de mettre en évidence qu'en termes de changement de schémas conceptuels, les résultats expérimentaux aboutissent à mener de nouvelles expériences (Duschl, 2013). Respecter le contexte historique est central dans cette démarche (Allchin, 2011a).

Recourir à un cas historique permet aussi d'avoir du recul par rapport au phénomène étudié et de développer sa vision de la science. Cela nécessite d'étudier un cas réel, de ne pas trop axer la séance sur l'aspect historique pour éviter de dévaluer l'élève s'il a peu de connaissances historiques, de ne pas se contenter d'observer ou de commenter des cas historiques, et de tenir cas des conditions pratiques de la séquence et d'explicitier la réflexion menée.

Les éléments de la NOS les mieux mis en évidence par une telle approche seraient le changement de théorie et l'aspect provisoire et faillible des sciences. L'atout d'une telle démarche est de montrer les facteurs auxiliaires nécessaires à la validation d'une théorie et le fait que son élaboration n'est pas due uniquement à des 'génies' ou des 'héros'.

Cela nécessite de fournir à l'élève des clés de lecture, sans quoi ses idées préconçues peuvent être renforcées par ce type d'activité, comme par exemple croire que la science 'd'autrefois' est intrinsèquement erronée (Allchin, 2014).

Une telle démarche ne suffit pas néanmoins à remettre en cause les présupposés des élèves assimilant la science à un « *heureux empirisme* ». Parmi les autres points négatifs associés au recours à un cas historique figurent le manque d'outils pour quantifier l'apport d'une telle séquence et l'écart entre une activité contextualisée et des instruments trop abstraits et généraux (Allchin, 2011a).

Recourir à un cas contemporain

Pour Allchin, la priorité de la NOS n'est pas d'énoncer comme une généralité que la science est influencée par le milieu socio-culturel mais plutôt de discerner comment s'exprime cette influence sur un cas donné.

L'intérêt pour les élèves de recourir à un cas contemporain serait la facilité de les motiver sur une telle situation (Allchin, 2011a). Ils pourraient y apprécier l'importance de comprendre la NOS.

Cependant, lorsqu'est abordée une telle situation, il y a un risque que les élèves se limitent à y voir ce qui maintient leurs jugements. Lors du choix par l'enseignant d'un cas contemporain à étudier, il s'agit de veiller à l'influence de l'émotion liée à l'actualité. En effet, parmi les cas contemporains figurent les questions socialement vives (*'SocioScientific Issues'* ou SSI en anglais) et dans le cas des SSI, des informations sont associées à des jugements, des faits à des valeurs. De plus, lors de l'étude d'un cas contemporain, il n'y a pas de solution au problème posé, d'où un risque de désillusion et de confusion chez les élèves.

Comme exemple de support sont proposés ceux produits par les média. Mais cela nécessite un préalable de la part des élèves : qu'ils aient une connaissance primaire de la NOS. Allchin considère qu'il n'y a pas d'informations suffisantes sur les mécanismes de la démarche scientifique dans la presse pour qu'y recourir permette de développer la vision de la NOS des élèves.

Pour Allchin il apparaît plus difficile de percevoir l'influence du contexte dans un cas contemporain interdisciplinaire que dans un cas historique. Par ailleurs, un cas contemporain peut vite être dépassé et devenir historique (Allchin prend comme exemple le cas du SRAS).

Recourir à des démarches d'investigation

Selon Duschl (2013), un enseignement intégré de la NOS nécessite de **faire intervenir les pratiques sociales et épistémiques** suivantes : la construction des théories et des modèles, la collecte et l'analyse de données à partir d'observations ou d'expériences, la construction d'une argumentation et la transcription de ces résultats sous différentes formes, orales ou écrites. Lors d'une séquence d'enseignement, les activités d'investigation ont à être menées par les élèves eux-mêmes.

Exposer un étudiant à un environnement de recherche, via un projet durant une année par exemple, serait susceptible de favoriser chez lui un développement de sa compréhension de la NOS, à condition que l'étudiant ait à articuler et justifier sa vision de la NOS, ce qui l'aiderait à la structurer (Ryder, 1999a).

Néanmoins, l'investigation ne permettraient d'atteindre que certaines caractéristiques des sciences, mais au moins celles-là seraient correctement traitées (Allchin, 2011a). Par exemple, il n'y aurait pas de mise en évidence des influences économique et historique sur les sciences. Par ailleurs, Allchin rappelle le rôle primordial de l'enseignant lors de l'activité, sans quoi c'est l'échec assuré, comme ce fut le cas dans les années 1960. En effet, les compétences requises chez l'élève ne peuvent s'acquérir que dans la durée, les élèves n'étant pas préparés *a priori* à de telles activités. Là encore, l'enseignant joue un rôle de médiateur dans l'apprentissage de l'élève.

2.4 Deux propositions de coordination possible entre les thématiques de recherche sur les PCK et la NOS

Nous évoquons ici les contributions de Van Dijk (Van Dijk, 2014) et d'Abd-El-Khalick (Abd-el-khalick, 2013).

Van Dijk suggère de développer une catégorie de 'PCK pour la NOS' où la NOS serait abordée en lien avec '*subject matter knowledge*'. Elle insiste en effet sur l'importance du contenu scientifique pour accéder à une compréhension de la NOS : par exemple, en fonction du domaine scientifique, la démarche de recherche diffère. Il s'agirait de mettre en avant cette diversité, cette hétérogénéité des pratiques scientifiques. Van Dijk encourage donc à **développer chez les enseignants une catégorie de PCK de 'culture scientifique' afin de saisir l'hétérogénéité de la NOS.**

La construction de cette catégorie de PCK devrait jaillir du contenu enseigné. Elle ne peut pas découler de l'énoncé de principes généraux ensuite appliqués à un contexte donné.

Pour y parvenir, il s'agirait de relier ce contenu au contexte historique ayant permis de l'obtenir et de développer des activités de démarche d'investigation lors de la formation des enseignants.

Une réflexion sur les modèles pourrait également y aider : il s'agirait de montrer que, plus que représenter la réalité, **un modèle permet de répondre à un problème donné, dans un contexte donné.** Les modèles sont pour Van Dijk (2014, p.406) « *one of the most prominent nature of science aspects within science education today* ».

Une réflexion chez les enseignants sur la construction des savoirs serait à développer (Abd-el-khalick, 2013), dans la mesure où **la compréhension de la NOS par les enseignants serait la pierre angulaire d'une évolution possible de leurs pratiques** (*ibid.*). Si l'enseignant avait des connaissances sur la NOS, il saurait orienter la démarche demandée aux élèves en tenant cas de leurs conceptions naïves sur la NOS. Il est noté cependant qu'améliorer cette compréhension chez l'enseignant est une condition nécessaire mais non suffisante. D'autres facteurs, appartenant au registre des convictions ('*beliefs*'), interviennent également et sont au-delà du contrôle du seul enseignant (priorité donnée à la gestion de la classe, convictions sur l'importance ou non que les élèves apprennent sur la NOS, etc.).

Comme Van Dijk, Abd-El-Khalick suggère de recourir à la démarche d'investigation. Couplée à l'étude de documents historiques, elle permettrait une amélioration de la compréhension de la NOS par les enseignants, ce qui permettrait *in fine* la transmission d'une meilleure compréhension de la démarche scientifique à l'élève.

Par ailleurs, il insiste sur la nécessité d'un cadrage explicite, incitant les enseignants à réfléchir sur la NOS et pointe l'importance des visées mises en avant par les curricula d'enseignement pour les élèves et de formation des enseignants.

Ainsi le double apport d'une meilleure compréhension de la NOS par les enseignants serait de **favoriser une meilleure transmission de la NOS aux élèves ('enseigner la NOS')** et de **favoriser et structurer un environnement d'apprentissage fondé sur la compréhension des modes de construction du savoir en science ('enseigner avec la NOS')**.

Si Van Dijk ne relie la NOS qu'au contenu, Abd-El-Khalick l'articule également avec d'autres catégories, liées notamment aux élèves. Il indique que construire une catégorie de PCK, qu'il nomme 'NOS PCK', requiert 3 domaines nécessaires et suffisants chez l'enseignant : sa maîtrise du contenu scientifique, un ensemble de compétences liées à la démarche d'investigation centrée sur l'élève et liées à la réalisation d'activités permettant de modifier les conceptions de l'élève sur la NOS, enfin la compréhension de la NOS par l'enseignant, sur des aspects généraux mais aussi sur des aspects historiques, philosophiques, psychologiques et sociologiques du développement du savoir scientifique ainsi que sur des contenus spécifiques, associés au domaine enseigné. Un développement optimal de cet enseignement 'sur la NOS' et 'avec la NOS' serait mené grâce à un cycle de phases d'implémentation en classe et de phases de réflexion sur ces implémentations.

Conclusion

Aborder la question de la NOS lors d'une séquence d'enseignement permet notamment de mettre en avant l'aspect social de la construction du savoir et l'importance de la modélisation pour comprendre ce processus.

Que son enseignement soit explicite ou implicite-réflexif, la réflexion sur la NOS peut être réalisée de différentes manières : recours à un cas historique, à un cas contemporain ou à une activité d'investigation.

Parmi les pistes pour la formation des enseignants proposées par la communauté de recherche sur la NOS et évoquées dans ce chapitre, il s'avère que le recours à l'histoire des sciences fait consensus.

Pour autant, à ce jour, les plaidoyers en faveur d'une introduction systématique d'un cours dédié à l'histoire des sciences en premier cycle universitaire n'ont pas abouti. Dans le système éducatif actuel, le mode d'exposition dit « *dogmatique* » (Sartori, 2001) apparaît adapté aux opportunités et contraintes de l'enseignant. Prétendre à un remaniement complet des pratiques enseignantes apparaît peu réalisable sans un profond changement dans la formation tant initiale que continue des enseignants. Cela n'étant pas acté à ce jour, il s'agit d'améliorer l'existant autant que faire se peut. Nous abordons le recours à l'histoire des sciences de manière plus détaillée dans la suite de ce manuscrit (cf chapitre 5).

Au chapitre suivant, nous revenons plus en détails sur les notions de modèle et de modélisation qui ont été évoquées dans ce chapitre.

Chapitre 3 Modèles et modélisation

Lors d'un bilan de l'état de l'enseignement de la physique en France, dressé dans les années 1970 (Halbwachs, 1975), la démarche de modélisation est indiquée comme étant une activité centrale à favoriser. La finalité générale d'un enseignement de la physique serait de développer la capacité à élaborer des modèles et à manier les transformations des relations dans le cadre de ces modèles.

En France, c'est dans les années 1980 que le terme 'modèle' apparaît dans les concours de recrutement d'enseignants (CAPES, agrégation), ce qui traduirait, selon Rumelhard (1988), une préoccupation de valoriser la méthode scientifique, en plus de la maîtrise d'un savoir et de son exposé pédagogique.

Dans ce chapitre, nous apportons des éléments concernant le thème central de cette étude : modèles et modélisation. Nous l'abordons sous deux registres, épistémologique et didactique. Dans un premier temps, nous en rappelons les principales caractéristiques, puis, dans un second temps, nous abordons des stratégies d'enseignement associées, qui tiennent compte des conceptions des élèves, de leurs difficultés et de facteurs institutionnels. Parmi ces stratégies d'enseignement, la contextualisation est valorisée.

3.1 Définitions et caractéristiques

3.1.1 Définitions

Le concept de modèle est un concept polysémique dont la définition varie selon les disciplines et les chercheurs (Roy, 2014). Il est aussi à signaler qu'on l'emploie pour qualifier des éléments théoriques datant de périodes où le terme n'était pas utilisé (modèle de Ptolémée ou de Galilée par exemple) (Drouin, 1988).

Drouin présente la modélisation comme étant « *la démarche de construction d'un modèle, ou d'appropriation d'un modèle déjà construit* » (*ibid.*, p.9).

Elle définit le **modèle** comme étant le « *produit fini* » associé au « *processus* » de modélisation et en souligne la dimension fonctionnelle « *On peut alors considérer qu'un modèle est avant tout quelque chose qui fonctionne comme modèle (ce qui voudrait dire qu'un modèle est peut-être moins un objet qu'une fonction particulière attribuée à un objet)* » (*ibid.*, p.18).

Nous retrouvons une idée voisine chez Soler, pour qui un modèle scientifique **fournit** « *des outils efficaces pour résoudre des problèmes particuliers* » et qui précise de plus qu'il est **une** « *construction intellectuelle* » (Soler, 2013, p.185).

Un modèle permet d'établir des relations entre des éléments de savoir théoriques et des éléments issus du champ expérimental (Sensevy, 2008).

Comprendre la démarche de modélisation, c'est comprendre le fonctionnement de la discipline, connecter ce que Tiberghien nomme le « *champ expérimental de référence* » (au modèle) à la théorie.

Un modèle évolue de manière itérative à partir des interactions entre l'objet visé et les données empiriques (Van Driel, 2002). « *Il y a ainsi un balancement continu entre la formalisation et le retour au concret. Cette formalisation s'opère à travers des lois qui sont les éléments quantifiables et mathématisables du modèle* ». (Drouin, 1988, p.7).

3.1.2 Modèle et réalité

Le modèle est un outil qui permet d'éviter de limiter la réalité à l'interprétation qu'en donne la science (Latour, 2007 ; Drouin, 1988). Le modèle « *freine* » la tendance à confondre ce que dit la science avec la réalité : *un modèle se donne ouvertement comme ne pouvant rendre compte de toute la réalité (...)* C'est dans cette perspective qu'Einstein comparait le monde réel au mécanisme interne de cette montre qu'on ne peut ouvrir ; on a besoin de supposer que ce mécanisme, à jamais invisible, existe, pour que la recherche d'une vérité objective ait un sens. » (Drouin, 1988, p.10).

Un modèle représente une situation : « *les sciences produisent des modèles explicatifs du monde, mais pas du monde tel qu'il est, bien plutôt du monde tel qu'il est reconstruit dans l'enceinte expérimentale* » (Sensevy, 2006, p.165). **Cette représentation n'est jamais complète ni exacte**, ce qui est à l'image des sciences qui « *nous enlèvent à jamais la possibilité d'un accès direct, immédiat, brutal, avec le référent. C'est même ce qui les rend à la fois belles et civilisatrices* » (Latour, p.224).

Les objets étudiés, techniques, de laboratoire ou issus de notre quotidien, **y sont « idéalisés »** (Jouin, 2002, p.4), au sens où « *leur fonction d'usage n'est pas prise en compte, mais seulement les caractéristiques pertinentes par rapport à la question étudiée* » (*ibid.*, p.4). Par exemple, dans un modèle en physique, une « canalisation » sanguine (un vaisseau sanguin) est supposée étanche afin d'obtenir le profil de vitesse du sang tandis que pour un modèle physiologique du sang, la porosité de la « canalisation » est mise en avant pour comprendre les échanges de fluides entre le sang et le milieu interstitiel.

3.1.3 Propriétés d'un modèle

Il existe un lexique polysémique concernant les propriétés d'un modèle (Soler, 2013), que nous n'avons pas étudié. Nous évoquons ici un certain nombre de ces propriétés.

Composants et cohérence d'un modèle

Un modèle nécessite une cohérence interne en son sein (Halbwachs, 1975). Il est constitué d'un certain nombre de concepts, de principes et de lois.

Fonctions d'un modèle

Les fonctions principales d'un modèle sont de représenter, d'expliquer et de prédire (Drouin, 1988 ; Lange, 2005 ; Roy, 2014) : « *certains modèles semblent donc avoir pour fonction principale d'expliquer, d'autres plutôt de prévoir, c'est-à-dire d'anticiper par la pensée le déroulement d'un phénomène, à travers la théorie interprétative que constitue le modèle. Toutefois, prévoir et expliquer ne sont pas forcément associés* » (Drouin, 1988, p.11)

Un modèle permet aussi de générer de nouvelles connaissances (fonction heuristique) et de communiquer avec les autres (Schwarz, 2009).

Domaine de validité d'un modèle

Une des caractéristiques principales d'un modèle est **son domaine de validité** : « *les lois de la physique s'appliquent seulement où ses modèles s'ajustent, et cela, apparemment, inclut seulement un domaine très limité de circonstances* » indique Sensevy, citant Cartwright (Sensevy, 2006, p.165). « *Tout concept finit par perdre son utilité, sa signification même, quand on s'écarte de plus en plus des conditions expérimentales où il a été formulé* » rappelle Bachelard, citant Jean Perrin (Bachelard, 1983, p.139).

Un modèle est « *destiné à s'adapter facilement à tel ou tel contexte circonscrit* », il est « *localisé* » (Soler, 2013, p.185) et ne vise pas l'universalité (Sensevy, 2006).

Aborder le domaine de validité d'un modèle nécessite, en physique, **une confrontation entre les prévisions du modèle et les données du champ expérimental** : « *le modèle ne donne pas de lui-même les limites de son utilisation.* » (Rumelhard, 1988, p.32).

Fidélité et simplicité d'un modèle

Lors de l'étude d'une situation donnée, on peut avoir recours à des modèles plus ou moins complexes. Par exemple, pour étudier le mouvement mécanique d'un objet, on peut prendre en compte ou non les frottements.

Un modèle où on néglige les frottements est plus simple d'emploi qu'un modèle qui en tient cas. Pour autant, les prévisions qu'il permet sont moins « *fidèles* » aux données expérimentales (Soler, 2013, p.188) que celles d'un modèle tenant cas des frottements.

Simplicité et fidélité varient en sens opposé : « *Ce que le scénario du modèle perd en fidélité, il le gagne en simplicité* » (*ibid.*, p.185).

Articulation des modèles

Pour une situation donnée et un problème donné peut exister une pluralité de modèles, en l'occurrence un modèle avec ou sans frottements sur l'exemple précédent.

Ces modèles peuvent avoir à « *cohabiter* » (Soler, 2013, p.207). Par exemple, lors de l'étude de la figure d'interférence obtenue dans un montage du type 'trous de Young', une démarche d'optique

géométrique permet d'estimer la différence de marche induite par un déplacement du point source primaire, tandis que pour estimer la répartition d'intensité à l'écran, un raisonnement d'optique ondulatoire est nécessaire.

L'articulation des modèles souvent proposée par les enseignants serait de partir du modèle le plus simple et de le complexifier. Par exemple, pour étudier le mouvement d'un oscillateur mécanique, on commence par négliger les frottements et on compare les prévisions du modèle aux données expérimentales. En négligeant les frottements, on supprime (on soustrait, on ignore) un terme dans la relation fondamentale de la dynamique du point. Une telle démarche est qualifiée de « *simplification soustractive* » (*ibid.*, p.204).

Une telle articulation des modèles présente un intérêt pédagogique (on va du plus simple au plus compliqué), mais aussi un inconvénient : « *Dans une telle configuration soustractive, les scénarios d'un ensemble de modèles du même objet, ordonnés du plus simple au plus compliqué, peuvent alors facilement apparaître comme une série de versions se rapprochant toujours davantage du « vrai » scénario identifié à celui de la théorie en vigueur.* » (*ibid.*, p.204)

De là, trois approches du modèle sont possibles : deux réalistes et l'une dite instrumentaliste.

Dans une première **vision réaliste**, un modèle est supposé faux (celui négligeant les frottements par exemple) et est remplacé par l'autre (celui prenant en compte des frottements), l'idée étant qu'en complexifiant le modèle, on se rapproche de la vérité. Soler signale que l'expression 'les découvertes scientifiques' se réfère au terme 'découvrir' qui signifie 'enlever ce qui couvre' : à travers une découverte scientifique, il s'agirait de rechercher une réalité cachée.

Dans une seconde vision réaliste, on peut aussi présenter les modèles sans et avec frottements comme étant des visions partielles et plus ou moins proches d'un modèle 'vrai'.

Dans une **vision instrumentaliste**, au contraire, le modèle n'a pas vocation à être un tel reflet de la réalité : c'est un outil, « *un instrument destiné à s'appliquer localement, à résoudre efficacement une classe particulière de problèmes* » (*ibid.*, p.206).

Ce localisme évite d'avoir à postuler la recherche d'une éventuelle réalité cachée.

Il permet également une **cohabitation pacifique entre modèles**, l'un n'étant pas déclaré meilleur que l'autre : chacun répond à une question posée différente, dans un contexte donné.

Utilisation d'un modèle

Le recours à un modèle dépend de son **opérationnalité** et de son **efficacité**.

Un modèle « *n'est opérant que relativement à certains objectifs humains particuliers associés à des énoncés de problèmes particuliers* » (*ibid.*, p.185) : par exemple, étudier un ensemble très important de particules en interaction n'est pas opérant via un modèle issu de la mécanique classique. Une approche issue de la thermodynamique statistique serait plus opérante.

L'efficacité d'un modèle « *renvoie à la facilité d'utilisation et à l'aptitude du modèle à apporter des solutions aux problèmes posés* » (*ibid.*, p.185) : par exemple, utiliser un modèle se référant à la mécanique quantique pour étudier le mouvement d'un système masse-ressort ne serait pas efficace.

Le contexte apparaît comme un élément important pour évaluer si un modèle est opérant et efficace pour aider à résoudre un problème posé.

3.2 Apprendre la physique et les modèles

3.2.1 Expérience et abstraction

Selon Halbwachs (1975), **la base théorique n'aurait pas à découler de l'expérience. Elle devrait la précéder, pour aider à la comprendre, une fois la théorie construite dans la tête de l'élève.**

Partir de l'analyse directe d'un fait expérimental serait à l'opposé de la démarche naturelle de l'intelligence humaine et de l'histoire du développement de la science (Halbwachs, 1975). La réalité est le résultat de plusieurs causes enchevêtrées. Partir d'observations et de manipulations directes aboutit à des conclusions obscures (ce qu'Halbwachs illustre sur l'exemple de deux approches contraires pour aborder la mécanique du solide).

L'expérience ne servirait pas à apprendre à l'élève à « lire » les relations mathématiques dans la situation réelle mais à l'aider à former et clarifier des concepts « *concrets* », correspondant à des classes d'objets ou des phénomènes avec lesquels l'observation, surtout qualitative, et la pratique manipulative le mettraient directement en contact. **L'expérience aiderait à former dans l'esprit de l'élève les relations opératoires liant ces concepts.**

L'expérience permettrait donc de construire les concepts et les relations de la physique sur le plan psychocognitif (ce qui est différent du rôle qui lui est attribué dans les manuels, à savoir définir avec précision les grandeurs à prendre en considération, les obtenir expérimentalement et garantir la certitude spécifique sur l'accord entre les lois physiques et le système d'expériences).

Il y aurait à distinguer l'abstraction « *empirique* », par exemple la notion de force dès l'âge de 12-14 ans, de l'abstraction « *réfléchissante* », par exemple la notion de vecteurs à sommer, qui n'apparaît que plus tard. Il y a à se demander quand l'élève est prêt, psychologiquement, à manier ces deux types d'abstraction.

Les expériences simples empiriques sont de l'abstraction simple : elles sont juxtaposées, il n'y a pas d'organisation. L'expérience logique, par contre, est une abstraction réfléchissante : c'est une construction de propriétés relationnelles, c'est-à-dire d'opérations, les opérations étant « *les actions intériorisées réversibles au sens où une action inverse annule mentalement les résultats de la première et se coordonnant en structure.* » (Chalon-Blanc, 1997, p.97).

Cette construction d'opérations est un acte du sujet, elle ne peut lui être uniquement transmise par l'écoute du discours de l'enseignant : « *La compréhension et la production d'énoncés logiques ne se tirent pas de l'ordre du discours transmis par l'adulte ; elles ne sont assurées que lorsque l'enfant devient capable de se saisir des actions qu'il intériorise et coordonne. (...) Une opération comme telle est une création du sujet... puisqu'elle ajoute des éléments nouveaux à la réalité. Toutes les opérations de la pensée sont toujours des créations du sujet.* » (*ibid.*, p.92).

Une telle démarche est liée à la **notion piagétienne de « réversibilité de la pensée »**, « *capacité mentale de coordonner toute action à celle qui l'annule ou la compense* » (Chalon-Blanc, 1997, p.34) : « *Le sujet, grâce à la réversibilité de sa pensée, construit des connaissances logico-mathématiques qui, seules, lui permettent d'atteindre un réel physique intelligible. (...) Il apparaît que l'expérience physique des objets, bien que nécessaire, ne suffit jamais à elle seule pour expliquer les faits correctement lus. Seul le sujet en atteignant les modifications successives de la substance, soit ses transformations qu'il relie entre elles, peut accéder à l'explication de l'identité des niveaux et des poids. Sa pensée devient alors réversible : il peut établir des relations d'égalité entre les objets qui sont totalement détachées de lui.* » (Chalon-Blanc, 2011, p.34).

Cette interaction avec le réel est à double sens : si toute connaissance objective trouve sa source dans la construction mentale du sujet, l'évènement doit, en retour, la confirmer (Chalon-Blanc, 2011).

En physique, « *le besoin de comprendre naît de la prise de conscience d'un paradoxe entre une prévision et un constat* » (Robardet, 2001, p.13), ce qui nécessite **un recours à l'expérimental dans l'enseignement de cette discipline**.

Rappelons qu'un tel recours est une constante dans les propositions des courants progressistes francophones du 20^e siècle : « *L'incroyable lacune des écoles traditionnelles, jusqu'en ces dernières années compris, est d'avoir négligé presque systématiquement la formation des élèves à l'expérimentation.* » (Piaget, 1988). Un tel plaidoyer se retrouve également dans la littérature anglo-saxonne (Van Driel, 2002 ; Lavonen, 2004).

Signalons enfin qu'un aspect important favorisant l'apprentissage de l'élève est sa **motivation psychologique** (Halbwachs, 1975). Elle peut être développée en faisant traiter à l'élève des problèmes physiques situés dans le cadre de ses préoccupations d'enfant ou d'adolescent. La finalité serait de faire mieux comprendre à l'adulte en devenir qu'est l'élève le monde naturel et le fonctionnement des dispositifs techniques au milieu desquels il est appelé à vivre. **Contextualiser l'enseignement favoriserait l'apprentissage de l'élève.**

Pour y parvenir, il est suggéré de faire correspondre à chaque niveau d'approfondissement de l'exploration du monde naturel et technique un niveau de la connaissance théorique à introduire, sans se poser des questions sous-jacentes sur la théorie associée. Par exemple, en biologie, il s'agirait de ne pas introduire trop tôt le concept de cellule si ce n'est pas utile. **La hiérarchie des relations reliées au sujet pensant, les « capacités opératoires » de Piaget, est différente de la hiérarchie des notions (simples / composées) reliée à l'objet lui-même.**

3.2.2 La physique de sens commun et la modélisation

La démarche de modélisation en physique

Modéliser en physique consisterait à connecter la théorie à ce que Tiberghien (1994) nomme le 'champ expérimental de référence' au modèle, comme indiqué sur le schéma reproduit dans le document 3.2.2.

La théorie contient l'explication du phénomène : paradigme, causalité, principes et lois. Le modèle inclut les relations entre des quantités physiques, des résultats qualitatifs associés à

l'observation. Le champ expérimental de référence correspond aux mesures, aux faits expérimentaux et aux procédés de mesure. Le champ expérimental de référence n'est pas indépendant de la théorie.

Theory	<i>Explanation : Paradigms Causality Principles Laws...</i>
Model	<i>Formalism: relations between physical quantities... Qualitative aspects associated with observable phenomena</i>



Experimental field of reference	<i>Measurements Experimental facts Experimental devices</i>
--	---

Document 3.2.2
« A view of modeling in physics »

Constats de l'écart entre l'approche quotidienne et l'approche physique

Tiberghien analyse les éléments de savoir que mobilise un élève à partir de la modélisation qu'il utilise.

Son analyse est à visée didactique : sur un thème donné, elle met en parallèle le modèle attendu en physique et celui construit par l'élève, ce qui lui permet d'en expliciter les écarts.

Concernant le modèle construit par l'élève, elle suppose que ce dernier sélectionne des éléments de son environnement immédiat selon des critères pourvus de sens pour lui.

Elle montre que les éléments et la cohérence du modèle rendant compte des réponses de l'élève diffèrent souvent de celle du modèle attendu en physique. Là où le physicien exploite un formalisme mathématique, l'élève se réfère aux éléments de son environnement immédiat (*ibid.*).

Ainsi, sur l'exemple des transferts thermiques, Tiberghien (2008) met en avant la relation de causalité que les élèves proposent pour expliquer un phénomène donné. Dans le raisonnement d'un élève apparaît souvent un lien causal entre ce qui rend chaud (pour l'élève, ce n'est pas évident d'y associer une température) et ce qui devient chaud (l'élève lui associe sans problème une augmentation de température). De par son rapport au toucher, la nature chaude ou froide des objets dans des situations d'isolation n'est pas perçue de la même manière par l'élève. Selon que l'objet est chaud ou froid, la causalité n'est pas la même chez l'élève alors qu'elle l'est pour l'enseignant : ce dernier procède au même traitement pour l'objet chauffé et pour l'objet qui chauffe. Là réside un des intérêts de la physique : une seule et même explication, quelle que soit

la situation envisagée. Cela nécessite de traduire le problème en termes physico-mathématiques : introduction de grandeurs physiques et de relations mathématiques entre ces grandeurs (soit ici une variation des températures, jusqu'à l'égalité à l'équilibre).

Tiberghien considère que ce qu'il faut chercher à connaître, c'est à quel point ce raisonnement scientifique est éloigné de l'approche suivie spontanément par l'élève. Si l'élève rencontre des difficultés dans son raisonnement (par exemple dans le cas d'un changement d'état), il fait alors appel aux connaissances du monde, au quotidien, qui sont reliées à la perception. Ainsi, l'élève sait que chauffer peut faire autre chose qu'augmenter la température (cas du sucre qui se caramélise par exemple).

Les écarts entre les deux approches peuvent être ainsi résumés : dans une approche quotidienne, les actions sont en soi des éléments de structuration au quotidien tandis que dans une approche physique, la structuration se construit à partir des phénomènes. Il y a une modélisation. Les questions qu'on se pose dans ces deux approches sont différentes et différemment posées. Les visées d'interprétation sont également différentes dans les deux approches.

Ces écarts peuvent être mis en parallèle avec la remarque de Venturini (2009, p.53) sur le fait que 'savoir' signifie pour l'élève « *comprendre SON monde* », ce qui est différent des attentes de l'enseignant de physique ou de Sciences de la Vie et de la Terre (SVT). En physique comme en SVT, l'élève éprouve des difficultés à lier le modèle à la réalité (*ibid.*).

3.2.3 Importance du contexte pour l'apprentissage

Intérêt épistémologique

Un savoir se construit dans un contexte donné (Sensevy, 2006). Sans contexte associé, un savoir est « *crystallisé, morcelé et inerte* » (Lenoir, 2014, p.6). La relation de dépendance entre lois, modèles et contextes « *interdit de penser une loi donnée sans le contexte au sein de laquelle elle est vraie* » (Sensevy, 2006, p.169). En effet, « *les modèles sont intrinsèquement contextuels* » (*ibid.*, p.163).

Etudier le contexte est un élément important dans une démarche de modélisation : « *il s'agit de réévaluer l'importance des situations dans lesquelles le vrai s'élabore* » (*ibid.*, p.165).

Changer de contexte permet également de changer le statut du modèle : objet d'étude dans un contexte donné, il peut devenir « *outil* » dans un autre (Douady, 1992, p.133).

Intérêt psychologique

Comprendre, c'est être capable de mobiliser des savoirs dans des situations particulières, ces savoirs fournissant « *des réponses à des questions liées à l'environnement quotidien* » (Venturini, 2007, p.13). La contextualisation n'est pas un « *simple habillage de la situation* », il s'agit de faire saisir aux élèves « *l'utilité des apprentissages visés* », en les insérant dans le « *social-historique et dans la réalité sociale* » (Lenoir, 2014, p.6). Contextualiser aiderait également l'élève à « *concevoir les sciences comme une construction influencée par les contextes* ».

épistémiques et sociaux et non pas comme une accumulation linéaire et statique » (Hasni, 2014, p.11).

Donner du sens au contenu à enseigner facilite son apprentissage : contextualiser ce contenu, c'est-à-dire établir une relation entre ce contenu et divers contextes (historique, social, quotidien de l'élève appelé parfois « *contexte physique (naturel)* » ou « *contexte empirique* ») serait une aide (Hasni, 2014, p.10).

De plus, proposer un contexte lié au quotidien présenterait un intérêt plus marqué chez les élèves ayant un faible intérêt initial pour les sciences que chez ceux déjà intéressés (Sevian, 2018).

3.2.4 Enseigner les modèles et la modélisation

Enseigner la démarche de modélisation à un élève nécessite de prendre en compte les connaissances et les conceptions qu'il a déjà construites et emmagasinées en amont de la séquence d'enseignement. En effet, « *un passage sans problème des représentations quotidiennes des enfants au savoir scientifique scolaire et vice-versa est largement contesté* » (Koulaidis, 1999, p.169) : l'élève n'est pas 'un vase vide que l'on remplit'. Il s'agit de tenir cas de la connaissance « *commune* », nommée aussi « *spontanée* » (Maurines, 2013, p.2), ou encore naïve, qui est « *individuelle, implicite, partiellement structurée et cohérente* » (*ibid.*, p.2). Qualifiée parfois d'obstacle à l'apprentissage, elle a fait l'objet de nombreuses études, principalement dans les années 1980-1990 (Maurines, 1988 ; Kaminski, 1991 ; Closset, 1992 ; Viennot, 1996a). Dans ce qui suit, elle est évoquée sous le vocable 'd'approche quotidienne', de 'modèle de l'élève' ou de 'structure d'accueil'.

C'est ce 'déjà-là' conceptuel que Tiberghien prend en compte dans son étude de l'apprentissage de la modélisation. Comme le note Sensevy (2006, p.182), la question de la modélisation est ici problématisée en construisant une « *double distinction* » : « *celle entre savoir quotidien et savoir de la physique, et pour chacun de ces savoirs celle entre théorie et description en termes d'objets et d'évènements d'une situation matérielle* ». Etudier les articulations entre ces registres fournit une piste pour « *envisager les ruptures et les continuités à gérer pour l'apprentissage* » (Jouin, 2002, p.3).

Pour que l'élève saisisse la démarche de modélisation, l'enseignant devrait l'aider à **distinguer entre les phénomènes et les noumènes** (un noumène étant lié à la réalité intelligible d'un phénomène et ne pouvant pas être l'objet d'une connaissance empirique directe).

L'enseignant aurait à **lui proposer des situations où il aurait à produire une représentation d'un phénomène donné et à l'utiliser** (Justi, 2002a). **Contextualiser** serait nécessaire dans la mesure où « *l'enseignement des sciences se doit de mettre les élèves en contact avec les modèles interprétatifs et les situations au sein desquelles ces modèles déterminent l'aménagement des lois* » (Sensevy, 2006, p.183). Contextualiser permettrait de présenter le savoir à enseigner « *de manière opératoire, en concurrence directe avec les conceptions* » de l'élève (Robardet, 2001, p.9).

Il s'agirait de **développer les interactions entre l'approche quotidienne et l'approche physique chez l'élève, en faisant confronter le modèle de l'élève à un nouveau contexte**, ce

qui favoriserait le dialogue entre ces deux approches et donc, à termes, l'apprentissage de l'élève (Tiberghien, 1994). L'élève aurait à comparer 'son' modèle à celui de la physique sur une situation donnée. Il s'agirait ensuite de montrer, sur un autre exemple, la portée et la pertinence du modèle physique par rapport au modèle de l'élève. En effet, le modèle de l'élève n'étant fondé que sur des éléments de la première situation envisagée, il ne serait explicatif que pour cette situation-ci et ne le serait pas pour la nouvelle situation, contrairement au modèle de la physique. Pour qu'un nouvel élément permette à l'élève de basculer dans un nouveau mode de pensée, l'élève doit percevoir que cet élément perturbe son mode de pensée antérieur, sans quoi ce nouvel élément, incorporé dans son mode de pensée antérieur, peut aller jusqu'à empêcher tout changement (Tseitlin, 2005).

Réussir à faire appréhender une démarche scientifique et son écart vis-à-vis de la démarche retenue par un élève apparaît comme un travail de longue haleine, dans la mesure où le modèle de l'élève est souvent « *particulièrement efficace pour comprendre le quotidien* » (Robardet, 2001, p.9). Cela peut nécessiter de la part de l'élève des étapes contenant **un savoir intermédiaire** entre ces deux démarches : « *L'apprentissage les conduit à passer par des connaissances intermédiaires qui peuvent être incorrectes tout en étant une étape dans la compréhension de la discipline enseignée* » (Tiberghien, 2008, p.153).

Il s'agirait également d'introduire le savoir à enseigner à partir de **questions** possibles posées par l'élève, liées à ce qu'il peut observer et manipuler, à partir de « *ce qu'il est* » (Halbwachs, 1975, p.23). Une cause possible des difficultés de certains élèves en sciences serait que les réponses données par l'enseignant sont le plus souvent éloignées des questions que se pose l'élève et de la façon dont l'élève y répondrait (Gaidioz, 2003). Par exemple, si on fait parler librement une classe à propos de la nature, chez l'enseignant, il n'y aurait *a priori* que l'aspect scientifique qui serait évoqué, tandis que chez l'élève, les références aux sciences n'apparaîtraient pas toujours (*ibid.*).

Par ailleurs, Tiberghien (2004) estime que les connaissances issues de la vie quotidienne et les connaissances de la physique peuvent interférer par le sens des mots et par les intuitions. **Le langage est important pour assimiler des concepts à long terme** (Sensevy, 2008). Il y a donc à expliciter les différents sens d'un même mot et à expliciter la rigueur du sens du mot en physique. Selon le contexte, les termes sont différents pour décrire et pour interpréter une expérience.

Les enseignants auraient à **expliquer leurs choix pédagogiques** lors d'une séquence d'enseignement (Tiberghien, 2004).

Le chemin entre la situation réelle (objets, événements) et la situation épurée ou déjà modélisée dans un exercice ou un TP est souvent occulté. D'où parfois un sentiment d'arbitraire chez l'élève. C'est un implicite qui pose problème à l'élève. Aussi est-il conseillé aux enseignants de l'expliquer et de développer ces passages réel / modèle plutôt que de n'aborder que l'utilisation des modèles dans des situations déjà modélisées. Par exemple, il s'agirait de s'interroger sur les avantages et les inconvénients à utiliser tel ou tel modèle dans une situation réelle donnée.

Il y aurait également à **mettre l'accent sur le domaine de validité de ces modèles** lorsqu'une démarche de modélisation est mise en place dans une séquence d'enseignement ou lorsqu'un modèle est présenté (Justi, 2002a).

En outre, **faire basculer l'élève d'une conception du modèle comme outil de communication à une conception du modèle comme outil d'explication du monde nécessiterait une réflexion chez l'enseignant sur la nature et la fonction d'un modèle** (Schwarz, 2009).

Lors d'une situation d'enseignement, il apparaît important d'**explicitier le statut des modèles** pour comprendre le lien entre expérimental et théorie, les modèles orientant « *l'enseignement, la manipulation des questions posées et la manière d'y répondre* » (Gaidioz, 2003, p.73). En effet, ces modèles n'étant pas encore assimilés par l'élève, il y a un risque de décalage et d'apparition d'une sensation d'échec chez lui (Tiberghien, 2004).

L'enseignant ayant un rôle de médiateur dans l'apprentissage de l'élève (Calmettes, 2014), créer des connexions entre empirie et théorie chez l'élève nécessiterait l'appui de l'enseignant. Par exemple, le recours à l'expérimental ne serait bénéfique pour l'élève que sous certaines conditions : le but de l'expérience doit être maîtrisé à la fois par l'élève et l'enseignant et la visée du recours à l'expérimental par l'enseignant ne devrait pas être limitée à confirmer ce qui a déjà été enseigné en cours (Lavonen, 2004).

Formuler des hypothèses et les valider est une démarche difficile pour l'élève qui nécessite l'aide de l'enseignant. Développer la compréhension par l'enseignant des concepts et des démarches utilisés lors d'un travail expérimental serait important (« *vital part of PCK* » (Lavonen, 2004, p.314)).

Coquidé considère que « *les expériences et les expérimentations peuvent représenter, dans les enseignements scientifiques, les références empiriques nécessaires pour la mise à l'épreuve et la validation des savoirs conceptuels et des modèles* » (Coquidé, 2003, p.164).

Ces recommandations seraient utiles au vu de **l'attitude spontanée des enseignants, liée à leur formation universitaire**: il s'agirait de compléter leur formation uniquement centrée sur la discipline académique par une formation sur comment apprendre et comment enseigner. Par exemple, les enseignants de physique chercheraient à réaliser la transmission de tout ce qui peut passer du corps de doctrine que constitue la physique du physicien. Une telle transmission, adaptée pour un public de futurs enseignants, chercheurs ou ingénieurs le serait moins pour d'autres publics d'élèves (Halbwachs, 1975).

En résumé, selon Justi et Gilbert (2002 ; 2003), réussir l'apprentissage d'un modèle nécessiterait chez l'élève une compréhension de la vision scientifique de ce qu'est un modèle, une familiarisation par rapport aux phénomènes modélisés, une connaissance des raisons pour lesquelles le modèle a été construit et pour lesquelles il est enseigné, une compréhension de l'opérationnalité des analogies et une connaissance des origines du modèle étudié.

3.3 Conceptions et pratiques des enseignants sur les modèles et l'expérimental

Conceptions sur les modèles

Justi et Gilbert (2002) considèrent que les modèles et la modélisation doivent avoir une place centrale dans l'enseignement des sciences. Ils interviewent un échantillon de 39 enseignants de sciences brésiliens de tout niveau (primaire, collège, lycée, université), en lien avec les modèles. Ils étudient leurs conceptions sur l'utilisation des modèles et de la modélisation en séquence d'enseignement. Pour cela, ils abordent le statut épistémique des modèles chez ces enseignants, la transposition didactique qu'ils proposent et leur attitude face aux modèles proposés par leurs élèves (Justi, 2002a).

De leur étude ne se dégagent **pas de profils types d'enseignants** (Justi, 2003). Ces enseignants interrogés saisissent la valeur ajoutée des analogies pour construire un modèle (Justi, 2002a). Par contre, des enseignants de collège interrogés décrivent une **vision naïve du modèle**, perçue comme une reproduction du réel, une norme à suivre qui ne peut être modifiée (Justi, 2002, Justi, 2003). Dans l'échantillon étudié, une telle vision se retrouverait principalement parmi des enseignants de biologie (Justi, 2003).

On retrouve dans d'autres enquêtes cette conception du **modèle comme représentation exacte de la réalité** (Roy, 2014). De plus, lors d'une enquête exploratoire, il est constaté que les enseignants du secondaire interrogés se représentent les modèles en sciences comme étant davantage «*physiques*» que «*mathématiques*». L'appellation 'modèles «*physiques*» signifie «*représentations concrètes*» (par exemple des maquettes ou «*l'analogie d'une pompe hydraulique en biologie pour illustrer le fonctionnement du cœur*») et 'modèles «*mathématiques*» signifie modèles faisant «*appel aux langages logicomathématiques*» (*ibid.*, p.351).

Dans une enquête auprès d'enseignants du secondaire, Schwarz constate chez eux une vision du savoir scientifique qui ne serait pas suffisamment élaborée pour saisir qu'un modèle évolue au fur et à mesure que le savoir s'accroît (Schwarz, 2009).

La fonction que les enseignants attribue à un modèle serait liée à leur parcours scolaire (un enseignant de biologie n'attribue pas à un modèle le même rôle qu'un enseignant de chimie par exemple) (Van Driel, 1999).

Les enseignants attribueraient plutôt au modèle **une fonction de représentation de phénomènes abstraits et d'explication de phénomènes scientifiques** (Roy, 2014). Les fonctions heuristique («*le modèle en tant qu'outil d'exploration des phénomènes*» (*ibid.*, p.350)) et prédictive d'un modèle seraient rarement évoquées.

Les enseignants considéreraient la modélisation comme utile pour enseigner du contenu scientifique mais pas pour enseigner du contenu lié à la NOS.

Saisir que le modèle est un outil pour comprendre un phénomène donné permettrait de développer chez l'élève l'idée qu'un modèle est révisable (Schwarz, 2009).

Conceptions sur le recours à l'expérimental

D'une analyse d'exemples extraits de la littérature, Coquidé (1998) aboutit à trois modes de pratiques expérimentales, à savoir la familiarisation pratique, l'élaboration théorique et l'investigation empirique. Par familiarisation pratique il s'agit que «*l'élève expérimente « pour voir », il explore et contrôle peu à peu ses actions : il apprend à maîtriser des pratiques*» (*ibid.*, p.113). Par élaboration théorique, «*l'expérimental est mis au service de l'appropriation*

conceptuelle et modélisante » (*ibid.*, p.114), il s'agit « *d'expériences pour démontrer, conceptualiser, modéliser* » (Coquidé, 2003, p.168). Enfin, lors d'une investigation empirique, « *l'élève mène un mini-projet ou met en œuvre, en tout ou en partie, une réelle démarche d'investigation scientifique* » (Coquidé, 1998, p.114). Il s'agit « *d'expériences pour tester, contester, argumenter* » (Coquidé, 2003, p.168).

Par ailleurs, en lien avec la place accordée par les enseignants aux élèves, Koulaïdis (1999, p.185) indique que les professeurs de science accepteraient « *l'idée de l'importance de la participation des élèves à des expériences* » mais que « *l'objectif de cette participation* » n'est pas clairement défini.

Pratiques enseignantes en lien avec modèles et modélisation

Un décalage entre le déclaratif des enseignants interrogés sur le recours à des stratégies d'enseignement centrées sur la modélisation par les élèves et leurs pratiques réelles d'enseignement a été plusieurs fois constaté (Van Driel, 1999 ; Pélissier, 2007).

Les enseignants auraient un vécu limité en termes de démarche de modélisation (Schwarz, 2009) et **peu de connaissances sur les conceptions des élèves sur cette démarche** (Justi, 2002).

Rarement la démarche de construction d'un modèle serait menée en séquence d'enseignement (Schwarz, 2009), en particulier par les universitaires interrogés (Justi, 2002). Adopter une telle démarche permettrait pourtant à l'élève de progresser dans sa compréhension du modèle (Justi, 2003).

La nature et la fonction des modèles ne seraient pas abordées en séquence d'enseignement par les enseignants interrogés (Schwarz, 2009) et **la mise en avant du domaine de validité du modèle serait rarement effectuée** (Justi, 2002a).

Dans plusieurs enquêtes (Driver, 2000 ; Lavonen, 2004 ; Calmettes, 2014), il est constaté que le **travail de transposition** d'un modèle issu de la recherche à un modèle enseigné est **compliqué**. En effet, un modèle présenté aux élèves est soumis à deux types de contraintes. D'une part, il s'agit de préserver la structure conceptuelle du modèle scientifique ou historique auquel il se réfère et d'autre part, il s'agit de l'adapter au public visé, en prenant en compte les conceptions naïves des élèves et leurs capacités cognitives (capacité à manipuler des grandeurs abstraites par exemple) (Justi, 2002).

Les pratiques scolaires traditionnelles (concevoir une discipline à enseigner comme une somme de réponses figées à enseigner) **impacterait de manière négative** la mise en place d'une démarche scientifique, en particulier **une démarche de modélisation, lors d'une séquence d'enseignement** (Schwarz, 2009).

Pratiques enseignantes en lien avec le recours à l'expérimental

Coquidé se réfère à une enquête de Séré auprès d'enseignants du secondaire, au niveau européen (Coquidé, 2003). Séré y analyse la place des pratiques expérimentales dans l'enseignement

scientifique. « *Etablir des relations entre grandeurs* » (*ibid.*, p.157) serait l'objectif majoritaire que les enseignants de physique du secondaire accordent aux travaux pratiques, tandis que « *tester une prédiction ou choisir plusieurs explications* » (*ibid.*, p.157) serait peu évoqué. Coquidé en conclut que « *les TP habituels aident peu les élèves à établir des relations entre concepts, percepts et objets matériels* » (*ibid.*, p.157).

De plus, elle indique avoir constaté dans ses enquêtes que les pratiques expérimentales proposées par les enseignants du secondaire interrogés « *restent le plus souvent reconstruites* », que les démarches proposées sont « *uniquement linéaires* » et les méthodes envisagées « *indépendantes de leur objet d'étude* » (*ibid.*, p.164). Coquidé évoque également une étude de Nott sur les travaux pratiques dans le secondaire en Angleterre, qui montrerait que **les activités expérimentales « laissent peu de place à la résistance du réel. « Il faut que ça marche » »** (Coquidé, 1998, p.109).

Par ailleurs, Péliissier (2007) soumet un questionnaire lié à l'épistémologie de la physique à des enseignants stagiaires et à des enseignants qualifiés de confirmés, c'est-à-dire à des enseignants exerçant depuis au moins 10 ans. Il évoque « *l'indigence* » des réponses des stagiaires et constate que chez les enseignants confirmés, il y aurait **une relation entre la véracité d'une connaissance et l'importance de l'objectivité de l'observation et de la rigueur expérimentale**. Il y aurait une cohérence entre leurs pratiques et leurs conceptions de la science mais elles ne correspondraient pas à « *l'épistémologie souhaitable* » (*ibid.*, p.4).

Conclusion

Un modèle est notamment une interprétation du réel et ne saurait s'y substituer. Confronter les prévisions théoriques au champ expérimental de référence aide à délimiter le domaine de validité du modèle. Champ expérimental de référence et théorie ne sont pas indépendants : ils se nourrissent l'un l'autre.

Un modèle est représentatif d'une dynamique plus que d'une connaissance en soi, qui serait figée. C'est un outil répondant à une question donnée, dans un contexte donné.

Faire réfléchir l'élève sur la notion de modèle apparaît alors comme étant formateur pour développer chez lui une meilleure compréhension de la NOS.

Aborder la modélisation en situation d'enseignement nécessiterait trois éléments, liés à la différence entre la structure du physicien et celle de l'élève :

Il s'agirait d'explicitier le modèle, son domaine de validité ainsi que les raisons du choix de ce modèle afin que l'élève prenne conscience à la fois de la démarche suivie pour interpréter une expérience et des écarts entre ce modèle et celui issu d'une approche quotidienne.

Il s'agirait également de distinguer les différents types de cause, matérielles (objets et événements) et explicatives (modèles).

Enfin, il y aurait à prendre en compte les connaissances préalables des élèves.

Ces éléments, développés par Tiberghien, peuvent être vus comme des éléments de référence en termes de modélisation, que l'on pourrait qualifier de 'PCK de référence'. Ils fournissent des pistes à explorer : par exemple, retrouve-t-on ces éléments dans le discours d'enseignants sur leurs pratiques ?

Chapitre 4 Problématique

Nous présentons ici la construction de la problématique.

4.1 Choix des thématiques de recherche réalisés pour cette étude

4.1.1 Choix 1 : le supérieur, les enseignants et leurs pratiques

Pour faire face à l'évolution des publics scolaires et à l'échec en début d'études universitaires, plusieurs textes ministériels publiés depuis le 18 juin 2013 appellent à la mise en place d'un continuum bac-3 / bac+3.

Suite à l'évolution des programmes de sciences de lycée à partir de la rentrée 2010 et en cohérence avec ces textes, de nouveaux programmes ont été mis en oeuvre à partir de la rentrée 2013 en classes préparatoires scientifiques. Inscrits dans une double continuité, « *en amont, avec les programmes rénovés du lycée, en aval avec les enseignements dispensés dans les grandes écoles, et plus généralement les poursuites d'études universitaires* », ils sont conçus « *pour permettre de se former tout au long de la vie* » (Programme physique PC, 2014, p.1).

Ces nouveaux programmes évoquent notamment les notions de modèles, de contextes et suggèrent un recours à l'histoire des sciences. Par exemple, dans le programme de terminale scientifique, est évoquée « *l'exploitation d'un résultat [qui] apparaît comme un moyen de validation des hypothèses faites lors de la modélisation* » (BO, 2010, p.1).

Un maillon essentiel de ces réformes est constitué par les enseignants, qui sont un médiateur entre l'élève et le monde scientifique (Ryder1999a).

De plus, les textes institutionnels appellent à la transformation des pratiques et au développement des recherches sur le supérieur.

Or peu d'études ont été menées à ce jour sur le supérieur et les enseignants.

Dans ce travail de thèse, il a donc été décidé d'étudier **les pratiques d'enseignants exerçant dans des structures qualifiées de premier cycle universitaire scientifique**.

Se limiter au premier cycle universitaire permet de viser un profil d'étudiants associés plus homogène. Par exemple, ils ont *a priori* quasiment tous suivi au lycée un parcours en filière générale.

De plus, se limiter à un enseignement de premier cycle universitaire scientifique permet de restreindre le domaine d'étude disciplinaire, les cours envisagés correspondant à une introduction ou à une première phase d'approfondissement. Il n'y a pas une spécialisation (et donc une

diversité) aussi importante que celle qu'on pourrait trouver si on englobait des formations de niveau master.

On peut également supposer que les outils mathématiques nécessaires à de tels cours introductifs sont potentiellement à la portée de tous les étudiants en sciences de premier cycle universitaire. Cette homogénéité serait plus difficilement atteignable si on englobait des publics de masters ou de formations pré-bac.

Enfin, étudier des enseignants de premier cycle universitaire permet d'apporter une contribution au champ de recherche sur les PCK. Rappelons que sur 85 articles en lien avec les PCK référencés par Evens (2015) pour être analysés, seuls 2 concernaient les PCK en physique à l'université : les autres articles retenus concernaient davantage l'enseignement secondaire et avaient trait à des considérations générales sur les PCK, qui n'étaient pas propres à l'enseignement de la physique. Au contraire, l'étude que nous menons ici apparaît comme pouvant **contribuer à élargir le domaine d'application des PCK à l'enseignement de la physique en premier cycle universitaire.**

Dans cette étude exploratoire, nous nous centrons sur les catégories de PCK faisant consensus et qualifiées des termes génériques de '*Representations & strategies*' et de '*Student learning & conceptions*'.

4.1.2 Choix 2 : la NOS, les modèles et les contextes

Les recherches sur la NOS montrent que **la modélisation est une activité fondamentale** de la physique qui, mise au centre des cours de physique, permettrait aux élèves de mieux en saisir le sens.

Un modèle est une construction intellectuelle, un outil répondant à une question donnée, dans un contexte donné. Dans une approche traditionnelle, les enseignants ne feraient pas fonctionner le modèle : la validité du modèle ne serait pas testée, l'enseignant ne lui associant pas d'expériences. Les modèles ne seraient pas confrontés à la réalité et le recours à l'expérimental, s'il est retenu, ne serait là qu'à titre illustratif, ne permettant pas une remise en cause éventuelle du modèle.

Les recherches sur la NOS soulignent également **l'importance du contexte** dans la démarche de modélisation, le terme contexte étant à comprendre en deux sens : contexte empirique ou champ expérimental de référence pour reprendre l'expression de Tiberghien, contexte pédagogique caractérisé entre autres par les supports d'enseignement et leurs contenus (Hasni, 2014).

Parmi ces supports, l'histoire des sciences fait consensus.

Ces constats nous ont conduits à choisir de mettre au cœur de l'enquête menée la modélisation en l'abordant sous deux angles : modèles et contextes.

Signalons que cet accent sur les modèles, la modélisation et la contextualisation, déjà présents dans les programmes de physique-chimie du lycée, se retrouvent depuis 2013 dans les programmes de physique de CPGE, notamment en filière PC.

Ce programme de CPGE, déjà évoqué dans l'introduction générale de ce manuscrit, **fait référence aux modèles (articulation entre modèles, domaine de validité, etc...)**. En effet, modéliser y figure dans le préambule parmi les compétences attendues de la part de l'étudiant (il

est question d'« *analyser et modéliser* »). **La notion de modèle** est aussi évoquée dans le paragraphe sur la résolution de problèmes, « *qui permet de se confronter à des situations où plusieurs approches sont possibles, qu'il s'agisse de la méthode mise en œuvre ou du degré de précision recherché. Ces situations se prêtent bien à une résolution progressive pour laquelle un premier modèle permettra d'obtenir rapidement un résultat, qui sera ensuite discuté et amélioré* ».

Dans ce programme, **le recours à l'empirie et à l'expérimental** est mis en avant : « *Observer, mesurer, confronter un modèle au réel nécessitent la pratique d'une démarche expérimentale. La formation expérimentale de l'étudiant revêt donc une importance essentielle, au même titre que sa formation théorique. En outre elle donne un sens aux concepts et aux lois introduites.* » Signalons par ailleurs que parmi toutes les filières de CPGE, la PC est celle où le volume horaire dédié aux travaux pratiques est le plus élevé : dans cette filière, du temps est disponible pour expérimenter.

Plus loin dans le programme, il est indiqué que « *Les expériences de cours doivent susciter un questionnement actif et collectif autour d'une expérience bien choisie permettant de faire évoluer la réflexion théorique et la modélisation, d'aboutir à des lois simplificatrices et unificatrices, de dégager des concepts transversaux entre différents domaines de la physique.* »

Concernant la contextualisation, dans le programme de PC, il est indiqué, en lien avec la formation théorique proposée, que « *Le professeur s'appuiera sur des exemples concrets afin de lui donner du sens* ». Plus loin dans le programme, parmi les principes directeurs suggérés au professeur pour organiser son enseignement figure de « *savoir recourir à la mise en contexte des contenus scientifiques : le questionnement scientifique peut être introduit à partir de phénomènes naturels, de procédés ou d'objets technologiques. Lorsque le thème traité s'y prête, le professeur peut le mettre en perspective avec l'histoire des sciences et des techniques, des questions d'actualité ou des débats d'idées.* »

4.1.3 Choix 3 : les modèles dans différentes filières et disciplines

Une discipline scolaire donnée n'occupe pas la même place d'une filière d'enseignement à une autre. Les objectifs d'enseignement associés, notamment en termes de modélisation, diffèrent donc également d'une filière à l'autre *a priori*. Pour autant, **quel que soit le cursus scientifique étudié, un minimum est attendu par rapport à ce qu'est un modèle**. Ainsi, si dans le référentiel licence, parmi les compétences disciplinaires attendues, la notion de modélisation est indiquée de manière explicite dans la mention physique (« *interpréter des données expérimentales pour envisager leur modélisation* », « *valider un modèle par comparaison de ses prévisions aux résultats expérimentaux et préciser ses limites de validité* » (Référentiel de compétences, 2012, p.45) p.45), elle apparaît néanmoins de manière implicite dans la mention sciences pour la santé (« *choisir et mettre en œuvre des outils théoriques permettant de s'approprier les résultats des études expérimentales* » (*ibid.*, p.55)). Il y a donc une logique d'un minimum de connaissances attendues sur les modèles et ses limites, même pour une formation de médecins par exemple. Ce minimum de connaissances nous semble devoir être celui mis en avant par le programme de première scientifique, à savoir « *mettre en œuvre un raisonnement pour identifier un problème, formuler des hypothèses, les confronter aux constats expérimentaux et exercer son esprit critique* »(BO, 2010, p.1).

Cette différence de place qu'occupe une discipline scolaire d'une filière d'enseignement à une autre peut s'expliquer par le fait qu'une discipline scolaire présente plusieurs fonctions : « *dans tous les cas* », elle présente « *une fonction d'ouverture* » (citation de Martinand dans (Jouin, 2002, p.1)). Elle est qualifiée de « **discipline de cœur** » lorsqu'elle correspond à « *l'axe de la filière de formation* » (citation de Martinand dans Lange, 2005, p.5), lorsqu'elle est « *discipline de base de la formation* » (citation de Martinand dans Jouin, 2002, p.1). Elle est qualifiée de « **discipline de service** » lorsqu'elle répond au « *besoin des disciplines de cœur* », « *dans une filière fondée sur d'autres spécialités* » (citation de Martinand dans Jouin, 2002, p.1). Une discipline de service n'a de sens que si elle s'inscrit dans la perspective de formation de la filière et qu'elle y apporte une contribution (Jouin, 2002).

Ainsi, dans une formation à visée professionnelle (formation de techniciens par exemple), la discipline physique a un statut de discipline de service alors qu'il s'agit d'une discipline de cœur dans une formation à visée généraliste de premier cycle (conduisant à une formation d'ingénieur par exemple).

De plus, **le statut du savoir construit** dans une discipline scolaire varie *a priori* en fonction de la visée de formation. Il peut s'agir d'**un objet qu'on travaille** ou d'**un outil** pour étudier un autre objet (Douady, 1992).

Dans une filière de formation qualifiée de physique (par exemple une formation de techniciens ou d'ingénieurs), le contenu de physique enseigné aurait le statut d'objet, tandis qu'il serait un outil dans une filière de santé (par exemple une formation de médecins).

Ces aspects impacteraient les attendus en termes de modélisation, plus ou moins élevés d'un cursus à l'autre, ce qui nous a conduits à choisir d'étudier différentes filières et différentes disciplines. Cela nous donne également l'occasion de contribuer à l'élargissement de la réflexion sur les PCK à des filières où la physique est une discipline de service : « *Il reste à poursuivre le travail pour d'autres grandeurs physiques, à envisager les questions qui se posent pour d'autres contextes scolaires et d'autres dispositifs, quand les sciences physiques ne fonctionnent pas comme une discipline de cœur.* » (Jouin, 2002, p.7).

4.1.4 Choix 4 : le domaine de la physique étudié

L'importance du contexte dans la démarche de modélisation fait consensus au sein de la communauté de recherche sur la NOS (Ryder, 2000). Cette étude exploratoire n'est donc pas menée de manière générale mais centrée sur un domaine de la physique donné. Durant la première année de thèse, nous avons réalisé différentes études préalables (analyse de contenu de la physique, programmes, manuels, travail bibliographique en histoire des sciences et en didactique) afin de restreindre le domaine d'étude et de déterminer l'angle d'approche à adopter.

Les domaines de la physique enseignés au primaire et dans le secondaire ont été très étudiés en didactique. C'est moins le cas de domaines propres à l'enseignement supérieur, en particulier **la mécanique des fluides**. En effet, à l'exception des travaux de Closset et al (Closset, 1992 ; Blondin, 1992a) et de chercheurs de l'Université du Wisconsin (FMCI : '*Fluid Mechanics Concept Inventory*', Martin, 2003b), repris notamment par Fraser (Fraser, 2007), **très peu d'études ont été menées**, tant dans la communauté francophone qu'anglo-saxonne. Seule la

statique des fluides a été massivement traitée (Karlottoglou, 1995 ; Psillos, 1999 ; Psillos, 2004 ; Besson, 2001 ; Besson, 2004).

La mécanique des fluides est **un domaine de la physique très riche mais qui présente de nombreuses difficultés** : contrairement au point ou au solide, le système étudié y est déformable. De plus, plusieurs échelles d'étude sont possibles (microscopique / mésoscopique / macroscopique). Enfin, l'outil mathématique est nécessaire et requiert une certaine dextérité. Par exemple, la maîtrise des fonctions de plusieurs variables est difficile d'accès pour les étudiants, ce qui est souvent indiqué dans des rapports de jury de concours d'écoles d'ingénieurs (par exemple aux oraux des Concours Communs Polytechniques, en filière PC).

Si nous reprenons l'exemple du programme de physique en CPGE filière PC et que nous y analysons l'évocation des modèles et des contextes, nous constatons qu'en mécanique des fluides est notamment travaillée la relation de Bernoulli. Les capacités exigibles associées sont de « *justifier et utiliser cette relation. Interpréter d'éventuels écarts observés en vérifiant les conditions de validité* ».

Pour autant, on constate dans ce même programme que, **concernant par exemple les capacités exigibles de la rubrique « formation expérimentale », il n'est jamais fait référence à la mécanique des fluides** parmi les domaines proposés pour les aborder.

Plus loin, dans la rubrique « *formation disciplinaire* », le seul élément lié à de l'expérimental qui est proposé en mécanique des fluides traite des phénomènes de tension superficielle. Dans ce programme, la référence à une pratique expérimentale est notifiée par une écriture en gras : aucune capacité expérimentale exigible n'est écrite en gras dans la rubrique de mécanique des fluides.

Concernant la relation de Bernoulli, aucune des capacités exigibles citées précédemment (« *Justifier et utiliser cette relation. Interpréter d'éventuels écarts observés en vérifiant les conditions de validité* ») n'est écrite en gras : le recours à l'expérimental n'est pas attendu *a priori*. On constate donc un écart entre les attendus généraux du programme en termes de modélisation et de recours à l'expérimental et ce qui est proposé en mécanique des fluides dans ce même programme.

Notons également qu'un tel écart n'est pas aussi marqué dans les autres domaines de la physique abordés dans ce programme.

Le champ de la mécanique des fluides étant très vaste, il a été décidé de se restreindre à l'étude de **l'écoulement d'un fluide** (l'eau par exemple), à **l'intérieur d'une canalisation fermée** (un tuyau par exemple) : on parle alors d'**écoulement interne**, par opposition à un écoulement externe (un canal par exemple).

Etudier un écoulement interne présente plusieurs intérêts : cela figure au syllabus de tous les différents cursus déjà évoqués. Les champs d'application associés sont variés : hémodynamique dans le corps humain pour les formations médicales, étude de la circulation de la sève dans les plantes en biologie, choix d'une pompe pour un réseau hydraulique pour une formation de techniciens en Contrôle Industriel Régulation Automatisation, étude d'un profil de vitesse pour une formation d'ingénieur, etc...

Etudier un tel écoulement permet également d'aborder les propriétés d'un écoulement (permanent ou non, 'parfait' ou visqueux) et les grandeurs le caractérisant (vitesse, débit, pression, notion de résistance hydraulique).

De plus, une telle étude nécessite de recourir aux lois générales de la mécanique des fluides (la loi de conservation de la masse, l'équation de Navier-Stokes, les cas particuliers de la relation de Bernoulli et de la loi de Poiseuille). Il est ainsi possible de questionner leur emploi par l'enseignant et d'étudier la richesse du modèle que l'enseignant a retenu pour sa séquence d'enseignement.

Par ailleurs, comme nous l'avons constaté lors de nos recherches, l'histoire des sciences rattachée notamment à la circulation d'eau dans une canalisation est riche et variée en mécanique des fluides. Il a également été constaté que recourir à l'histoire des sciences est déjà recommandé dans les années 1950 dans ce domaine : Seeger conseille aux enseignants d'encourager leurs étudiants de premier cycle universitaire à lire les articles originaux de Poiseuille (Seeger, 1953).

Enfin, les expériences de cours associées sont facilement réalisables dans une salle de cours, rapidement exécutables, aisément visualisables et d'un coût modeste. Il existe en outre pléthore de vidéos associées à de tels écoulements. Il n'est pas besoin ici de recourir à une soufflerie, à un banc hydraulique, à des maquettes ou de posséder des fluides non-newtoniens ou des licences de logiciels parfois très coûteuses.

Etudier l'enseignement de la mécanique des fluides apparaît donc comme un domaine riche à explorer en termes de modèles et de contextes.

Durant l'enquête, l'écoulement interne d'un fluide a été abordé via l'étude d'un rétrécissement dans une canalisation, d'une prise de mesures de pression en différents points d'une canalisation de diamètre fixé, des régimes d'écoulement possibles dans une canalisation et des échanges dans un capillaire sanguin. Une partie seulement de ces situations est évoquée dans ce manuscrit. Nous n'abordons ni l'enseignement des écoulements externes (comme par exemple une rivière ou un canal) ni l'enseignement de la turbulence.

4.2 Enoncé de la problématique et des questions de recherche

Du cas particulier de la filière d'enseignement des CPGE évoquée au 4.1, nous avons cherché à élargir le champ d'exploration de ces thèmes de recherche au cas de l'enseignement en premier cycle universitaire. Nous avons souhaité étudier les caractéristiques des modèles que l'enseignant déclare employer et interroger leur utilisation.

A travers l'exemple d'un cours de mécanique des fluides en premier cycle universitaire, et en se focalisant sur l'étude d'un écoulement interne, nos interrogations pourraient être résumées en :

Quelles sont les pratiques ordinaires d'enseignants du supérieur

en termes de modélisation dans le cas de l'écoulement interne d'un fluide ?

Nous déclinons cette problématique en différentes questions de recherche.

Au sein d'une institution donnée :

Quelles sont les propriétés des modèles introduits par les enseignants ? (Question de recherche numéro 1 notée QR1)

Quelles sont les propriétés des contextes auxquels ils font appel ? (Question de recherche numéro 2, QR2)

Quels périmètres d'expertise en termes de modélisation et de contextualisation ces enseignants présentent-ils ? (Question de recherche numéro 3, QR3)

Quelle place les enseignants accordent-ils aux élèves dans leur discours sur leurs pratiques ? (Question de recherche numéro 4, QR4)

Existe-t-il des liens entre les catégories de PCK des enseignants « orientées » modélisation et les catégories de PCK « orientées » contextualisation ? Existe-t-il des liens entre certaines variables explicatives (formation, ancienneté, par exemple) et ces catégories de PCK ? (Question de recherche numéro 5, QR5)

Nous nous plaçons dans la lignée de Shulman en **centrant notre étude sur les enseignants**. Nous choisissons de caractériser leur pratique en ancrant notre travail dans le cadre des PCK. L'analyse de la construction historique d'un modèle d'étude d'un écoulement nous fournit des pistes pour comprendre les modèles, leur articulation ainsi que le recours à l'expérimental retenus par les enseignants interrogés et aborder ainsi la catégorie '*Representations & strategies*'. L'étude bibliographique d'éventuelles difficultés et malentendus nous permet d'aborder la catégorie '*Student learning & conceptions*'.

Nous cherchons ici à analyser les choix pédagogiques de l'enseignant, en lien avec la structuration et l'utilisation d'un modèle en nous limitant à un contenu délimité, ici l'écoulement d'un fluide. Interviennent des éléments cognitifs (structure du modèle), coordonnés à des convictions (ou '*beliefs*'), qui permettent de justifier la variété des choix retenus : en cela nous souscrivons à la contribution de Magnusson sur l'importance des convictions ('*beliefs*'). En effet, les choix pédagogiques retenus par l'enseignant ne relèvent pas que du disciplinaire et font intervenir également son rapport au savoir. Les convictions ('*beliefs*') de l'enseignant sont liées notamment à son propre vécu d'élève mais également à la structure dans laquelle il travaille (structure de l'entité éducative, finalité de la formation, manuel retenu, interactions avec les collègues et les élèves). L'ensemble de ces facteurs impacte les choix de l'enseignant en termes de PCK retenus, ils jouent le rôle de '*Amplifiers & Filters*'. Il s'agit donc d'**un ensemble de dimensions personnelles et institutionnelles** (Roditi, 2013) **qui, considérées ensemble, permettent de rendre compte des pratiques de l'enseignant**. Il s'agit de mettre l'accent sur les connexions entre ces dimensions, « *not only on the amount of knowledge in individual constituent components but also on the growth in the connectedness and complexity of PCK as a whole* » (Park, 2012, p.931).

Hypothèses de recherche

Lors d'un séminaire 'jeunes chercheurs' organisé par l'Ardist (Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies), il avait été fortement conseillé d'énoncer les hypothèses d'étude : suivons cette voie.

Des enquêtes déjà menées en lien avec le recours des enseignants à l'histoire des sciences (par exemple (Guilbert, 1993)), on attend des connaissances ainsi qu'un recours à l'histoire des sciences plutôt faibles de la part des enseignants interrogés.

En France comme aux Etats-Unis, de par la formation reçue par les enseignants-chercheurs et les contraintes institutionnelles fortes qu'ils subissent (cumul d'activités d'enseignement, de recherche et d'administration, prédominance de la recherche sur l'enseignement dans l'avancement de leur carrière), on peut supposer de leur part **un manque de réflexion épistémologique sur leurs pratiques enseignantes, notamment en lien avec les modèles** : « *It seems vital to address the education of university teachers (...) their content knowledge and attitudes towards the use of models and modelling seem to have serious limitations* » (Justi, 2002, p.1289).

Par ailleurs, pour aborder la mécanique des fluides, le recours à l'expérimentation est peu présent dans les programmes et dans les ouvrages français de premier cycle universitaire.

A la lecture d'ouvrages de premier cycle universitaire français et américains, **on s'attend à constater un rapport à l'expérimentation et à la contextualisation très différent dans les deux pays** : à un accent mis sur la construction mathématique du modèle en France correspondrait aux États-Unis une approche résolument tournée vers l'application. Au manque de recours à l'expérimental auquel on s'attend en France devrait correspondre la découverte aux États-Unis d'une approche contextualisée, imprégnée du pragmatisme présent notamment dans la pensée de Dewey (Deledalle, 1965 ; Beaunis, 1993 ; Westbrook, 1993 ; Fabre, 2005 ; Dewey, 2014). De tels écarts devraient transparaître lors d'entretiens avec des enseignants des deux pays et fournir *a priori* des pistes d'évolution pour le système français.

Un autre écart auquel on s'attend est relié à la discipline de rattachement de l'enseignant et à la filière de formation dans laquelle il exerce.

Les usages d'un modèle dépendant de l'institution (Chevallard, 2002 ; Douady 1992), nous nous intéressons à différentes formations, qualifiées de généralistes (CPGE, formation d'ingénieurs de premier cycle universitaire...) ou professionnelles (BTS), où la physique y est tantôt une discipline de coeur, tantôt une discipline de service.

Nous abordons également différentes disciplines (physique, physiologie etc...) et différentes catégories d'enseignants (enseignants-chercheurs, enseignants agrégés, etc... exerçant en France ou aux Etats-Unis).

Ainsi, sur un même thème d'enseignement, par exemple l'écoulement sanguin, les approches proposées par un médecin et un physicien devraient être nettement distinguables, tant en termes de modèle que de recours à l'expérimental.

Signalons que les modes de représentation diffèrent eux aussi d'une discipline à l'autre, ce qu'on pourrait retrouver dans les propos des enseignants interrogés. Bachelard rappelle par exemple la différence de représentation du spectre lumineux en physique et en biologie : à une représentation

linéaire, permettant une ouverture sur l'infra-rouge et l'ultra-violet et donnant le même poids à chaque « *couleur* » en physique correspond, en biologie, une représentation circulaire avec trois couleurs fondamentales, liées aux capteurs de la rétine (Bachelard, 1953).

De plus, il y aurait **un changement de modèle opéré par les enseignants en fonction du domaine et des capacités supposées de leurs élèves** (Hodson, 2008). En adoptant la position d'Hodson et en se restreignant par exemple aux enseignants qualifiés de physiciens, on peut alors émettre l'hypothèse qu'ils adaptent l'approche retenue dans l'élaboration de leur cours au public visé. En effet, un public étudiant qualifié de technicien n'a pas *a priori* les mêmes attentes qu'un public qualifié d'ingénieur : leur rapport au savoir, le type de formation qu'ils suivent et les débouchés associés sont différents. Les attentes de l'enseignant et de l'institution à l'égard de ces deux profils d'étudiants sont *a priori* différentes elles aussi. Sur l'étude d'un même concept enseigné à ces deux profils de public on pourrait s'interroger sur un éventuel écart dans l'approche proposée par l'enseignant.

Nous présentons les caractéristiques des modèles évoqués par les enseignants interrogés et testons leur utilisation (cf chapitre 7).

Puis nous étudions les contextes empiriques et pédagogiques retenus, en particulier le recours à l'expérimental et à l'histoire des sciences (cf chapitre 8). D'une part, nous présentons la variété de contextes empiriques que proposent les enseignants, en lien avec un modèle donné. D'autre part, nous évoquons la variété de contextualisations pédagogiques proposée par les enseignants interrogés. Par exemple, quels supports les enseignants utilisent-ils (manipulations de cours, vidéo, schémas, documents historiques, documentation technique...) ? Justifient-ils leur choix ?

A chacune de ces étapes il s'agit également d'étudier les justifications proposées par les enseignants et si les réponses des enseignants dépendent des filières de premier cycle universitaire dans lesquelles ils exercent (pays d'exercice, discipline de rattachement, visée de formation notamment).

Nous attendons **des spécificités individuelles et des marqueurs liés à l'institution**.

Il s'agit ici d'**une étude exploratoire** des caractéristiques de différentes populations enseignantes. Cette étude se limite donc à mettre en évidence des hypothèses sur ces caractéristiques, sur les ressemblances et différences entre ces différentes populations, ce qui nécessite d'accéder à une variété de profils d'enseignants examinés.

Chapitre 5 Mécanique des fluides

Comme indiqué dans le chapitre précédent, nous cherchons à analyser les choix pédagogiques de l'enseignant, notamment en lien avec la construction et l'utilisation d'un modèle.

Avant d'aborder les résultats de l'enquête menée auprès d'enseignants, nous évoquons le modèle qui est généralement présenté pour étudier un écoulement interne, en physique, dans des formations de premier cycle universitaire conduisant aux écoles d'ingénieurs. Nous étudions également la construction historique du modèle présenté en physique, sous l'angle d'une réflexion sur la NOS. Nous évoquons les contextes et limites de la physique et de la biologie. Puis nous présentons quelques éléments issus de la littérature en didactique et en recherche médicale liés à la mécanique des fluides. Enfin, nous proposons quelques exemples de questionnement sur les pratiques en lien avec les modèles et les contextes.

5.1 Eléments de physique : lois et modèles

Nous rappelons ici, de manière succincte, les éléments théoriques du modèle intervenant dans un cours introductif de mécanique des fluides, en lien avec un écoulement interne.

L'écoulement est supposé incompressible. Le fluide étudié est supposé newtonien. On lui associe une masse volumique ρ et une viscosité dynamique η .

On lui associe des équations dites locales, notamment la loi de conservation de la masse, qui se note $\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho \vec{v}) = 0$ et aboutit à la conservation du débit volumique.

Le mouvement d'une particule de fluide (volume mésoscopique de molécules de fluide) de vitesse \vec{v} est alors régi par l'équation de Navier-Stokes :

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

où \vec{g} représente le champ de pesanteur et P le champ de pression.

Hors de la couche limite, le terme diffusif $\eta \Delta \vec{v}$ est négligeable devant le terme convectif $\rho(\vec{v} \cdot \overrightarrow{grad})(\vec{v})$ dans l'équation de Navier-Stokes.

L'équation se simplifie alors et est couramment appelée équation d'Euler :

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

Dans de nombreux ouvrages français et dans quelques ouvrages anglo-saxons, on parle alors d'écoulement parfait et on va même parfois jusqu'à définir un écoulement parfait comme étant l'écoulement d'un fluide de viscosité nulle.

Enfin, hors de la couche limite, pour un écoulement homogène et permanent, si on se restreint à se déplacer le long d'une même ligne de courant, le terme convectif $\rho(\vec{v} \cdot \overrightarrow{grad})(\vec{v})$, non-linéaire, se simplifie.

Entre deux points A et B d'une même ligne de courant, on a alors conservation d'une grandeur homogène à une énergie (volumique), souvent appelée 'charge' :

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

On parle alors de relation de Bernoulli.

Une autre approche possible consiste à effectuer des bilans (de masse, de quantité de mouvement, de moment cinétique ou d'énergie) pour un volume dit volume de contrôle (quantités entrantes et sortantes sont évaluées).

La viscosité du fluide impose la continuité de la vitesse au niveau des parois.

Les écoulements peuvent être classés en fonction de la valeur du nombre de Reynolds, noté Re . Ce nombre sans dimension, rapport en ordre de grandeur du terme convectif par le terme diffusif vaut :

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

Avec v et d les vitesse et distance caractéristiques du problème.

$Re \ll 1$ correspond à un écoulement dit rampant, $Re \lesssim 2 \cdot 10^3$ correspond à un écoulement laminaire et $Re \gtrsim 2 \cdot 10^3$ à un écoulement turbulent.

Dans le cas d'un écoulement laminaire et permanent, pour un tube de section circulaire de rayon r , l'écart de pression ΔP sur une longueur L est relié au débit volumique D_V (souvent noté Q aux États-Unis) par :

$$D_V = \frac{\pi r^4}{8 \eta L} \Delta P$$

On parle alors de loi de Poiseuille. Le facteur $\frac{\pi r^4}{8 \eta L}$ est souvent noté R_H et appelé résistance hydraulique, par analogie avec la résistance électrique R apparaissant dans la loi d'Ohm ($R_H = \frac{\Delta P}{D_V}$ et $R = \frac{U}{I}$). De là est souvent introduite la notion de pertes de charge linéique $\frac{\Delta P}{L}$. L'étape suivante est d'estimer ces pertes de charge en fonction de différents types de canalisation (pertes dites régulières comme sur l'exemple précédent d'un écoulement dit de Poiseuille, pertes singulières dans un coude, etc.). Les pertes de charge étant très rarement évaluables analytiquement, le problème peut être traité à l'aide de formules semi-empiriques ou de manière graphique, à l'aide du diagramme de Moody par exemple.

5.2 Eléments d'histoire des sciences : construction historique d'un modèle en mécanique des fluides

5.2.1 Introduction

Dans les propositions pédagogiques retenues par la communauté des chercheurs sur la NOS (cf chapitre 2), recourir à l'histoire des sciences fait consensus. L'appliquer à la mécanique des fluides nécessite au préalable d'avoir effectué quelques rappels sur son histoire.

Dans des revues dédiées aux enseignants et chercheurs, comme le BUP en France ou *American Journal of Physics* aux États-Unis, force est de constater que très peu d'articles ont été publiés en lien avec l'histoire de la mécanique des fluides sur la période couvrant les 18^e et 19^e siècles : à ce jour, à notre connaissance, aucun article dans le BUP et un seul dans *American Journal of Physics*, datant de 1953 (Seeger, 1953).

Dans les manuels de premier cycle universitaire, à quelques exceptions près, l'histoire des sciences est 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.

Pour autant, la littérature en histoire de la mécanique des fluides est riche et fait l'objet de recherches actuelles (par exemple, Darrigol et Guilbaud en France).

Le travail mené ici s'inscrit dans le cadre des sciences de l'éducation et non de l'histoire des sciences. 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. La description ici menée découle des travaux préalables, riches et fournis, d'historiens des sciences : essentiellement Darrigol (2002 ; 2002a ; 2003 ; 2005), Hahn (1964), Guilbaud (2007 ; 2012), Dugas (1996), Blay (2007) et Grmek (1990).

La frise du document 5.2.1 retrace les principales étapes de l'histoire de la mécanique des fluides qui ont eu lieu entre le 17^e siècle et la première moitié du 20^e siècle.

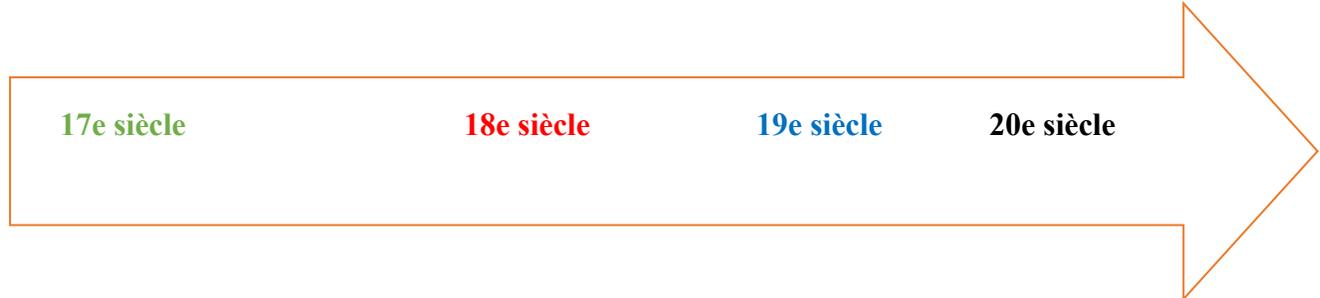
Écoulement via un orifice

Torricelli, Newton

Prise en compte de la viscosité

Navier, Stokes

Helmholtz, Reynolds, Poiseuille



Écoulement « parfait »
Bernoulli (père et fils),
D'Alembert, Euler

Couche limite
Von Karman,
Prandtl

Document 5.2.1

Principales étapes de l'histoire de la mécanique des fluides du 17^e siècle à la première moitié du 20^e siècle

C'est à la période allant du 17^e siècle à la première moitié du 19^e siècle que nous consacrons ce chapitre.

C'est en effet à cette période qu'ont été élaborés les principaux éléments présentés dans un cours introductif de mécanique des fluides. De plus, c'est une période riche d'enseignements sur la construction d'un modèle et sur le rôle de l'expérimentation.

Dans la structure des révolutions scientifiques, Kuhn (2008, p.57) évoque en ces termes le 18^e siècle : « Euler, Lagrange, Laplace, Gauss, consacrèrent tous certains de leurs travaux les plus brillants à améliorer la concordance entre le paradigme de Newton et les observations célestes. Plusieurs d'entre eux travaillèrent simultanément à mettre au point les outils mathématiques nécessaires à des applications que ni Newton ni l'école contemporaine continentale de mécanique n'avaient même envisagées. Ceci est à l'origine d'un grand nombre d'articles et de quelques techniques mathématiques très puissantes pour l'hydrodynamique et pour les problèmes des cordes vibrantes, et, dans l'ensemble, de ce qui fut probablement au 18^e siècle le travail scientifique le plus brillant et le plus ardu. »

Nous nous proposons d'en relater ici certains aspects.

Nous découpons cette période sous la forme suivante : une problématique expérimentale et une tentative d'interprétation au 17^e siècle, qui correspondent aux prémisses, un développement théorique qui présente des limites et aboutit à des difficultés au siècle des Lumières, et enfin un nouveau modèle qui permet de dépasser ces difficultés dans la première moitié du 19^e siècle. Le cas particulier de l'hémodynamique est ensuite discuté.

Les éléments détaillés d'histoire des sciences en mécanique des fluides sont fournis en annexe (cf Annexe B). Dans cette annexe, un ordre chronologique a été retenu pour les présenter. Dans le système éducatif actuel, l'accent étant mis sur les contributions individuelles, nous avons suivi ce type de présentation. Le cas de l'étude de l'écoulement sanguin y est également abordé, de manière séparée, mais en suivant la même trame.

5.2.2 Une problématique expérimentale

Torricelli (1608-1647) étudie le mouvement de l'eau à la sortie d'un vase qui a été percé d'un trou étroit. Il choisit un vase large de niveau d'eau maintenu constant, permettant d'assurer un écoulement quasi-permanent. Il indique : « *Je suppose que les eaux, qui sortent avec violence, ont au point de leur sortie la mesme impétuosité, ou le mesme degré de vitesse, 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.* » (De motu Aquarum (1664), traduction de 1664, citée dans Blay, 2007, p.14).

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. Il est à noter que Torricelli a rencontré Galilée et que ses travaux, notamment l'idée du mouvement parabolique, ont dû l'inspirer.

5.2.3 Une tentative d'interprétation

Torricelli précise les conditions expérimentales dans lesquelles il se place pour obtenir un tel résultat : il indique choisir un récipient « *d'une capacité convenable* » et « *percé d'un petit trou* » (citation de Torricelli dans Blay, 2007, p.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. Il constate que le jet d'eau ne parvient pas à monter jusqu'au niveau de la surface libre du réservoir. Il en conclut que « *L'expérience mesme semble en quelque façon prouver ce principe, bien qu'aussi elle semble en quelque façon le détruire* » (citation de Torricelli dans Blay, 2007, p.122). Huygens conclut à ce propos que la loi de Torricelli n'a pu être « *desmontrée par raison, mais seulement prouvée par expérience* » (citation de Huygens dans Blay, 2007, p.123).

Nordon considère donc que Torricelli « *ouvre une porte de cinématique sans savoir que la dynamique est derrière* » (Nordon, 1992, p.54).

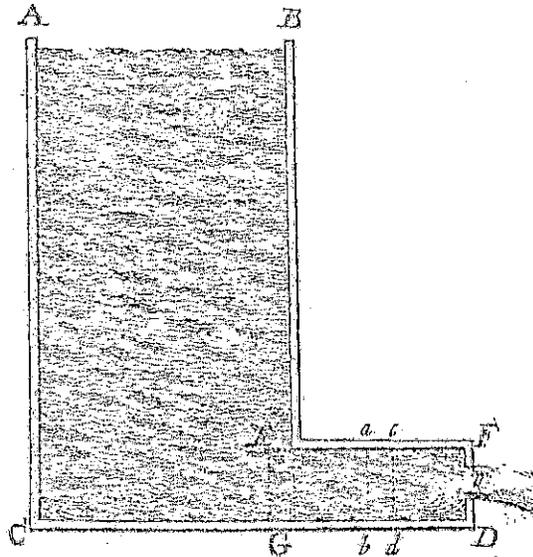
Nordon pointe l'état de la réflexion à cette époque : « *Les difficultés sont considérables car une telle démarche impose le développement d'une science du mouvement dépassant largement l'étude du point matériel ou même des systèmes de corps* » (*ibid.*, p.54).

C'est au siècle suivant qu'une preuve théorique de ce résultat est obtenue, via notamment les travaux de Jean Bernoulli (le père), Daniel Bernoulli (le fils), Jean le Rond d'Alembert et Leonhard Euler. Dans le paragraphe suivant, nous nous limitons à préciser les principales contributions de chacun d'entre eux.

5.2.4 Un développement théorique qui présente des limites

Dans *Hydrodynamica* (1738), Daniel Bernoulli prouve théoriquement la loi de Torricelli via une loi plus générale : la loi de conservation des forces vives. Il s'agit de « l'égalité entre la descente réelle et la montée potentielle ».

Daniel Bernoulli reprend la situation étudiée par Torricelli. Sur la gravure du document 5.2.4.1 figure un récipient *ABGC* rempli, de surface libre *AB*.



Document 5.2.4.1

1^{ère} gravure extraite d'*Hydrodynamica* et reproduite dans Darrigol, 2005, p.8

Via un rétrécissement *EG* lui est associée une canalisation horizontale *EFDG* présentant une ouverture *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, la portion notée *abcd*). 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 d'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 du tube *FD* 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' (Nordona, 1992, p.202).

La gravure du document 5.2.4.2 correspond à la même configuration, avec deux orifices supplémentaires placés en *g* et *l*.

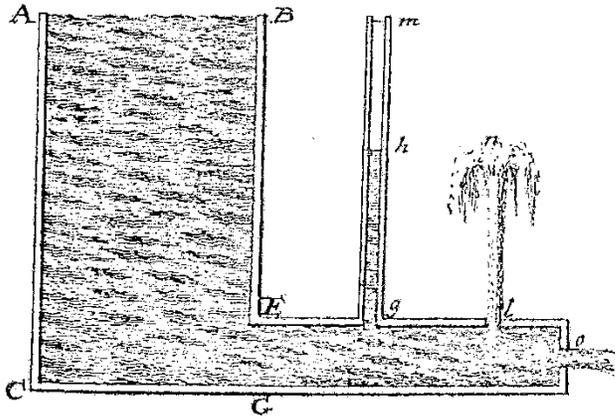


Fig. 1.5. Effects of the velocity dependence of pressure according to Daniel Bernoulli ([1738] plate).

Document 5.2.4.2

2^e gravure extraite d'Hydrodynamica et reproduite dans Darrigol, 2005, p.9

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 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 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 stationnaire. On observe sur la gravure du document E indiqué en annexe C.1 qu'il évoque ce qui se produit dans la zone IDF.

D'Alembert, dans le *Traité des fluides* (1744) et *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 les 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 ».

C'est dans son oeuvre *Principes généraux du mouvement des fluides* (1755) qu'Euler structure les équations du mouvement d'un fluide en écoulement. Le fluide est analysé comme étant un milieu continu pour lequel on étudie le champ de vitesse.

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

Leur non-linéarité implique l'absence d'une solution générale connue. La recherche d'une solution va être une des préoccupations majeures des savants de l'époque. 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.

D'où l'existence de tensions, que nous présentons au paragraphe suivant.

5.2.5 Un obstacle

D'une part se construit une communauté universitaire autour de cette approche théorique de la mécanique des fluides, communauté composée essentiellement d'académiciens. Elle suit la démarche de raisonnement de la mécanique rationnelle : déterminer les causes, mettre en évidence les conséquences. Il s'agit de généraliser. Il y a une recherche de progrès et en cela cette communauté s'inscrit dans la lignée du cartésianisme. Ainsi, sur l'exemple des ouvrages d'hydraulique, Hahn constate que jusqu'au 17^e siècle prédomine une tradition artisanale et les articles des ouvrages sont classés par ordre alphabétique : il s'agit d'énumérer les savoirs. A partir du 18^e siècle, une nouvelle approche apparait et aboutit à modifier l'ordre des chapitres des ouvrages : on cherche désormais à enseigner les savoirs et non plus seulement à les énumérer. Il s'agit de faire comprendre le raisonnement afin d'accéder à de nouvelles méthodes (Hahn, 1964).

D'autre part, les ingénieurs, artisans et officiers de la marine continuent d'aborder la mécanique des fluides de manière pratique, comme cela peut se lire dans l'article « *Vaisseaux* » de l'Encyclopédie : « *L'expérience est la base de toutes les regles des constructeurs. Cette expérience consiste à comparer la bonté de différens bâtimens de divers gabarits, & à choisir une moyenne forme qui réunisse les diverses qualités de ces bâtimens. Ils se reglent encore sur les poissons, & ils s'imaginent que de tous les poissons, celui qui va le mieux, doit avoir la forme convenable à un parfait vaisseau. Ce poisson est selon eux le maquereau : ce sont les portions de cet animal que l'on doit suivre. Ainsi l'a du-moins fait un des plus fameux constructeurs françois : c'est M. Hendrick. »*

La transformation déjà opérée dans les arts pratiques pousse néanmoins les artisans à davantage solliciter les savants pour résoudre leurs problèmes, même si les traditions, les cultures, les modes de formation, les objectifs visés et les contextes employés diffèrent entre ces deux communautés.

La fin du 18^e siècle, en particulier la décennie 1770-1780, est une période de fortes tensions entre ces deux communautés, tensions qui sont perceptibles lors de l'attribution de postes et de prix. C'est le cas notamment pour une place d'associé à l'Académie royale des sciences de Paris en 1768, pour le choix des enseignants à l'Ecole de Mézières, lors de la construction du canal de Picardie en 1769 ou encore lors des élections à la chaire d'hydrodynamique du Louvre en 1775.

Le décalage entre ces deux communautés est tel que l'historien des sciences Hahn le qualifie de « *gouffre entre la théorie et l'expérience* » (citation de Hahn dans Guilbaud, 2007, p.184). Ce gouffre aboutit à des dénominations elles-mêmes différentes pour caractériser les champs d'étude de ces deux communautés, l'hydrodynamique pour les académiciens et l'hydraulique pour les ingénieurs, ce que l'on peut résumer dans le tableau 5.2.5.

Dénomination du champ d'étude	Hydraulique	Hydrodynamique
Membres	Ingénieurs, Artisans mécaniciens de la marine	Académiciens
Exemples de membres connus	Borda	D'Alembert, Bossut, Condorcet

Tableau 5.2.5
Hydraulique et hydrodynamique : quelques membres

Les difficultés sont importantes entre ces deux communautés mais également au sein de chacune d'entre elles.

En effet, l'approche pratique des ingénieurs ne permet pas l'obtention de résultats généraux : par exemple, à chaque type de canalisation est associée une formule empirique pour évaluer le débit. Les premiers résultats concernent des écoulements à surface libre, étendus ensuite au cas des conduites. Nordon estime à une centaine le nombre de formules au 19^e siècle en lien avec les pertes de charge, dues essentiellement à des Français et des Anglais (Nordong, 1990). Ce nombre élevé de formules atteste du domaine de validité restreint de chacune de ces formules, liées aux conditions de réalisation des expériences.

L'approche théorique présente, elle aussi, des lacunes : les phénomènes dissipatifs visqueux n'interviennent pas dans les formules retenues. Les prévisions annoncées par le modèle se trouvent donc très souvent en décalage fort avec les résultats expérimentaux obtenus.

D'Alembert l'évoque notamment dans l'article « *Fluide* » de *l'Encyclopédie*, qu'il rédige : on peut y lire que cette matière « *pourroit bien être du nombre de celles où les expériences faites en petit n'ont presque aucune analogie avec les expériences faites en grand [...] où chaque cas particulier demande presque une expérience isolée, & où par conséquent les résultats généraux sont toujours très-fautifs & très imparfaits* » (Guilbaud, 2012, p.223).

Navier, présentant un mémoire à l'Académie des sciences le 18 mars 1822, évoque des différences considérables ou totales que présentent dans certains cas les effets naturels avec les résultats des théories connues (Dugas, 1996).

Ce que l'on nomme aujourd'hui le 'paradoxe de D'Alembert' est source de confusions et de perplexité pour les savants de l'époque. D'Alembert en arrive à écrire que « *la comparaison de la Théorie et de l'Expérience est peut-être impossible* » (citation de d'Alembert dans Hahn, 1964, p.19).

5.2.6 Un nouveau modèle qui permet de dépasser ces difficultés

De par la démarche de Bossut et de Borda, le rapprochement entre les deux approches, théorique et expérimentale, s'enclenche.

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'Ecole Polytechnique en France qui propose un nouveau type d'enseignement contenant, entre autres, de l'hydrodynamique et que suivent Navier, Coriolis, Saint-Venant. Plus tard, ils y enseigneront, ainsi qu'à l'Ecole des Ponts et Chaussées, tout en étant membres de l'Académie.

Hydrodynamique et hydraulique sont associées.

C'est donc au début du 19e siècle que le fossé entre approche pratique et théorique peut commencer à s'estomper. A l'occasion des interférences entre ces deux approches, chacune d'entre elles évolue sans pour autant fusionner l'une avec l'autre.

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* » comme l'indique Guilbaud (2007, p.27), citant Hahn. Le tableau 5.2.6 précise les formulations retenues par les historiens Hahn et Blay pour qualifier ce basculement de périodes.

Historien des sciences	Hahn	Blay
Dénomination proposée des étapes	Evolution des idées (de Bernoulli à Euler)	Construction d'un corps de science (de Torricelli à Lagrange)
	↓	↓
	Etape du retour vers le concret	Développements (prise en compte de la viscosité)

*Tableau 5.2.6
Hydraulique et hydrodynamique : dénominations des étapes*

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, 1964) 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 19e 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 avec une infinité de degrés de liberté : il y a donc très peu de cas où on sait résoudre ces équations. Toutes les avancées du 19e 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.

Concernant l'évolution d'une théorie, Darrigol signale trois étapes, applicables au cas de la mécanique des fluides : la théorie est homogène au début, s'en suit une structure modulaire, puis une évolution qui fait suite d'une part à la confrontation de la théorie avec l'expérience et d'autre part aux tentatives réductionnistes qui visent à trouver une théorie plus générale.

Parmi ces nouveaux 'schémas conceptuels' imaginés au 19^e siècle en mécanique des fluides figure la viscosité, concept développé notamment par Navier, élève de l'Ecole Polytechnique et des Ponts. Il veut appliquer des théories mathématiques à des problèmes concrets. Il cherche notamment à améliorer la compréhension de la perte de charge dans une canalisation : ses résultats ont été validés dans le cas d'un capillaire mais pas dans celui d'une canalisation de plus grande taille, ce qu'il a mal vécu. Navier s'intéresse aux conditions aux limites d'un écoulement et aboutit à l'introduction d'un coefficient lié au glissement de la couche liquide sur la paroi (cette hypothèse sera réfutée, à la suite des travaux de Stokes et de Poiseuille).

Pour accéder à l'équation dite de Navier-Stokes, Navier, Cauchy, Poisson et Saint-Venant, contrairement à Stokes, partent de la théorie élastique des solides. L'obtention de l'écriture des lois de l'élasticité constitue en effet une des avancées du début du 19^e siècle. Navier y travaille avant de formuler ses résultats d'hydrodynamique. Chacun des chercheurs cités emprunte à la démarche des autres mais les méthodologies sont différentes d'un chercheur à l'autre, d'où le rejet par chacun des travaux antérieurs des autres (Dugas, 1996). Navier utilise également une hypothèse atomique plutôt qu'une approche continue pour obtenir les équations du mouvement en trois dimensions d'un corps élastique et pour en déduire la nécessité d'ajouter un terme de viscosité dans l'équation d'Euler. Cette hypothèse moléculaire ne sera pas retenue par la suite par la communauté scientifique. Néanmoins, Dugas insiste sur son importance dans la structuration de ce modèle. Il s'agirait d'une grande avancée. En effet, d'une part, ce terme supplémentaire tient compte des interactions moléculaires et d'autre part, la démarche de Navier est à la fois cohérente avec une approche appliquée qualifiée d'ingénieur et avec une approche théorique. Il lie une approche 'macroscopique' régie par des équations aux dérivées partielles et la théorie moléculaire de Laplace. Pour autant, signalons que son approche n'a pas convaincu ses contemporains.

Darrigol conclut qu'observer des écoulements a permis d'obtenir des propriétés des solutions du problème et que l'obstacle majeur réside dans les mathématiques. En mécanique des fluides, les équations fondamentales s'avèrent être connues dès le début de l'étude de ce domaine. Ce qui a mis du temps, c'est de pouvoir les appliquer à des cas concrets. L'écart entre fondements théoriques et phénomènes est encore plus grand en mécanique des fluides que dans d'autres domaines de la physique.

La réconciliation entre les approches hydraulicienne et hydrodynamicienne n'est néanmoins visible qu'au début du 20^e siècle. Darrigol estime en effet que ce fossé perdure jusqu'au 20^e siècle, citant Wien, qui oppose les deux démarches en 1900 : « *in hydrodynamics... the real processes differ so much from the theoretical conclusions, that engineers have had to develop*

their own approach to hydrodynamics, usually called hydraulics. In this approach, however, both foundations and conclusions so much lack rigor that most results remain confined to empirical formulas of very limited validity » (citation de Wien dans (Darrigol, 2005, p.215)).

5.2.7 Le cas de l'étude d'un écoulement sanguin

Poursuivons ces rappels historiques avec le cas particulier de l'étude d'un écoulement sanguin, dont le détail est lui aussi fourni en annexe (cf B.5).

Nous nous concentrons ici essentiellement sur l'apport à l'hémodynamique de Jean Léonard Marie Poiseuille, dans la première moitié du 19^e siècle. Ses principaux résultats apparaissent dans sa thèse en médecine, intitulée *Recherches sur la force du cœur aortique* (1828), ainsi que dans deux présentations à l'Académie des sciences, *Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres* (1840) et *Ecoulement des liquides de nature différente dans les tubes de verre de très petits diamètres* (1843).

Poiseuille débute ses études à l'Ecole Polytechnique. L'X ayant fermé un an, Poiseuille part en médecine. Lors de son année d'étude à l'Ecole Polytechnique, l'influence de Petit sur ses qualités expérimentales est notée (Guillerme, 2015).

Les mesures *in vivo* du sang posent problème. Poiseuille choisit donc d'étudier d'autres liquides, en débutant par de l'eau distillée. Dans le travail de Poiseuille que Guillerme (2015, p.44) évoque, « *le sang se meut donc dans des tubes vivants comme le ferait un liquide dans un tube inerte* ». Guillerme note que « *la comparaison entre le réseau sanguin et le réseau hydraulique n'est pas simplement métaphorique ou fortuite* » (*ibid.*, p.44) : elle fait suite à des discussions à l'Académie et à d'autres recherches contemporaines.

Poiseuille présente des résultats sur l'écoulement d'un fluide dans une canalisation circulaire de rayon r . La version actuelle de la loi de Poiseuille indique que sur une longueur de canalisation L , la chute de pression $P_1 - P_2$ est reliée au débit volumique D_V par la relation $P_1 - P_2 = \frac{8\eta L}{\pi r^4} D_V$ avec η la viscosité dynamique du fluide en écoulement. Il est à noter cependant que Poiseuille ne fait pas référence au coefficient de viscosité dynamique dans ses écrits. Il évoque un coefficient de proportionnalité entre le débit et la différence de pression qui dépend de la température et du fluide considéré. La viscosité dynamique est pourtant déjà introduite par Navier en 1823, mais Poiseuille n'a pas connaissance *a priori* de ces travaux, ni de ceux de Stokes.

Le dispositif expérimental mis en place par Poiseuille est complexe. Le problème de la reproductibilité des mesures le pousse à l'améliorer. Poiseuille tient cas de facteurs correctifs. Un travail soutenu est mené sur la mesure du diamètre des capillaires utilisés. Leur dépendance en température, qui n'est pas linéaire, est étudiée. On reconnaît aujourd'hui la grande qualité de ses mesures au vu de l'estimation de la viscosité de l'eau qui peut en être déduite.

Dans ses expériences, Poiseuille monte jusqu'à 8 atm (explosion à 10 atm). Il emploie dix tubes de diamètres différents, allant de 15 à $600 \mu\text{m}$. Ces tubes sont ensuite découpés pour faire varier le paramètre 'longueur' L . Il fait varier la température de 0°C à 45°C lors d'une série de mesures.

Les résultats de Poiseuille sont validés par la communauté scientifique via des mesures similaires aux siennes pour le mercure et l'éthylether. Pour autant, de son vivant, Poiseuille est moyennement reconnu par sa communauté.

Hagen obtient des résultats analogues à ceux de Poiseuille en 1839. La première preuve mathématique de la loi de Poiseuille est due à Hagenbach en 1860, soit une vingtaine d'années après les travaux de Poiseuille.

Stokes, à l'Université de Cambridge, a également résolu ce problème en 1845, via l'équation de Navier-Stokes. Stefanovska (1999, p.33) indique que « *it was Georges Stokes himself who, in 1845, solved the problem of Poiseuille flow as an application of the Navier-Stokes equations, but he did not publish his results because he believed that they conflicted with experiment : he was evidently unaware of Poiseuille's work* ». Mais ses résultats étant différents de ceux de Bossut et de Du Buat, il ne les publie pas, doutant de son hypothèse de nullité de la vitesse du fluide au contact des parois : « *but having calculated, according to the conditions which I have mentioned, the discharge of long straight circular pipes and rectangular canals, and compared the resulting formulae with some of the experiments of Bossut and Du Buat, I found that the formulae did not at all agree with experiment* » (citation de Stokes dans Sutura, 1993, p.12).

5.3 Contextes et limites de la physique et de la biologie

La mécanique des fluides est employée dans des contextes empiriques variés, auxquels sont associées des disciplines variées.

D'un cursus d'enseignement à un autre, les contextes empiriques varient *a priori*.

En physique, dans les manuels, figurent des contextes où existe un rétrécissement, souvent dû à un obstacle (circulation sanguine, circulation de la sève, vidange d'un réservoir, jet d'eau, terrier et cheminée, débitmètre), des contextes où l'écart en pression est fixé, d'autres où le débit est fixé. La vie quotidienne est évoquée (vaporisateur, etc.), mais aussi l'aéronautique (étude d'une aile d'avion), la circulation atmosphérique, la circulation sanguine, les appareils de mesure (débitmètre, tube de Pitot), les réseaux hydrauliques (réseau hydraulique urbain ou en sortie d'un barrage) ou encore le cas d'un objet se déplaçant dans un liquide statique.

En physiologie animale, branche de la biologie qui étudie les fonctions et les propriétés des organes et des tissus des animaux au sein de l'organisme, figure essentiellement le cas de la circulation sanguine.

L'autre contexte en physiologie concerne le système respiratoire. Grotberg (2011) évoque le cas des poumons humains dont la surface d'échanges gazeux est de l'ordre de la taille d'un terrain de football. Les écoulements s'y effectuent dans une gamme de nombres de Reynolds très large (de très inférieur à 1 dans les alvéoles à très supérieur à 1000 dans la trachée). Le problème du manque de surfactant naturel est indiqué comme étant un vrai enjeu en termes de mortalité pulmonaire. La pathologie des oedèmes pulmonaires est également abordée.

Enfin, en biologie végétale, le cas de la montée de la sève dans le xylème est évoqué.

Même en se restreignant à un même contexte empirique, on constate une approche différente en physique et en biologie (ici physiologie animale) : prenons l'exemple d'un écoulement sanguin.

Il s'agit, en physique, d'estimer la nature de l'écoulement dans une veine et une aorte, d'obtenir le profil de vitesse en lien avec le débit sanguin, à partir de l'équation de Navier-Stokes. Les parois sont alors supposées imperméables et indéformables.

En physiologie, au contraire, l'obtention du profil de vitesse n'est pas un enjeu. Sont décrits les réseaux artériels, veineux et les réseaux des capillaires au sein de l'organisme, ainsi que la conséquence de la taille de ces « canalisations » sur l'ordre de grandeur de la vitesse dans chacune d'elles. L'objectif est d'appréhender le fonctionnement du système cardiovasculaire, notamment de comprendre que les échanges entre le sang et le milieu interstitiel ont lieu principalement au niveau des capillaires.

Pour comprendre ces échanges, les « canalisations » sanguines sont ici abordées comme étant des canalisations perméables et déformables, contrairement à l'approche retenue en physique.

Il s'agit en effet de décrire la complexité des échanges qui ont lieu au niveau des parois perméables et de comprendre comment l'organisme régule le diamètre des vaisseaux sanguins grâce aux phénomènes de vaso-dilatation et de vaso-constriction via l'interaction entre le système nerveux, les fibres musculaires et les vaisseaux sanguins. Les pathologies cardiaques, dont l'obstruction des artères à cause des graisses, sont également évoquées.

Physique et biologie ne cherchent pas à répondre au même type de questions : les savoirs associés ont donc des fonctions différentes.

5.4 Eléments issus de la littérature en didactique et en recherche médicale liés à la mécanique des fluides

Nous proposons quatre rubriques dans ce paragraphe : une première où on aborde des inexactitudes et oublis observés dans des manuels, programmes et articles de recherche médicale, une deuxième en lien avec les conceptions et les difficultés des élèves et étudiants, une sur les enseignants et une dernière sur des propositions pédagogiques associées, déjà formulées par des enseignants et des chercheurs.

5.4.1 Manuels d'enseignement, programmes et articles de recherche médicale : des inexactitudes, des oublis

Cas de la statique des fluides

Besson (2001) propose un état de l'art très complet de l'enseignement de la statique des fluides dans le chapitre 2 de sa thèse. Ses travaux sont très fortement inspirés de ceux de Kariotoglou, Koumaras et Psillos (Kariotoglou, 1995).

Pour mener son étude en Grèce, Psillos (1999) part des contenus, des instructions ministérielles et de leur mise en situation. Il constate que tantôt les phénomènes sont expliqués avec le concept de force (par exemple dans le cas d'un solide immergé), tantôt avec celui de pression (lorsqu'il s'agit

d'une presse hydraulique). Il constate que la pression P est introduite à la fois par $P = \frac{F}{S}$ (avec F la force et S la surface associées) et par $P = d g h$ (avec d la masse volumique du fluide considéré, g le champ de pesanteur et h l'écart d'altitude associé à l'écart de pression P).

En France, signalons que les programmes actuels du secondaire poussent également à introduire la pression par $P = \frac{F}{S}$. Par exemple, dans le programme de physique de première STI2D, on peut lire : « *Caractériser un fluide incompressible. Exprimer la pression comme une force surfacique* ».

Cas de la dynamique des fluides

Dans la littérature scientifique consultée, issue de revues de recherche ou d'enseignement et liée aux écoulements, certains articles ont attiré notre attention de par leur manière d'aborder (ou non) la validité du modèle employé pour étudier un écoulement. Nous évoquons quelques articles dans ce qui suit.

Des confusions dans des articles de didactique

Dans le domaine de la didactique, Levy (2013) propose à des enfants des expériences à base de bouts de tuyaux à connecter afin d'étudier leurs conceptions sur un écoulement d'eau. Levy (2013, p.547), évoquant à quel niveau scolaire l'écoulement de fluides est traditionnellement enseigné, indique comment il obtient l'expression du débit en fonction des paramètres du problème étudié : « *its principles are typically presented and formulated in terms of conservation of energy (Bernoulli's Law), with pressure as a central concept. These principles together with Poiseuille's Law were used to derive how the rate of flow is modified by variations in the system* ». Combiner dans un même raisonnement la relation de Bernoulli et la loi de Poiseuille (« *together with* ») est pour le moins surprenant. **Aucune allusion aux domaines de validité respectifs de ces lois n'est évoquée** ailleurs dans l'article.

Dans un document de travail proposant des tests sur les conceptions des élèves sur l'écoulement du sang dans le corps humain, on a pu constater **un amalgame entre les hypothèses d'écoulement parfait et d'écoulement incompressible** (Guide, 2010).

Dans un compte-rendu d'activité à un symposium, Mora Munoz (2006) fournit un dessin schématisant un seau rempli d'eau, présentant trois trous à des hauteurs différentes, comme indiqué sur la figure 5.4.1. La **représentation** proposée pour la forme du jet d'eau en sortie du trou le plus bas, horizontale sur une grande distance, est **surprenante**. Il apparaît peu probable que l'expérience ait été réalisée avant de proposer une telle schématisation.

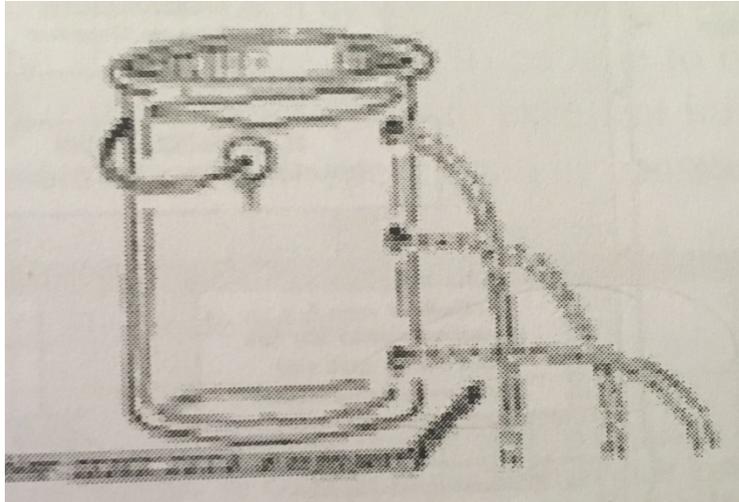


Figure 5.4.1
Exemple proposé dans un compte-rendu d'activité

Des malentendus dans des articles liés au biomédical

Dans le bilan d'articles qui suit, un accent a été mis sur des domaines où la mécanique des fluides est une discipline de service et non de cœur, en particulier le domaine biomédical. On peut s'attendre à une construction et une exploitation des modèles différentes de celles traditionnellement retenues en mécanique des fluides.

L'enseignement de la circulation sanguine dans le cursus biomédical a fait l'objet de nombreux articles et la mécanique des fluides y intervient, en particulier la loi de Poiseuille, déclarée comme étant la pierre angulaire (« *the cornerstone* » (Cavendish, 2008, p.749)) de l'étude du système circulatoire sanguin.

Un point commun aux situations évoquées dans le domaine biomédical auxquelles nous avons eu accès est l'absence d'interrogation sur le domaine de validité du modèle physique retenu.

En voici quelques illustrations :

La sonographie Doppler permet de déterminer le débit volumique sanguin (Kuhlman, 2014). La loi de Poiseuille y est employée. Lors du commentaire des résultats, à aucun moment la validité de la loi de Poiseuille n'est remise en cause.

Lors d'un compte-rendu de recherche, Li (2010, p.725) compare l'emploi de deux fins cathéters intraveineux à l'emploi d'un plus large. Le résultat expérimental *in-vivo* est annoncé comme étant à l'opposé de celui attendu par la loi de Poiseuille : « *in-vivo conditions often differ from theoretical calculations* ». Aucune référence au domaine de validité de la loi de Poiseuille n'est proposée. Il n'y a pas non plus de remarques sur la précision de l'estimation du diamètre des cathéters par exemple, qui pourrait expliquer l'écart observé.

Dans un article présentant un rappel historique de l'hémodynamique, Badeer (2001) évoque les différents résultats expérimentaux de Poiseuille et de Hagen. La loi de Poiseuille y est énoncée en ces termes : $P_1 - P_2 = k L \eta \frac{Q}{r^4}$. Le facteur k est annoncé comme ayant été trouvé égal à $\frac{8}{\pi}$ (« *k was found to be* ») : cette formulation est troublante. Comment cette valeur a-t-elle été obtenue ? Dans le paragraphe qui précède cette formule, Badeer met en avant la démarche expérimentale de Poiseuille et de Hagen alors qu'il n'est pas possible d'avoir trouvé expérimentalement un coefficient numérique valant exactement $\frac{8}{\pi}$. Cette tournure de phrase surprend d'autant plus que dans le paragraphe suivant, Badeer indique que la loi de Poiseuille peut être **aussi** démontrée mathématiquement (« *it can be derived also mathematically* ») : l'auteur ne se réfère donc pas *a priori* à une approche théorique pour obtenir la valeur exacte de ce coefficient k . Et pourtant, comment autrement que par un modèle serait-il possible d'annoncer une valeur de $\frac{8}{\pi}$?

Par ailleurs, Pfitzner (1976, p.274) énonce dans un article la loi de Poiseuille comme étant $Q = K P$ avec Q le débit et P « *the pressure producing the flow* ». Le risque de confusion entre la pression en un point du réseau sanguin et l'écart de pression entre deux points apparaît nettement. On peut se demander s'il s'agit d'un abus de notation, d'une confusion propre à l'auteur ou d'une confusion partagée par la communauté enseignant en Biomédical.

Enfin, signalons que Badeer indique qu'aux États-Unis, dans un cours d'hémodynamique, tout serait ramené à des équations en pression. Il est question dans son article de sources de pression (« *sources of pressure* » (*ibid.*, p.44)). Dans un autre article d'un autre auteur, la pression est assimilée à une énergie potentielle : « *the energy is stored as a pressure (potential energy)* » (Carroll, 2001, p.11). Il s'agit d'expression qu'on ne retrouve pas dans des manuels français. Se trouve là une piste possible d'écarts d'approche entre les deux pays.

5.4.2 Elèves et étudiants : difficultés et conceptions

Le cas de la statique des fluides : travaux de Psillos

Psillos (2004) aborde la construction d'une situation d'enseignement par des néo-titulaires : il cherche à analyser le lien entre les concepts primaires des néo-titulaires et le modèle à enseigner. Il propose une analyse de la pensée de Pascal : il estime que chez Pascal, la notion de pression serait plus proche de la notion actuelle de force que de celle actuelle de pression. Historiquement, il aurait fallu du temps pour distinguer ces deux concepts.

Le modèle envisagé, faisant intervenir la pression et la force, nécessite de transformer les modèles des chercheurs pour les rendre compréhensibles par les étudiants (travail de transposition). Il insiste notamment 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.

Chez une majorité d'élèves du secondaire, le fluide serait vu comme différent du solide, du liquide ou du gaz.

La pression est liée à la profondeur et à la nature du liquide. Pour certains élèves, c'est la pression qui est transmise à travers les liquides. Pour d'autres, c'est la force. La force dominerait la pression. Les propriétés vectorielles de la force sont attribuées à la pression.

Le cas de l'écoulement d'un fluide : travaux de Closset

L'objectif de l'équipe de Closset (Blondin, 1992a) est d'améliorer l'enseignement de l'électricité. Ils abordent l'écoulement d'un liquide dans un circuit fermé comme analogie possible pour l'étude d'un circuit électrique. Signalons qu'ici, 'circuit fermé' désigne un circuit hydraulique bouclé sur lui-même.

Cette analogie entre hydraulique et électrique est déjà évoquée par Bachelard (1973, p.98) : *« précisément, la science moderne se sert de l'analogie de la pompe pour illustrer certains caractères des générateurs électriques ; mais c'est pour tâcher d'éclaircir les idées abstraites de différences de potentiels, d'intensité de courant. On voit ici un vif contraste des deux mentalités : dans la mentalité scientifique, l'analogie joue après la théorie. Elle joue avant dans la mentalité préscientifique ».*

Closset rappelle l'usage par des élèves de la métaphore du fluide en mouvement en électricité, mise en évidence par Johsua puis Benseghir dans les années 1980.

L'étude de Closset 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 d'une cinquantaine de novices.

Les situations envisagées concernent un circuit hydraulique. Il est constitué d'une canalisation fermée qui est reliée à une pompe et qui présente un ou plusieurs rétrécissements, une ou plusieurs ramifications.

Les chercheurs constatent des obstacles conceptuels. Trois idées reçues sont mises en évidence, liées à un raisonnement qualifié de séquentiel : la section diminue donc le débit volumique diminue, la section diminue et une même quantité d'eau doit traverser une section donnée donc le débit volumique augmente (il y a confusion entre le débit volumique et la vitesse moyenne), enfin, le rétrécissement n'aurait pas d'influence sur l'amont du circuit. Le rétrécissement n'aurait un impact que localement.

Closset note que le transfert à l'hydraulique de compétences acquises dans d'autres domaines de la physique (électricité, circulation sanguine notamment) paraît relativement faible.

Il signale que des élèves ont des difficultés à appréhender le problème dans son ensemble : ils ne voient pas l'importance de l'aspect fermé du circuit.

Il repère quatre principaux modes de raisonnement (Closset, 1992) : un raisonnement local, 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.

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 (1992, p.155) 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' ».

Signalons que dans un document de travail datant de 2010, intitulé *The Humanized Physics Project* et proposant des tests sur les conceptions des élèves sur l'écoulement du sang dans le corps humain (*'What is blood doing in our bodies ?'*), une partie du test est une reprise des questions posées par Closset (Guide, 2010).

Le cas d'écoulements dans le corps humain

Alkhalwaldeh étudie des conceptions naïves de collégiens liées à l'écoulement sanguin. Une perdurerait même après une séquence d'enseignement : « *blood pressure is lowest in the veins because blood velocity is lowest in veins* » (Alkhalwaldeh, 2007, p.379). Comprendre l'écoulement sanguin nécessite pour l'élève de comprendre et d'appliquer à la fois des concepts de physique, de chimie et de biologie.

Les lycéens et étudiants auraient tendance à concevoir le système de digestion-excrétion comme étant un tuyau continu à parois imperméables. Dans l'échantillon étudié par Clement (1991), 90% de lycéens, 72% d'étudiants de 1^{ère} année de biologie et 57% d'étudiants de 2^e année de biologie partagent une telle conception. Cet exemple illustrerait le primat de la perception, avec une conception du micro à l'image du macro (Lhoste, 2009). Il y aurait alors nécessité de construire l'idée que le tube digestif ne peut pas être continu ou étanche. Ces conceptions, constatées pour le système digestif, pourraient l'être également pour le système sanguin.

5.4.3 Enseignants

Statique des fluides

Pour certains enseignants, les modèles utilisés en statique des fluides seraient fondés essentiellement sur le concept de force (Psillos, 2004) : le programme débute avec l'étude des solides et il y est question de transmission de forces dans un liquide.

D'autres enseignants fonderaient les modèles sur le concept de pression via l'étude de l'atmosphère. Cela permettrait d'englober liquide et gaz dans la catégorie des fluides.

Le cas de formations biomédicales

Concernant les articles lus en lien avec l'enseignement de l'écoulement sanguin en cursus biomédical, nous formulons quatre remarques :

La **complexité du phénomène à étudier** est mise en avant (Carroll, 2001). Par exemple, le système de régulation cardiovasculaire nécessite une pression constante et donc un débit volumique contrôlé par la résistance artérielle dans les artères. Dans les tissus, le débit est contrôlé par les besoins métaboliques des tissus.

Les **phénomènes modifiant la forme de la paroi des canalisations sanguines** sont étudiés (Stefanovska, 1999).

Par exemple, Stefanovska rappelle que le contrôle du mouvement radial des vaisseaux, permettant la contraction et la relaxation des muscles au contact des parois des vaisseaux (« *myogenic process* »), est assuré par le système nerveux via la différence de concentration en ions à l'intérieur et l'extérieur de la membrane musculaire.

Par ailleurs, **l'approche la plus commune pour étudier les mécanismes artériels serait l'analogie électrique**, reposant sur une linéarité entre la différence de pression dans une artère et le débit volumique (Parker, 2009).

Enfin, concernant les conceptions des enseignants sur la circulation sanguine, **les erreurs que les enseignants partagent avec les élèves concernent les mécanismes d'échanges, le rôle du fluide des tissus dans les capillaires, la relation entre le débit, la pression sanguine et le diamètre des vaisseaux** (Alkhawaldeh, 2007).

5.4.4 Propositions

Un plaidoyer pour un enseignement de mécanique des fluides

Nous signalons ici les efforts réguliers de Guyon, Hulin et Petit pour promouvoir la mécanique des fluides auprès de la communauté enseignante de physique-chimie du secondaire, via de nombreux articles dans le BUP, revue de l'Union des Professeurs de physique et de chimie (UDPPC) (notamment (Guyon, 1990)). Que proposent-ils ?

Ils constatent et mettent en avant que les démarches de raisonnement en mécanique des fluides diffèrent de celle d'un enseignement traditionnel dans la mesure où la valorisation de l'observation, le recours aux ordres de grandeurs et l'analyse dimensionnelle y sont très présents.

De plus, ils signalent qu'historiquement, en France, la mécanique est vue comme une branche autonome, intermédiaire entre les mathématiques et la physique. Les auteurs lui préfèrent la vision américaine, où la mécanique appartient à la branche physique. Il rappelle un clivage entre physiciens et mécaniciens au début du 20^e siècle notamment, avec d'un côté les équations locales du physicien et de l'autre une approche centrée sur le volume de contrôle des mécaniciens. Ils signalent un retour des physiciens vers la mécanique des fluides via la description d'états fluides de la matière. Elle y est très couplée à la thermodynamique et à la physique des matériaux. Une autre piste d'enseignement est suggérée, liée à l'approche 'matériaux'.

Enfin, ils se réfèrent à des articles de Taylor (20^e siècle) comme étant des pistes possibles d'enseignement.

Des propositions en statique des fluides

Psillos (2004) propose un modèle qui introduit la force et la pression et permet aux étudiants d'associer les deux. Il n'y a pas de distinction liquide-gaz, on parle de fluide. Il n'y a pas non plus

de recours à la notion de force pour définir la pression dans un fluide. On évite *a priori* la confusion scalaire / vecteur. La force est introduite en fin de session avec $F = p S$: cette relation ne constitue pas une définition de la pression. La relation $F = p S$ résume uniquement le lien entre F , p et S .

Psillos étudie également l'influence des idées préconçues des élèves sur le monde sur leur raisonnement en sciences. Il mène un travail avec de futurs enseignants du primaire, issus de l'université de Thessalonique. L'approche retenue est constructiviste. Il s'agit de travailler sur des situations réelles. Le passage d'une idée préconçue à un concept scientifique passe par des étapes de conception.

Obtenir une même interprétation pour des phénomènes liés au liquide et au gaz permettrait d'asseoir la notion de pression.

Il propose de montrer aux élèves deux problèmes, l'un soluble à la fois avec les anciennes conceptions des élèves et les nouvelles, l'autre uniquement soluble avec les nouvelles conceptions pour prouver leur valeur ajoutée.

Un outil d'évaluation pédagogique : *Fluid Mechanics Concept Inventory (FMCI)*

Une équipe de l'université du Wisconsin (Martin, Mitchell et Newell) aborde l'étude de l'enseignement de la mécanique des fluides en suivant la démarche déjà menée par Hestenes en mécanique en 1992, via le *Force Concept Inventory (FCI)* (Hestenes, 1997). L'objectif d'Hestenes est de proposer des instruments d'évaluation de l'apport pédagogique d'une méthode d'enseignement donnée (« *assessment instruments* »). Cette démarche semble avoir répondu à une attente des enseignants nord-américains dans les années 1990, dans la mesure où plusieurs équipes de recherche s'en sont inspirées. Ainsi, dans la lignée du FCI ont été publiés des *Concept Inventories* dans différents domaines : électromagnétisme, signaux et systèmes, résistance des matériaux, thermodynamique, circuits électriques, matériaux, chimie, dynamique, statistiques. Mais également en mécanique des fluides (*Fluid Mechanics Concept Inventory* ou FMCI), par Martin *et al* (Martin, 2003b ; Mitchell, 2006).

Ces derniers suggèrent d'aborder les points suivants : « *Basic ideas, Hydrodynamics, Conservation of mass, Conservation of momentum - ideal, Conservation of momentum - viscous et Conservation of energy* » (Mitchell, 2006, p.4).

L'accent est mis davantage sur l'évaluation que sur la compréhension des difficultés conceptuelles des étudiants.

Signalons que les trois chercheurs à l'origine du FMCI n'ont pas, depuis, poussé plus avant cette étude : Martin a basculé dans le développement de l'accès aux cursus et carrières scientifiques pour les handicapés, Mitchell s'est recentré sur l'ingénierie mécanique et Newell, sur les transferts thermiques.

On trouve trace de cette étude dans des articles d'une équipe d'Afrique du Sud qui cherche à améliorer l'enseignement de la mécanique des fluides via le recours aux simulations numériques (Fraser, 2007). La détection préalable des principales difficultés des étudiants du département d'ingénierie chimique de l'université du Cap s'effectue via un recours au FMCI et à des questions qualitatives. Il ressort de cette étude que les points du cours posant problème aux étudiants sont les suivants : « *The major areas of difficulty were pressure measuring instruments, flow through a*

pipe with changing diameters, and velocity profiles with different boundary conditions. Force balances were less problematic, and general fluid mechanics theory was handled quite well » (ibid., p.383).

Fraser mène une comparaison du bénéfice pédagogique à employer une simulation face à des travaux pratiques où l'étudiant manipule. Il indique quatre types d'approche des étudiants vis-à-vis d'une simulation numérique : « *they see it as an assignment to be completed ; they see the simulation as a representation of the phenomenon concerned ; they manipulate the simulation to understand how the simulation works ; or they explore the phenomenon itself using the simulation » (ibid., p.381).* La valeur ajoutée des séances de simulation est prouvée mais il n'est pas recommandé pour autant de remplacer complètement les séances de manipulation (« *real world experience » (ibid., p.381))* par des séances de simulation. Enfin, les étudiants auraient perçu les simulations comme des outils informatiques et non comme des outils d'apprentissage.

Le cas des formations médicales

Utiliser les équations différentielles de la mécanique des fluides serait trop chronophage et trop compliqué pour des étudiants débutants de médecine qui ont à étudier le système cardiovasculaire (Ribaric, 2011). A la place, le recours aux équivalents électriques est mis en avant. Ils sont employés en séquence d'enseignement et en recherche, en neuro-Physiologie et en physiologie cellulaire notamment.

Ces équivalents électriques permettent notamment d'aborder les régimes non permanents. A ce propos, une idée naïve sur le rythme cardiaque est évoquée dans un autre article : « *contrary to popular perception, the heart of a healthy person at rest does not beat at a constant rate. Indeed, unevenness of the heart rhythm seems to be absolutely essential to physical wellbeing » (Stefanovska, 1999, p.32).* Ribaric rappelle que les prérequis nécessaires pour utiliser les équivalents électriques sont les concepts de base en électricité (courant, tension, résistance, charge, capacité). Le cœur est présenté comme un condensateur, les phases de charge et de décharge modélisant respectivement la diastole et la systole. L'intérêt de cette analogie est double : éthique et didactique. En effet, d'une part, elle permet d'éviter le recours à des expériences *in vivo* sur des animaux et d'autre part, elle permet de mettre en évidence les régimes transitoires du cœur.

Cette analogie aiderait par ailleurs les élèves à comprendre les notions de variables, de paramètres, de régime transitoire et de conditions d'écoulement quasi-permanent. Il est rappelé l'utilité de maîtriser cette notion de variable puisque les données recueillies pour évaluer une pathologie sont de ce type. Par contre, le domaine de validité du modèle électrique n'est pas abordé.

'Moins d'équations, plus de compréhension' est encouragé pour l'enseignement de la physiologie (« *Less is more » (Carroll, 2001, p.9).* D'après Carroll, le recours aux équations n'aiderait à clarifier un concept que pour peu de personnes, essentiellement les enseignants de science. La relation $Q = \frac{\Delta P}{R}$, liant le débit volumique Q à la différence de pression ΔP et à la résistance hydraulique R est jugée « *particularly troubling for students because it contains three variables, all of which can change simultaneously and which are interrelated » (ibid., p. 9).*

Conclusion

L'analogie entre mécanique des fluides et électricité est utilisée dans l'enseignement et la recherche, notamment dans des cursus biomédicaux pour étudier le système cardiovasculaire.

En didactique, la mécanique des fluides a été surtout étudiée en tant qu'intermédiaire éventuel pour mieux comprendre l'électricité. Couplé à l'étude de la statique des fluides, des difficultés conceptuelles chez les élèves ont été observées. L'évaluation de ce domaine a également été discutée via le FMCI.

Néanmoins, à notre connaissance, les pratiques enseignantes en lien avec cette discipline n'ont pas encore fait l'objet de recherches en soi. Notre travail cherche à combler en partie ce vide.

5.4.5 Exemples de questionnement sur les pratiques en lien avec les modèles et les contextes

Le questionnement mené dans ce travail de thèse aboutit notamment à interroger les éléments du modèle retenu par l'enseignant, ainsi que leur coordination.

Plusieurs aspects du modèle pourraient être abordés : ses caractéristiques mais aussi sa mise en œuvre en situation d'enseignement. Illustrons-le sur l'exemple de la relation de Bernoulli.

Aspects relevant des caractéristiques du modèle

On peut s'interroger sur l'appellation retenue par les enseignants pour qualifier cette égalité mathématique : parlent-ils de 'relation', d' 'équation', de 'loi', de 'formule' ou de 'théorème' de Bernoulli ?

On peut aussi s'interroger sur le nombre de formulations de cette relation retenu par l'enseignant : la relation de Bernoulli est-elle exprimée en unités d'énergie, de pression, de hauteur ? Est-elle exprimée entre deux points ou est-il annoncé qu'un terme est égal à une constante ?

On peut aussi étudier la justification associée, le signalement ou non du cas où le régime n'est pas permanent ou du cas où il y a des pertes de charge (l'appellation de 'charge' est-elle définie ?), l'éventuel ordre à suivre dans la détermination des différentes grandeurs que sont la pression, le débit et la vitesse.

Les enseignants proposent-ils une preuve de la relation de Bernoulli ? Si oui, comment ? Via un bilan énergétique ou l'équation d'Euler par exemple ? Plusieurs méthodes sont-elles employées et comparées ou la relation est-elle directement admise ?

On peut aborder les approximations sur l'écoulement retenues par les enseignants : les énoncent-ils ? Par exemple, dans des ouvrages américains, la limitation au cas d'une ligne de courant n'est pas toujours signalée.

Concernant le domaine de validité du modèle retenu, on peut se demander si l'enseignant l'aborde ou non.

L'évaluation de la validité des approximations proposées est-elle menée ? Par exemple vérifier la condition de Mach, notamment pour le cas d'un écoulement gazeux, s'interroger sur l'approximation d'un écoulement permanent, aborder la notion de couche limite etc...

Les approximations proposées sont-elles vérifiées sur un cas pratique ? Des cas contre-intuitifs sont-ils évoqués ? Par exemple, lors de l'étude d'une aile d'avion, le cas d'un avion de voltige volant à l'envers est-il abordé ?

La comparaison des ordres de grandeur entre les prévisions dues au modèle et les résultats expérimentaux est-elle menée ? L'écart est-il justifié ?

Aspects relevant de la mise en œuvre du modèle

On peut s'interroger sur les contextes associés à la relation de Bernoulli : les domaines d'application abordés, les choix retenus (les exemples sont-ils issus de la biologie lorsque les étudiants sont des biologistes, de la mécanique pour des mécaniciens ou à l'inverse une ouverture sur d'autres domaines que la majeure d'un cursus donné est-elle tentée ?), les objectifs visés associés (les applications sont-elles perçues comme aidant à la compréhension des concepts introduits dans le cours ? Ou comme illustration des concepts ? Une prévision des résultats attendus est-elle suggérée ? Une application numérique, associée ?).

Quelle place l'enseignant accorde-t-il à l'expérimental ?

Les aspects suivants peuvent être abordés : la nature des expériences proposées (qualitatives ou quantitatives), le support retenu (manipulation de cours, travaux pratiques (TP), vidéo, expérience décrite sur un document visuel ou manuscrit), la personne réalisant l'expérience (s'agit-il de l'enseignant, d'un ou des élèves ? Pourquoi ?), le positionnement de l'expérience dans la situation d'enseignement (est-ce une expérience introductive, illustrative ou ludique ? Vient-elle en fin de situation d'enseignement, comme confrontation du modèle à la réalité ?), l'existence d'une éventuelle mise en parallèle des contextes empiriques présentés.

En lien avec une approche historique, l'enseignant présente-t-il la relation de Bernoulli comme étant une relation 'expérimentale' ou 'théorique' ? Se demande-t-il pourquoi, historiquement, ce thème a été étudié ? Qu'en est-il de l'effet Venturi ? Son étude est-elle antérieure aux travaux d'Euler ? La contradiction historiquement persistante entre modèle et résultats expérimentaux est-elle connue de l'enseignant ? Le paradoxe de d'Alembert est-il évoqué ?

Les difficultés éventuelles que rencontrent les étudiants, en lien avec la relation de Bernoulli, sont-elles évoquées par l'enseignant ?

Parmi ces difficultés pourraient figurer de choisir les points où appliquer la relation de Bernoulli si ce n'est pas indiqué dans l'énoncé, de négliger ou non les variations d'altitude lorsqu'il y a à utiliser la relation de Bernoulli, de prévoir l'évolution de la pression lors d'un rétrécissement, de relier les vitesses aux rayons des canalisations, de représenter la répartition de pression au sein d'une section donnée pour un écoulement 'parfait', d'étudier un écoulement présentant un point d'arrêt ou encore de distinguer un écoulement à faible nombre de Reynolds d'un écoulement 'parfait'.

Quel intérêt à être enseignée la relation de Bernoulli présente-t-elle ? Est-elle 'utilitaire' ? Intéressante pour montrer le domaine de validité d'un modèle ?

Conclusion

Comme l'a mis en avant Darrigol, c'est par l'association d'une approche théorique et d'une approche expérimentale que les avancées ont été possibles en mécanique des fluides. D'une théorie homogène on passe à une structure modulaire, où chaque module sert tantôt à définir une notion, tantôt à approximer, à idéaliser ou à illustrer. Cette structure évolue d'une part grâce aux confrontations entre expérience et théorie et d'autre part grâce aux tentatives réductionnistes.

Les travaux menés par Poiseuille sont un exemple de travail expérimental minutieux et la justification tardive de ses résultats illustre un exemple d'interaction théorie-expérience.

L'étude de l'écoulement sanguin révèle également les interactions à double sens entre la physique et la médecine ainsi que l'influence des courants de pensée sur la construction de nouvelles théories. Par exemple, comme indiqué en annexe B.5, l'importance du cercle en philosophie a facilité l'émergence de l'idée d'une circulation en boucle fermée pour le sang au sein d'un organisme.

Nous pouvons dès lors nous demander si l'on retrouve chez les enseignants les difficultés que la communauté de recherche a connues lors de l'élaboration du modèle d'un écoulement incompressible.

Il s'agit par exemple de la difficulté à associer prévisions théoriques et données expérimentales.

Le fait qu'historiquement, le développement théorique des hydrodynamiciens du 18^e siècle se soit construit de manière plus ou moins déconnectée des données obtenues par les hydrauliciens interroge également le recours à l'expérimental que les enseignants déclarent employer en mécanique des fluides. L'approche retenue pour enseigner cette discipline est-elle déconnectée d'un recours à l'expérimental ?

De plus, les enseignants suivent-ils la démarche historique des hydrodynamiciens, à savoir débiter l'étude des écoulements en négligeant la viscosité pour ensuite en tenir cas, face aux contradictions entre prévisions théoriques et résultats expérimentaux observés ?

Par ailleurs, les problématiques originelles (approvisionnement en eau, etc...) ayant mené à la construction de ce savoir qu'est la mécanique des fluides sont-elles évoquées par les enseignants interrogés ? Les interactions entre la communauté des chercheurs en mécanique des fluides et la société sont-elles reprises ?

A travers ces questionnements, il s'agit de s'interroger sur le recours à l'histoire des sciences que les enseignants interviewés déclarent employer. Cela constitue l'un des enjeux de la seconde partie de ce manuscrit : l'enquête.

Seconde partie : l'enquête

Cette seconde partie concerne l'enquête que nous avons réalisée auprès d'enseignants du supérieur afin d'étudier principalement les modèles et les contextes qu'ils retiennent pour enseigner l'écoulement d'un fluide ainsi que les démarches de modélisation qu'ils mettent en œuvre.

Nous détaillons la méthodologie de l'enquête, ses caractéristiques et la trame d'entretien construite (chapitre 6), puis nous présentons les résultats obtenus (chapitres 7 et 8) que nous rapprochons et discutons (chapitre 9).

Chapitre 6 Méthodologie

Détailler la méthodologie de l'enquête nécessite de préciser le type d'approche retenue, d'explicitier les phases et la trame de l'enquête menée et de justifier les questions posées. Cela suppose également de présenter la population enseignante interviewée ainsi que la démarche suivie pour analyser les données.

6.1 Caractéristiques de l'enquête menée

6.1.1 Visées : étude de cas et régularités contextualisées

Nous avons suivi l'avis de Guilbert (1993) qui recommande de recourir à une étude qualitative plutôt que quantitative afin de permettre une compréhension plus profonde et plus contextuelle de l'idée de science chez les enseignants. Selon Dumez (2013, p.12), « *la recherche qualitative s'efforce d'analyser les acteurs ou agents comme ils agissent. Elle s'appuie sur leurs discours, leurs intentions (le pourquoi de l'action), les modalités de leurs actions et interactions (le comment de l'action).* ».

A partir de l'échantillon limité d'enseignants étudié, nous ne prétendons pas présenter un état des lieux général de l'enseignement actuel en mécanique des fluides. Néanmoins, des tendances peuvent apparaître. Nous avons cherché à quantifier ces tendances, sur un échantillon de faible taille : en cela cette étude exploratoire pourrait aussi être qualifiée de semi-quantitative.

Pour autant, il s'agit ici de rester vigilant à ne pas trop généraliser les résultats obtenus à partir de l'enquête, de chercher à ne pas accumuler des faits généraux mais plutôt de la compréhension liée à des contextes donnés (Thomas, 2012). Il s'agit de comprendre le contexte associé aux personnes interviewées : « *l'attention au contexte doit au contraire se focaliser sur ce qui est susceptible de changer la valeur de vérité de certaines propositions ou le sens de l'action des acteurs étudiés. Encore une fois, plus que sur le contexte en général, elle doit porter sur les conditions contextuelles* » (Dumez, 2013, p.104). Les différences constatées dans les différents contextes peuvent alors être vues comme différentes réalisations de mêmes possibilités d'action. (Ercikan, 2009).

Nous proposons donc ici une enquête par étude de cas, idiographique, au cours de laquelle nous avons aussi recherché des régularités liées au contexte d'enseignement, un état n'ayant en effet de sens que dans un contexte donné (Thomas, 2012).

6.1.2 Une enquête sur les pratiques déclarées d'enseignants

Nous avons décidé de centrer notre étude sur les pratiques déclarées d'enseignants, en particulier sur celles en lien avec la démarche de modélisation, comme suggéré par Gilbert (Justi, 2002). Une telle étude peut s'opérer via l'observation *in situ* d'une séquence d'enseignement (pratiques observées) ou via des entretiens (pratiques déclarées). Le sujet central de cette étude est d'analyser les choix des enseignants en amont de la situation d'enseignement. Contrairement à Cross (2010) ou Rollnick (2008), la situation d'interaction entre l'élève et l'enseignant n'est pas le point principal abordé dans cette thèse.

Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'une étude exploratoire sur l'enseignement de la mécanique des fluides : recueillir et analyser le déclaré d'enseignants sur leurs pratiques apparaît alors comme une première étape utile pour guider la suivante, qui consisterait à comparer ces pratiques déclarées à leur mise en application lors de situations d'enseignement.

Ce choix s'explique également par des contraintes logistiques assez fortes en termes de temps disponible à consacrer à la thèse. En effet, ce travail a été mené en parallèle de mon activité professionnelle d'enseignant en classes préparatoires. L'obtention d'un congé de formation n'étant pas assuré au démarrage de la thèse, il n'était pas raisonnable de prévoir des observations répétées en situation : aborder cette enquête sous l'angle des pratiques déclarées pouvant être recueillies lors d'entretiens paraissait alors plus adapté (un congé a finalement été obtenu, ce qui m'a notamment permis de séjourner aux Etats-Unis mais le travail sur les pratiques déclarées avait déjà été lancé).

Tout au long de cette présentation, il s'agit de garder en tête que cette étude se fonde sur du déclaratif d'enseignants. On sait l'écart possible et parfois constaté entre le déclaré et le pratiqué (Souza-Barros, 1974). Nous adhérons aux propos de Cross (2014) qui rappelle que grâce à un questionnaire, nous n'accédons qu'aux pratiques déclarées de l'interviewé et non à ce qu'il réalise effectivement avec ses élèves lors d'une séquence d'enseignement. Pour autant, on peut néanmoins supposer que si déjà des éléments de pratique enseignante ne sont pas indiqués ou développés par l'enseignant interrogé, il est peu probable qu'ils soient employés en situation d'apprentissage. Par ailleurs, dans le cadre de cette démarche exploratoire qui est la nôtre, nous ne cherchons pas à comparer le déclaré des enseignants à sa mise en situation.

6.1.3 Une enquête par entretien

La collecte de ces pratiques déclarées a été effectuée lors d'entretiens semi-directifs et longs, que nous avons privilégiés au questionnaire.

En effet, l'entretien permet d'interagir avec l'interviewé pour mettre en évidence ses pratiques déclarées, ce que permet moins un questionnaire écrit (Astolfi, 1992 ; Havdala, 2007). Ainsi, des contradictions apparues dans les réponses d'élèves à des questionnaires papier-crayon sur le thème des modèles ont pu être levées lors d'entretiens prolongés menés avec ces mêmes élèves (Ryder, 2000).

Dans cette étude, nous avons voulu également prendre en compte les convictions de ces enseignants : un entretien permet d'accéder au ressenti des enseignants (Abell, 2007), contrairement à un questionnaire papier-crayon.

Lors des enquêtes que nous avons menées, la durée des entretiens a varié d'un enseignant à l'autre. En France comme aux États-Unis, les entretiens les plus courts ont duré entre 45 minutes et 1 heure, les entretiens les plus longs, entre 1 heure et 1h45.

Il s'agissait donc d'entretiens longs, sans pause (à quelques exceptions près). Cela a permis aux interviewés de développer leurs prises de position lors des différentes questions posées et à l'intervieweur de revenir sur un point si besoin.

De plus, signalons que les enseignants étaient volontaires : qu'ils aient accepté de consacrer tant de temps à ces entretiens permet de supposer que cela les intéressait *a minima*.

Les entretiens ont eu lieu principalement au bureau des enseignants lorsqu'ils en possédaient un. Sinon, en salle de cours ou de travaux pratiques, à leur convenance.

6.1.4 Dialectique entre empirie et théorie

Tout d'abord, comme le constate Dumez (2013, p.103), « *le sens même de la recherche compréhensive consiste à partir de l'idée que ce que les acteurs pensent et disent a de l'importance pour comprendre leurs interactions. Et, en même temps, à affirmer qu'ils peuvent se tromper, ne pas voir certaines choses importantes, donc qu'un point de vue différent sur leurs interactions peut et doit être construit par le chercheur* ».

Ainsi, nous ne nous sommes pas limités à réaliser des entretiens d'enseignants. Nous avons également mené une étude théorique afin d'élaborer un cadre dans lequel inscrire les questions posées et l'analyse des réponses fournies.

Ensuite, tout au long de la thèse, une démarche dialectique entre empirie et théorie a été suivie. Nous avons débuté l'étude théorique préalablement à toute étude empirique. Nous l'avons poursuivie et enrichie tout au long de la thèse. Nous avons ainsi pu analyser les pratiques déclarées recueillies en entretien en mobilisant une grille que nous avons élaborée progressivement par allers-retours entre les catégories et propositions *a priori* de types de réponse et les données recueillies.

Une approche plus fine des thèmes abordés dans la trame d'entretien s'est mise en place au fur et à mesure des lectures.

Pour la synthèse présentée ici, nous avons cherché à mettre en perspective notre travail avec les publications récentes sur les PCK, notamment les deux livres publiés après le démarrage de mon travail de thèse : l'ouvrage de synthèse issu du sommet du Colorado (modèle de Gess-Newsome) et l'ouvrage de Grangeat comportant les contributions de chercheurs francophones. Cela nous a conduits à une présentation plus structurée des différents thèmes explorés et à une grille d'analyse articulant les cadres de la modélisation et des PCK.

6.1.5 Une enquête réalisée dans deux pays et dans différentes institutions

Cette enquête concerne des enseignants exerçant en France et aux États-Unis, en premier cycle universitaire, c'est-à-dire au niveau L (licence) dans la structure européenne LMD, au niveau *undergraduate* (diplôme du *bachelor*), aux États-Unis.

Nous rappelons dans les tableaux suivants (tableaux 6.1.5.1. A et 6.1.5.1. B) les équivalences entre les structures françaises et américaines de premier cycle universitaire et la signification de leurs sigles respectifs.

Équivalences		
STS ou IUT	↔	Community College
CPGE ou licence	↔	College of Engineering
PACES ou licence de médecine	↔	Premedical

Tableau 6.1.5.1. A
Équivalences entre les structures américaines et françaises
de premier cycle universitaire étudiées

Dénomination de la structure d'enseignement	Définition
STS	Section de Technicien Supérieur
IUT	Institut Universitaire Technologique
CPGE	Classes Préparatoires aux Grandes Écoles
PACES	Première Année Commune des Études de Santé
Community College	Structure proposant des formations techniques en deux ans
College of Engineering	Entité en propre ou appartenant à une université. Il existe des <i>Colleges</i> associés aux différentes majeures scientifiques : <i>College of Mechanical Engineering, College of Aeronautical Engineering, College of Agricultural Engineering, etc...</i>
Premedical	Aux États-Unis, il faut avoir validé un certain nombre de modules pour pouvoir candidater à un cursus médical ou paramédical (<i>Medical School</i>).

Tableau 6.1.5.1. B
Définition des structures américaines et françaises de premier cycle universitaire étudiées

En France, pour intégrer un cursus universitaire, certaines formations sont sélectives, le recrutement s'effectuant sur dossier (CPGE, STS, IUT) ou sur concours (écoles d'architecture, certaines formations d'ingénieur...), d'autres ne sont pas sélectives (formations qualifiées de L1 au sein des universités).

Aux États- Unis, la sélection s'effectue principalement sur dossier.

Au terme d'un premier cycle universitaire, soit trois ans après la fin des études secondaires, on obtient en France le diplôme de grade 'licence'.

Aux États-Unis, c'est au bout de quatre ans après la fin des études secondaires. Le diplôme est appelé 'bachelor'.

Nous précisons dans le tableau 6.1.5.2 la dénomination associée à chacune des années du premier cycle pour ces différentes structures.

Nature du cycle	Années	Exemples d'intitulés de formation
Undergraduate level	Freshman Sophomore Junior Senior	
Licence	L1 L2 L3	PACES, 1ère année de BTS, 1ère année d'IUT BCPST2 agro-véto, PC, PSI, PT, 2e année de BTS, 2e année d'IUT

Tableau 6.1.5.2
Dénominations des années de premier cycle universitaire étudiées

NB : BCPST2 2^e année de classe « agro-véto », PC, PSI, PT sont des classes de CPGE. Les sigles associés correspondent aux disciplines majoritaires de la classe : Biologie Chimie Physique Sciences de la Terre en BCPST, Physique Chimie en PC, Physique Sciences de l'Ingénieur en PSI et Physique Technologie en PT.

6.1.6 Déroulé de l'enquête

L'enquête s'est déroulée en France (en 2014 et 2015) et aux États-Unis (de janvier à mai 2015). Vivre sur un campus américain durant un semestre a constitué une opportunité d'accéder à un autre système éducatif et de réaliser une étude comparative.

L'enquête comporte trois phases : deux pré-enquêtes et une enquête.

Une pré-enquête a été réalisée auprès de 7 étudiants français en juin 2014. Cette pré-enquête a été l'occasion d'obtenir des témoignages d'étudiants. Ceux-ci ont pu être exploités lors des entretiens d'enseignants comme appui pour relancer la discussion, un exemple de relance étant : « à cette question, un étudiant interrogé a répondu que... Qu'en pensez-vous ? ».

Les profils des étudiants n'étant pas nécessairement les mêmes d'un pays à l'autre, la même démarche a été reproduite aux États-Unis auprès de 7 étudiants américains en avril 2015, avant de démarrer les entretiens des enseignants américains.

Une pré-enquête auprès d'enseignants français s'est déroulée en novembre-décembre 2014 : 4 entretiens ont eu lieu à Orsay, 1 à Paris, 11 à Reims. Il s'agissait de tester la première trame de questionnaire, d'observer d'éventuelles tendances et de recueillir des éléments de réponses d'enseignants français avant d'entamer l'enquête aux États-Unis.

Une enquête auprès d'enseignants américains a été menée en avril-mai 2015 lors de mon séjour aux États-Unis : 5 entretiens ont eu lieu à Boston, 1 à Pittsburgh et 22 à State College. Au vu des retours de la pré-enquête, la trame du questionnaire a été en partie modifiée avant d'être utilisée en entretien aux États-Unis. Ayant dès lors des données américaines, la trame du questionnaire a été traduite en français et proposée ensuite à des enseignants français (4 à Paris et 1 à Reims), à l'été 2015, pour avoir des éléments de comparaison entre enseignants des deux pays sur une même trame de questionnaire.

Le déroulé temporel du recueil de données est résumé dans le tableau 6.1.6 ainsi que le nombre d'entretiens menés dans chaque ville indiquée entre parenthèses dans la case 'Ville'.

Phase de l'enquête	Pré-enquête auprès d'étudiants	Pré-enquête auprès d'enseignants	Enquête auprès d'enseignants
Public visé interviewé	Etudiants de filières PC, PC* et BCPST	Enseignants	Enseignants
Pays	France	France	États- Unis
Ville (nombre d'entretiens menés dans la ville)	Reims (7)	Orsay (4) Paris (1) Reims (11)	Boston (5) Pittsburgh (1) State College (22)
Date	Juin 2014	Novembre-décembre 2014	Avril-mai 2015
Public visé interviewé	Etudiants ingénieurs		Enseignants
Pays	États- Unis		France
Ville (nombre d'entretiens menés dans la ville)	State College, PA		Paris (4) Reims (1)
Date	Avril 2015		Juin-juillet-septembre 2015

*Tableau 6.1.6
Phases de l'enquête*

6.2 La trame d'entretien et les questions travaillées dans la thèse

Seule une partie de l'enquête de 2015 est détaillée ici, le reste (trames et documents présentés aux interviewés en entretien lors des pré-enquêtes et de l'enquête) est fourni en annexes (cf Annexe E.).

6.2.1 La structure de l'entretien, les thèmes abordés et étudiés

Les réponses obtenues lors des pré-enquêtes ont orienté la rédaction de la trame du questionnaire avec lequel nous avons réalisé les entretiens des enseignants en 2015.

Il comporte trois parties et 22 questions.

La partie A traite du vécu de l'enseignant interviewé et la partie B de ses choix en termes de construction du cours.

Dans la partie C, il est demandé à l'enseignant de commenter des situations données qui lui sont présentées lors de l'entretien.

Avant de poursuivre, précisons que faute de temps, nous avons décidé de n'étudier qu'une partie des données recueillies au cours des entretiens.

Le tableau 6.2.1 présente, pour chacune des parties de la trame de l'enquête auprès d'enseignants, les thèmes abordés en entretien et ceux retenus ici ainsi que les chapitres dans lesquels les résultats associés sont présentés.

Les thèmes abordés dans la partie A de l'entretien constituent des variables explicatives des thèmes abordés aux parties B et C.

Les thèmes de la partie B sont liés aux modèles et aux contextes.

Ceux de la partie C permettent d'aborder le périmètre d'expertise des enseignants interrogés. Y sont évoquées des situations présentées à l'interviewé issues d'un contexte traditionnel d'un enseignement de physique ou de physiologie et également des situations de physique que l'interviewé peut percevoir comme étant hors des contextes qui lui sont traditionnels.

Partie de l'enquête auprès d'enseignants	Thèmes abordés avec les enseignants au cours des entretiens	Thèmes étudiés dans ce manuscrit avec indication du chapitre associé
Partie A	Parcours personnel de l'enseignant	Chapitre 9 (variables explicatives)
	Goût de l'enseignant pour la mécanique des fluides	
	Sources auxquelles l'enseignant se réfère	
	Lien entre la mécanique des Fluides et le cursus suivi par l'enseignant	Chapitre 9 (variables explicatives)
Partie B	Vision d'ensemble du cours	Chapitre 7
	Evaluation	
	Rapport élève / enseignant	
	Présence de l'expérimental	Chapitre 8
	Recours à l'histoire des sciences	
	Démarche d'introduction du modèle	Chapitre 7
	Modélisation	
Partie C	Contexte traditionnel issu de la physique	Chapitre 7
	Contexte traditionnel issu de la physiologie	
	Hors contexte traditionnel issu de la physique	Chapitre 7

Tableau 6.2.1
Thèmes abordés en entretien

Dans ce qui suit, nous mettons en perspective les thèmes et sous-thèmes abordés au cours des entretiens, les questions posées et examinées dans la thèse avec nos questions de recherche, reformulées sous forme de PCK. Cela nous conduit à présenter les trois parties du questionnaire de l'enquête et à justifier nos choix. Nous examinons la présence éventuelle de difficultés de la part des interviewés et nous terminons en présentant la grille d'analyse thématique « à grain large » qui nous a servi à caractériser les réponses fournies par les enseignants.

6.2.2 Présentation des questions de l'enquête étudiées dans ce manuscrit

Nous nous inscrivons dans la lignée de Closset (Blondin, 1992a), qui conseille de poser des questions ouvertes avec demande de justification plutôt que des questions fermées à choix multiples par exemple. Closset a procédé de la sorte pour étudier les concepts des élèves en

électricité et en hydrodynamique. Nous avons agi de même pour les enseignants, en mécanique des fluides.

La partie A du questionnaire de l'enquête correspond aux questions 1 à 7, fournies dans le tableau 6.2.2.1. A.

Numéro de la question	Intitulé de la question
Q1	Have you chosen to teach the course XX?
Q2	Is your research field linked with fluid flow?
Q3	At what point in your experience did you study fluid flow?
Q4	Are you interested in this field? Currently, are you reading about it?
Q5	Do you think that fluid flow should be part of the curriculum of all students in undergraduate degrees? (Scientific, engineering) why?
Q6	Have you already taught this course? How many years and for which students?
Q7	Which textbook did you choose for this course? Refer to their syllabus? Why? What type of resources do you use to prepare your course? Why? Which references are trust worthy? Why? Or how do you use these resources? Or the data that you find in these resources may not always mesh: which one do youselect?

Tableau 6.2.2.1. A
Détail des questions de la partie A de l'enquête auprès d'enseignants

Dans cette partie A, on aborde le vécu de l'enseignant interviewé : son choix (ou non) d'enseigner ce module, son propre parcours scolaire et professionnel, son goût personnel pour l'écoulement des fluides, son ancienneté en tant qu'enseignant du module considéré, la bibliographie retenue pour ce module et les raisons de ses choix.

La partie B correspond aux questions 8 à 14, fournies dans le tableau 6.2.2.1. B.

Numéro de la question	Intitulé de la question
Q8	8/ Would you describe the pace of the course XX that you teach please? 8i/ Does your course requisite other courses? What do you assume students already know? 8ii/ How would you describe these students to who you teach this course?
Q9	What do you expect to furnish to students through this course?
Q10	What kind of reaction from the students do you expect? (Else, do you anticipate reactions? Which ones?)
Q11	When teaching quantum mechanics and relativity, instructors use several articles dealing with History of Science. Do you use History of Science in your fluid flow course? Why? What historic milestones should be mentioned?
Q12	Do you use experiments or refer to phenomena through activities in your course? Which ones? How do you choose them? Why? Under which form do you use or refer to them (You experiment? Students do? Through activities: motion pictures? Pictures? Exercise?) ? Why? Where do you locate this experiment or phenomenon in your course? Why? What do you expect from quoting this experiment or phenomenon? Could you describe how you use it or refer to it and explain why? How do you introduce it? What do you say about it? Do you ask questions? Do you draw students' attention to a particular point? How do you proceed the lesson?
Q13	Which representation/schematizations do you use in your course? How do you represent/schematize this experiment or phenomenon? The data obtained?
Q14	How do you introduce Bernoulli equation? Which pace is used towards the model? Where are experiments/phenomena inserted?

Tableau 6.2.2.1. B
Détail des questions de la partie B de l'enquête auprès d'enseignants

Dans cette partie B, on traite des choix de l'enseignant en termes de construction du cours.

Cette partie est composée de deux sous-parties : du récit du vécu personnel de l'enseignant dans la partie A, on passe ici à sa vision d'ensemble du module enseigné (questions Q8 à Q10). On évoque les grandes lignes directrices du module, sa vision des étudiants auxquels il enseigne et des interactions qu'il a avec eux, les objectifs pédagogiques qu'il vise dans ce module.

Dans un second temps (questions Q11 à Q14), on aborde la place que l'enseignant accorde aux phénomènes dans ses séances : les situations-types exploitées, un éventuel recours à l'histoire des sciences, la nature des activités expérimentales proposées et leur place au sein de la progression. Une justification est demandée. L'enseignant est également interrogé sur sa manière d'introduire la relation de Bernoulli. Signalons que pour les enseignants déclarant ne pas utiliser la relation de Bernoulli, la question leur est posée pour la loi de Poiseuille.

Enfin, la partie C correspond aux questions Q15 à Q18, fournies dans le tableau 6.2.2.1. C.

Numéro de la question	Intitulé de la question
Q15	<i>Direct your attention to the following case, which is usually introduced in this course.</i> I show a picture and indicate: <i>there is a flow from left to right in a tube. We insert two thin glass tubes before and after bottleneck.</i> Have you used this situation in your course? How do you use it? Why?
Q16	<i>I show a picture and indicate: there is a flow from left to right in a tube like the previous one. We insert a third thin glass tube before bottleneck.</i> Here again, have you used this situation in your course? How do you use it? Why
Q17	Some exercises deal with 'head loss': how does a student understand this statement? <i>Then, I show pictures: 'these pictures are taken from different editions of the same book. Surprising, isn't it?'</i>
Q18	<i>I show pictures:</i> Have you used this situation in your course? In French books, they hardly ever draw what is before and what is after the canalization. What do you think of this type of representation? In French curriculum, they don't talk about the entrance of pipes and elbows. Is it the same in your course? What do you think of this type of representation?

Tableau 6.2.2.1. C
Détail des questions de la partie C de l'enquête auprès d'enseignants

Dans la partie C, il est demandé à l'enseignant de commenter des situations données (schémas, dessins, graphiques) qui lui sont présentées lors de l'entretien. Ces situations apparaissent à première vue comme prototypiques de cours de premier cycle universitaire de domaines scientifiques distincts (respectivement physique et physiologie). Cependant elles peuvent être couplées d'une manière inhabituelle (situation de la question Q16) ou associée à une question inhabituelle (situation de la question Q17). A la question Q18 sont présentées des situations issues de manuels de physiologie (cf Annexe E.4) que nous n'abordons pas ici.

Justification des questions posées :

En termes de gestion proprement dite de l'entretien, la partie A permet d'entamer le dialogue de manière assez neutre, d'effectuer une prise de contact apaisée avec l'enseignant interrogé, le but étant qu'il se sente à l'aise dès que possible durant l'entretien.

La partie A permet également de recueillir des données liées au vécu de l'enseignant, qui peuvent constituer des variables explicatives pour justifier leurs réponses aux autres questions. Rappelons que le parcours étudiant d'un enseignant-chercheur influencerait de manière notable ses choix pédagogiques en début de carrière mais également par la suite, qu'il s'agisse de perpétuer l'enseignement reçu ou d'en proposer un différent de celui reçu (Estrela, 2005).

Les questions des parties B et C de la trame de l'enquête font notamment référence à la vision de l'enseignant des étudiants auxquels il enseigne, à ses attendus vis-à-vis de ceux-ci, à ses objectifs dans ce cours, à ses choix de contextualisation du problème avec recours éventuel à l'histoire des sciences et l'expérimental ainsi qu'à la structure du modèle retenu.

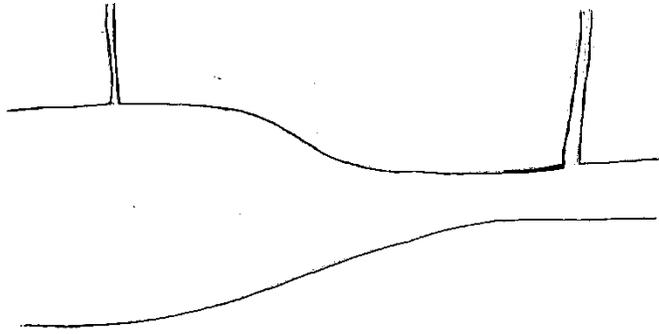
A travers les questions de cette enquête, nous retrouvons des éléments des questions posées dans un CoRe (cf tableau 1.1.5.1.) tel qu'indiqué dans le tableau 6.2.2.2. Nous constatons dans ce tableau que les questions des parties A et B peuvent être rapprochées de celles posées lors d'un CoRe.

Partie de la trame de l'enquête	Partie A							Partie B							Partie C				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
What do you intend the students to learn about this idea?								•	•	•		•							
Why is it important for the students to know this?									•			•							
What else do you know about this idea that you do not intend students to know yet?							•	•											
What difficulties/limitations are connected with teaching this idea?								•		•		•							
What do you know about student thinking which influences teaching about this idea?						•	•	•	•	•									
Are there any other factors that influence your teaching of this idea?		•		•		•	•						•						
What teaching procedures would you use, and why, for this idea?												•	•	•	•				
How would you ascertain student understanding of, or confusion about, this idea?																			

*Tableau 6.2.2.2
Rapprochement entre les questions de l'enquête et celles d'un CoRe*

Par ailleurs, les entretiens préliminaires lors des pré-enquêtes ont révélé que sans une délimitation de la situation retenue lors de l'entretien, celui-ci devenait difficilement exploitable. Il a donc été décidé de se concentrer sur le cas particulier de l'étude d'une canalisation (de type 'tuyau'). Nous nous sommes limités à des situations en lien avec la relation de Bernoulli et la loi de Poiseuille pour les questions Q14 à Q18.

Dans la partie C, la question Q15 se réfère à une situation traditionnelle d'un cours de mécanique des fluides (cf figure 6.2.2.1).



question 15

Figure 6.2.2.1
Situation évoquée à la question Q15

J'indique à l'interviewé : « *there is a flow from left to right in a tube. We insert two thin glass tubes before and after bottleneck. Have you used this situation in your course? How do you use it? Why?* ».

Poser la question « *Why?* » permet d'accéder au sens des savoirs de l'interviewé et de ne pas se limiter aux savoirs en eux-mêmes (Venturini, 2007).

On retrouve une telle situation tant dans des manuels de physique que de physiologie humaine. Tous les enseignants devraient y répondre. Elle garantit donc *a priori* des éléments de comparaison entre enseignants exerçant dans des cursus différents.

C'est par ailleurs l'occasion d'aborder le ou les modèles envisagés par l'enseignant.

Cette question permet également d'aborder de manière indirecte les difficultés éventuelles des étudiants qu'a perçues l'enseignant et ainsi d'observer un éventuel décalage avec les réponses qu'il a fournies aux questions de la partie B.

Pour évaluer le périmètre d'expertise des enseignants, nous cherchons à étudier leur réaction face à une situation non prototypique (Bishop, 2007a).

De plus, Cross signale que les épisodes qui permettent le plus facilement d'inférer des PCK sont des épisodes dans lesquels les acteurs rencontrent des difficultés (Cross, 2014) : ce point nous conforte dans l'idée de confronter les enseignants à des questions qui leur sont *a priori* inconnues ou qui peuvent les perturber, comme c'est le cas de la question Q16.

A partir de la question Q16 et dans la suite de la partie C, il s'agit donc de confronter l'enseignant à des situations qui contiennent au moins un élément qui est 'hors-cadre' usuel d'un cours de mécanique des fluides, afin de tester sa démarche de réflexion : comment réagit-il face à ces imprévus ? Les perçoit-il ? Si oui, applique-t-il à ces situations 'hors-cadre' le modèle qu'il a énoncé précédemment ?

L'imprévu peut être de deux types : soit la situation envisagée apparaît traditionnelle mais des éléments sur le schéma fourni ne le sont pas (questions Q16 et Q17), soit la situation présentée est 'hors-cadre' habituel, du moins pour les physiciens (question Q18).

La question Q16 associe sur un même schéma la situation de la question Q15 à une autre situation, elle aussi traditionnelle, mais généralement présentée de manière disjointe dans un cours de mécanique des fluides (cf figure 6.2.2.2).

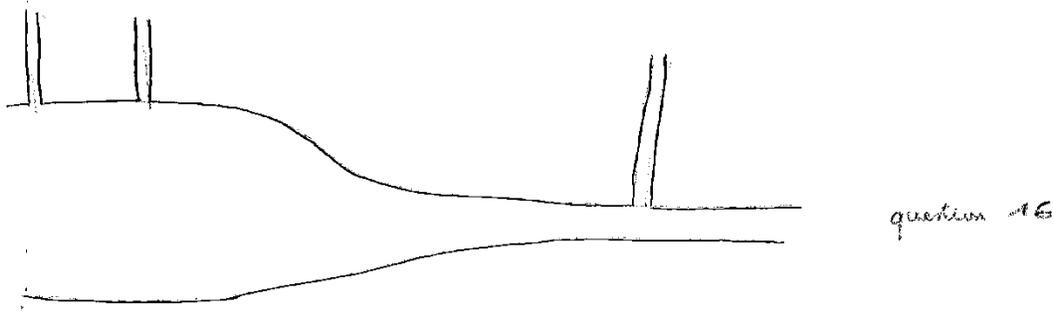


Figure 6.2.2.2
Situation évoquée à la question Q16

J'indique à l'interviewé : « *there is a flow from left to right in a tube like the previous one. We insert a third thin glass tube before bottleneck. Here again, have you used this situation in your course how do you use it? Why?* ».

Ce qui n'est pas usuel ici, c'est l'association proposée sur un même schéma : pour les deux tubes de mesure les plus en amont, il est question *a priori* des pertes de charge régulières, donc de la prise en compte de la viscosité (via par exemple la loi de Poiseuille), tandis que pour le tuyau du milieu et celui placé en aval du rétrécissement, l'analyse proposée dans les manuels s'appuie davantage sur la relation de Bernoulli pour laquelle justement les phénomènes de viscosité sont négligés. Réunir les deux situations sur un même schéma peut aboutir à un dilemme : en amont du rétrécissement, on tient compte des phénomènes de viscosité, pour les négliger juste après. L'enseignant interviewé vit-il cette situation comme étant un dilemme ? Quelle démarche propose-t-il ?

A la question Q17, on envisage une situation prototypique (cf figure 6.2.2.3) : l'écoulement de fluide d'un réservoir via un tuyau horizontal avec différentes prises de mesure de pression. Cette situation permet d'évoquer notamment la notion de pertes de charge. Deux schémas de cette situation sont proposés. Sur ces deux schémas est représentée une droite en pointillés qui relie les surfaces libres des tuyaux permettant la prise de mesure de pression. Cette droite est prolongée jusqu'aux extrémités du tuyau horizontal. Sur les deux schémas, cette droite atteint le côté ouvert du tuyau horizontal. Par contre, concernant l'amont du tuyau horizontal, autant sur le schéma de gauche cette droite atteint la surface libre du réservoir, autant sur le schéma de droite, cette droite atteint un point du réservoir plus bas que la surface libre. Il est alors demandé à l'interviewé de commenter ces deux schémas (« *these pictures are taken from different editions of the same book. Surprising, isn't it ?* »).

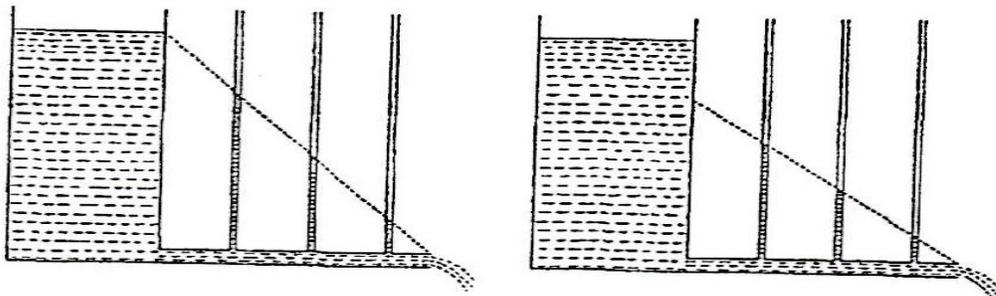


Figure 6.2.2.3
Situations évoquées à la question Q17

Représenter une droite sur ces schémas pour illustrer que, dans une zone du tuyau, la perte de charge y est linéaire, est usuel. Ce qui ne l'est pas, c'est de prolonger cette droite jusqu'aux extrémités du tuyau horizontal. Se pose la question de savoir quel schéma retenir et au-delà, ce que signifie cette droite et le fait de chercher à la prolonger jusqu'aux extrémités du tuyau. Peut surgir ici la question du domaine de validité d'un modèle donné.

Cette situation de la question Q17 est issue d'une note de lecture rédigée dans l'*American Journal of Physics* en 1944 (Farwell, 1944). L'auteur de l'article s'y plaint des erreurs qui perdurent dans l'enseignement à cause de coquilles d'impression dans les manuels scolaires. Il ne précise pas l'erreur qu'il évoque et ne commente pas davantage ces images issues de deux éditions différentes d'un même ouvrage.

Enfin, nous associons un nom aux situations des questions Q15 à Q17 afin de faciliter leur évocation dans la suite du manuscrit.

Nous les nommons respectivement 'rétrécissement', 'couplage' et 'pertes de charge', comme indiqué dans le tableau 6.2.2.4.

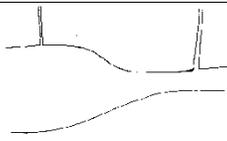
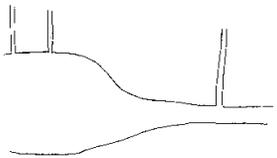
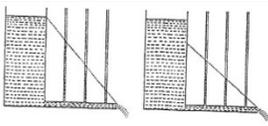
Numéro de la question	Schéma associé	Nom donné à la situation étudiée
Q15		Rétrécissement
Q16		Couplage
Q17		Pertes de charge

Tableau 6.2.2.4
Dénomination des situations des questions Q15 à Q17

Présence éventuelle de difficultés de la part des interviewés lors de l'entretien :

A priori, peu de difficultés sont attendues dans la partie A.

Dans la partie B, l'enseignant y décrit ses choix. *A priori*, peu de difficultés sont attendues là encore, l'enseignant y évoquant sa pratique.

Dans la partie C, des éléments des situations évoquées aux questions Q15 à Q17 se retrouvent dans des manuels qualifiés tant de physique que de biologie : tous les enseignants devraient donc

pouvoir proposer une réponse à ces questions. Elles garantissent donc *a priori* des éléments de comparaison entre enseignants exerçant dans des cursus différents. On s'attend à ce que confronter l'interviewé à des situations sortant du contexte traditionnel le perturbe lors de l'entretien et ce, de manière *a priori* positive (par exemple, à la question Q16, l'association de deux situations traditionnellement disjointes pourrait être source de difficultés chez l'interviewé). Etudier sa réaction éclairerait notre analyse sur ses pratiques déclarées et sur son utilisation du modèle retenu. Une telle démarche nous est donc apparue judicieuse pour cette étude.

6.2.3 Les thèmes et sous-thèmes du questionnaire étudiés dans ce manuscrit au travers du cadre des PCK et *beliefs*

Nous nous interrogeons sur les pratiques ordinaires déclarées d'enseignants et sur ce qui est véhiculé à travers ces pratiques. Nous rappelons dans le tableau 6.2.3.1 les questions de recherche retenues dans ce manuscrit.

Question de recherche	Notation associée
Quelles sont les propriétés des modèles introduits par les enseignants ?	QR1
Quelles sont les propriétés des contextes auxquels ils font appel ?	QR2
Quels périmètres d'expertise en termes de modélisation et de contextualisation ces enseignants présentent-ils ?	QR3
Quelle place les enseignants accordent-ils aux élèves dans leur discours sur leurs pratiques ?	QR4
Existe-t-il des liens entre les catégories de PCK des enseignants « orientées » modélisation et les catégories de PCK « orientées » contextualisation ? Existe-t-il des liens entre certaines variables explicatives (formation, ancienneté, par exemple) et ces catégories de PCK ?	QR5

*Tableau 6.2.3.1
Rappel des questions de recherche retenues dans ce manuscrit*

En choisissant d'ancrer notre travail dans le courant de recherches des PCK, nous nous inscrivons dans la démarche de plusieurs chercheurs francophones qui ont déjà eu recours aux PCK comme outil de catégorisation (Kermen, 2008 ; Jameau, 2013), mais également comme cadre d'étude permettant de caractériser les connaissances des enseignants (Calmettes, 2014 ; Kirschner, 2016).

En cohérence avec nos questions de recherche, les thèmes abordés, les questions posées et les catégories d'analyse retenues doivent permettre de caractériser les modèles et les contextes que les enseignants disent aborder en classe ainsi que leur expertise.

Nous mettons ici en perspective les thèmes et sous-thèmes abordés dans le questionnaire avec les catégorisations proposées dans le courant de recherches des PCK.

Nous n'aborderons ici que les éléments de catégorisation finalement étudiés, qui sont notamment liés aux dimensions de PCK suivantes et évoquées aux chapitres 1 et 4 : *Representations & strategies* et *Student learning & conceptions*.

Pour aborder l'étude d'un rétrécissement dans un écoulement, l'enseignant se réfère *a priori* à un modèle. A travers les PCK qualifiés de *Representations & strategies* peuvent être étudiées de quelle manière l'enseignant aborde le modèle retenu en cours et de quelle manière il l'utilise, notamment quels types de contextualisation il met en place. En référence au modèle de Gess-Newsome, on pourrait parler de connaissances mobilisées par l'enseignant dans la pratique.

Via les PCK qualifiés de *Student learning & conceptions*, on peut s'interroger sur la prise en compte de l'élève par l'enseignant lors de cette phase de modélisation. En particulier, on peut s'interroger sur sa connaissance des difficultés des élèves relatives aux modèles et à la modélisation et à leur prise en compte. En référence au modèle de Gess-Newsome, il s'agirait de connaissances de l'enseignant (et non de connaissances mobilisées dans la pratique, comme pour les PCK qualifiés de *Representations & strategies*).

A l'appellation anglo-saxonne de '*category*' nous avons décidé d'associer l'appellation francophone de 'dimension'. Chacune de ces dimensions de PCK a été divisée en sous-dimensions et catégories, comme indiqué dans le tableau 6.2.3.2. Nous y indiquons également les questions de recherche que ces sous-dimensions permettent d'aborder.

5 sous-dimensions de PCK ont été retenues *a priori* en lien avec *Representations & strategies* et sont abordées dans ce manuscrit : 'Caractéristiques des modèles', 'Modèles introduits', 'Contextes empiriques', 'Contextes pédagogiques' et 'Utilisation du modèle'.

Ces sous-dimensions permettent d'aborder la question des contextes retenus par l'enseignant et du modèle utilisé pour étudier l'écoulement d'un fluide.

4 sous-dimensions en lien avec *Student learning & conceptions* ont été initialement retenues : 'Prérequis', 'Attendus par rapport aux élèves', 'Objectifs du cours' et 'Difficultés des élèves'. Ces sous-dimensions permettent d'estimer la prise en compte des étudiants dans la pratique déclarée des enseignants ainsi que d'aborder les visées du cours recherchées.

N'est évoquée dans ce manuscrit que 'Difficultés des élèves'. En effet, dans ce manuscrit, nous avons décidé de mettre l'accent sur le modèle et les contextes retenus par l'enseignant pour étudier un écoulement : ce sont donc les dimensions qualifiées de *Representations & strategies* qui ont été privilégiées par rapport à celles qualifiées de *Student learning & conceptions*.

Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Question de recherche associée	Question de recherche transverse
<i>Personal PCK Representations & Strategies</i>	Modèles introduits	Nombre de modèles et progression	QR 1	QR3 et QR5
	Caractéristiques des modèles	Fonction du modèle Domaine de validité		
	Contextes empiriques	Objets et phénomènes Recours à l'expérimental	QR 2	
	Contextes pédagogiques	Recours à l'histoire des sciences Supports		
	Utilisation du modèle	Ressources	QR 3	
Raisonnement utilisé		QR 3		
<i>Personal PCK Student Learning & Conceptions</i>	Difficultés des élèves	Nature	QR 4	

Tableau 6.2.3.2
Sous-dimensions et catégories de PCK abordées dans ce manuscrit

Concernant la sous-dimension 'Modèles introduits', nous n'abordons que le 'Nombre de modèles et la progression'.

Concernant la sous-dimension 'Caractéristiques des modèles', nous abordons la 'Fonction du modèle' et son 'Domaine de validité'.

La sous-dimension 'Contextes empiriques' est étudiée via deux catégories, 'Objets et phénomènes' évoqués par l'enseignant et 'Recours à l'expérimental'.

Concernant la sous-dimension de PCK 'contextualisation pédagogique', nous étudions le 'Recours à l'histoire des sciences' et les 'Supports' évoqués par l'enseignant en entretien.

Concernant l'utilisation du modèle évoqué par l'enseignant lors de l'entretien, nous le testons en confrontant l'enseignant à des situations et à un questionnement inhabituel. Roth rappelle qu'à partir d'expériences accumulées, des liens sont créés entre objets et phénomènes : le concept est assimilé quand l'activation d'une expérience objet-phénomène peut activer l'une ou toutes les

autres (Ercikan, 2009). Notre démarche s'inscrit ainsi dans la lignée de Bachelard (1953, p.19), qui rappelle que « *comprendre est une émergence du savoir. Le professeur sera celui qui fait comprendre, -et dans la culture plus poussée où déjà le disciple a compris- il sera celui qui fait mieux comprendre. Comment d'ailleurs le professeur pourra-t-il avoir écho de cette compréhension ? Cela ne pourra se faire que par l'application de l'idée comprise, en se référant à des exemples qui diffèrent de l'exemple enseigné* ». Ici, nous examinons si l'enseignant introduit les situations présentées dans son cours, autrement dit si elles sont des ressources pour son cours, le raisonnement qu'il utilise pour les interpréter et les difficultés qu'il peut éventuellement rencontrer pour répondre.

En lien avec des situations évoquées lors de l'entretien, l'enseignant peut indiquer que ces situations présentent ou non des difficultés pour les étudiants. Nous nous limitons ici à préciser la nature de ces difficultés, si l'enseignant en indique.

En plus des *Personal PCK*, nous abordons une partie des *Beliefs* qui apparaissent comme des *Amplifiers and Filters* dans le modèle de Gess-Newsome. Nous suivons en cela les recommandations de Garritz notamment, qui rappelle que « *paying close attention to a teacher's 'amplifiers and filters' is also needed* » (Garritz, 2014, p.735). Les éléments qualifiés d'*Amplifiers & Filters* permettent en effet de compléter les dimensions précédentes de *Personal PCK* afin d'analyser les pratiques enseignantes sous l'angle des convictions (« *beliefs are of critical importance in understanding enacted practice in the discipline* » (Doyle, 2019, p.483)). Dans cette étude exploratoire, nous nous limitons à trois sous-dimensions, les contextes d'enseignement, les orientations et les attitudes, comme indiquées dans le tableau 6.2.3.3.

Dimension	Sous-dimension
Amplifiers & Filters	Contextes d'enseignement
	Orientations
	Attitudes

Tableau 6.2.3.3

Sous-dimensions de la composante des pratiques qualifiée de 'Amplifiers & Filters' abordées dans ce manuscrit

Les contextes d'enseignement peuvent être par exemple sociaux ou instrumentaux (Grangeat, 2015). Nous nous inscrivons dans la lignée de l'analyse de Roditi (2013) en nous limitant ici à des contextes sociaux. Ces **contextes sociaux** évoqués par l'enseignant peuvent être **liés à l'institution**, lorsque l'enseignant fait référence au programme par exemple, **ou au local**, lorsque l'enseignant évoque des aspects logistiques pour justifier ses choix (accès ou non à du matériel pour effectuer des manipulations, etc.).

'Orientations' est une contraction de l'appellation de Magnusson (1999, p.97) '*Orientation to teaching science*', qui se réfère aux '*purposes and goals for teaching science at a particular grade level*', c'est-à-dire aux raisons pour lesquelles un enseignant considère qu'il a à enseigner un sujet donné à un niveau donné.

S'intéresser aux orientations est indiqué comme étant « *a challenging task* » (*ibid.*, p.29). En effet, les orientations retenues par un enseignant évoluent avec son vécu et avec le contexte d'enseignement (Brown, 2008).

L'équipe de Magnusson établit 9 orientations ou tendances qu'un enseignant peut décider de suivre pour mener une séquence d'enseignement donnée, à savoir « *process, academic rigor, didactic, conceptual change, activity-driven, discovery, project-based science, inquiry and guided inquiry* » (Oliver, 2008, p.262). En fonction de l'orientation de l'enseignant, un même élément de savoir n'est pas abordé de la même manière.

La catégorisation de Magnusson a depuis été contestée (Friedrichsen, 2010), afin d'y ajouter des éléments liés à la NOS et à la vision de l'enseignant de son rôle et de celui de l'élève (Demirdogen, 2016). La proposition de Friedrichsen fait depuis consensus (Fernandez, 2014). Friedrichsen propose d'aborder les « *personalized goals and purposes of science teaching, views of science, and beliefs* » (Rice, 2017, p.200). Par exemple, dans une enquête auprès d'enseignants, Brown analyse les orientations de futurs enseignants en évoquant leurs « *views of teaching and learning* », « *views of the teacher roles* », « *views of the students roles* » et « *central goals* » (Brown, 2008, p.36). De manière analogue, nous considérons **des orientations liées à la NOS, au fait d'apprendre et au fait d'enseigner** pour analyser les réponses des enseignants interrogés.

Par ailleurs, nous nous référons aux **attitudes** des enseignants en entretien pour compléter l'analyse de leur réaction face à un questionnement inhabituel.

Tout comme 'orientation', le terme 'attitude' est polysémique. Garritz (2012) se réfère ainsi à Simpson pour définir l'attitude comme étant une « *prédisposition à répondre positivement ou négativement à une personne, à un événement ou une idée* » (*ibid.*, p.5), c'est-à-dire qu'une attitude est un engagement à chercher à répondre à la demande ou à l'éviter. Garritz se réfère également à Jones et Carter pour la définir comme étant « *une composante du système de croyances d'un individu comportant une composante affective* » (*ibid.*, p.5).

Dans cette étude exploratoire, nous nous sommes juste intéressés à la composante émotionnelle de l'attitude de l'enseignant interrogé : face à une situation potentiellement déstabilisante, est-il perturbé ou reste-t-il neutre, voire est-il assuré ?

6.2.4 Les situations empiriques et questions du questionnaire au travers des dimensions et catégories de PCK

Dans le tableau 6.2.4, nous proposons une synthèse de la catégorisation de PCK retenue dans ce manuscrit, couplée aux contextes empiriques proposés en entretien et aux questions du questionnaire de l'enquête, en indiquant notamment lorsqu'une justification des réponses est demandée lors de l'entretien. Nous signalons que certaines questions sont utilisées pour étudier différentes catégories de PCK (par exemple, la question Q15 'rétrécissement').

Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Contextes empiriques proposés en entretien	Questions du questionnaire de l'enquête	
				Numéro de la question	Justification demandée
<i>Personal PCK Representations & Strategies</i>	Modèles introduits	Nombre de modèles et progression	Rétrécissement	Q8 / Q14 / Q15 / Q16	
	Caractéristiques des modèles	Fonction du modèle		Q8 / Q9 / Q12 / Q14 / Q15 / Q16	
		Domaine de validité	Rétrécissement	Q12 / Q14 / Q15 / Q16 / Q17 / Q18	•
	Contextes empiriques	Objets et phénomènes		Q12 / Q13 / Q14	•
		Recours à l'expérimental		Q12 / Q13 / Q14	•
	Contextes pédagogiques	Recours à l'histoire des sciences		Q11	•
		Supports		Q12 / Q13 / Q14	
<i>Personal PCK Student Learning & Conceptions</i>	Difficultés des élèves	Nature	Rétrécissement	Q14 / Q15 / Q16	•
<i>Personal PCK Representations & Strategies</i>	Utilisation du modèle	Ressources	Canalisation avec rétrécissement Couplage de deux situations prototypiques	Q16	•
		Raisonnement utilisé	Réservoir et canalisation Une situation prototypique et une question inhabituelle	Q17	•

Tableau 6.2.4

Récapitulatif du lien entre catégorisation des PCK et trame du questionnaire de l'enquête

6.3 La population interviewée

Accéder à des profils variés d'enseignants est un des enjeux de cette étude.

Cette variété est liée notamment au parcours et aux structures dans lesquelles ces enseignants exercent.

Nous décrivons ici la variété des institutions de rattachement de la population étudiée puis la variété de cette population. Nous précisons également notre mode de sélection de cette population interviewée et de l'échantillon étudié.

6.3.1 Les institutions d'enseignement

Les entretiens d'enseignants ont été menés aux États-Unis et en France, dans des formations aux dénominations différentes d'un pays à l'autre mais à visées sensiblement équivalentes.

L'enquête s'est déroulée dans des structures variées de premier cycle universitaire (cf annexe D.2) : des CPGE scientifiques (Deuxième année de BCPST agro-véto, PC, PSI et PT), des facultés de physique (L1, L3 et préparations aux CAPES et à l'agrégation de physique) et de médecine (PACES et L3), des sections de techniciens supérieurs (génie chimique, CRSA et CIRA) et d'IUT (Mesuresphysiques), en région parisienne et à Reims, en France.

Des sections de formation de techniciens et d'ingénieurs de différents domaines (*Colleges of mechanics, chemistry, civil engineering, petrol & gas, geology, environment & geology, agriculture, food science, biology, architecture*) à State College et Pittsburgh, aux États-Unis.

Un *Community College*, deux sections d'ingénierie et deux sections d'études pré-médicales issues de 4 *College* distincts à Boston, aux États-Unis.

En termes de recours à l'expérimental et de modélisation, le système américain semblait promouvoir des approches différentes de celles utilisées en France. A partir des manuels anglo-saxons étudiés, on pouvait en effet supposer trouver aux États-Unis une approche plus appliquée et moins formelle qu'en France, une contextualisation plus systématique et un recours à l'expérimental plus courant qu'en France.

6.3.2 Les profils des enseignants interviewés

La variété des profils d'enseignants rencontrés est détaillée en annexe (cf Annexe D.1), mais signalons ici que parmi les enseignants français interrogés, ceux en poste en Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles (CPGE) et en Sections de Techniciens Supérieurs (STS) sont très majoritairement agrégés et ceux enseignant à l'université sont passés par les CPGE pour une partie d'entre eux.

Le séjour aux États-Unis a permis d'accéder à un public d'enseignants aux parcours de formation très différents du nôtre, ce qui nous a semblé judicieux, notamment pour étudier la place qu'occupent le recours à l'expérimental et la modélisation dans leur enseignement.

Une majorité d'enseignants interrogés sont des hommes.

L'échantillon étudié est composé d'enseignants de tout âge.

6.3.3 Le choix des enseignants interviewés

En France, à Reims et Paris, pour les CPGE et les BTS, les contacts ont été obtenus de proche en proche, via des connaissances de connaissances personnelles.

Pour le personnel de l'université de Reims, les contacts ont été obtenus après quelques relances téléphoniques. A Orsay, les contacts ont été obtenus par l'entremise de ma directrice de thèse.

Les seuls enseignants français que je connais personnellement sont ceux de CPGE à 4 exceptions près et un de BTS. Aucun aux États-Unis : en effet, j'ai été accueilli par le Dr Scott McDonald du *College of Education* de Penn State University (campus de State College). Dans ce *College of Education*, personne n'enseigne de mécanique des fluides et aucun contact n'a été obtenu par leur intermédiaire.

Avant mon arrivée aux États-Unis, j'ai effectué une recherche sur le site internet de l'université qui m'accueillait. Un courrier électronique a été envoyé à tous les enseignants repérés comme étant en charge d'un cours en lien avec l'écoulement d'un fluide. Après relances, 5 enseignants ont accepté que j'assiste à leurs cours (*lecture class*) et 3 autres à leurs séances de travaux pratiques (*lab session*).

Les autres contacts ont été obtenus soit de proche en proche, un enseignant interviewé me suggérant le nom d'un collègue et ainsi de suite, soit par démarchage direct de ma part, une fois arrivé sur le campus. A Pittsburgh et Boston, beaucoup de refus et de non-réponses. Après démarchage direct sur place de ma part, quelques rendez-vous supplémentaires ont pu être obtenus.

Aussi le choix des enseignants interrogés aux États-Unis a été contraint par les réponses positives reçues.

L'absence d'entretien au département d'*Air & Space* de State College et de Pittsburgh est due au refus des enseignants contactés dans ces départements.

A State College, il n'y a ni structures de *Community College*, ni CHU (Centre Hospitalier Universitaire). Pour accéder à des enseignants exerçant dans de telles structures, j'ai donc élargi la zone de démarchage : à Pittsburgh pour des raisons de proximité géographique et Boston pour la densité d'universités présentes dans cette ville et la possibilité qui m'a été offerte d'y être logé pour quelques jours. A noter enfin qu'à Boston, un *Community College* m'a été interdit d'accès par un personnel de la direction de cet établissement. Lui ayant signalé que la veille, j'avais effectué un entretien dans un établissement très prestigieux de la ville, il m'avait dit avoir peur d'une comparaison avec le sien et que pour protéger son établissement, il préférerait donc m'en refuser l'accès.

6.3.4 L'élaboration de l'échantillon interviewé : disciplines de cœur et disciplines de service

Nous nous intéressons aux pratiques déclarées d'enseignants de premier cycle universitaire de différents champs disciplinaires scientifiques et exerçant dans différentes structures que nous venons de décrire.

Nous centrons notre étude sur des enseignants dont la discipline académique de rattachement est la physique. Ils constituent la cible principale de notre enquête.

Parmi ces enseignants qualifiés de physique, certains enseignent dans des filières à dominante physique, visant à former des ingénieurs ou des techniciens.

D'autres interviennent dans des formations d'ingénieurs où la physique est au contraire une mineure (cas des cursus de biophysique ou de géophysique par exemple).

D'autres, enfin, exercent dans des filières biomédicales (par exemple des enseignants de physique en PACES, première année de médecine en France).

Nous nous intéressons aussi aux pratiques déclarées d'enseignants dont la discipline académique de rattachement et la filière dans laquelle ils exercent sont qualifiées de Biomédical (Biologie, physiologie ou médecine).

Comme nous allons souvent nous référer à ces différents types de formation dans la suite de ce manuscrit, nous codons chacune d'entre elles par une lettre en fonction de leur visée principale, comme résumé dans le tableau 6.3.4.1.

Des formations généralistes conduisant aux écoles d'ingénieurs, dans lesquelles la mécanique des fluides est une majeure, sont notées I. Celles dans lesquelles la mécanique des fluides est une mineure sont notées U (U pour « Utilisateur »). Les formations de techniciens sont notées T et celles qualifiées de Médical ou de biologie sont notées MB.

Nous parlerons désormais de la 'famille T' pour qualifier l'ensemble des enseignants interviewés exerçant dans une filière dont la visée est de former des techniciens.

Visée de la formation	Code associé
Ingénieur (formation « d'ingénieur » avec mécanique des fluides en majeure)	I
Utilisateur (formation « d'ingénieur » avec mécanique des fluides en mineure)	U
Technicien	T
Médical ou biologie	MB

Tableau 6.3.4.1
Codage des formations étudiées dans ce manuscrit

Le statut de la mécanique des fluides (cœur / service) et le statut du savoir construit (objet / outil) diffèrent *a priori* en fonction de la visée de formation, ce qui devrait impacter les pratiques déclarées des enseignants interrogés.

Ces aspects sont résumés dans le tableau 6.3.4.2.

On y retrouve notamment les appellations des différentes familles d'enseignants (T, I, U et MB), en fonction de la visée de la formation dans laquelle ces enseignants exercent.

Concernant les formations de techniciens, la physique peut y avoir un statut de discipline de cœur (formations spécialisées en hydraulique) ou de service (formations en maintenance par exemple).

Discipline enseignée	Enseignant de physique			Enseignant de biologie / géologie / médecine
Filière de formation	physique		biophysique / géophysique	biologie / géologie / médecine
Visée de formation	T Professionnel	I Généraliste	U Généraliste	MB Généraliste
Statut de la discipline / domaine disciplinaire	Service Ou coeur	Cœur	Service	Service
Statut de l'objet de savoir	Objet	Objet	Objet	Outil

Tableau 6.3.4.2
Caractéristiques des formations étudiées

6.4 L'échantillon analysé

Pour éviter des comparaisons strictes entre enseignants, nous avons décidé d'étudier les réponses de familles d'enseignants, des « *espèces de personnes* » en reprenant l'expression de Chevallard (2002, p.11). On peut ainsi tenter de lier leurs réponses aux objectifs de formation et aux spécificités des populations étudiantes de ces familles

Pour chaque type de formation, les enseignants ont été réunis en sous-groupes. Ces sous-groupes sont construits en fonction du type de structure dans lequel ils exercent, du type de poste qu'ils y occupent et de leur pays d'exercice.

Sur l'exemple de la famille I, les enseignants ont été réunis dans les sous-groupes suivants : enseignant-chercheurs américains / personnel américain uniquement chargé d'enseignement / enseignant-chercheurs français / PRAG (Professeur agrégé affecté dans l'enseignement supérieur) / professeurs de CPGE.

La famille I a été divisée en deux sous-familles, notées I CPGE et I USA. La sous-famille I CPGE n'est constituée que d'enseignants (français) de CPGE et la sous-famille I USA n'est constituée que d'enseignant-chercheurs américains.

Les noms des enseignants ont été anonymés et indexés par une lettre suivie d'un chiffre.

La lettre est choisie en fonction du type de formation dans lequel ils exercent principalement

Le numéro associé à un enseignant a été choisi de manière arbitraire.

Ainsi T3 représente le 3e membre du groupe des enseignants interrogés exerçant dans une formation de techniciens (famille T).

Pour des raisons de contraintes en temps en termes d'obtention de rendez-vous pour des entretiens et d'analyse détaillée des entretiens menés, il a été décidé de sélectionner 3-4 enseignants par sous-famille I (I USA et I CPGE) et par famille U et T. Pour la famille MB, 8 enseignants ont été retenus.

Les profils retenus correspondent aux entretiens recueillis **les plus riches**, c'est-à-dire ceux proposant le plus de réponses argumentées.

Les enseignants choisis par sous-famille sont indiqués dans le tableau 6.4.1. Ils y sont répartis en fonction de la discipline enseignée, de la filière et de la visée de formation.

On y compte 4 enseignants intervenant dans des formations à visée technicien et 11 intervenant dans des formations à visées ingénieur, soit 15 enseignants dont la discipline enseignée est la physique, auxquels on ajoute 8 enseignants dont la discipline académique de rattachement est qualifiée de Biomédical.

L'analyse porte donc essentiellement sur 23 enseignants parmi les 49 enseignants interrogés.

Parmi les enseignants sélectionnés, on compte environ 2/3 d'enseignants dont la discipline académique de rattachement est la physique pour 1/3 d'enseignants dont la discipline académique de rattachement est qualifiée de Biomédical.

Les enseignants qualifiés de physique constituent donc bien la cible principale de notre enquête.

Discipline enseignée	Enseignant de physique			Enseignant de biologie / géologie / médecine	
	physique		biophysique / géophysique		
Filière de formation				biologie / géologie / médecine	
Visée de formation	T Professionnel	I Généraliste		U Généraliste	MB Généraliste
Enseignants retenus pour l'analyse	T1	<i>I</i>	<i>I</i>	U2	MB2
	T2	<i>CPGE</i>	<i>USA</i>	U5	MB3
	T3	I5	I13	U6	MB4
	T6	I7	I14		MB5
		I9	I15		MB6
	I11	I20		MB7	
				MB8	
				MB9	
<i>Nombre d'enseignants</i>	4	4	4	3	8
<i>Sous-totaux (total : 23)</i>	15				8

*Tableau 6.4.1
Répartition des enseignants retenus*

Parmi les caractéristiques des enseignants retenus dans chaque famille pour l'analyse, nous en précisons deux dans le tableau 6.4.2 : le statut de l'enseignant (enseignant-chercheur ou uniquement enseignant, par exemple agrégé en France), ainsi que le pays dans lequel exercent ces enseignants.

Nous y constatons que les sous-familles I USA et I CPGE ainsi que la famille U sont homogènes en termes de statut de l'enseignant (uniquement des enseignants-chercheurs parmi les I USA et les U ; uniquement des enseignants parmi les I CPGE), tandis que les familles T et MB sont, elles, plus hétérogènes.

Cela s'explique par la quantité et la qualité des entretiens obtenus dans chacune de ces familles.

Famille	Sous-famille	Pays d'exercice	Dénomination des enseignants retenus pour l'analyse			
Ingénieur (I)	Enseignants-chercheurs	Américains (I USA)	I13	I14	I15	I20*
		Français (I CPGE)				
	Uniquement enseignants	Américains (I USA)				
		Français (I CPGE)	I5	I7	I9	I11*
Utilisateur (U)	Enseignants-chercheurs	Américains	U2	U5	U6	
		Français				
	Uniquement enseignants	Américains				
		Français				
Technicien (T)	Enseignants-chercheurs	Américains	T6			
		Français				
	Uniquement enseignants	Américains	T1	T2	T3	
		Français				
Médical-Biologie (MB)	Enseignants-chercheurs	Américains	MB6	MB9		
		Français	MB4	MB5		
	Uniquement enseignants	Américains	MB7	MB8		
		Français	MB2	MB3		

Tableau 6.4.2
Caractéristiques des enseignants retenus

Apportons quelques remarques supplémentaires sur ce tableau 6.4.2 :

I20* intervient dans une université à renommée mondiale, où il dispense un cours à destination d'élèves ingénieurs d'un département de mécanique (cursus qualifié de I) et d'autres départements, qualifiés de biophysique notamment (cursus qualifiés de U). Son profil a donc été scindé en deux, selon qu'il aborde le cursus qualifié d'ingénieur ou de biophysique. Nous n'évoquons ici que ses réponses en lien avec le cursus qualifié d'ingénieur.

I11* : I11 enseigne ou a enseigné dans des cursus qualifiés de I ou de MB et évoque ces deux types de cursus lors de son entretien.

Son profil a donc été scindé en deux, selon qu'elle aborde le cursus qualifié d'ingénieur ou de biomédical. Les dénominations correspondantes sont respectivement 'I11' et 'I11BCPST'. Nous n'évoquons ici que 'I11'.

Nous suivons l'exemple d'un article de Coquidé (1998) et de Van Driel (2005) en fournissant en annexe un tableau récapitulatif des caractéristiques professionnelles des enseignants interrogés (cf Annexe D.1.6).

Nous décrivons également en annexe les caractéristiques des modules qu'ils enseignent et les structures d'enseignement dans lesquelles ils exercent (cf Annexe D.1.6).

Enfin, nous indiquons dans le tableau 6.4.3 à quel questionnaire de la pré-enquête ou de l'enquête ces enseignants retenus ont répondu.

Enseignant	I5	I7	I9	I11	I13	I14	I15	I20	U2	U5	U6	T1	T2	T3	T6	MB2	MB3	MB4	MB5	MB6	MB7	MB8	MB9
Pré-enquête			•	•								•	•	•		•	•		•				
Enquête	•	•			•	•	•	•	•	•	•				•			•		•	•	•	•

Tableau 6.4.3
Questionnaire auquel les enseignants retenus ont répondu

Comparer des enseignants ayant répondu à des questionnaires dont la formulation des questions diffère peut paraître gênant *a priori*.

Pour autant, rappelons que lorsque nous avons cherché à repérer ce qui était dit par l'enseignant durant l'entretien, en lien avec les catégories proposées, nous avons dû étudier l'ensemble du discours et non pas uniquement la réponse aux questions spécifiques associées *a priori* à ces catégories.

Prenons l'exemple d'I9, qui a répondu à la pré-enquête. La première question qui lui est posée concerne les grandes idées du cours de mécanique des fluides dans sa filière. Il emploie le terme de « *clé de voûte* » dans sa réponse. Je le relance sur ce point et il précise son propos. Il débute alors son discours en évoquant de lui-même la notion de modèle et détaille la démarche qu'il lui associe.

On peut émettre l'hypothèse que les premières idées qui jaillissent du discours de l'enseignant sont celles qui sont les plus importantes pour lui.

Ces éléments de réponse fournis spontanément par I9 sont du registre de ce qui est attendu aux questions sur les modèles lors de l'enquête.

Nous avons veillé à ne retenir de la pré-enquête que des enseignants ayant spontanément abordé ces points dans leurs réponses.

Cet aspect a donc également impacté la sélection des enseignants retenus pour l'analyse.

Signalons enfin que les MB n'ont pas répondu à certaines questions (Q15 'rétrécissement' et Q16 'couplage' notamment), ayant indiqué lors de l'entretien ne pas étudier la situation d'un rétrécissement. Cela n'est pas si gênant, le cœur de cible de cette enquête étant les enseignants qualifiés de physique.

6.5 Le traitement des données

6.5.1 Panorama du travail réalisé

Nous avons effectué **une analyse qualitative, enseignant par enseignant**.

Pour chacun d'entre eux, nous avons étudié les sous-catégories de PCK et sous-dimensions de *Beliefs* évoquées précédemment.

De là, nous avons poursuivi par une étude semi-quantitative en menant deux sortes d'analyse : d'une part, nous avons évalué le nombre d'enseignants donnant tel type de réponse associé à telle sous-catégorie de PCK et d'autre part, nous avons tenté de construire des profils de groupes d'enseignants en comparant leurs réponses aux différentes sous-catégories de PCK retenues.

Nous avons cherché à croiser entre eux les résultats obtenus par ces groupes d'enseignants aux différentes sous-catégories de PCK et sous-dimensions de *Beliefs*, ainsi qu'à croiser ces résultats aux variables explicatives retenues.

Nous avons également étudié chaque sous-catégorie de PCK et sous-dimension de *Beliefs* pour l'ensemble de la population, **famille par famille**.

6.5.2 Analyse qualitative des réponses fournies par chaque enseignant

Nous avons réalisé une analyse de contenu des réponses fournies par les enseignants. Dans une analyse de contenu, le découpage en unités de signification (phrases ou extraits de phrase) est fondé sur le sens des propos recueillis et non sur leur forme. Nous nous sommes donc intéressés à l'homogénéité thématique, c'est-à-dire que nous avons analysé comment un même thème donné (par exemple le recours à l'expérimental) est abordé par différents sujets (analyse thématique horizontale) (Beaud, 2003).

Pour cela, nous avons écouté le discours des enseignants enregistré lors des entretiens et nous l'avons en partie transcrit à l'écrit.

Pour un enseignant donné, nous avons repéré ce qu'il disait durant l'entretien en lien avec les catégories de PCK retenues *a priori*.

Trois autres éléments ont été également retenus : les mots indigènes, décrits par Beaud (2003) comme « *disant à leur manière - simple, imagée, quotidienne - des catégories confrontables aux modes de classement sociaux plus généraux et abstraits* », les silences, non-dits et changements de ton ainsi que les malentendus.

Les éléments thématiques ont été recueillis sur l'ensemble de l'entretien et non pas uniquement lors de la réponse à la question spécifique associée à cette catégorie. En effet, on a constaté lors des entretiens que les éléments de réponses associés à une catégorie de PCK donnée n'étaient pas nécessairement fournis lors de la question associée du questionnaire.

A chacune des sous-catégories de PCK ont été associés un certain nombre de types de réponses, construits *a priori* pour l'analyse et qui ont été ensuite modifiés ou enrichis à partir de l'échantillon étudié.

Présentons cette analyse sur l'exemple des réponses de I11 à des questions relatives à l'histoire des sciences.

Lorsque lui est demandé si elle a recours à l'histoire des sciences, elle répond : « *A la fin de tous mes TD je mets une petite bio d'un des physiciens dont on a rencontré le nom pendant le cours / Par exemple Bernoulli avec une image du physicien déjà pour qu'ils visualisent l'époque / Là je mets une petite bio avec ce qu'il a fait et pourquoi il a contribué à l'histoire des sciences /* ». Plus loin dans l'entretien, elle indique que ces biographies contiennent notamment quelques dates, le prénom (« *ils adorent ça* »), le nom propre et la nationalité (« *ça les amuse beaucoup donc c'est pas plus mal* ») puis indique que « *C'est assez positif / Ça a l'air de les intéresser sinon ils diraient rien du tout / C'est que ça doit les amuser un peu /* ».

Ces éléments de réponses ont été compilés et un travail similaire a été mené pour l'ensemble de la population interrogée.

De là, couplé au travail préparatoire sur les types de réponses attendues, 4 types de réponse ont par exemple été retenus pour la sous-catégorie 'Visée de l'histoire des sciences', à savoir 'Absente ou jugée inutile', 'Annexe' (à lire à la maison), 'Ludique ou illustrative' (anecdotes) ou 'Compréhensive'.

La réponse de I11 relèverait alors de 'Ludique ou illustrative', c'est-à-dire du registre de l'anecdote et serait codée dans une grille d'analyse.

Un travail similaire a été mené pour l'ensemble des sous-catégories indiquées.

Une grille multidimensionnelle constituée de deux blocs associés aux dimensions de PCK *Representations & strategies* et *Student learning & conceptions* a ainsi été construite et a pu être complétée pour chaque enseignant.

Nous avons également renseigné un troisième bloc en lien avec les caractéristiques de l'enseignant et le déroulé de l'entretien. Ce bloc comporte par exemple la présentation de l'interviewé (données recueillies sur son parcours et ses goûts en lien avec la mécanique des fluides), du module enseigné (niveau d'enseignement du module, structure du module, volume horaire dédié) et du déroulé de l'entretien.

6.5.3 Analyse *a priori* des réponses susceptibles d'être fournies par les enseignants

Nous nous limitons au modèle retenu par les enseignants interrogés pour une séquence d'enseignement sur un écoulement interne. Plusieurs aspects le caractérisent. En entretien, nous avons utilisé la relation de Bernoulli pour aborder les caractéristiques du modèle retenu par les enseignants. Nous avons basculé sur la loi de Poiseuille lorsque l'interviewé déclarait ne pas enseigner la relation de Bernoulli.

Se pose la question des modèles introduits par l'enseignant.

Il s'agit *a priori* d'aborder les caractéristiques du modèle, notamment la fonction du modèle perçue par l'enseignant, descriptive et explicative ou prédictive. Si le modèle retenu est de type prédictif, les résultats qu'il produit correspondent-ils uniquement à une tendance ou aboutissent-ils à des données quantitatives ? Sur l'exemple de l'étude d'un rétrécissement dans une canalisation, le modèle retenu permet-il uniquement de prévoir le sens de variation de la pression associée au rétrécissement ou permet-il aussi d'obtenir une expression littérale de cette variation ? L'enseignant l'utilise-t-il pour obtenir une valeur numérique ? Si oui, est-elle comparée à une valeur mesurée ou à une valeur de référence ?

6.5.4 La grille d'analyse thématique en termes de PCK et de *beliefs* pour les modèles et les contextes

Une première exploitation des données nous a conduits à limiter le nombre de sous-catégories de PCK envisagées *a priori* et à affiner les types de réponse associés. Les éléments de réponse obtenus auprès des enseignants n'étaient en effet pas nécessairement pertinents pour caractériser leurs pratiques relativement à ces sous-catégories. De plus, certains nous ont semblé secondaires au regard de ce qui pouvait être analysé pour d'autres sous-catégories de PCK. Il en est ainsi par exemple des réponses obtenues concernant les types de preuve et de formulation du modèle en comparaison de ce qui pouvait être analysé sur le domaine de validité du modèle.

La grille multidimensionnelle que nous avons finalement utilisée est présentée dans le tableau 6.5.4. Les sous-catégories associées à chaque catégorie sont simplement nommées ici. Elles sont présentées aux chapitres 7 et 8.

Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie
<i>Personal PCK Representations & Strategies</i>	Modèles introduits	Nombre de modèles et progression	Un type
			Deux types
	Caractéristiques des modèles	Fonction du modèle	Non mentionné
			Descriptif et explicatif
			Prédictif
		Domaine de validité	Non mentionné
	Mentionné		
	Contextes empiriques	Objets et phénomènes	Mondes de référence
			Objets et phénomènes mentionnés
		Recours à l'expérimental	Visée
	Contextes pédagogiques	Recours à l'histoire des sciences	Visée
			Connaissances introduites
		Supports	Nombre
	Utilisation du modèle	Ressources	Non abordé
			Abordé
Raisonnement		Difficultés	
		Pas de difficultés	
<i>Personal PCK Student Learning & Conceptions</i>	Difficultés des élèves	Nature	Aucune
			Mathématique
			Physique

Tableau 6.5.4

Sous-dimensions, catégories et sous-catégories de PCK abordées dans ce manuscrit

6.5.5 Le profil d'un enseignant

Pour chaque enseignant et pour chacune des sous-catégories de PCK retenues, nous avons complété la case correspondante dans la grille en y indiquant le code associé au type de réponse fourni par l'enseignant interrogé. Soit, sur l'exemple de la sous-catégorie 'Visée de l'histoire des sciences' les correspondances indiquées dans le tableau 6.5.5.1.

Type de réponse	Valeur chiffrée associée remplie dans la grille
Absente	0
Annexe	1
Ludique ou introductive	2
Compréhensive	3

*Tableau 6.5.5.1
Codage associé aux types de réponses retenues
pour la sous-catégorie 'Visée de l'histoire des sciences'*

I11 serait codée par un chiffre '2' pour cette sous-catégorie.

Ce travail a été mené sur les 49 enseignants interrogés mais nous rappelons que dans les chapitres qui suivent, nous n'évoquons que les 23 enseignants retenus pour la richesse de leurs réponses et avec lesquels nous menons une analyse semi-quantitative comme évoqué précédemment.

Sous quelle forme représenter ensuite ces données codées ? La grille ainsi élaborée *a posteriori* permet notamment de construire le profil partiel d'un enseignant via une représentation sous Excel par exemple. Les modes de représentation retenus sous Excel nécessitent de rentrer au préalable des valeurs chiffrées : une échelle de chiffres a été associée à chacun des types de réponse d'une sous-catégorie donnée et de là, on a codé une signalétique pour chaque chiffre. Soit, sur l'exemple précédent de la sous-catégorie 'Visée de l'histoire des sciences', les correspondances indiquées dans le tableau 6.5.5.2.

Type de réponse	Valeur chiffrée associée	Type de trait associé
Absente	0	Absence de trait
Annexe	1	Trait fin en pointillé
Ludique ou introductive	2	Trait fin en continu
Compréhensive	3	Trait épais en continu

*Tableau 6.5.5.2
Types de traits associés aux types de réponses retenues*

Pour I11, codée '2', il y aurait un trait fin continu dans la représentation Excel finalement retenue.

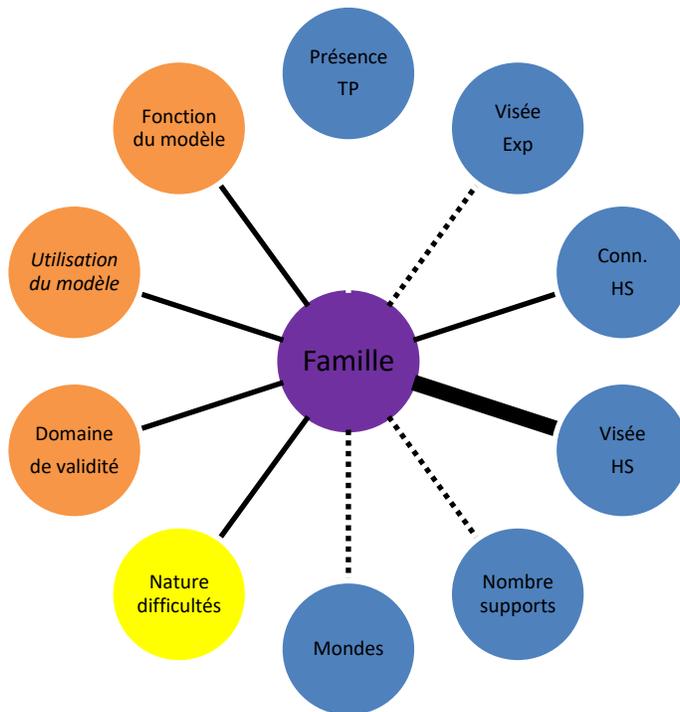
La même procédure est répétée pour chacune des sous-catégories. Nous qualifions de 'fleur' la représentation Excel choisie. Elle est constituée de 'pétales' associés aux sous-catégories retenues.

Cette représentation en forme de fleur étant limitée à 10 pétales, nous avons eu à sélectionner une partie seulement des sous-catégories étudiées ici, comme indiqué dans le tableau 6.5.5.3.

Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Éléments retenus dans la représentation en forme de fleur
Modèles introduits	Nombre de modèles et progression	Un type	
		Deux types	
Caractéristiques des modèles	Fonction du modèle	Non mentionné	•
		Descriptif et explicatif	
		Prédictif	
	Domaine de validité	Non mentionné	•
Mentionné			
Contextes empiriques	Objets et phénomènes	Mondes de référence	•
		Objets et phénomènes mentionnés	
	Recours à l'expérimental	Visée	•
		TP	•
Contextes pédagogiques	Recours à l'histoire des sciences	Visée	•
		Connaissances introduites	•
	Supports	Nombre	•
Utilisation du modèle	Ressources	Non abordé	•
		Abordé	
	Raisonnement	Difficultés	
		Pas de difficultés	
Difficultés des élèves	Nature	Aucune	•
		Mathématique	
		Physique	

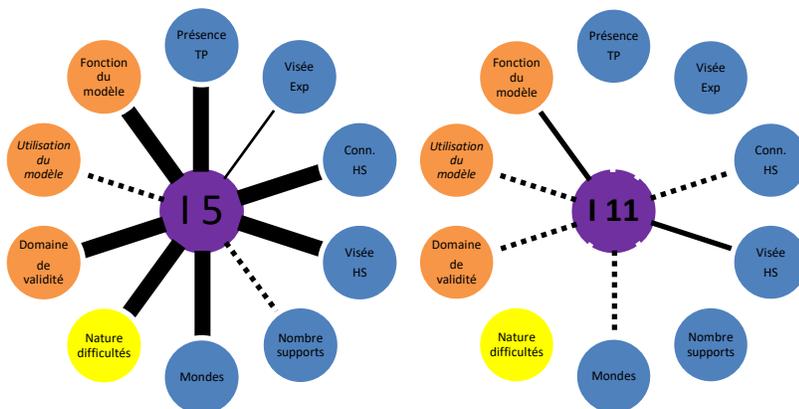
*Tableau 6.5.5.3
Éléments retenus dans la représentation en forme de fleur*

On obtient la représentation suivante, indiquée dans le document 6.5.5.1. Nous avons retenu des éléments liés à ce que les enseignants disent qu'ils font (éléments indiqués avec une police de caractères droits dans la représentation en forme de fleur) et un élément lié à ce qu'ils sont susceptibles de faire (élément 'Utilisation du modèle' indiqué en italique sur la fleur). En orange sont représentés les éléments liés aux modèles, en bleu ceux liés aux contextes et en jaune celui lié aux élèves.



Document 6.5.5.1
Exemple de bilan général sous forme de fleur

Nous illustrons cette représentation dans le document 6.5.5.2, sur les exemples de I5 et de I11.



Document 6.5.5.2
Bilan général de I5 et de I11

Le nombre et les proportions respectives des éléments retenus apparaissent sur ces graphiques en forme de fleur, mettant en avant les points valorisés et les points minorés éventuels de l'enseignant interrogé ainsi que l'homogénéité ou non de ces réponses.

On obtient ainsi le 'profil' d'un enseignant en termes de modèle et de contextes retenus pour l'étude de l'écoulement d'un fluide.

On observe par exemple pour I5 une répartition homogène des 10 éléments représentés. Ses points valorisés sont nombreux (le recours à l'histoire des sciences, le domaine de validité du modèle proposé, etc...). Ses points minorés seraient liés à l'utilisation du modèle et au nombre de supports retenus.

On observe pour I11 un profil beaucoup plus hétérogène, avec peu de points valorisés. Le recours à l'expérimental et le nombre de supports retenus apparaissent comme les points de sa démarche les plus minorés.

La grille proposée ici permet aussi une ouverture sur d'autres critères de comparaison possibles : l'ancienneté, le cursus d'origine, le pays d'exercice...

Rappelons que les graphiques obtenus sont relatifs à l'échantillon étudié et restent un outil visuel d'aide à la description.

6.5.6 Le profil d'une famille

Nous explorons des pratiques d'enseignants de différentes sphères : nous attendons des spécificités individuelles et des marqueurs liés à l'institution de rattachement.

Les regroupements retenus initialement sont ceux indiqués en 6.4.2 et liés aux familles et sous-familles (I CPGE, I USA, U, T et MB).

Pour chaque sous-catégorie, en moyennant sur l'ensemble des membres d'une famille ou sous-famille donnée les scores obtenus par les enseignants, on obtient également le profil partiel d'une famille.

On peut alors comparer les interviewés et les familles entre eux.

6.5.7 Mise en perspective des résultats associés aux différentes dimensions des PCK

Nous cherchons à mettre en évidence d'éventuelles tendances entre les résultats obtenus sur les modèles et les contextes évoqués par les enseignants.

Nous nous demandons si les regroupements d'enseignants opérés en lien avec les démarches de modélisation restent pertinents pour caractériser les contextes auxquels ils se réfèrent.

Nous souhaitons observer également si les enseignants ayant été le moins déstabilisé en entretien par les questions liées aux modèles sont les mêmes que ceux qui utilisent la plus grande variété de contextes à disposition.

6.5.8 Mise en perspective des résultats avec les variables explicatives

Nous cherchons également à mettre en évidence d'éventuelles variables explicatives associées aux résultats obtenus sur les modèles, les contextes et l'expertise des enseignants.

Faute de temps, nous nous limitons aux variables suivantes : la formation initiale en mécanique des fluides de l'enseignant interrogé, son lieu de formation universitaire initiale, son ancienneté en tant qu'enseignant dans le module pour lequel il est interviewé, son éventuel domaine de recherche, son domaine d'enseignement, le niveau d'enseignement dans lequel il exerce, son choix d'enseigner le module indiqué.

Nous avons ainsi accès, dans cette étude exploratoire, à des variables explicatives liées au vécu personnel de l'enseignant (formation initiale et lieu de formation, ancienneté), aux institutions dans lesquelles il exerce (domaines de recherche et d'enseignement, niveau d'enseignement) et également une variable liée à ses convictions (choix d'enseigner le module indiqué).

Chapitre 7 Résultats sur les modèles

Modéliser apparaît comme un élément important de la formation en CPGE : l'observe-t-on dans les propos des enseignants de CPGE interrogés (sous-famille I CPGE) ? En est-il de même pour les autres familles d'enseignants interrogés ?

Dans ce chapitre, il s'agit de caractériser ce que les enseignants disent qu'ils font et de dégager l'étendue de leur répertoire en termes de modèle et de modélisation en entretien : quel périmètre d'expertise présentent-ils ?

Nous nous concentrons sur les catégories de *Personal PCK Representations & Strategies* et *Student Learning & Conceptions* associées au modèle évoqué par les enseignants interviewés. Nous abordons également des catégories d'*Amplifiers & Filters* dans l'analyse des justifications associées à leurs réponses.

Nous débutons par la présentation de la grille d'analyse relative aux modèles, que nous avons élaborée puis nous présentons les résultats obtenus.

7.1 Grille d'analyse relative aux modèles

Nous proposons une brève analyse *a priori* de ce qu'il est possible d'attendre en termes de modèle et de modélisation puis nous présentons les éléments de la grille d'analyse que nous avons dégagés et retenus *a posteriori*, à partir des réponses majoritaires obtenues.

7.1.1 Analyse *a priori*

Analyse succincte décontextualisée

La physique est une science des modèles.

A chaque niveau d'approximation et à chaque type de question correspond un modèle.

Au sein d'une famille d'enseignants donnée, les volumes horaires dédiés et la finalité des formations étant proches, on peut attendre une certaine homogénéité dans les réponses obtenues auprès des enseignants qui la compose.

En fonction de la famille considérée, les attendus en termes de modèle retenu diffèrent : c'est chez un public qualifié de physique (familles I, U et T) que le travail sur la modélisation devrait être le plus présent.

A des modèles explicatifs et davantage tournés vers le prédictif évoqués par les enseignants qualifiés de physique devrait correspondre un modèle essentiellement descriptif et explicatif pour la famille MB.

A partir des attendus de formation du secondaire et des référentiels de compétences des mentions de Licence, nous estimons que délimiter le domaine de validité d'un modèle fait partie de la démarche de modélisation, que cette étape est importante et que la négliger peut induire chez l'enseignant une perception tronquée de la difficulté d'une situation donnée.

Nous estimons donc qu'une prise en compte du domaine de validité du modèle envisagé devrait apparaître dans le discours des enseignants interrogés, quelle que soit leur famille associée.

Pour les familles I et U, une réflexion sur l'élaboration du modèle est attendue. Par exemple, en lien avec la famille U, il semble nécessaire de comprendre l'apport mais aussi les limites du recours à un modèle (ici de la physique) lorsqu'on étudie une situation à l'interface entre la physique et la biologie ou entre la physique et la médecine.

Un aspect utilitaire devrait apparaître dans la famille T, la finalité des formations qualifiées de techniciens étant *a priori* plutôt d'appliquer des procédures que d'en concevoir : on n'attend pas une réflexion aussi développée sur la démarche de modélisation dans cette famille que dans les familles I ou U.

Les difficultés des élèves en lien avec l'étude d'un rétrécissement et signalées par les enseignants peuvent être de nature mathématique (par exemple obtenir l'expression d'une pression en fonction des diamètres en amont et en aval d'un rétrécissement) ou conceptuelles qualifiées de physique (par exemple choisir le modèle approprié pour étudier le rétrécissement).

Les difficultés de nature mathématique devraient être moins mentionnées dans le discours des enseignants I que chez les autres, les étudiants de ces formations qualifiées de I ayant été généralement sélectionnés.

Des difficultés de nature physique sont attendues quel que soit le profil de l'élève : elles devraient donc apparaître parmi les réponses des enseignants de chaque famille.

Par ailleurs, quel que soit le modèle retenu, il devrait être opérant au sens où il fournirait des pistes de raisonnement face à un problème nouveau, ne fonctionnant pas seulement dans un contexte donné, celui présenté lors de la situation d'enseignement. Face à un contexte inhabituel, l'enseignant met-il en application la démarche de raisonnement énoncée en situation d'enseignement ?

Appliquons cette analyse décontextualisée au cas de l'enseignement de la mécanique des fluides :

A quel type de modèle l'enseignant se réfère-t-il en entretien lorsqu'il s'agit d'étudier un écoulement interne ?

Le travail sur la modélisation permet de développer une vision d'ensemble de l'écoulement, d'estimer la localisation de la couche limite, d'évaluer la légitimité des approximations proposées selon la zone d'étude, de mener une résolution aboutissant à l'évaluation numérique d'une grandeur dont on peut confronter la valeur aux données de l'expérience.

Pour une visée plus 'utilitaire' de la mécanique des fluides, même en employant une version 'simplifiée' de la relation de Bernoulli, présenter qualitativement le domaine de validité de la relation de Bernoulli apparaît abordable et nécessaire.

Comment comprendre sinon quand employer la relation de Bernoulli, quand employer la loi de Poiseuille par exemple, l'une ne faisant pas intervenir la viscosité quand l'autre oui, alors qu'il s'agit *a priori* du même fluide qui s'écoule?

7.1.2 Présentation de la grille

L'objectif étant de balayer à grain large les propriétés des modèles introduits et leur utilisation, les catégories et sous-catégories retenues dans cette étude exploratoire relèvent de dimensions de PCK variées de *Personal PCK Representations & Strategies* et de *Personal PCK Student Learning & Conceptions* réunies dans un même tableau, de dimensions d'*Amplifiers & Filters* réunies dans un autre.

En lien avec **ce que les enseignants disent qu'ils font** en termes de modèle et de modélisation, nous évoquons **le nombre et le type de modèles introduits ainsi que la progression suivie pour leur introduction, la fonction des modèles, leur domaine de validité, la nature des difficultés des élèves.**

Concernant la catégorie 'Nombre de modèles et progression', l'enseignant peut se référer à un ou deux types de modèles pour étudier l'écoulement d'un fluide.

Concernant la catégorie 'Fonction du modèle', le modèle peut être descriptif et explicatif, ou / et prédictif.

Le domaine de validité du modèle est ou non mentionné par l'enseignant interrogé.

Concernant la catégorie 'Difficultés des élèves', si l'enseignant indique des difficultés, nous nous limitons ici à en préciser la nature : difficultés uniquement mathématiques ou / et physiques. Nous analysons **les justifications des réponses** des enseignants interrogés en lien avec ces difficultés **sous l'angle des 'contextes' et 'orientations'**.

En lien avec **ce que les enseignants sont susceptibles de faire** en termes de modèles et de modélisation, nous évoquons **l'utilisation du modèle** dans deux contextes présentés en entretien, l'un correspondant au couplage de deux situations prototypiques (question Q16 'couplage') et l'autre au couplage d'une situation prototypique et d'une question associée inhabituelle (question Q17 'Pertes de charge'). Pour enrichir l'analyse des réponses des enseignants à la question Q17 'Pertes de charge', nous abordons également **leur 'attitude' et leurs éventuelles difficultés en entretien** lorsqu'ils répondent à cette question.

Dans le chapitre précédent sur la méthodologie, les tableaux proposés résumant la grille d'analyse étaient décontextualisés et susceptibles d'être mobilisés pour tout domaine de la physique. Nous les reprenons ici et y ajoutons deux colonnes, l'une qui est décontextualisée et qui contient les différentes sous-catégories étudiées associées à chaque catégorie, l'autre qui est contextualisée et qui contient, pour chaque sous-catégorie, les « Types de réponse » retenues pour la mécanique des fluides. De plus, nous scindons ces tableaux en deux, en lien avec les deux sous-parties de ce chapitre sur ce que les enseignants disent qu'ils font (Tableaux 7.1.2.1. A et 7.1.2.1. B) et sur ce qu'ils sont susceptibles de faire (Tableaux 7.1.2.2. A et 7.1.2.2. B).

CE QUE LES ENSEIGNANTS DISENT QU'ILS FONT EN LIEN AVEC LES MODELES								
Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Types de réponse	Contextes empiriques proposés en entretien	Questions du questionnaire de l'enquête		
						Numéro de la question	Justification demandée	
Personal PCK Representations & Strategies	Modèles introduits	Nombre de modèles et progression	Un type	Que parfait	Canalisation avec rétrécissement	Q8 / Q14 / Q15 / Q16		
				Que visqueux				
			Deux types	Parfait puis visqueux				
	Caractéristiques des modèles	Fonction du modèle		Non mentionné		Canalisation avec rétrécissement	Q8 / Q9 / Q12 / Q14 / Q15 / Q16	
				Descriptif et explicatif				
				Prédictif	Qualitatif			
					Quantitatif			
	Domaine de validité			Non mentionné	Inconnu	Canalisation avec rétrécissement	Q12 / Q14 / Q15 / Q16 / Q17 / Q18	•
					Volontairement ignoré			
				Mentionné	Evoqué			
				Discuté				
Personal PCK Student Learning & Conceptions	Difficultés des élèves	Nature	Aucune		Canalisation avec rétrécissement	Q15	•	
			Mathématique	Puissance et fractions				
				Conversion d'unités				
				Mise en équation				
			Physique	Conceptuelle Naïve				
				Liée au modèle				

Tableau 7.1.2.1. A
Grille d'analyse des modèles : ce que les enseignants disent qu'ils font

CE QUE LES ENSEIGNANTS DISENT QU'ILS FONT EN LIEN AVEC LES MODELES							
Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Type de réponse	Questions du questionnaire de l'enquête		
					Numéro de la question	Justification demandée	
Amplifiers & Filters	Contextes d'enseignement	Social	Local	Logistique	Q11 / Q12 / Q13 / Q14	Justification aux questions Q11 / Q12 / Q13 / Q14	
			Institutionnel	Programme			
		Instrumental					
	Orientations	NOS	Apprendre	Affectif		Q11 / Q12 / Q13 / Q14	Justification aux questions Q11 / Q12 / Q13 / Q14
				Cognitif			
				Enseigner			

Tableau 7.1.2.1. B
Grille d'analyse des modèles : ce que les enseignants disent qu'ils font
Cas des Amplifiers & Filters

CE QUE LES ENSEIGNANTS SONT SUSCEPTIBLES DE FAIRE EN LIEN AVEC LES MODELES							
Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Types de réponse	Contextes empiriques proposés en entretien	Questions du questionnaire de l'enquête	
						Numéro de la question	Justification demandée
Personal PCK Representations & Strategies	Utilisation du modèle	Ressources	Non abordé en classe		Canalisation avec rétrécissement	Q16	•
			Abordé en classe	De manière découplée sans*	Couplage de deux situations prototypiques		
				De manière découplée avec*			
		Raisonnement	Difficultés	Evacué	Réservoir et canalisation	Q17	•
				Raisonnement incohérent avec son cours			
				Raisonnement cohérent avec son cours			
			Pas de difficultés	Raisonnement visuel et par pertes de charge	Une situation prototypique et une question inhabituelle		
				Raisonnement uniquement par pertes de charge			
Raisonnement par réflexion sur les approximations							

Tableau 7.1.2.2. A

Grille d'analyse des modèles : ce que les enseignants sont susceptibles de faire

De manière découplée sans*... prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien.
De manière découplée avec*... prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien.

CE QUE LES ENSEIGNANTS SONT SUSCEPTIBLES DE FAIRE EN LIEN AVEC LES MODELES					
Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Type de réponse	Questions du questionnaire de l'enquête
Amplifiers & Filters	Attitudes	Attitude critique	Emotion	Perturbé	Attitude liée à la question Q17
				Neutre	
				Assuré	

Tableau 7.1.2.2. B

*Grille d'analyse des modèles : ce que les enseignants sont susceptibles de faire
Cas des Amplifiers & Filters*

Dans le tableau 7.1.2.3, nous illustrons comment ces types de réponse se déclinent dans le cas de l'étude d'un écoulement, sur l'exemple de la catégorie « Fonction du modèle ».

Catégorie	Sous-catégorie	Types de réponse	Exemple	Contextes empiriques proposés en entretien
Fonction du modèle	Non mentionné			Canalisation avec rétrécissement
	Descriptif et explicatif		<i>Description du sens de l'écoulement</i>	
	Prédictif	Qualitatif	<i>La pression décroît lors d'un rétrécissement</i>	
		Quantitatif	<i>L'expression de la dépression lors d'un rétrécissement est évaluée</i>	

Tableau 7.1.2.3
Exemple illustrant les sous-catégories et types de réponses obtenus

7.1.3 Deux groupes d'enseignants concernant le type de modèle évoqué

Les résultats obtenus confirment ce à quoi l'on pouvait s'attendre.

On distingue deux groupes d'enseignants, en fonction du modèle déclaré retenu en situation d'enseignement:

Un premier groupe d'enseignant correspond à ceux dont la formation initiale a été principalement orientée vers la physique. Le modèle retenu ne fait intervenir que les lois de conservation de la mécanique et de la thermodynamique. Il correspond aux éléments du modèle énoncé dans la première partie (cf 5.1.1).

Un second groupe englobe les autres enseignants (de biologie, de physiologie... soit uniquement des membres de la famille MB). Si des lois physiques sont exploitées, on pourrait les qualifier, à l'instar d'un enseignant interrogé, de premières lois du fluide (relation pression-volume, loi de Boyle pour les gaz parfaits, etc...).

Dans la suite de ce chapitre, nous abordons donc de manière séparée les réponses des enseignants interrogés en fonction de leur discipline académique de rattachement : nous débutons par les enseignants dont la formation initiale relève principalement de la physique (enseignants 'qualifiés de physique' et correspondant aux familles I, U et T) puis nous évoquons de manière plus succincte ceux dont la formation initiale relève principalement de la biologie ou de la médecine (enseignants 'qualifiés de biomédical' et correspondant à la famille MB).

7.2 Cas des enseignants qualifiés de physique : ce qu'ils disent qu'ils font

7.2.1 Les modèles introduits et la progression suivie

Pour débiter sur les modèles introduits par les enseignants interrogés qualifiés de physique, nous nous proposons d'évoquer la trame retenue par I5 dans sa progression de cours pour construire les modèles. I5 figure parmi les enseignants interrogés ayant le plus détaillé sa pensée et la visée de son cours.

Partant d'une équation différentielle non-linéaire, l'équation de Navier-Stokes, I5 explicite les simplifications successives, valables sous conditions (cf 5.1.1), qui aboutissent à la relation de Bernoulli, comme résumé dans le tableau 7.2.1.1.

Ces simplifications correspondent aux éléments barrés dans ce tableau.

Type d'écoulement	Écoulement incompressible visqueux		Écoulement incompressible 'parfait'		Écoulement incompressible 'parfait' étudié sur une ligne de courant
Loi retenue	Equation de Navier-Stokes	→	Equation d'Euler	→	Relation de Bernoulli
Termes présents	Terme non linéaire terme visqueux		Terme non linéaire terme visqueux		Terme non linéaire terme visqueux

*Tableau 7.2.1.1
Proposition d'I5 d'articulation des modèles*

Une démarche réciproque est possible, à savoir entamer par le cas le plus simplifié (le cas d'un écoulement 'parfait') et progressivement remonter au cas général d'un écoulement visqueux.

Qu'en est-il au sein de la population interrogée ?

La répartition des enseignants dont la formation initiale a été principalement orientée vers la physique est résumée dans le tableau 7.2.1.2.

Nous rappelons que nous n'avons pas étudié les justifications associées à ces réponses (cf tableau 7.1.2.1. A).

Enseignants qualifiés de 'physique'				
Modèles introduits et leur articulation				
<i>Famille</i>	Que 'parfait'	Que visqueux	Écoulement 'parfait' ↓ Écoulement visqueux	Écoulement visqueux ↓ Écoulement 'parfait'
<i>I CPGE</i>			I7 I9 I11	I5
<i>I USA</i>			I14 I15 I20	I13
<i>U</i>		U2	U6	U5
<i>T</i>			T1 T2 T3 T6	
<i>Total</i>	0	1	11	3

Tableau 7.2.1.2
Cas des enseignants qualifiés de physique : modèles introduits et articulation

Dans ce tableau, on constate une scission en sous-groupes, dépendant de la démarche retenue par ces enseignants pour étudier un écoulement.

Dans cette population étudiée, le recours à un écoulement uniquement 'parfait' n'a pas été observé.

Ne recourir qu'à un écoulement visqueux n'est observé que chez U2.

Les deux principaux sous-groupes correspondent à une utilisation à la fois du cas simplifié d'un écoulement 'parfait' où on peut négliger la viscosité et du cas plus général d'un écoulement visqueux où on doit prendre en compte la viscosité.

On bascule d'un sous-groupe à l'autre en fonction de l'ordre dans lequel ces deux cas sont déclarés être abordés en situation d'enseignement.

La démarche la plus fréquente dans la population étudiée est de partir du plus simplifié pour aller vers du plus général.

7.2.2 Caractéristiques des modèles introduits : la fonction principale du modèle

La fonction principale du modèle que nous avons repérée dans les propos des enseignants interrogés est descriptive et explicative, ou prédictive-qualitative ou encore prédictive-quantitative.

Nous notons les types de réponses associés ‘descriptif et explicatif’, ‘prédictif qualitatif’ et ‘prédictif quantitatif’.

La répartition des enseignants qualifiés de physique est indiquée dans le tableau 7.2.2.

Nous rappelons que nous n’avons pas étudié les justifications associées à ces réponses (cf tableau 7.1.2.1. A).

Enseignants qualifiés de ‘physique’				
Fonction du modèle				
<i>Famille</i>	<i>Non abordée en entretien</i>	Descriptive explicative	Prédictive qualitative	Prédictive Quantitative
<i>I CPGE</i>			I11	I5 I7 I9
<i>I USA</i>	<i>I14</i>			I13 I15 I20
<i>U</i>	<i>U5</i>		U2	U6
<i>T</i>	<i>T6</i>		T2	T1 T3
<i>Total</i>	<i>3</i>	<i>0</i>	<i>2</i>	<i>9</i>

Tableau 7.2.2
Cas des enseignants qualifiés de physique : la fonction du modèle

Pour tous les enseignants qualifiés de ‘physique’, le modèle est prédictif.

Pour I11, U2 et T2, le modèle a une fonction prédictive mais sans quantitatif associé. Ainsi, dans la situation présentée à la question Q15 ‘rétrécissement’, il s’agirait pour eux de prévoir le sens de variation de la pression dû au rétrécissement, mais pas d’évaluer cette variation.

Pour les autres enseignants (les trois-quarts des enseignants qualifiés de ‘physique’), le modèle déclaré prédictif aboutit à une étude quantitative. Il s’agirait, sur l’exemple du rétrécissement de la question Q15, d’aller jusqu’à l’évaluation littérale, voire numérique, de la chute de pression associée au rétrécissement.

7.2.3 Caractéristiques des modèles introduits : le domaine de validité du modèle

Pour aborder le domaine de validité du modèle, nous nous appuyons sur la situation évoquée à la question Q15 'rétrécissement'.

Analyse a priori de la question Q15

A la question Q15 est montré à l'enseignant un schéma (cf figure 7.2.3.) sur lequel apparaît une canalisation présentant un rétrécissement, avec deux prises de mesure de pression, l'une en amont du rétrécissement et l'autre en aval. Il est demandé à l'enseignant si cette situation présente des difficultés pour les élèves.

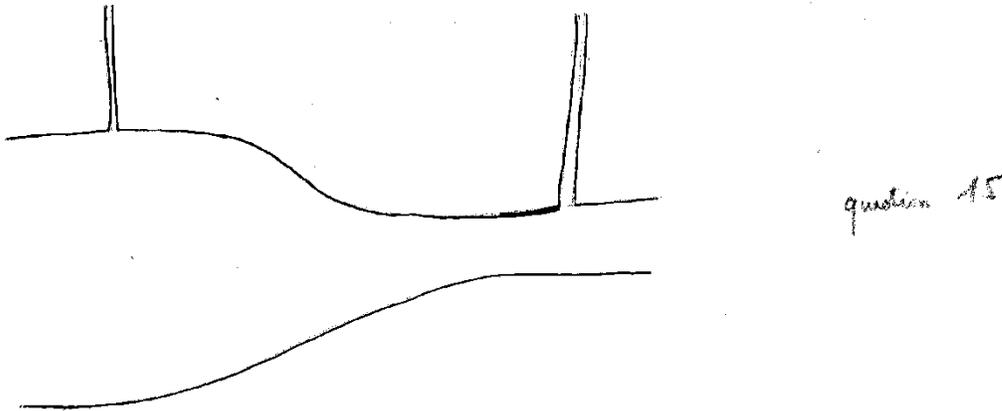


Figure 7.2.3

Schéma associé à la question Q15 'rétrécissement' et présenté en entretien à l'enseignant

Ce schéma, que nous avons rencontré dans tous les ouvrages consultés de mécanique des fluides pour physiciens de premier cycle universitaire, est généralement introduit en lien avec l'effet Venturi pour illustrer la relation de Bernoulli.

Tel que présenté dans les manuels, est énoncé dans un premier temps la conservation du débit volumique, ce qui aboutit à une augmentation de la vitesse en aval du rétrécissement par rapport à l'amont.

De là est fait référence à la relation de Bernoulli pour justifier qu'à cette augmentation de la vitesse est associée une diminution de la pression.

Dans ce contexte, la viscosité de l'écoulement n'est pas prise en compte : il est souvent indiqué dans les manuels que l'on suppose l'écoulement 'parfait', sans qu'une justification de cette approximation ne soit apportée.

On s'attend donc à ce que les enseignants qualifiés de physique ne soient pas surpris par ce schéma et déclarent l'utiliser en cours en lien avec la relation de Bernoulli. Pour autant, perçoivent-ils des difficultés dans cette situation en termes de modélisation ?

La situation de la question Q15 est abordée par les enseignants qualifiés de physique.

La situation du rétrécissement de la question Q15 est abordée par l'ensemble des I, des U et des T (« *Situation archi-classique* » indique T3).

La situation de la question Q15 est indiquée comme étant associée à la relation de Bernoulli, qui est déclarée comme étant un attendu dans un cursus qualifié de I ou de : « *Je vais l'utiliser / Je vais l'utiliser parce qu'au programme je dois illustrer l'effet Venturi et notamment par un débitmètre / Là on est typiquement dans la situation d'application du débitmètre* » (I9) (on rappelle que l'effet Venturi est une conséquence de la relation de Bernoulli).

Il y a une seule exception, U2. Il associe lui aussi cette situation à la relation de Bernoulli mais indique ne pas avoir à enseigner cette relation. Il indique qu'il suppose la relation de Bernoulli connue de ses étudiants et en conclut qu'il n'a pas à aborder la situation de la question Q15.

Types de réponse à la question Q15 en lien avec le domaine de validité du modèle

Nous avons retenu quatre types de réponse en lien avec la catégorie de PCK 'Domaine de validité' du modèle :

La situation évoquée à la question Q15 'rétrécissement' peut être déclarée par l'enseignant comme n'étant pas abordée en situation d'enseignement.

Elle peut être abordée, mais sans que l'enseignant ne fasse référence au domaine de validité du modèle (type de réponse noté 'Abordée sans mention du domaine de validité du modèle').

Si elle est abordée en se référant au domaine de validité du modèle, on distingue alors deux autres types de réponse, selon que le domaine de validité du modèle est déclaré comme analysé ou non (type de réponse noté 'Abordée avec mention du domaine de validité du modèle analysé' et type de réponse noté 'Abordée avec mention du domaine de validité du modèle non analysé').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse :

Situation abordée sans mention du domaine de validité du modèle :

« Not a main point [les limites de la relation de Bernoulli] » (U6)

Situation abordée avec mention du domaine de validité du modèle non analysé :

« dans la première situation [celle de la question Q15] elle est très classique on la présente souvent dans le cadre des / dans le cadre d'un cours sur les fluides parfaits donc l'hypothèse est implicite parce qu'on la fait depuis le début du chapitre » (I7)

« l'utilisation de l'équation de Bernoulli se // doit être précédée de l'énumération des hypothèses nécessaires et de la vérification que ces hypothèses sont présentes dans le problème ou sont raisonnablement |- présentes ? -| Alors soit présentes parce qu'elles ont

été énoncées dans le sujet soit qu'ces hypothèses sont / sont raisonnables pour décrire le phénomène qui est proposé » (I7)

« This is ideal the assumptions that we made / right? I ask them all the assumptions are realistic or not/ (...) Obviously it's not realistic » (I14)

Situation abordée avec mention du domaine de validité du modèle analysé :

« Là je crois qu'on a une expérience qui est telle qu'on la fait au lycée à la fois elle a les deux vertus c'est-à-dire elle illustre les faits et elle illustre les défaillances donc ce qui est spectaculaire / C'est presque choquant pour des élèves / La même manip / Le théorème il est intéressant et en même temps il a des limites / »(I5)

« Un modèle il est adapté à décrire en fait une situation d'une richesse donnée / Et si tu veux un truc un peu plus riche ou un peu plus fin il faut un modèle plus fin / Là c'est encore quelque chose une grande vertu de la mécanique des fluides | -hm hm-| qui est finalement de choisir un niveau de description en fonction de je dirais la richesse de l'expérience / »(I5)

Répartition des enseignants en fonction de la façon dont le domaine de validité du modèle est abordé

La répartition des enseignants en fonction de la façon dont le domaine de validité du modèle est abordé est résumée dans le tableau 7.2.3.1.

		Situation évoquée à la question Q15		
Famille	Non abordée en classe	Abordée en classe sans mention du domaine de validité du modèle	Abordée en classe avec mention du domaine de validité du modèle...	
			... non analysé	... analysé
<i>I CPGE</i>			I7 I11	I5 I9
<i>I USA</i>			I14 I15	I13 I20
<i>U</i>	<i>U2</i>	U6	U5	
<i>T</i>		T1 T2 T6		T3
<i>Total</i>	1	4	5	5

*Tableau 7.2.3.1
Cas des enseignants qualifiés de physique : domaine de validité du modèle*

On constate dans ce tableau que tous les enseignants de la famille I évoquent le domaine de validité du modèle lorsqu'il est question de la situation de la question Q15 'rétrécissement'. Ils citent les conditions d'application de la loi utilisée.

Pour autant, la moitié des membres de la famille I, tant en France qu'aux Etats-Unis, se bornent à citer ces conditions d'application sans les analyser.

Les réponses des membres de la famille U se répartissent sur trois types de réponse ('Non abordée en classe', 'Abordée sans mention du domaine de validité du modèle' et 'Abordée avec mention du domaine de validité du modèle non analysé').

Les membres de la famille T abordent tous la situation de la question Q15 'rétrécissement', sans mention du domaine de validité du modèle, sauf pour T3 qui l'analyse en plus de le mentionner.

Justifications avancées par les enseignants

La répartition des enseignants concernant leurs justifications en lien avec le domaine de validité du modèle est résumée dans le tableau 7.2.3.2.

Justifications en lien avec le domaine de validité du modèle							
Famille	Non abordé	Aucune	Contexte social		Orientations		
			Local (logistique)	Institutionnel (programme)	Enseigner	Apprendre (affectif)	Apprendre (cognitif)
<i>I</i> <i>CPGE</i>				I7	I5 I7 I11		I5 I9
<i>I</i> <i>USA</i>				I14 I15	I14		I13 I20
<i>U</i>	<i>U2</i>			U6	U5		
<i>T</i>	<i>T6</i>			T2	T2 T3	T1	T3
<i>Total</i>	2	0	0	5	7	1	5

Tableau 7.2.3.2
Justifications en lien avec le domaine de validité du modèle

Parmi les enseignants de la famille I qui n'analysent pas le domaine de validité du modèle, les justifications proposées sont liées au programme (il s'agit d'un cours introductif de mécanique des fluides pour I14 et I15) mais aussi liées à des convictions personnelles des enseignants (I7, I11, I14).

Parmi ceux de la famille I qui analysent le domaine de validité du modèle, I13, par exemple, préfère le terme 'approximation' au terme 'hypothèse'.

Une articulation entre les modèles est évoquée par I5, en fonction du contexte d'étude (« *Pour moi c'est pas j'ai l'équation d'Euler, j'ai l'équation de Navier-Stokes' mis les uns à côté des autres comme cinq outils différents / Pour moi ça s'articule /* » (I5) et « *J'ai l'équation d'Euler et je la simplifie encore dans un contexte pour pouvoir absorber sa non-linéarité dans une équation simple / Mais le prix à payer c'est que ce n'est pas universel /* » (I5)). I5 l'illustre sur l'exemple de la relation de Bernoulli et de la loi de Poiseuille : « *Si tu as les deux ça t'oblige euh à le structurer à expliquer quand même que quelque part tu as changé complètement de modèle (...) Il ne faut pas leur [les étudiants] faire utiliser n'importe comment l'une et l'autre /* ».

Dans la famille U, U6 n'évoque pas le domaine de validité du modèle tandis qu'U5 l'évoque mais sans l'analyser.

La justification d'U6 est liée au programme tandis qu'U5 évoque sa vision du modèle.

La majorité des membres de la famille T n'abordent pas le domaine de validité du modèle : la formule mathématique associée à la relation de Bernoulli est énoncée, ses conditions d'application ne sont pas mises en avant.

Dans la famille T, la situation de la question Q15 'rétrécissement' est spontanément associée à la relation de Bernoulli : T3 présente la situation de la question Q15 'rétrécissement' comme étant « *archi-classique* », T6 indique : « *if they [ses étudiants] don't know that they don't know anything about fluid dynamics* ». T6 s'exclame spontanément : « *it's a Pitot tube* »! La relation de Bernoulli, qualifiée de « *Bernoulli* » par T1, est l'élément central du cours de mécanique des fluides des membres de la famille T (T1 y consacre deux mois ; T2 associe la relation de Bernoulli à un théorème fondamental de la dynamique « *à la compréhension des principes généraux / il va servir pour celui qui va continuer les études / pour aller plus loin j'pense / ou pour faire face à un nouveau cas pratique à étudier* »).

Seul T3 fait exception et présente sa vision d'un modèle, plus construite : « *Un modèle est toujours une approximation (...) D'ailleurs ils [ses étudiants] comprennent très bien que y a des lois simples aussi bien en mécanique des fluides qu'ailleurs / y a des lois simples qu'on utilise dans des cas simples et dans des cas / euh je dirais un peu inquiétants en termes de dimensions / en termes de la complexité / oui / il faut utiliser d'autres lois /* ».

7.2.4 Nature des difficultés des élèves

Nous reprenons les réponses à la question Q15 'rétrécissement', sous l'angle cette fois de la nature des difficultés des élèves envisagées par les enseignants interrogés.

Types de réponse à la question Q15 en lien avec la nature des difficultés des élèves

Concernant la question Q15, nous avons retenu quatre types de réponse en lien avec la nature des difficultés liées à l'étude d'un rétrécissement :

L'enseignant considère qu'une telle étude ne présente pas de difficultés (type de réponse noté 'Aucune').

L'enseignant considère que les difficultés ne sont que du registre mathématique, par exemple obtenir l'expression d'une pression en fonction des diamètres en amont et en aval du

rétrécissement. On lui associe le type de réponse noté 'Mathématique', sans distinguer si les difficultés sont liées à l'usage des puissances et des fractions, les conversions d'unités ou autre. L'enseignant peut indiquer des difficultés conceptuelles qualifiées de physique. On distingue alors des difficultés conceptuelles qualifiées de naïves (type de réponse noté 'Conceptuelles Naïves') de celles liées au modèle (type de réponse noté 'Liées au modèle'). Un exemple de difficulté conceptuelle qualifiée de naïve a été observé lors de la pré-enquête auprès d'étudiants. En entretien, des étudiants français et des étudiants américains ont énoncé 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. Les difficultés conceptuelles liées au modèle concerneraient le choix du modèle. Par exemple, est-il légitime de recourir à la relation de Bernoulli dans cette situation par exemple ?

Nous présentons des extraits d'entretiens d'enseignants associés à ces différents types de réponse :

Nature des difficultés des situations évoquées en Q15 : 'Aucune'

La situation du rétrécissement est présentée comme ne présentant pas de difficulté pour les étudiants.

Concernant la variation de pression, « *oui avec Bernoulli ça allait /* » (I11)

Situation de la question Q15 : « *very straightforward / (...) Probably because we've already done problems like this one /* » (U6).

Nature des difficultés des situations évoquées en Q15 : 'Mathématique'

Le type de difficultés envisagées par l'enseignant se limite au registre des mathématiques : difficultés éventuelles avec les conversions d'unités, avec la résolution d'une équation mathématique...

« *Le lien [entre pression et vitesse] ça devrait être les unités* » (T2)

Nature des difficultés des situations évoquées en Q15 : (Physique) 'Conceptuelles Naïves'

« *et le gag / évidemment / c'est // on a une grande section à l'entrée puis un rétrécissement et à votre avis / là où le fluide il a passé / là / il est tout tassé / là / pour circuler dans la section contractée / comment va être la pression ? Et la réponse qui fusait c'était / 'ben la pression va être plus forte puisque il faut tasser pour passer / faut pousser pour passer donc la pression sera plus forte' / Voilà* » (T3)

Nature des difficultés des situations évoquées en Q15 : (Physique) 'Liée au modèle'

« *Le seul fait de leur dire que c'est une dépression ou une surpression et le fait d'être obligé de faire un raisonnement de statique des fluides à un endroit alors qu'on est en train de faire une manip de mécanique des fluides / oui j'ai constaté que ça les chagrinait* » (I5)

« *Oui // Oui // Oui // Euh oui j'anticipe un problème parce qu'on a / on a fait de la statique des fluides qui est passée en seconde année (...) Donc j'anticipe que en étant à disons trois maximum quatre semaines de leur avoir dit que les lignes isobares étaient // des plans horizontaux que là de leur montrer qu'on va pas arriver au même niveau je pense que ça va / ça va bloquer //* » (I9)

« *It only makes sense after you understand what makes sense / the connection between pressure and speed / right ?* » (I20)

Répartition des enseignants en lien avec la nature des difficultés liées à l'étude d'un rétrécissement

La répartition des enseignants en lien avec la nature des difficultés liées à l'étude d'un rétrécissement est résumée dans le tableau 7.2.4. Nous signalons que U2 indique ne pas évoquer la situation de la question Q15 dans son module mais pour autant, lors de l'entretien, il commente les difficultés éventuelles liées à cette situation et apparaît donc dans le tableau 7.2.4.

Enseignants qualifiés de 'physique'				
Nature des difficultés des élèves sur la situation évoquée à la question Q15				
Famille	Aucune difficulté	Mathématique	Physique	
			Conceptuelles naïves	Liées au modèle
<i>I CPGE</i>	I11		I7	I5 I9
<i>I USA</i>	I13 I14	I15		I20
<i>U</i>	U2 U5 U6			
<i>T</i>	T2 T6	T1	T3	
<i>Total</i>	8	2	2	3

Tableau 7.2.4

Cas des enseignants qualifiés de physique : nature des difficultés des élèves sur la situation évoquée à la question Q15 'rétrécissement'

On constate dans ce tableau que la moitié des enseignants qualifiés de physique n'évoquent aucune difficulté en lien avec la situation du rétrécissement évoquée à la question Q15.

Pour la famille U, il n'y a pas de difficulté associée à cette situation, ce qui serait justifié par le fait que cette situation permet d'illustrer la variation de pression lors d'un rétrécissement : ce serait une situation 'classique'. Elle est associée à la relation de Bernoulli : « *this is for Bernoulli equation* » (U2).

Parmi ceux évoquant des difficultés, il n'y a pas un type de difficulté privilégié. Indiquer d'éventuelles difficultés associées à la situation de la question Q15 'rétrécissement' aboutit à des réponses très variées au sein des familles I et T. Aucun enseignant de la famille T ne se réfère à la difficulté de choisir un modèle contrairement à trois enseignants de la famille I. La sous-famille I CPGE évoque plutôt des difficultés conceptuelles tandis que les membres de la sous-famille I USA sont plutôt à considérer qu'il n'y a pas de difficulté conceptuelle dans cette situation.

Les éventuelles difficultés qualifiées de 'mathématiques' sont du registre du 'calculatoire' : convertir des unités, isoler la pression ou la vitesse dans la relation de Bernoulli... En termes de conceptions naïves, une erreur, observée chez les étudiants par T3 et anticipée par I7 est indiquée : la pression serait plus forte là où la section serait la plus étroite. En termes de difficultés liées au modèle, I5 et I9 évoquent des amalgames possibles entre statique des fluides et dynamique des fluides. La prévision de l'évolution de la pression due au rétrécissement n'est jugée délicate en soi que par I20. Il insiste sur ce point (« *Absolutely / Absolutely* ») : il n'y a ni intuition *a priori* face à une telle situation, ni connexion attendue avec d'autres situations *a priori* connues de la part de ses étudiants, comme par exemple le cas de la portance d'une aile notamment. Il le justifie en signalant que même un de ses TA (*Teaching Assistant*) s'est trompé lorsque la question de l'évolution de la pression lors d'un rétrécissement lui a été posée.

7.3 Cas des enseignants qualifiés de physique : ce qu'ils sont susceptibles de faire

Pour tester l'utilisation du modèle menée par les enseignants interrogés, nous utilisons deux situations, présentées aux questions Q16 et Q17 lors des entretiens et nommées respectivement 'couplage' et 'pertes de charge'.

7.3.1 Utilisation du modèle : couplage de deux situations prototypiques

Analyse *a priori* de la question Q16

Le schéma de la question Q16 'couplage' (figure 7.3.1) est une reprise du schéma de la question Q15 'rétrécissement' (figure 7.2.3), sur lequel on ajoute une seconde prise de mesure de pression, plus en amont de la canalisation, avant le rétrécissement.

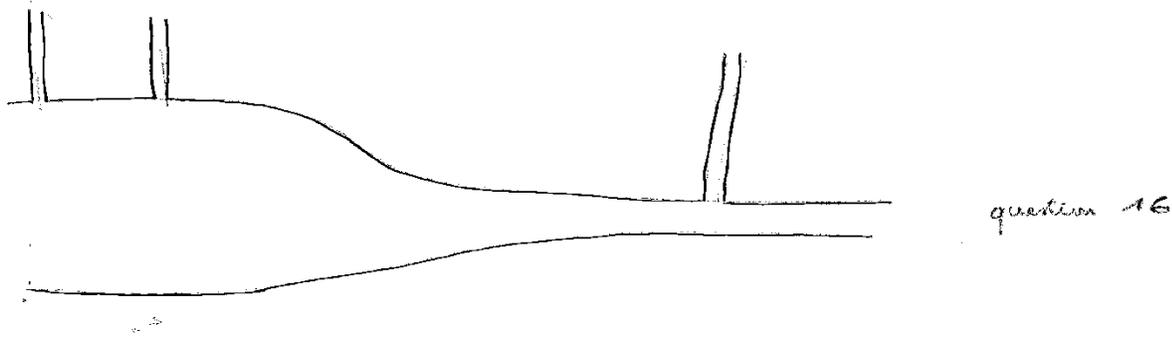


Figure 7.3.1
Schéma associé à la question Q16 et présenté en entretien à l'enseignant

Ce schéma constitue un mélange de deux situations qui sont traditionnellement découplées dans les manuels : d'une part, le schéma du rétrécissement avec deux prises de mesure de pression, l'une en amont du rétrécissement et l'autre en aval, est employé pour illustrer l'effet Venturi, pour lequel intervient la relation de Bernoulli. D'autre part, les deux prises de mesure de pression en amont du rétrécissement, elles, sont associées à l'illustration de la perte de charge (c'est-à-dire la perte de pression) dans une canalisation à section fixée (on parle de perte de charge régulière).

On demande à l'interviewé s'il utilise ce schéma dans sa pratique enseignante. Coupler les deux situations n'ayant pas été observé dans les manuels consultés, on s'attend à ce que l'interviewé déclare n'utiliser qu'une des deux situations à la fois.

Quelle réponse l'enseignant attendrait-il de la part de l'élève concernant le niveau d'eau dans les trois tubes ? Quel modèle retenir ?

Raisonnement sur un 'écoulement parfait' aboutit à prévoir que le niveau de fluide ne va pas baisser dans la partie de diamètre fixé, en amont du rétrécissement et que le niveau baisse au niveau du rétrécissement.

Tandis que raisonner en termes de 'pertes de charge' aboutit à prévoir une baisse de niveau du premier au deuxième tube. Il s'agit ainsi de prendre en compte la viscosité de l'écoulement, négligée lorsqu'on raisonne en termes d'écoulement parfait'.

Mais dans ce cas, comment justifier alors le niveau d'eau dans le troisième tube ?

Pour aborder la chute de pression au niveau du rétrécissement, le raisonnement proposé à la question précédente Q15 était fondé sur un modèle d'écoulement parfait.

Or désormais on déclare tenir compte de la viscosité en amont du rétrécissement : la viscosité serait à prendre en compte dans la partie de la canalisation à section fixée mais serait négligeable au niveau du rétrécissement ? Comment, pour un même écoulement, maintenir un raisonnement tantôt fondé sur un écoulement parfait, tantôt sur un écoulement visqueux ?

Comment l'enseignant articule-t-il ces deux approches lorsque la question lui est posée en entretien ?

Signalons que dans les manuels consultés, une fois la viscosité abordée (avec souvent la notion de pertes de charge), ce contexte du rétrécissement n'est pas repris. En particulier, le schéma de la question Q15 'rétrécissement', présent également à la question Q16 'couplage', n'est pas retravaillé en termes de perte de charge par exemple.

On n'attend donc pas des enseignants interrogés qu'ils utilisent *a priori* cette situation après avoir évoqué la notion de viscosité.

Types de réponse à la question Q16 en lien avec l'utilisation du modèle

Nous avons dégagé trois types de réponse face à la situation de la question Q16 :

L'enseignant peut déclarer ne pas aborder cette situation en séquence d'enseignement (type de réponse noté 'non abordée').

Il peut l'aborder, de manière couplée (type de réponse non rencontré ici) ou de manière découplée.

Dans ce dernier cas, se pose la question de savoir si l'enseignant, durant l'entretien, indique la contradiction apparente en termes de modèle induit par cette situation.

S'il l'indique, nous associons alors sa réponse au type de réponse noté 'abordée de manière découplée avec' prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien.

Sinon, nous l'associons au type de réponse noté 'Abordée de manière découplée sans' prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien.

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse :

Situation de la question Q16 'non abordée':

[La situation de « la question Q16 est-elle utilisée dans son cours ? » «not really» (I14)

Situation de Q16 'abordée de manière découplée sans' prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien :

I7 signale qu'il n'aborde que de manière séparée les deux situations : pertes de charge régulières d'un côté (« quand on étudie le phénomène de perte de charge on l'étudie dans un tuyau de section constante et euh //donc voilà c'est une situation bien // bien délimitée»), rétrécissement de l'autre (« dans la première situation [celle de la question Q15 'rétrécissement'] elle est très classique on la présente souvent dans le cadre des / dans le cadre d'un cours sur les fluides parfaits donc l'hypothèse est implicite parce qu'on la fait depuis le début du chapitre»).

Situation de Q16 'abordée de manière découplée avec' prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien :

« I would say it's not a Bernoulli problem / it's a head loss problem // The difference between Bernoulli and conservation of energy the way it is written is that conservation of energy involves integrating across the cross-section area // Bernoulli is a local expression that applies two different points // If you're gonna apply Bernoulli here / it won't tell you what the pressure up here is // Say you want to do an integral over this and that's controlled volume and you have this head loss term and I say if you take that squish it down on a streamline that's Bernoulli // Now can they learn that ? No they can't learn that // So I say this is not an appropriate problem for Bernoulli // This is a head loss problem // The question you asked is not a Bernoulli question // It's a head loss question // Part of what you try to teach is to categorize / you know / based on the analysis that you can try to perform you have to categorize // Is Bernoulli involved in this problem? No // This should be a control volume problem // » (I13)

Répartition des enseignants en lien avec l'utilisation en classe du modèle sur l'exemple de la situation de la question Q16

La répartition des enseignants en lien avec la question Q16 est résumée dans le tableau 7.3.1.1.

Enseignants qualifiés de 'physique'				
Utilisation du modèle sur l'exemple de la situation de la question Q16				
<i>Famille</i>	<i>Non abordée (lors de l'entretien)</i>	Non abordée en classe	Abordée en classe de manière découplée sans *	Abordée en classe de manière découplée avec *
<i>I CPGE</i>			I7 I9 I11	I5
<i>I USA</i>		I14 I15	I20	I13
<i>U</i>	<i>U2</i>	U5	U6	
<i>T</i>			T1 T2 T6	T3
<i>Total</i>	<i>1</i>	3	8	3

Tableau 7.3.1.1

Cas des enseignants qualifiés de physique : utilisation du modèle sur l'exemple de la situation de la question Q16

*[sans...] prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien

** [avec...] prise en compte de la contradiction apparente lors de l'entretien

On constate dans ce tableau 7.3.1.2 des réponses contrastées au sein de chacune des familles qualifiées de physique.

On constate pour autant que la situation de la question Q16 'couplage' est abordée en classe par une très grande majorité des enseignants qualifiés de physique (11 enseignants sur 15), mais de manière découplée, en étant scindée en deux situations : d'une part le cas de la perte de charge dans une canalisation de diamètre fixé (perte de charge régulière), d'autre part le cas durétrécissement.

Lors de l'entretien, I5, I13 et T3 indiquent que cette situation évoque les limites d'un modèle de type 'écoulement parfait' et permet ainsi de confronter les deux modèles (écoulement 'parfait' et écoulement visqueux).

Une majorité des enseignants qualifiés de physique qui déclarent aborder cette situation en classe n'indique pas, en entretien, les obstacles possibles en termes de modèle induits par cette situation. Si ce point est abordé durant l'entretien, après relance de l'intervieweur, des difficultés apparaissent chez l'enseignant. C'est le cas de I7, évoqué dans le tableau 7.3.1.2.

Justifications avancées par les enseignants

Deux des enseignants n'abordant pas la situation de la question Q16 'couplage' le justifient par le curriculum du cours dont ils ont la charge (I14, I15) : il s'agit de cours d'introduction à la mécanique des fluides.

Concernant les deux premiers tubes du schéma de la question Q16 'couplage', I14 pense que les élèves diraient que 'la vitesse est la même donc la pression est la même'. Pour I14, ce ne serait pas réaliste, mais vu qu'il s'agit d'un premier cours de mécanique des fluides, il s'en contenterait (« *As a starting point it's fine / I don't see it as a problem /* » I14).

Dans le tableau 7.3.1.2, nous détaillons les réponses fournies par quatre enseignants (I5 et I13 qui évoquent la contradiction apparente lors de l'entretien, I7 et I20 qui ne l'évoquent pas) : Les réponses d'I5, I13 et I20 illustrent la richesse de leur réflexion sur leur pratique enseignante. Celle d'I7 met en évidence les difficultés possibles chez un enseignant.

Détail des réponses d'I5, I13, I20 et I7	
I5	La situation de la question Q16 est pour I5 une situation riche d'enseignements : l'effet Venturi est vérifié pour la dénivellation entre les prises de mesure de pression numéro 1 et numéro 2 (« <i>Et là ben on trouve l'effet Venturi / On est tout content / On a quelque chose qui est prédictif</i> »). Et dans le même temps, l'effet Venturi n'est pas vérifié pour les prises de mesure de pression numéro 2 et numéro 3 (« <i>Oui mais si vous regardez là ce n'est plus prédictif / Car Bernoulli ça flanche</i> »).
I13	Pour I13, la situation de la question Q16 est complexe : il estime que les étudiants auraient du mal à y répondre (« <i>That's a hard question for them to answer cause now that comes back to friction</i> »). I13 voit dans le schéma de la question Q16 deux situations : les deux premiers tuyaux évoquent une situation de perte de charge nécessitant le recours à un volume de contrôle (« <i>I would say it's not a Bernoulli problem it's ahead loss problem / this is not an appropriate problem for Bernoulli</i> »), le rétrécissement est à relier à Bernoulli. I13 estime pour des raisons pédagogiques

qu'il faut distinguer ces deux situations : il s'agit de catégoriser les situations pour aider l'étudiant à construire sa pensée.

I13 rappelle sa démarche en cours : « *I want the students to think about the situation that they're analyzing and the equations they're using have to be consistent* ».

Il insiste sur la nécessité de justifier son raisonnement : les termes « *Why ?* » et « *Explain* » sont récurrents dans son discours.

I20

Concernant le passage d'un modèle fondé sur un écoulement 'parfait' à un modèle fondé sur un écoulement 'visqueux', I20 présente une vision raisonnée de la démarche de modélisation : « *It's a work in progress / I don't know (silent) I don't know / I have to think about it / It's all reality / Bernoulli is an equation very well in many realistic situations / just specific reality* ». Rappelons pour autant que le couplage proposé à la question Q16 ne l'interpelle pas lors de l'entretien.

Détaillons le cas de I7 :

I7 signale qu'il n'aborde que de manière séparée les deux situations : pertes de charge régulières d'un côté (« *quand on étudie le phénomène de perte de charge on l'étudie dans un tuyau de section constante et euh // donc voilà c'est une situation bien // bien délimitée* »), rétrécissement de l'autre (« *dans la première situation [celle de la question 15] elle est très classique on la présente souvent dans le cadre des dans le cadre d'un cours sur les fluides parfaits donc l'hypothèse est implicite parcequ'on la fait depuis le début du chapitre* »).

I7 constate qu'en séparant les deux situations, il n'a pas à faire confronter les deux modèles. Il justifie sa pratique déclarée en indiquant avoir reproduit ce qu'il avait lu dans des manuels qu'il avait cités lors de l'entretien.

Lorsqu'il lui est demandé de détailler comment il ferait constater à un étudiant que la prise en compte de la viscosité modifie la réponse attendue pour la dénivellation entre les tubes numéro 1 et numéro 2, I7 en arrive à une contradiction.

I7 réfléchit à voix haute pour appréhender l'impact de la viscosité sur la pression. Son discours devient alors haché (« *Ah c'est une bonne question / Si le fluide est pas parfait le / le // le comment dire la relation de //* ») et il termine sa réponse par « *eh oui c'est pas trivial / C'est pas une situation usuelle / Faudrait // y réfléchir /* ». Plus tard durant l'entretien : « *Qu'est-ce qu'on en fait alors de cette situation ? Quel niveau placer dans les tuyaux ? Euh à ce moment-là deux effets contradictoires dans le // notamment dans le tuyau aval là / Euh // c'est une bonne question / Je vous remercie de me l'avoir posée / Je suis pas sûr qu'on puisse répondre // qualitativement sur le/ sur ce niveau-là sur la figure /* ».

Il précise : « *Ben parce que dans la première situation elle est très classique on la présente souvent dans le cadre des dans le cadre d'un cours sur les fluides parfaits donc l'hypothèse est*

implicite parce qu'on la fait depuis le début du chapitre / Donc moi j'étais parti de ce chap // des mêmes hypothèses pour la deuxième situation / Le fait de placer de placer un deuxième tuyau en amont c'est peut-être qu'on veut montrer un phénomène qu'on ne montrait pas dans la première situation / Donc m'est venu à l'idée de considérer que le fluide n'était pas parfait pour / pour qui y ait une dénivellation et donc une différence de situation / ».

A la question « *Et si un élève te demandait pour la première situation 'mais finalement monsieur si on fait ça euh // dans la vraie vie le fluide il est pas parfait' ?* », I7 répond : « *Oui / Et donc que répondre ? Que mettre comme dénivellation dans les tuyaux ? Eh bien euh // c'est quelque chose que j'insérerai dans mon cours cette année alors après y avoir réfléchi plus amplement / (silence) ».*

Enfin, plus loin dans l'entretien, I7 indique : « *Oui c'est vrai / (silence) On se pose pas la question à ce moment-là / Enfin pff // l'écoulement n'est pas parfait l'écoulement n'est pas parfait non c'est vrai mais on le traite comme s'il était parfait / En général / (silence) Et donc ? Eh oui / (silence) Euh pff // Voilà / Encore une fois // C'est / c'est intéressant parce que là je me pose des questions que je ne m'étais pas posées l'année dernière quand j'ai élaboré ce cours-là / ».*

Tableau 7.3.1.2

Cas des enseignants qualifiés de physique : utilisation du modèle sur l'exemple de la situation de la question Q16 'couplage' ; détail des réponses de 4 enseignants

7.3.2 Utilisation du modèle : Une situation prototypique et une question inhabituelle

Analyse a priori de la question Q17 ('Pertes de charge')

La figure 7.3.2 correspond au schéma de la question Q17 présenté en entretien à l'enseignant interrogé.

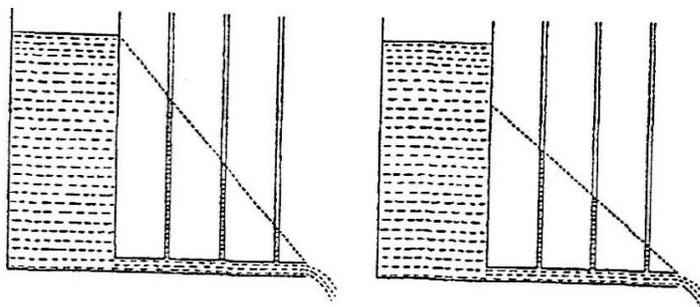


Figure 7.3.2

Schéma associé à la question Q17 ('pertes de charge') et présenté en entretien à l'enseignant

Dans les deux cas représentés 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 ?

Référons-nous par exemple à la photographie de l'expérience indiquée dans un poly de TP d'un centre de préparation au CAPES d'une université parisienne (cf Annexe C.3). Lacourbe, qui relie les surfaces libres des tubes de prise de mesure de pression dans la canalisation horizontale, est quasi-droite. De plus, elle n'atteint pas en amont la surface libre du réservoir. Le schéma de gauche de la figure 7.3.2 paraît donc moins adapté que celui de droite.

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 démarre 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 ('*entrance region*') 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 photo de l'annexe C.3 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 de la figure 7.3.2.

Les deux représentations restent donc des simplifications d'une situation réelle donnée.

Comment les enseignants interrogés commentent-ils ces schémas ?

La situation de la figure 7.3.2 est 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.

De plus, dans tous les manuels consultés à destination d'étudiants en médecine, la perte de pression dans un tuyau sanguin de diamètre donné est évoquée, via un graphique comme celui du document 2 de la trame de l'enquête (cf Annexe E.4.).

La situation présentée ne devrait donc pas déstabiliser les enseignants.

Par contre, la question posée devrait, elle, être plus déstabilisante.

En effet, ce questionnement du prolongement de la droite n'a jamais été constaté dans les manuels consultés.

Pour autant, on peut attendre au moins un début de raisonnement construit de la part de tous les enseignants interrogés.

Les enseignants qualifiés de I devraient présenter les réponses les plus construites et cohérentes, en adéquation avec les visées d'une formation d'ingénieur dans laquelle ils interviennent.

Types de réponse à la question Q17 en lien avec le raisonnement mené pour étudier la situation présentée pour cette question

Nous avons réparti les réponses à la question Q17 selon que l'enseignant rencontre ou non des difficultés à répondre.

Lorsque l'enseignant interviewé éprouve des difficultés face à la question posée, il peut ne pas savoir et ne pas chercher de réponse (type de réponse noté 'Evacué').

Il peut avancer un raisonnement qui n'aboutit pas. Nous lui associons deux types de réponse, selon que son raisonnement est cohérent avec son cours (type de réponse associé nommé 'Raisonnement cohérent avec son cours') ou ne l'est pas ('Raisonnement incohérent avec son cours').

Lorsque l'enseignant ne présente pas de difficultés, nous lui avons associé trois types de réponse possibles, associée chacune à une démarche de raisonnement différente : l'enseignant répond en se référant à du visuel (par exemple, des souvenirs de travaux pratiques) et à la notion de pertes de charge (type de réponse noté 'Raisonnement visuel et par pertes de charge') ou uniquement en se référant à la notion de pertes de charge (type de réponse noté 'Raisonnement uniquement par pertes de charge'). Il peut également raisonner sur la validité des modèles introduits (type de réponse noté 'Raisonnement par réflexion sur les approximations').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse :

'Evacué' :

« Doesn't matter / You can shift each one / » (I14)

« I'll be guessing / I don't know » (MB6)

« I have no idea » (MB9)

« Which one to follow? I don't know / I would have to call a physicist » (MB7)

Raisonnement qui n'aboutit pas et 'incohérent avec son cours' :

« là [schéma de gauche retenu par III] tous ces points ils relient les points qui correspondent à la pression atmosphérique » (I11)

Raisonnement qui n'aboutit pas mais 'cohérent avec son cours' :

« the left is an ideal / the right is little bit more robust with what you can do with it / if you change the slope it's gonna affect the pressure / » (U5)

'Raisonnement visuel et par pertes de charge' :

« Celui de gauche est faux (...) c'est évident. Y a une perte singulière au rétrécissement ici »(T3)

« without friction I like this one [celui de gauche] / with friction I like this one / it's artificial / it looks decent because you would have a head loss / » (T6)

'Raisonnement uniquement par pertes de charge' :

« Si on fait des pertes de charge il est ballot d'oublier la singulière si elle est majoritaire / Parce que là manifestement elle a l'air d'être significative / » (I9)

'Raisonnement par réflexion sur les approximations' :

« Of course the straight line is wrong you know // Why is it a straight line ? It shouldn't be a straight line // That's part of my problem // It should go asymptotically to a straight line but it's not a straightline // At the beginning it's not // It's curved // But it's not a // If you're teaching the students correctly you can't make that on a straight line // Why is it not a straight line ? You explain it to them and they may learn something // But this straightline they say 'oh yeah / this is just a fully developed pipe flow the all way' // This is part of my problem // Why make it a straight line when it is not a straight line ? » (I13)

Répartition des enseignants en lien avec le raisonnement mené pour étudier la situation de la question Q17

Quelle que soit la famille ou sous-famille qualifiée de physique, les réponses sont contrastées, comme l'indique le tableau 7.3.2.1.

Cas des enseignants qualifiés de physique						
Raisonnement mené pour étudier la situation de la question Q17						
Difficultés				Pas de difficultés		
Famille	Evacué	Raisonnement incohérent avec son cours	Raisonnement cohérent avec son cours	Raisonnement visuel et par pertes de charge	Raisonnement uniquement par pertes de charge	Raisonnement par réflexion sur les approximations
<i>I</i>		I11	I5		I9	
<i>CPGE</i>			I7			
<i>I USA</i>	I14		I20		I15	I13
<i>U</i>			U2 U5		U6	
<i>T</i>		T1 T2		T3 T6		
<i>Total</i>	1	3	5	2	3	1

Tableau 7.3.2.1

Cas des enseignants qualifiés de physique : raisonnement mené pour étudier la situation de la question Q17

On lit dans ce tableau que 9 enseignants sur les 15 sélectionnés qualifiés de physique présentent des difficultés sur cette situation, soit 60% de ce groupe.

Quasiment un tiers du groupe (4 enseignants sur 15) propose un raisonnement incohérent ou évacue la question.

Ceux appuyant leur raisonnement sur des équations locales (I5, I7, I20) ne parviennent pas à dépasser leurs difficultés, contrairement à ceux s'appuyant sur la notion de pertes de charge.

Ceux qui ne présentent pas de difficultés se répartissent sur les trois types de raisonnement retenus, une majorité se référant à la notion de pertes de charge (soit 5 enseignants sur 15). Parmi eux, seuls ceux qualifiés de T se réfèrent à du visuel couplé à la notion de pertes de charge. Seul I13 appuie son raisonnement sur une réflexion générale et argumentée sur les approximations en physique.

Nous présentons de manière détaillée des réponses d'enseignants, par famille et sous-famille, dans le tableau 7.3.2.

Détail des réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Cas des I CPGE

Les quatre enseignants de la sous-famille I CPGE tentent de répondre directement à la question posée.

I11 répond assez vite qu'elle choisirait le schéma de gauche parce que là tous ces points ils relient les points qui correspondent à la pression atmosphérique, ce qui n'est pas le cas du point d'intersection de la droite et du réservoir dans le schéma de droite. I11 semble induire que les points étant tous à la même pression, ils devraient être répartis selon une droite.

I5 conclut ne pas savoir quelle situation est correcte mais fournit des pistes de réflexion pour analyser le problème. Il propose notamment de réfléchir aux tailles respectives du réservoir et des différents tuyaux (« *Je suis pas sûr si celui-là [schéma de droite] est plus rigoureux* »).

I5 se demande quelle est la visée pédagogique associée à cette situation représentée : *a priori* illustrer la notion de perte de charge linéique constante dans une canalisation horizontale. Dès lors, il s'agit de centrer l'attention du lecteur sur ce point et de ne pas le distraire par autre chose : l'origine de la droite n'aurait donc pas à être représentée, ce qui l'incite à préférer le schéma de droite pour cette raison. Et de rappeler que « *Je suis pas sûr que le plus rigoureux soit le plus pédagogique* ».

I7 se pose des questions similaires à I5 pour valider l'hypothèse d'un écoulement permanent.

I7 fournit un argumentaire équivalent à I5 et énonce que l'auteur de ces schémas a certainement cherché à montrer que le point de départ de cette droite n'a pas à correspondre *a priori* avec la surface libre du réservoir. I7 choisit le schéma de droite qu'il estime correspondre à une amélioration du schéma de gauche qui comporterait un biais.

I9 indique répondre à froid, sans écrire. Il justifie son choix du schéma de droite via la notion de perte de charge singulière et de perte de charge régulière. Il s'est demandé au préalable si les deux situations étaient possibles et conclut qu'il ne faut en retenir qu'une, ce qu'il fait. Il nuance son choix en précisant ne pas avoir réalisé l'expérience, ne pas avoir vécu en écoulement en canalisation et indique qu'il faudrait évaluer les pertes de charge singulière et régulière dans la situation envisagée afin de conclure quel schéma serait le plus adapté.

I9 indique également que dans la filière de CPGE dans laquelle il enseigne, de se limiter aux pertes de charge et de ne pas aborder les équations locales comme dans d'autres filières permet d'être moins perturbé face à une situation du type de celle proposée à la question Q17.

Cas des I USA

Les réponses des enseignants de la sous-famille I USA sont contrastées :

Ces schémas n'ont pas de sens pour I14 parce que la baisse de pression n'est pas explicable à l'aide de la relation de Bernoulli qui est la seule relation qu'il a abordée dans son cours. I14 indique saisir le problème (« *I can see there's an issue there* ») mais il rappelle l'ampleur du programme à aborder : des choix sont à faire. I14 estime que vu ce qu'il a enseigné aux élèves, le schéma de gauche a peut-être plus de sens que celui de droite mais il ne développe pas sa réponse. Il n'a jamais vu l'expérience associée. Je signale qu'en pratique les élèves n'auraient pas *a priori* le choix de l'expérience correcte. Il indique alors ne pas faire de TP et que la mécanique des fluides ne représente qu'un quartdecours.

I20 indique qu'initialement il a raisonné avec la relation de Bernoulli et s'est rendu compte de l'inadéquation avec la baisse de niveau représentée. Il indique ensuite que la vitesse dépend de la hauteur, pas d'autres paramètres. Il évoque la finesse des tuyaux. Il n'a pas réalisé cette expérience mais indique avoir vu une situation équivalente via une des vidéos montrées à ses élèves. La scène représentée dans la vidéo évoque la perte de charge linéaire (« *it should keep going linearly down* ») mais n'y est pas représenté le point d'intersection avec le réservoir, qui n'est pas l'enjeu de la scène filmée (« *I always see that and then you see a slope* »). Il exprime sa perturbation et finit par se demander s'il s'agit d'un état permanent. Il s'interroge également sur la taille du rétrécissement, sans quoi « *it is a mess* ».

I15 voit dans les schémas présentés une mise en valeur des pertes de charge singulières en entrée du tuyau horizontal. Il adapterait son choix à la situation : fonction de la vitesse d'écoulement, il emploierait le schéma de gauche (faible changement de vitesse au niveau du rétrécissement) ou celui de droite (changement de vitesse plus important). Connaître le contexte serait nécessaire pour choisir : « *So I guess in detail and not seeing that in context is caviar /* ».

Enfin, I13 conteste les deux représentations, dans la mesure où elles induisent l'idée d'une chute de pression linéaire dans la canalisation alors que pour lui, c'est uniquement de manière asymptotique que la chute de pression tend vers une chute de pression linéaire.

A choisir entre les deux schémas, il préfère celui de droite, « *évidemment* », dans la mesure où celui-ci ne sous-entend pas que la pression en entrée du tuyau horizontal est la pression atmosphérique.

Néanmoins, ce n'est pour lui qu'un aspect de la situation envisagée : il insiste sur la question « *why?* ». Il estime que c'est à ce type de question qu'on doit répondre en physique : pourquoi présenter ou non une décroissance linéaire de la pression ? Si un tel schéma apparaissait dans le manuel, il l'exploiterait en cours en demandant à ses élèves ce qui ne convient pas dans ce schéma.

Cas des U

Soit les enseignants de la famille Tont des difficultés mais raisonnent de manière cohérente avec leur cours (U2 et U5), soit ils n'ont pas de difficultés et présentent un raisonnement uniquement par pertes de charge (U6) :

U2 dit comprendre le schéma de gauche qu'il juge intuitif : si un des fins tubes de verre pouvait être déplacé jusqu'au réservoir, le niveau d'eau indiqué serait équivalent à celui du réservoir. Il

déclare se douter que la seconde édition tient cas d'un autre phénomène mais il ne voit pas lequel.

U5 réfléchit et indique qu'il choisirait le schéma de droite car ayant plus de « *variability* ». Il précise : « *The left is an ideal / The right is little bit more robust with what you can do with it / If you change the slope it's gonna affect the pressure /* ».

U5 : « *The right is better just because there it's more challenging to look at the free surface / That's technically not moving but fluid flows /* ». Il indique : « *a free surface is always a challenge for some students* » et ce, même avec la meilleure mise en évidence et l'utilisation de vidéos indique-t-il.

U6 n'utiliserait pas le schéma de gauche car il nécessite des hypothèses, notamment sur les « *entrance losses* ». Il indique qu'avec Mathematica il réalise des simulations de réservoirs de hauteurs différentes (« *a pipe network problem* »).

Cas des T

Soit les enseignants de la famille T ont des difficultés et raisonnent de manière incohérente avec leur cours (T1 et T2), soit ils n'ont pas de difficultés et présentent un raisonnement visuel et par pertes de charge (T3 et T6) :

T1 indique que le schéma montre la perte de pression dans le tube horizontal. Concernant le schéma de gauche, il parle de confusion possible. Il ne comprend pas pourquoi l'intersection de la droite et du réservoir serait sur la surface libre du réservoir. Il choisit *a priori* le schéma de droite, puis se ravise après réflexion. Il indique que dans le schéma de gauche il apparaît que la pression à l'entrée du tuyau est la pression à la surface libre du réservoir, contrairement au schéma de droite, mais il conclut ne pas être sûr de lui (« *Donc c'est que c'est pas clair dans ma tête* »).

Pour T2, « *les droites représentées sur les schémas sous-entendent des relations qui me paraissent pas évidentes / (...) La question qui se pose est 'est-ce que les droites sont concourantes ?' et mon expérience me fait dire que je reste sceptique par rapport à ça /* ». Il doute également de la linéarité de la chute de pression dans le tuyau, indiquant que le schéma pourrait correspondre à un instant donné d'une expérience. Il parle de sous-entendus : « *c'est plein de sous-entendus qui sont pas évidents /* ».

T3 répond que le schéma de gauche est faux car il ne tient pas cas de la perte de charge singulière à l'entrée du tuyau horizontal. Il indique « *c'est / c'est évident* » puis se ravise, annonçant qu'en fait ce n'est pas évident *a priori* et anticipe des difficultés si la question était posée à des enseignants de physique.

Il indique que c'est en faisant l'expérience qu'il a constaté un effondrement du niveau d'eau dans le tuyau en entrée du tube horizontal. C'est pour lui l'illustration de l'importance de recourir à l'expérimental en situation d'enseignement.

Il associe son choix de retenir le schéma de droite à un objectif pédagogique (« *tout dépend aussi de ce qu'on a / de ce qu'on fixe comme but à l'expérience* ») : ici, il s'agit pour lui de montrer la linéarité de la perte de charge dans une partie du tuyau horizontal. Il considère qu'il ne faut donc pas se limiter à représenter les niveaux dans les tuyaux mais également tracer la droite et expliciter la discontinuité de niveau en entrée du tuyau. Il conclut que présenter cette situation

impacte l'ordre de présentation du cours : les pertes singulières sont un prérequis à l'étude de cette expérience.

T6 indique, concernant le schéma de gauche : « *In real life this ideal case doesn't work cause friction /* ». Le choix de schéma de T6 est associé à la prise en compte ou non des pertes de charge en entrée du tuyau horizontal (« *without friction [celui de gauche] I like this one / With friction I like this one [celui de droite] / it's artificial / It looks decent because you would have a head loss /* »).

Tableau 7.3.2.2

Cas des enseignants qualifiés de physique : raisonnement mené pour étudier la situation de la question Q17 ; détail des réponses d'enseignants par famille et sous-famille

7.3.3 Utilisation du modèle : attitude face à une situation prototypique et une question inhabituelle

Pour compléter l'analyse des réponses des enseignants à la question Q17, nous évoquons ici leur 'attitude', plus précisément la composante émotionnelle, en entretien, face à la question posée.

Nous avons retenu trois types d'attitude face à Q17 : 'perturbé', 'neutre' et 'assuré'.

Nous ne présentons que des extraits d'entretiens associés à une attitude 'perturbé' face à Q17 :

« *désarroi puisque c'est la première fois que je la [cette situation] rencontre* » (I7)

« *Ben c'est une bonne question ça /Faut que je réfléchisse /* »(I9)

« *il [le schéma de droite] me parait bizarre* » (I11)

« *puzzled* » (U2)

La répartition des attitudes des enseignants face à Q17 est résumée dans le tableau 7.3.3.1.

Enseignants qualifiés de 'physique'			
'Attitude' face à la question Q17			
<i>Famille</i>	Perturbé	Neutre	Assuré
<i>I CPGE</i>	I5 I7 I9 I11		
<i>I USA</i>	I20	I14 I15	I13
<i>U</i>	U2	U5	U6
<i>T</i>	T1 T2		T3 T6
<i>Total</i>	8	3	4

Tableau 7.3.3.1
Cas des enseignants qualifiés de physique : 'attitude' face à la question Q17

On constate dans ce tableau que la situation de la question Q17 présente un aspect inhabituel pour au moins la moitié des enseignants interrogés.

Un quart reste neutre.

Un quart y répond de manière assurée.

La sous-famille I CPGE est perturbée par cette situation schématisée.

L'attitude des I USA est plus contrastée que celle des I CPGE.

L'attitude des membres de la famille U est contrastée ainsi que celle des membres de la famille T.

Nous présentons de manière détaillée des réponses d'enseignants, par famille et sous-famille, dans le tableau 7.3.3.2.

Détail des réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Cas des I CPGE

I5 se déclare surpris de ne jamais s'être posé de questions sur cette situation alors qu'il déclare en avoir étudié une voisine lors de sa préparation à l'agrégation. Il indique par ailleurs ne pas l'exploiter dans une situation d'enseignement.

I9 indique n'avoir jamais réalisé cette expérience.

Seule I11 indique avoir eu à exploiter cette situation par le passé, lorsqu'elle était en poste en BCPST. Le schéma (sans intersection entre la droite et le réservoir) était alors fourni aux étudiants.

Cas des I USA

I13 commente spontanément cette situation.

I15 n'est pas troublé par les schémas présentés.

I20 est perturbé par le schéma de droite. Il se demande ce qu'il comprend de la situation. Il reste silencieux pendant quasiment 5 minutes, ce qui est particulièrement long lors d'un entretien. I20 apparaît perturbé par ce schéma puisqu'il conclut l'entretien par : « *That was good / It was good / Still need to think about // When you see a curve / You know the answer ?* ».

Le comportement de I14 est différent : il indique évoquer ce type de situation en cours. Il me propose de voir ce qu'il a utilisé en cours. Il parle des niveaux d'énergie qu'il évoque en cours : il s'agit d'une représentation sur un écoulement des contributions relatives de l'énergie cinétique volumique, de l'énergie potentielle et de la pression à la charge totale. Il ne commente pas la manière dont sont représentés les niveaux de liquide sur le schéma proposé. Il ne constate pas que le schéma de son cours avec les niveaux d'énergie n'a pas de lien direct avec les schémas qui lui sont présentés.

Signalons enfin que c'est lors de la discussion sur cette situation que se produit la seule 'rupture' constatée en entretien. Il s'agit d'un arrêt brutal dans l'échange avec I17. Elle demande si c'est le niveau d'eau ou la pression qui est représentée, indique « *not clear if the data line represents pressure* ». I17 paraît ne pas savoir que répondre à cette question. Elle tourne alors la tête à 90°, me tend le document et se tait. Elle exprime son refus de poursuivre l'entretien sur ce point.

Cas des U

U2 reste silencieux et se déclare perplexe face à ces schémas. Il indique que c'est la première fois

qu'il est confronté à cette situation.

U5 indique ne pas utiliser cet exemple.

U6 y répond de manière spontanée.

Cas des T

T1 est perturbé par le schéma de gauche, il indique répondre à froid et le répète.

T2 indique que ce dispositif est disponible au lycée et signale que les schémas présentés sont peu clairs.

T3 et T6 répondent spontanément.

Tableau 7.3.3.2

Cas des enseignants qualifiés de physique : 'attitude' face à la question Q17

Détail des réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Conclusion

Ayant vu le contexte empirique de la question Q17 ('pertes de charge') dans différents manuels, tant français que nord-américains, tant anciens que récents, la méconnaissance des enseignants interrogés à l'égard de ce contexte peut surprendre.

La gêne associée l'est moins : 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 de réfléchir aux conditions de validité de la linéarité de la perte de charge par exemple. Cela n'a pas été le cas (hormis pour I13 et I20).

Ceux ayant des difficultés ont adopté des attitudes contrastées : un raisonnement est tenté mais n'aboutit pas complètement (I5, I7, I20, U2, U5), un raisonnement est tenté mais n'aboutit pas du tout (I11, T1, T2) ou l'obstacle est évacué (I14, I17).

Au mieux est formulée la distinction entre un cas limite qualifié d'idéal pour le schéma de gauche, comparé à celui de droite.

Les enseignants ne présentant pas de difficultés se sont référés à une réflexion sur la nature de l'écoulement (I13), à la notion de pertes de charge singulière en entrée du tuyau horizontal (I9, I13, I15, U6, T3, T6) ou à leur vécu lié à la réalisation expérimentale du montage (T3, T6).

Le pays d'exercice de l'enseignant n'apparaît pas comme un critère permettant de distinguer les enseignants.

On note par contre que des enseignants de la famille T répondent mieux à cette question que des enseignants de la famille I.

Ce constat n'avait pas été anticipé : le travail de modélisation à enseigner étant moins marqué pour la famille T que pour la famille I, on aurait attendu un résultat contraire.

On constate que le recours à la notion de perte de charge évite aux enseignants qui l'emploient des difficultés sur cette situation. Ce type d'approche étant courant dans les filières T, cela pourrait justifier qu'ils ne soient pas mis en difficulté par la question posée.

Ce raisonnement par blocs explicite l'impact des phénomènes dissipatifs tout en mettant de côté le formalisme compliqué associé à ces phénomènes dissipatifs.

Les enseignants raisonnant à partir des équations locales sont mis en difficulté, les zones à considérer pour réfléchir à la question posée ne correspondant pas à celles où l'écriture simplifiée de ces équations est applicable.

Par exemple, I20, face à cet obstacle, prend une feuille de papier et y écrit la relation de Navier-Stokes projetée sur un axe horizontal : cela ne l'aide pas. Il ne remet pas en cause l'approximation qui mène à la formulation qu'il écrit, à savoir de supposer le champ de vitesse du type $\vec{v} = v(y) \vec{u}_x$. Dans la zone du rétrécissement (*'entrance zone'* pour les Anglo-Saxons), l'expression du champ de vitesse est plus compliquée. En France, en CPGÉ en filière PC notamment, l'existence même de cette zone est mise de côté dans les programmes où ne figure pas la notion de pertes de charge. Peu de manuels de premier cycle universitaire français font référence à cette *'entrance zone'*. Il n'a pas été fait référence au programme dans cette partie de l'entretien mais les difficultés constatées en entretien laissent à penser que la validité du domaine où $\vec{v} = v(y) \vec{u}_x$ n'est pas évoquée.

Plusieurs des enseignants qualifiés de I présentant des difficultés à la question Q17 n'ont pas au programme de leur cours la notion de perte de charge singulière. La linéarité de la perte de charge est connue de plusieurs d'entre eux (puisqu'ils énoncent ce résultat), mais ses conditions de validité, liées aux propriétés de l'écoulement, ne sont pas évoquées pour les associer aux schémas proposés.

Par ailleurs, la majorité de ceux ayant présenté des difficultés indiquent ne pas avoir eu recours à des expériences de cours en mécanique des fluides (à l'exception de I5, I11, I20, T1, T2). La réalisation pratique de l'expérience schématisée a été réalisée par I11 : cela n'a pas suffi pour autant à la formulation d'une réponse correcte. Le recours à une vidéo par I20, pas davantage. Cela peut s'expliquer par la visée pédagogique accordée tant à la manipulation de cours qu'à la vidéo associée, qui étaient pour ces enseignants uniquement de visualiser la linéarité de la perte de charge et non de travailler sur la modélisation de cette situation.

Signalons que les enseignants n'ayant pas présenté de difficultés sur cette question Q17 partagent un vécu au quotidien fort lié à l'expérimental : via la recherche (I13, I15, U6) ou via leur pratique enseignante (T3, T6).

I9 peut sembler faire exception : il n'est pas enseignant-chercheur et ne déclare pas avoir beaucoup recours à l'expérimental dans ses séances de mécanique des fluides. Néanmoins, il a effectué sa thèse en mécanique des fluides et, suite au nouveau programme dans la filière où il enseigne, il indique s'être penché sur la question des pertes de charge pour préparer son cours.

Recourir à l'expérimental pour étudier un écoulement pourrait constituer une aide au travail de modélisation. Nous détaillons davantage ce point dans le chapitre sur les contextes (cf chapitre 8).

7.4 Cas des enseignants qualifiés de biomédical (MB)

Les membres de la famille MB sont ceux présentant le plus d'homogénéité dans les réponses apportées en lien avec le modèle.

La visée du modèle retenu est une **description générale du système d'écoulement sanguin et son contrôle-régulation par le système nerveux.**

Le modèle retenu par la famille MB pour étudier un écoulement présente des caractéristiques différentes de celles du modèle proposé par des physiciens.

L'association structure-fonction est centrale dans le discours des MB : par exemple, la structure 'cœur' a la fonction de 'pompe' pour le sang. Le rôle du système sanguin est de permettre la circulation du sang dans l'organisme : le cœur est présenté comme une pompe et les vaisseaux comme des voies de circulation. La question posée en situation d'enseignement est de savoir comment mettre en mouvement le sang. Le système circulatoire est fermé, le débit cardiaque est constant et le débit sanguin local peut varier. Artères et veines ont pour fonction la circulation du sang. Les capillaires, la circulation et les échanges.

L'association contenant-contenu est également centrale dans le discours des MB : par exemple, le contenant correspond aux vaisseaux sanguins et le contenu est le sang qui circule à l'intérieur.

Il s'agit, pour la famille MB de faire **comprendre le sens de l'écoulement sanguin** (des zones de haute pression aux zones de basse pression), en quoi les conditions d'écoulement au niveau des capillaires est favorable aux échanges (les échanges ont lieu là où l'écoulement sanguin est le plus lent et les parois des vaisseaux sont fines) et d'**appréhender le fonctionnement du système circulatoire sanguin dans le contexte d'un organisme avec régulations et échanges** (par exemple le cas des parois perméables permettant les échanges gazeux ou les phénomènes de vasodilatation et de vasoconstriction via l'interaction avec les fibres musculaires et le système nerveux. Rappelons ici les causes de la régulation de la pression artérielle: « *La pression artérielle est maintenue pendant la diastole grâce à la résistance à l'écoulement du sang dans les artérioles et les capillaires et grâce, également, à l'élasticité de l'aorte et des grosses artères, qui restituent lors de la diastole l'énergie accumulée au moment de la systole. Les caractéristiques du système artériel (paroi constituée à la fois de fibres élastiques et musculaires) conduisent ainsi à un amortissement des oscillations de la pression artérielle et à un écoulement laminaire du sang à l'entrée des capillaires, condition indispensable aux échanges qui se déroulent, à ce niveau, avec les tissus irrigués.* » (Cadet, 2008, p.111)).

L'écoulement est présenté comme s'effectuant des zones de pression élevée à celles de pression faible : cette idée revient chez tous les MB.

Seul MB4 évoque le cas d'un rétrécissement d'une « canalisation » sanguine, suivi d'un élargissement. Il indique utiliser la relation de Bernoulli pour étudier cette situation. La pression en aval de l'élargissement serait plus faible qu'en amont de l'élargissement et pourtant l'écoulement s'effectuerait vers l'aval, ce qui entre en contradiction avec l'affirmation que l'écoulement s'effectue des zones de pression élevée vers celles de pression faible.

De plus, dans le modèle retenu par MB4, la pression serait la même entre l'amont du rétrécissement et l'aval de l'élargissement : il ne devrait pas y avoir d'écoulement. Là encore, il y aurait contradiction avec l'affirmation que l'écoulement s'effectue des zones de pression élevée vers celles de pression faible.

De telles contradictions n'apparaissent pas dans le discours des autres MB : ils n'y sont pas confrontés dans leur enseignement, le rétrécissement n'étant pas abordé.

S'il y a « interaction » entre le système et l'extérieur au niveau de la paroi, on recherche qui contrôle l'interaction, comment elle s'effectue mécaniquement (vasodilatation et vasoconstriction). L'écoulement du fluide le long des parois n'est pas abordé. On constate que la pression diminue tout au long du réseau sanguin. On le relie éventuellement à une résistance, voire même à la taille de la canalisation mais on ne va pas jusqu'à évoquer la viscosité (sauf MB4).

Leur public étudiant a un bagage mathématique faible et la durée de cours disponible est très limitée.

L'introduction d'un formalisme mathématisé avec recours à la relation de Bernoulli n'est pas retenue par les membres de la famille MB, à l'exception de MB4. De plus, aucun des membres de la famille MB n'évoque l'équation de Navier-Stokes.

Pour la majorité des enseignants qualifiés de MB, le recours aux équations et lois physiques, s'il y a lieu, est limité à une visée de **mémorisation**.

Par exemple, la loi de Poiseuille résume en un langage mathématisé les influences de différents paramètres sur le débit sanguin. La loi de Boyle-Mariotte permet de retenir que lorsque le volume augmente, la pression diminue. Ces lois sont généralement énoncées *ex-nihilo*. Elles ne sont pas justifiées et n'ont pas à l'être selon les enseignants interrogés : la preuve de ces lois est considérée comme dépendant d'un autre cours que le leur. Le domaine de validité de ces lois n'est pas précisé, que l'enseignant le connaisse ou non. Dans de telles conditions, utiliser une loi physique hors de son domaine de validité (comme par exemple utiliser la loi de Boyle-Mariotte pour un liquide) n'apparaît pas perturbant pour un enseignant de la famille MB.

Dans les tableaux 7.4.1.1 et 7.4.1.2, nous proposons quelques citations qui justifient le paragraphe précédent sur le modèle retenu par les enseignants de la famille MB.

Le premier tableau évoque les éléments du modèle et le second évoque le modèle sous l'angle des PCK retenus *a posteriori* dans cette étude.

Enseignants qualifiés de biomédical	
Éléments du modèle retenu et citations associées	
Éléments du modèle	Citations associées
Recherche d'une vision d'ensemble simplifiée	« <i>qualitative approach</i> », « <i>general overview</i> » (MB6) « <i>on est très simplificateur en biologie</i> » (MB3)
Le modèle retenu est de type contenant-contenu	« <i>the container and the fluid inside the container</i> » (MB7) En échographie cardiaque, « <i>on voit les contenants / pas les contenus</i> » (MB3)
Un modèle fondé sur l'association structure-fonction	« <i>different structures related to different functions</i> » (MB7)
Fonctions de contrôle et de régulation	« <i>We focus a lot on communications / so how do we maintain body functions and how do we communicate that using the nervous system and hormones</i> » (MB6) « <i>Il s'agit de régulation de la pression artérielle via le contrôle de l'activité cardiaque</i> » (MB2)
Éléments qui permettent la régulation	« <i>flexible walls / We have elasticity in the walls /</i> » (MB9) « <i>Les artérioles sont douées de vaso-motricité / elles peuvent se vaso-dilater ou se vaso-contricter et ainsi faire varier R [la résistance hydraulique] /</i> » (MB4) « <i>I have to do with muscles</i> » (MB7)

Tableau 7.4.1.1
Cas des enseignants qualifiés de biomédical :
éléments du modèle retenu et citations associées

Enseignants qualifiés de biomédical			
Catégorie 'Caractéristiques du modèle'			
Catégorie	Sous-catégorie	Type de réponse	Citations associées
Caractéristiques des modèles	Fonction du modèle	Descriptif explicatif	« on décrit les mécanismes » (MB2) « on utilise des choses qu'on a retenues et qu'on essaie de faire retenir aux autres parce qu'elles sont pratiques pour // se représenter les phénomènes / » (MB4)
		Inconnu	« Poiseuille nous dit que / la formule c'est celle-là et c'est pas négociable » (MB5) « Les notions de physique sont annoncées » (MB2)
Caractéristiques des modèles	Domaine de validité du modèle	Volontairement ignoré ou minimisé	Sur les conditions d'écoulement : « on va pas en parler si ce n'est // Non / on se pose pas la question alors qu'on devrait » (MB3) « savoir si elle [l'équation de Poiseuille] est applicable telle quelle / si elle a des limites si on fait bien de l'appliquer ou pas c'est pas // j'en sais rien à vrai dire / (...) Elle va fonctionner pour expliquer des phénomènes qu'on peut constater et c'est ça qui nous importe / » (MB4)

Tableau 7.4.1.2
Cas des enseignants qualifiés de biomédical :
citations associées à la catégorie 'Caractéristiques du modèle'

Nous évoquons enfin les lois de la physique énoncées par les enseignants de la famille MB afin de préciser une partie de leurs emprunts éventuels à la physique.

Loisphysiques énoncées

Quatre équations sont évoquées en entretien par les enseignants de la famille MB : la loi de Poiseuille, la relation de Bernoulli, l'équivalent de la loi d'Ohm pour un écoulement de fluide et la loi de Boyle-Mariotte.

La répartition des enseignants est indiquée dans le tableau 7.4.1.3.

Loisphysiques évoquées par les enseignants qualifiés de biomédical			
Loi de Poiseuille	Relation de Bernoulli	Loi d'Ohm	Loi de Boyle-Mariotte
MB2 MB3 MB4 MB5	MB4	MB2 MB3 MB4 MB5 MB6 MB8	MB6 MB8
4	1	6	2

Tableau 7.4.1.3

Cas des enseignants qualifiés de biomédical : lois physiques qu'ils évoquent en entretien

Pour certains, parmi lesquels MB5, les lois de la physique sont des lois universelles, sans domaine de validité limitant leur portée. D'autres enseignants, tel MB4, présentent une vision moins naïve des lois physiques.

Nous précisons ce qui est dit par des enseignants interrogés sur ces différentes lois dans le tableau 7.4.1.4 où nous avons réparti les réponses par loi physique évoquée.

Détail des réponses d'enseignants de la famille MB en lien avec les loisphysiques évoquées
<p>Loi de Poiseuille</p> <p>Un des points qui revient fréquemment chez les enseignants de la famille MB est que le sang va des zones de haute pression à celles de basse pression. MB2 évoque le programme : « pour la loi de Poiseuille / il s'agit de montrer que c'est un gradient de pression qui est à l'origine de l'écoulement du sang/ ».</p>

La loi de Poiseuille vise principalement à mémoriser l'influence du diamètre de la canalisation sur la chute de pression à débit fixé.

Il n'y a pas d'applications numériques associées à cette loi pour MB3 ou MB6 par exemple.

La loi de Poiseuille est énoncée et non prouvée. Si une limite de cette loi est évoquée, il s'agit essentiellement des aspects géométriques, à savoir le fait que le tuyau sanguin n'est pas exactement cylindrique. Les facteurs autres que géométriques ne sont pas évoqués spontanément : par exemple, la condition d'être en régime permanent et en régime laminaire n'est indiquée par MB3 qu'après une allusion à d'autres hypothèses que celles géométriques. Il l'indique alors de lui-même, ce que ne fait pas MB2 par exemple.

Relation de Bernoulli

La relation de Bernoulli n'est pas évoquée spontanément, sauf par MB4, dans son cours de Cardiologie.

Loi d'Ohm

C'est pour évoquer le fait que le sang va des zones de haute pression à celles de basse pression que la loi d'Ohm et l'analogie avec la résistance électrique est utilisée : la différence de pression est analogue à une différence de potentiel (ou tension électrique), le débit analogue à un courant électrique et la résistance hydraulique analogue à la résistance électrique.

Pour MB4, concernant le lien entre pression, débit et résistance : *« je pense que je réussis à leur faire passer (...) je leur dis toujours ça / $\Delta V = RI$ / Si vous comprenez ce type d'équation vous comprenez tout parce que ce type d'équation s'applique dans tous les domaines ».*

Loi de Boyle-Mariotte

MB8 explicite le lien entre pression et section de la canalisation : le volume de sang n'est pas modifié mais l'espace à travers lequel le sang s'écoule change. Même volume, section qui augmente, pression qui diminue.

« They understand pressure / volume is inversely related one each other / ». Il s'agit bien de la loi de Boyle- Mariotte : *« they know it from physics and chemistry »*, elle précise également que les élèves en ont une bonne compréhension quand ils démarrent son cours.

La loi de Boyle-Mariotte est évoquée dans le cas du système respiratoire par MB6 : *« so that makes more sense / but we do that after the heart so I related back to the idea of you know the fluid moving in the heart / So I correct myself there ».*

A la question sur l'application aux liquides de cette loi valable *a priori* pour un gaz, MB8 répond

: « *we don't do huge difference between gas and fluid / We don't go to the details on teaching that / It's just basic concepts for the students (...) not to understand the maths for them /* ». Un liquide n'est pas aussi compressible qu'un gaz, « *but we don't even discuss that* » dans un cours d'anatomie. Elle laisse cela au cours de chimie : « *to explain that small concept with them* ». En chimie, ils ont surtout travaillé avec des gaz : « *they understand the concept for the gas / When they come to fluid / I keep it with pressure inversely proportionnal to volume /* ».

Il est donc fait référence à la loi de Boyle-Mariotte pour l'étude du sang alors que cette loi concerne un gaz. Cette contradiction n'est pas gênante pour MB8 dans la mesure où la seule visée du recours à la loi de Boyle-Mariotte est de justifier et de retenir que la pression varie en sens inverse du volume.

Tableau 7.4.1.4

Détail des réponses des enseignants de la famille MB en lien avec les lois physiques évoquées

Cas de la situation de la question Q15

Les membres de la famille MB déclarent ne pas aborder la situation de la question Q15 'rétrécissement' (« *à la limite du programme / je ne m'attarde pas dessus /* » (MB2) ; « *we don't even do this / no* » (MB9)).

La situation de la question Q15 'rétrécissement' évoque à MB2 la vasoconstriction et la vasodilatation : « *c'est plus le mécanisme biologique et l'effet qui nous intéressent /* ». Sur les dessins de tuyaux qu'elle représente durant l'entretien, c'est soit un gros diamètre, soit un petit mais pas la transition de l'un à l'autre.

MB5 se limite elle aussi à des tuyaux de diamètre fixé. Je cite alors la situation représentée sur sa diapositive de cours 52 qui équivaut au schéma présenté en entretien. MB5 répond : « *c'est une illustration mais je ne passe pas du temps là-dessus* ».

MB3 fait référence à des manuels de physiologie évoquant le schéma de la question Q15 'rétrécissement' mais il précise ne pas s'y attarder, l'intérêt étant pour lui ailleurs : « *on va dessiner des choses comme ça mais (...) Juste pour nous de comprendre ce qui se passe lorsqu'un muscle fonctionne* » (MB3).

Les réponses aux questions Q16 ('couplage') et Q17 ('pertes de charge') étant très limitées, nous ne les évoquons pas. Seule MB8 tente un raisonnement à la question Q17, qui n'aboutit pas.

Conclusion

Représentation des résultats globaux sur les modèles introduits par les enseignants interrogés

Nous proposons ici une synthèse des résultats obtenus en termes de PCK 'Representation & Strategies' et 'Student Learning & Conceptions' associés aux modèles.

Comme indiqué dans le chapitre méthodologie, pour chaque enseignant retenu pour cette analyse, on code ses réponses aux sous-catégories de PCK retenues en associant un chiffre au type de

réponse qu'on lui a attribué. On effectue alors une moyenne de ces valeurs chiffrées par famille et sous-famille.

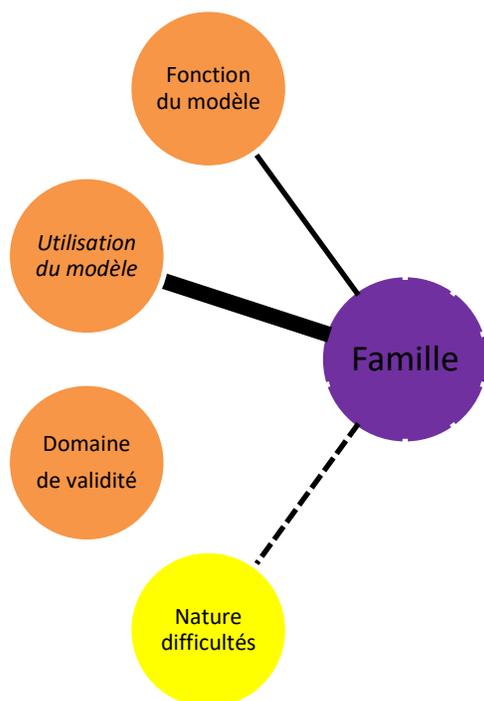
On associe à ces valeurs moyennes obtenues un type de trait comme rappelé dans le tableau 7.5.1.

Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Types de réponse	Type de trait associé
Personal PCK Representations & Strategies	Caractéristiques des modèles	Fonction du modèle	Non mentionné		absence de trait
			Descriptif et explicatif		trait fin en pointillé
			Prédictif	Qualitatif	trait fin en continu
		Quantitatif		trait épais en continu	
		Domaine de validité	Non mentionné	Inconnu	absence de trait
				Volontairement ignoré	trait fin en pointillé
			Mentionné	Evoqué	trait fin en continu
		Discuté	trait épais en continu		
Personal PCK Student Learning & Conceptions	Difficultés des élèves	Nature	Aucune		absence de trait
			Mathématique	Puissance et fractions Mise en équation	trait fin en pointillé
			Physique	Conceptuelle Naïve	trait fin en continu
				Liée au modèle	trait épais en continu
Personal PCK Representations & Strategies	Utilisation du modèle	Raisonnement	Difficultés	Evacué	absence de trait
				Raisonnement incohérent avec son cours	trait fin en pointillé
				Raisonnement cohérent avec son cours	trait fin en continu
		Pas de difficultés	Raisonnement visuel et par pertes de charge	trait épais en continu	
			Raisonnement uniquement par pertes de charge		
			Raisonnement par réflexion sur les approximations		

Tableau 7.5.1

Types de traits associés aux types de réponses retenues pour les 'fleurs' liées au modèle

On obtient alors un diagramme en forme de 'fleur' comme indiqué dans le document 7.5.1. Nous rappelons que nous avons retenu des éléments liés à ce que les enseignants disent qu'ils font (éléments indiqués avec une police de caractères droit) et un élément lié à ce qu'ils sont susceptibles de faire (élément 'Utilisation du modèle' indiqué en italique). En orange sont représentés les éléments liés aux modèles et en jaune celui lié aux élèves.

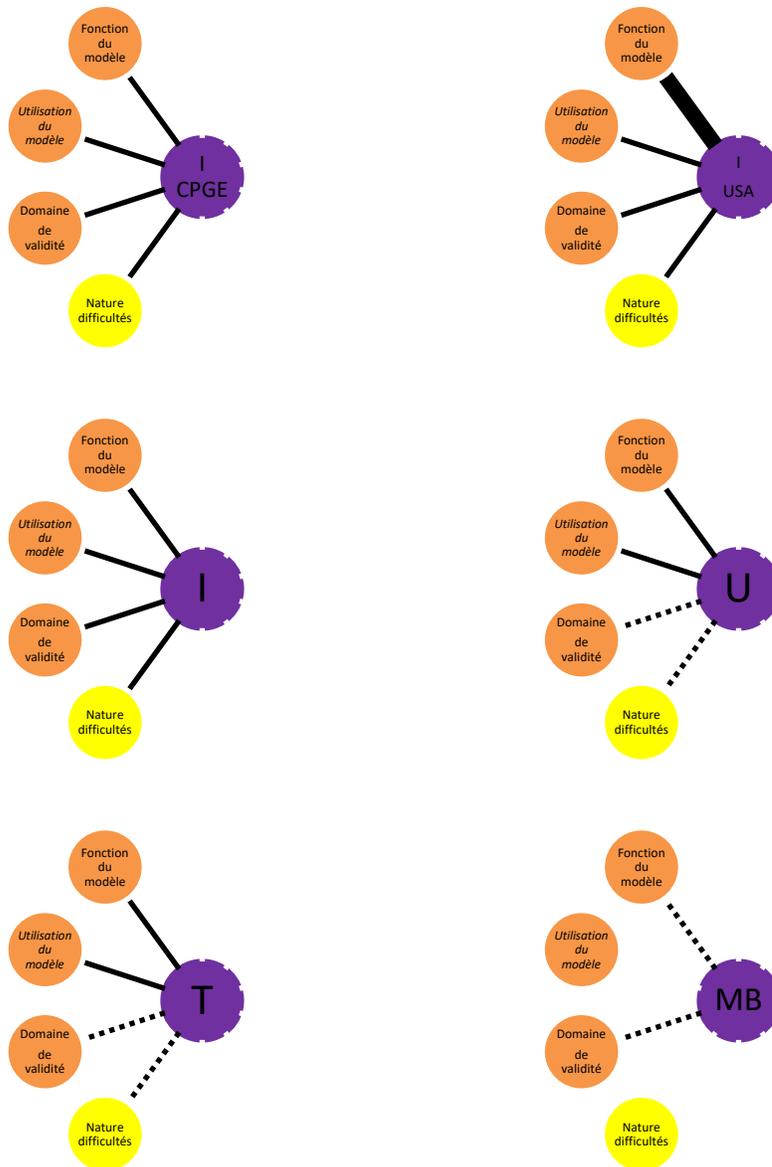


Document 7.5.1

Exemple de bilan sur les modèles sous forme de fleur

On synthétise alors les réponses des différentes familles et sous-familles dans le document 7.5.2.

MODELE
Bilan par famille et sous-famille



Document 7.5.2
Bilan sur les modèles par famille et sous-famille

Commentaires associés aux modèles introduits par les enseignants interrogés

On constate dans ce document 7.5.2 qu’au sein de la population analysée, **c’est la famille I qui présente le profil le plus homogène et contenant le plus de points valorisés en lien avec la démarche de modélisation (3 points valorisés sur les 3 retenus) et la nature des difficultés des élèves.**

Au sein de la famille I, lorsque l'on compare les I CPGE et les I USA, on constate dans ces deux sous-familles une homogénéité des points liés à la nature des difficultés des élèves et à la démarche de modélisation, qui sont valorisés, voire très valorisés pour les I USA concernant la fonction du modèle.

Les familles U et T présentent un profil plutôt hétérogène, avec des points majorés et minorés parmi les éléments liés aux modèles (2 points valorisés sur les 3 retenus en lien avec les modèles, à savoir la fonction et l'utilisation du modèle). La nature des difficultés des élèves est un point minoré pour ces familles.

La famille MB présente un profil contenant le plus de points minorés.

Si on met en perspective ces résultats avec la nature de la discipline (cœur / service) et du savoir (objet / outil), il semblerait que le périmètre d'expertise sur les modèles soit plus étendu lorsque la physique est une discipline de cœur que lorsqu'elle est une discipline de service. De même, lorsque l'objet de savoir est un objet plutôt qu'un outil.

Par ailleurs, le type de modèle retenu distingue les enseignants qualifiés de physique de ceux qualifiés de biomédical : les premiers utilisent les lois de conservation tandis que ceux de la famille MB utilisent un modèle qui se limite à des lois 'simples' de la physique et fondé sur la notion de contenant-contenu et de structure-fonction.

Pour les enseignants qualifiés de physique, la construction du modèle va tantôt des lois les plus simples aux lois les plus complexes, tantôt l'inverse, sans que cela n'impacte l'utilisation du modèle.

Lorsque la famille MB se réfère à la loi de Poiseuille ou à la relation de Bernoulli, l'utilisation qui en est faite est faible : il s'agit essentiellement d'une aide à la mémorisation.

Dans le discours des enseignants interrogés de la famille MB, on ne perçoit pas d'enjeu à faire réfléchir les étudiants sur la validité des lois énoncées, et ce, que l'enseignant ait conscience ou non de la validité des lois énoncées. Cela pourrait aboutir à une vision idéalisée de la portée de ces lois issues de la physique.

Les enseignants qualifiés de MB abordent les fonctions de contrôle et de régulation, contrairement aux enseignants qualifiés de physique.

Notons que les termes de 'structure' et de 'fonction' ne sont pas employés par les enseignants qualifiés de physique.

L'interaction entre le système étudié et son environnement n'apparaît pas dans un cours qualifié de physique : la réalisation des conditions aux limites (par exemple le rétrécissement possible d'une canalisation sanguine lié à l'élasticité de ses parois) n'est pas mise en avant et l'impact musculaire est passé sous silence, ce qui n'est pas le cas dans des cours qualifiés de biomédical.

Dans la population étudiée qualifiée de 'physique', le recours uniquement à un écoulement 'parfait' n'a pas été observé.

Ne recourir qu'à un écoulement visqueux n'est observé que chez U2, ce qui peut s'expliquer par la visée du module dans lequel il enseigne. Il s'agit d'un module de biophysique orienté neurosciences.

La répartition des enseignants en termes de fonction du modèle nous apparaît en accord avec les visées de formation qualifiées d'ingénieur ou de technicien où le prédictif y est recherché davantage que chez les MB.

A l'exception de I11, les membres de la famille I associent au modèle une visée prédictive-quantitative et ce, quelle que soit le pays dans lequel ils exercent, ce qui est là aussi en accord avec les visées d'une formation d'ingénieur à dominantphysique.

Que des membres des familles U et T puissent associer une visée uniquement prédictive au modèle ne surprend pas non plus : les attentes dans ces types de formation peuvent y être moindres en termes d'étude quantitative que dans des formations d'ingénieurs à dominantphysique.

Ces résultats paraissent en accord avec le statut qu'occupe la physique dans ces formations : discipline de 'cœur' pour des formations qualifiées de I, discipline 'd'ouverture' pour des formations qualifiées de U ou de T.

Pour un grand nombre d'enseignants qualifiés de physique, travailler sur le domaine de validité du modèle retenu est peu ou pas envisagé, qu'il s'agisse de la majorité des membres des familles T ou U, mais aussi d'une partie des I.

Il en va de même de la famille MB.

Cet état de fait apparaît plus contradictoire pour les enseignants qualifiés de physique que pour ceux de la famille MB : il est en effet davantage en désaccord avec une visée prédictive et quantitative du modèle utilisé qu'avec une visée descriptive comme dans le cas des MB.

Les enseignants n'abordant pas le domaine de validité d'un modèle ou l'abordant sans l'analyser ont tendance à considérer la situation du rétrécissement de la question Q15 ('rétrécissement') comme ne présentant pas ou peu de difficultés. Les éventuelles difficultés évoquées ne sont alors que du registre du 'calculatoire' (conversion d'unités, isoler la pression ou la vitesse dans la relation de Bernoulli, etc.), ce qui apparaît cohérent avec l'utilisation du modèle qu'ils proposent.

Au contraire, les enseignants analysant le domaine de validité d'un modèle ont tendance à évoquer des difficultés conceptuelles liées à cette situation. Ils sont peu nombreux (I5, I9, I20).

On pouvait attendre des enseignants de la famille I des réponses où la réflexion sur le modèle serait mise en avant. Les réponses sont en fait très contrastées, certains présentant un raisonnement marqué, lié à une démarche de modélisation, d'autres étant dans une démarche d'application d'une situation type qui ne nécessite pas ou plus de réflexion de leur part.

Pour beaucoup, la réflexion sur la portée limitée d'un modèle n'apparaît pas centrale : à travers cette situation du rétrécissement, il s'agit pour eux d'illustrer la relation de Bernoulli, pas de contester ou de limiter sa portée.

Ce constat s'observe aussi à la question Q16 ('couplage'). La situation qui y est évoquée correspond au couplage de deux situations traditionnellement disjointes : rétrécissement et prise de mesure de pression dans une canalisation à section constante. La première situation est traditionnellement reliée à la relation de Bernoulli et la seconde à la notion de perte de charge. Ce sont *a priori* des attendus dans un cursus qualifié de I, de U ou de T et elles y sont découplées : qu'une majorité d'enseignants les aborde de manière découplée ne surprend donc pas.

Coupler ces deux situations n'est spontanément repéré comme délicat en termes de choix de modélisation que par peu d'enseignants (I5, I9, I20). Demander quel modèle retenir pour aborder

simultanément ces deux situations couplées aboutit même à un obstacle chez un des enseignants interrogés à ce propos (I7). Bien qu'ayant perçu des difficultés conceptuelles associées à la situation de la question Q15 ('rétrécissement'), I7 ne présente pas pour autant une réflexion assez poussée sur le domaine de validité du modèle retenu, ce qui le gêne à la question Q16 ('couplage').

Que les enseignants qualifiés de physique qui abordent cette situation de la question Q16 de manière découplée ne perçoivent pas spontanément la difficulté de l'aborder de manière couplée interroge l'articulation des modèles qu'ils proposent et le domaine de validité qu'ils accordent à un modèle donné. Par exemple, les deux premiers tubes représentés dans la situation de la question Q16 ('couplage') ne seraient employés que pour illustrer la perte de charge linéaire dans une canalisation horizontale : une telle situation ne serait pas envisagée pour illustrer le domaine de validité du modèle retenu.

Ce qui serait éventuellement cohérent avec une formation qualifiée de T où la réflexion sur le modèle n'est pas très marquée l'est beaucoup moins pour une formation qualifiée de U ou de I. Certes, comme l'indique I5, faire douter les élèves d'une relation nouvelle à peine enseignée paraît peu adéquat (I5 : « *Et dans le même temps tu peux pas enseigner une loi et // Il faut leur donner confiance dans cette loi // Il faut en même temps signaler // En disant c'est quand même en mécanique des fluides où on est plus sur la tangente/* »).

Néanmoins, on ne peut que constater dans les réponses des enseignants interrogés qu'une telle démarche étant la seule retenue, elle finit par devenir la norme : une telle routine apparaît contestable et source d'obstacles en situation non prototypique.

On peut s'interroger sur le rapport au modèle pouvant être obtenu dans des formations où les enseignants n'abordent pas le domaine de validité du modèle ou l'abordent sans l'analyser : comment un étudiant pourrait-il être critique vis-à-vis d'un modèle donné si on ne l'habitue pas à étudier ses limites ? Comment parviendrait-il à coupler des approches de différentes disciplines si on ne perçoit pas les limites de chacune d'entre elles?

Lorsque l'enseignant a à choisir entre deux schémas évoquant une même situation (question Q17 'pertes de charge'), le questionnement spontané sur la validité de prolonger une droite modélisée est aussi peu présent chez beaucoup d'enseignants.

Ceux non perturbés peuvent avoir été déjà confrontés à ce questionnement, en travaux pratiques par exemple. Ainsi, ceux qui ne présentent pas de difficultés à la question Q17 ('pertes de charge') et qui se réfèrent à du visuel sont issus de la famille T (T3 et T6). Qu'ils ne présentent pas de difficultés pourrait s'expliquer par la pratique expérimentale de la mécanique des fluides dans les formations où ils exercent. T3 y fait explicitement référence en entretien. T6 fait cours et TP dans la même salle, où se trouvent des tuyaux avec des capteurs de pression identiques à ceux représentés sur le schéma. La salle de TP où exerce T3 contient elle aussi un dispositif analogue. Les enseignants qualifiés de physique qui ne sont pas déstabilisés par les deux schémas ont plutôt tendance à raisonner en termes de pertes de charge tandis que ceux se référant aux équations locales de la mécanique des fluides sont davantage perplexes face à ces situations.

Par exemple, I15 voit dans les schémas présentés une mise en valeur des pertes de charge singulières en entrée du tuyau horizontal. Il adapterait son choix à la situation. En fonction de la vitesse d'écoulement, il emploierait le schéma de gauche (faible changement de vitesse au niveau

du rétrécissement) ou celui de droite (changement de vitesse plus important). Le contexte est nécessaire pour choisir : « *So I guess in detail and not seeing that in context is caviar/* ».

Parmi les enseignants qualifiés de ‘physique’, trois groupes d’enseignants se dessinent en lien avec leur périmètre d’expertise sur modèles et modélisation :

Alors qu'on aurait pu attendre un recours au modèle de plus en plus complexe de la famille T à la famille U puis à la famille I, de par les attendus de formation des structures dans lesquelles exercent ces différentes familles, on a plutôt constaté une scission en trois ‘blocs’, vérifiée en particulier au sein de la famille I mais visible aussi chez les T, comme indiqué dans le tableau récapitulatif 7.5.2, construit en couplant les résultats obtenus aux différentes sous-catégories de PCK liées au modèle. N’ayant pas tous les éléments requis pour U2 et T6, ils n’ont pas été classés dans ce tableau.

Enseignants qualifiés de ‘physique’ Périmètre d’expertise sur modèles et modélisation				
<i>Famille</i>	<i>Non classé</i>	<i>Limité</i>	<i>Intermédiaire</i>	<i>Étendu</i>
<i>I CPGE</i>		I11	I7	I5 I9
<i>I USA</i>		I14	I15	I13 I20
<i>U</i>	<i>U2</i>		U5 U6	
<i>T</i>	<i>T6</i>	T1 T2		T3
<i>Total</i>	2	4	4	5

Tableau 7.5.2

Cas des enseignants qualifiés de physique :

3 groupes d’enseignants en lien avec leur périmètre d’expertise sur modèles et modélisation

Des enseignants sont orientés vers une démarche d’application à des situations limitées et maîtrisées, de résultats établis et dont le domaine de validité n’est pas interrogé (I11, I14, T1, T2). On pourrait parler de **groupe ‘modélisation peu valorisée’ pour ce périmètre d’expertise limité**.

D’autres enseignants présentent une démarche de raisonnement construite, pouvant être qualifiée de démarche de modélisation (I5, I9, I13, I20, T3). On pourrait parler de **groupe ‘modélisation valorisée’ pour ce périmètre d’expertise étendu**.

Entre ces deux groupes, figurent des enseignants présentant un état qu’on pourrait qualifier d’intermédiaire (I7, I15, U5, U6) : ils présentent des caractéristiques liées au modèle et à la modélisation oscillant entre celles des deux groupes définis précédemment. On pourrait parler de **groupe ‘modélisation intermédiaire’ pour ce périmètre d’expertise intermédiaire**.

Cette scission s'observe pour les différentes catégories de PCK étudiées : par exemple lors de l'évocation des difficultés de la situation d'un rétrécissement.

Ces difficultés sont jugées plutôt faibles ou limitées (difficultés 'mathématiques') par les membres des groupes 'modélisation intermédiaire' et 'modélisation peu valorisée', tandis que les membres du groupe 'modélisation valorisée' les jugent plutôt fortes (difficultés 'conceptuelles').

En lien avec les situations des questions Q15 ('rétrécissement') et Q16 ('couplage'), les membres des groupes 'modélisation peu valorisée' et 'modélisation intermédiaire' n'évoquent pas le domaine de validité du modèle (U6 et T6 d'une part, T1 et T2 d'autre part) ou l'évoquent sans l'analyser (I7, I15, U5 d'une part, I11 et I14 d'autre part), tandis que l'ensemble du groupe 'modélisation valorisée' l'analyse.

Les enseignants du groupe 'modélisation peu valorisée' évacuent la question Q17 'pertes de charge' (I14) ou raisonnent de manière incohérente avec le modèle qu'ils ont évoqué en entretien (I11, T1, T2).

Ceux du groupe intermédiaire ne présentent pas de difficultés (I15, U6, T6) ou si c'est le cas, ils tentent de raisonner de manière cohérente avec le modèle qu'ils ont évoqué en entretien (I7 et U5).

Il en va de même pour le groupe de 'modélisation valorisée' : I9, I13, T3 ne présentent pas de difficultés. I5 et I20 présentent des difficultés mais tentent de raisonner de manière cohérente avec le modèle qu'ils ont évoqué en entretien.

Dans le chapitre suivant, nous poursuivons cette enquête en nous intéressant aux contextes évoqués par les enseignants.

En effet, à travers les réponses recueillies, il semble que pour beaucoup d'enseignants, à un modèle n'est associé qu'un contexte et un type de questionnement donné. Par exemple, la notion d'écoulement parfait est associée à la situation du rétrécissement via la relation de Bernoulli et l'effet Venturi, tandis que la prise en compte de la viscosité est associée à la prise de mesure de pression dans une canalisation à section constante, via la notion de perte de charge.

Nous évoquons également le recours à l'expérimental retenu par les enseignants interrogés en termes de contextualisation.

Le recours à l'expérimental peut apparaître *a priori* comme une piste pour favoriser, chez les enseignants, une réflexion sur le modèle et son domaine de validité.

Par exemple, mener à bien une expérience sur le thème des schémas évoqués à la question Q17 ('pertes de charge') aboutirait pour l'enseignant à une confrontation au réel : obtenir un écoulement quasi-permanent, délimiter la zone dans laquelle la linéarité de la perte de charge est observée, évaluer l'influence des tailles des différents tuyaux, etc...

Nous abordons également la contextualisation pédagogique via le recours à l'histoire des sciences déclaré en entretien et le nombre de supports retenus par les enseignants interrogés.

Retrouvons-nous, en termes de contextualisation, les trois groupes constatés pour la modélisation ?

Chapitre 8 Résultats sur les contextes

Quel que soit l'objectif de formation visé en termes de modèle et de modélisation, nous souhaitons maintenant aborder la variété de contextes que les enseignants déclarent employer. Nous nous limitons ici à présenter un aperçu des contextualisations empiriques et pédagogiques retenues.

Qu'est-ce que les enseignants prennent de la réalité pour mener une telle démarche ? Avec quels moyens s'y réfèrent-ils ?

Les retours d'enseignants étudiés au chapitre précédent interrogent sur les attendus d'un recours à des travaux pratiques (TP) en premier cycle universitaire : s'agit-il par exemple de construire un savoir-faire expérimental, auquel cas cet enseignement expérimental n'est pas nécessaire à l'apprentissage du cours à ce niveau et peut n'être fourni que plus tardivement dans le cursus universitaire ? Ou cet enseignement expérimental participe-t-il de l'assimilation par l'élève de ce que constituent un modèle et la démarche de modélisation ?

La contextualisation pédagogique est abordée afin de constater la variété de supports indiqués par l'enseignant dans ses séquences d'enseignement. Nous nous intéressons également à un éventuel recours à l'histoire des sciences.

Dans ce chapitre, après avoir évoqué la grille d'analyse retenue, nous abordons de manière successive les mondes de référence et les objets et phénomènes évoqués par les enseignants interrogés, leur recours à l'expérimental et à l'histoire des sciences ainsi que les supports de contextualisation pédagogique que les enseignants interrogés déclarent employer.

8.1 Grille d'analyse relative aux contextes

Nous proposons une analyse *a priori* des contextes susceptibles d'être mobilisés par les enseignants interrogés puis nous présentons les éléments de la grille d'analyse associés aux contextes que nous avons dégagés et retenus *a posteriori*.

8.1.1 Contextes empiriques et pédagogiques : analyse *a priori*

D'un point de vue historique, la mécanique des fluides apparaît comme un des domaines de la physique où la scission entre deux visions, l'une académique et l'autre pratique, a été très profonde et très étalée dans le temps. D'un côté se développe, tout au long du siècle des Lumières, la construction de l'outil que constituent les équations différentielles et la décomposition en volumes élémentaires. De l'autre, les ingénieurs et artisans de la marine tentent de répondre de manière empirique aux enjeux du commerce maritime (posséder les navires les

plus rapides). A cela s'ajoute la problématique de l'accès à l'eau, notamment pour la construction de fontaines dans les jardins de palais partout en Europe (Versailles, Sans-Souci, Venaria Reale près de Turin). Les interactions entre académiciens d'une part et praticiens d'autre part sont faibles et n'aboutissent pas. Ce fossé se traduit même dans la dénomination donnée au domaine d'étude de l'écoulement d'un fluide : les académiciens traiteront d'hydrodynamique quand les artisans et ingénieurs traiteront, eux, d'hydraulique. La compréhension de l'écoulement d'un fluide n'est pas maîtrisée. 150 ans s'écoulent avant qu'un pont réussisse à être établi entre ces deux approches avec Navier et Stokes, modélisant les forces de viscosité, comment nous l'avons vu dans la première partie de ce manuscrit (cf chapitre 5).

Mettre en perspective ce fossé permet de rappeler à l'étudiant l'importance des échanges entre les deux aspects théorique et expérimental, qui sont nécessaires à une interprétation satisfaisante d'un problème donné (Bachelard, 1973).

D'un point de vue expérimental, la mécanique des fluides permet d'approcher ces interactions via des situations faciles à réaliser, comme par exemple un tube présentant un rétrécissement avec des prises de pression en amont et en aval du rétrécissement, réservoir qu'on vidange, etc... La réalisation pratique de l'expérience est simple et rapide, gérable en amphithéâtre dès lors qu'il y a un accès à de l'eau et d'un coût modique. Il n'y a pas *a priori* de contraintes matérielles fortes liées à la situation évoquée.

Ces expériences simples permettent une confrontation directe entre le modèle présenté dans le cours et la réalité : prévisions possibles à l'aide du modèle, travail sur le domaine de validité du modèle qui peut conduire à modifier le modèle initial afin d'approfondir l'analyse de la situation observée. Se met ainsi en place devant l'élève une illustration du dialogue à construire entre modèle et réalité.

L'emploi de vidéo permet d'engager une séquence d'enseignement via des situations pouvant déclencher un intérêt de l'élève, soit par une proximité avec leur quotidien, soit par leur aspect ludique : jet d'eau de Genève ou flyboard par exemple.

L'enjeu est alors de dépasser l'aspect ludique de la situation envisagée afin d'exploiter pleinement la situation : quelle est la légitimité du modèle pour décrire la situation donnée ? Quelle force prédictive ce modèle a-t-il ? Posant par exemple la question de la hauteur d'un jet d'eau ou de sa vitesse en un point donné, la construction du modèle permet d'estimer ces paramètres. Il peut s'agir d'atteindre l'évaluation chiffrée de ces paramètres et de la comparer aux données techniques fournies. Une discussion peut suivre alors sur la concordance de ces valeurs. L'ordre de grandeur est-il correct ? Suffisant ? Comment améliorer l'estimation ? Que conclure sur le domaine de validité du modèle proposé ? Ces allers-retours entre prévisions du modèle et résultats expérimentaux agrémentent et même structurent la ou les séquences d'enseignement.

Contextualiser la situation d'enseignement peut donner du sens et de l'intérêt à la situation proposée. S'interroger sur l'écoulement de chocolat liquide au sein d'une usine de fabrication du biscuit préféré des étudiants augmente la portée du cours abordé et permet de cerner le domaine de validité du modèle proposé. Réfléchir au domaine d'emprunt de l'exemple choisi permet d'élargir pour l'étudiant sa vision du domaine étudié. Il peut s'agir de se demander comment fournir de l'eau au dernier étage d'une tour donnée, d'interroger l'étudiant sur le système d'alimentation en eau potable de la ville où il habite, quel débit imposer au sein d'un système de refroidissement d'un ordinateur ou d'aborder le problème du rétrécissement d'un canal sanguin, problème qui peut toucher un membre de sa famille, etc... C'est l'occasion pour l'étudiant

d'apercevoir en quoi ce cours lui fournit des outils pour porter un regard construit et scientifique sur le monde qui l'entoure. L'étude de l'écoulement des fluides présente cet avantage d'être présent dans des secteurs très variés : quel que soit le profil et les goûts de l'étudiant, une situation peut lui être proposée en lien avec un fluide.

Nous nous attendons *a priori* à ce que les enseignants proposent une variété de contextes pour étudier un fluide en écoulement et ce, quelle que soit la filière dans laquelle exercent les enseignants interrogés. C'est un domaine qui s'y prête, comme nous venons de le rappeler.

Les enseignants des familles I et U devraient proposer une palette de contextes plus diversifiée que les T et les MB, afin de répondre notamment aux demandes de transversalité des programmes des filières dans lesquelles ils enseignent.

On s'attend à ce que les enseignants de la famille T privilégient des contextes orientés vers le secteur industriel vers lequel la formation dans laquelle ils enseignent est tournée et que ceux de la famille MB restent centrés sur des contextes liés à l'écoulement sanguin.

Concernant l'utilisation de ces contextes, on s'attend à ce que les enseignants des familles I et U soient ceux leur associant une visée élevée, ayant davantage que leurs collègues à faire travailler la notion de modélisation.

8.1.2 Présentation de la grille

L'objectif est de balayer à grain large les contextes retenus, leur utilisation et les justifications associées proposées par les enseignants interrogés. Les catégories de PCK retenues dans cette étude exploratoire relèvent donc de dimensions variées (*Personal PCK Representations & Strategies* et *Amplifiers & Filters*). Présentons les sous-catégories associées à ces différentes catégories que nous avons retenues dans cette étude.

Concernant la catégorie de PCK 'Objets et phénomènes', on s'intéresse aux **sous-catégories 'Mondes de référence' et 'Objets et phénomènes mentionnés'**. Il s'agit d'étudier ce que l'enseignant prend de la réalité pour contextualiser son enseignement.

Concernant la catégorie de PCK 'Recours à l'expérimental', deux sous-catégories sont étudiées : la visée déclarée par l'enseignant d'un recours à l'expérimental dans une séquence d'enseignement (**sous-catégorie 'Visée'**) ainsi que la présence éventuelle de Travaux Pratiques (notés TP) associés au module qu'il enseigne (**sous-catégorie 'TP'**).

Cette dernière donnée permet de documenter la place qu'occupe le recours à l'expérimental dans les pratiques déclarées des enseignants. Si on se limitait à interroger les enseignants sur tout type de recours à de l'expérimental (TP, manipulations de cours, évocation d'une expérience sous forme documentaire), il apparaîtrait délicat de réussir à distinguer les enseignants ayant un recours important à l'expérimental de ceux en ayant un recours plus occasionnel. Mettre en œuvre un TP nécessitant du temps et des efforts, cette donnée nous est apparue plus pertinente pour notre étude. Elle permet également de nous renseigner sur la place donnée à l'élève par l'enseignant pour mener à bien sa formation.

En lien avec la catégorie 'Recours à l'histoire des sciences', signalons que des enquêtes déjà menées ont montré une faible utilisation de l'histoire des sciences par les enseignants dans d'autres domaines de la physique. Nous avons supposé qu'il en serait de même en mécanique des fluides. De plus, utiliser un recours à l'histoire des sciences afin de proposer un contexte original

pour favoriser une démarche de modélisation nécessite deux préalables : un minimum de connaissances historiques dans le domaine considéré et une visée suffisamment riche associée à un tel recours. Cette étude étant exploratoire, il nous a semblé adapté de nous limiter à l'étude de ces deux aspects (**sous-catégories 'Visée' et 'Connaissances introduites'**).

Concernant la catégorie 'Supports', on se limite à évaluer le nombre de formes de contextualisation pédagogique retenues parmi vidéo, simulation numérique et manipulation expérimentale (manipulations de cours de cours et / ou TP), sans chercher à distinguer chacune de ces formes. Nous nous limitons donc à une sous-catégorie, nommée '**Nombre**'. Cette sous-catégorie permet d'estimer la variété de supports retenus par l'enseignant interrogé pour contextualiser son enseignement.

Dans le chapitre 6 sur la méthodologie, les tableaux proposés résumant la grille d'analyse étaient décontextualisés.

Comme pour le chapitre 7, nous y ajoutons deux colonnes, l'une décontextualisée, contenant les différentes sous-catégories associées à chaque catégorie que nous avons retenues, l'autre contenant, pour chaque sous-catégorie, les « Types de réponse » retenues pour la mécanique des fluides (tableaux 8.1.2. A et 8.1.2. B).

Les type de réponses ont été construits à partir d'une analyse *a priori* des types de réponses attendues mais aussi à partir des réponses obtenues dans la population interrogée.

Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Types de réponse	Questions du questionnaire de l'enquête	
					Numéro de la question	Justification demandée
Personal PCK Representations & Strategies	Contextes empiriques	Objets et phénomènes	Mondes de référence	Que scolaire	Q12 / Q13 / Q14	•
				+ quotidien		
				+ actualités		
				+ recherche		
		Objets et phénomènes mentionnés	Tuyauterie du quotidien	Q12 / Q13 / Q14		
			Capteurs industriels			
			Objet en mouvement			
			Corps humain			
	Recours à l'expérimental	Visée	Inutile	Q12 / Q13 / Q14	•	
			Familiarisation pratique			
			Elaboration théorique			
			Investigation empirique			
	TP		Absence sans manque	Q12 / Q14	•	
Absence et manque						
TP associés optionnels						
TP associés obligatoires						
Contextes pédagogiques	Recours à l'histoire des sciences	Visée	Absente ou jugée inutile	Q11	•	
			Annexe			
			Ludique ou illustrative			
			Compréhensive			
	Connaissances introduites		Faibles	Q11		
			Limitées			
			Spécifiques			
Supports	Nombre	Aucun	Q12 / Q13 / Q14			
		Un				
		Deux				
		Trois				

Tableau 8.1.2. A
Grille d'analyse des contextes

Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Type de réponse	Questions du questionnaire de l'enquête
					Numéro de la question
Amplifiers & Filters	Contextes d'enseignement	Social	Local	Logistique	Justification aux questions Q11 / Q12 / Q13 / Q14
			Institutionnel	Programme	
		Instrumental			
	Orientations	NOS			Justification aux questions Q11 / Q12 / Q13 / Q14
		Elèves	Affectif		
			Cognitif	Mémoriser/raisonner	
Enseigner					

Tableau 8.1.2. B
Grille d'analyse des contextes : cas des Amplifiers & Filters

Au chapitre précédent sur les modèles, nous avons détaillé de manière disjointe les réponses des enseignants qualifiés de physique de ceux qualifiés de biomédical, les attendus en termes de modèles étant très différents entre ces deux groupes d'enseignants.

Les écarts d'attendus étant moins prononcés en termes de contextes, nous ne séparons pas dans ce chapitre les réponses de ces deux groupes d'enseignants.

8.2 Contextes empiriques : objets et phénomènes proposés par les enseignants interrogés

Nous abordons ici deux sous-catégories associées à la catégorie 'Objets et phénomènes' : les mondes de référence mentionnés par les enseignants interrogés (sous-catégorie 'Mondes') ainsi que les objets et phénomènes (sous-catégorie 'Objets et phénomènes mentionnés').

Nous évoquons également les justifications associées à la variété d'objets et de phénomènes retenus par les enseignants interrogés.

8.2.1 Mondes de référence retenus

Types de réponse en lien avec les mondes de référence retenus

Concernant les mondes de référence retenus par les enseignants interrogés, il s'agit ici d'étudier ce que l'enseignant prend de la réalité pour contextualiser son enseignement.

L'enseignant peut se limiter aux cas prototypiques liés à la situation étudiée (type de réponse noté 'que cas classiques'). On entend par cas 'classiques' ceux qui sont proposés traditionnellement dans les manuels d'une formation donnée et qui sont parfois décontextualisés : les situations des questions Q15 'rétrécissement' et Q16 'couplage' en sont des exemples (il s'agirait d'une situation introduite sous la forme : 'soit une canalisation avec rétrécissement' etc.).

L'enseignant peut ajouter aux cas 'classiques' d'éventuelles références au quotidien (cas d'un robinet d'eau dans une cuisine par exemple) et au quotidien uniquement (type de réponse noté '+ évocation quotidien').

Aux cas 'classiques' et à ceux associés au quotidien de l'élève, l'enseignant peut ajouter des références liées à l'actualité, par exemple des faits divers en lien avec la mécanique des fluides qui sont commentés comme celui relaté dans l'article de presse régionale fourni en annexe (cf Annexe C.2.). Le type de réponse associé est alors noté '+ évocation actualités'.

Enfin, aux cas 'classiques' et à ceux associés au quotidien de l'élève l'enseignant peut ajouter des références en lien avec la recherche (type de réponse noté '+ évocation recherche').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse :

Nature de la contextualisation empirique : Que cas 'classiques'

« une distribution d'eau / il faut trouver les points // On change les noms // Au lieu de 1 / 2 ou A / B / on a C / D / Juste pour voir s'ils arrivent à // Les côtes sont données // Et après on fait les applications numériques // Mais ça a pas vocation à être vrai puisqu'à ce stade on parle pas de tous les problèmes d'écoulements / de pertes // » (T2)

Nature de la contextualisation empirique : Cas 'classiques' + Evocation du quotidien

« des photographies mentales d'un écoulement observé à la maison par exemple » (I7)

« I try to pick up everyday examples » (MB7)

Nature de la contextualisation empirique : Cas 'classiques' + Evocation actualités

« Par exemple il est clair que pour repenser à la médecine comme maintenant il y a l'effet Doppler qui a été introduit dans le programme je leur parlerai des échographies Doppler parce qu'en plus pour les futurs parents qu'ils sont aussi c'est magnifique de voir le cœur du bébé avec les ventricules et le mouvement du sang alors qu'on perturbe même pas bébé » (I9)

« using examples like when we used the Japanese tsunami on March 2011 » (I15)

Nature de la contextualisation empirique : Cas 'classiques' + Evocation recherche

« First every week or every month / BBC News / The current research out there / Hey / We just generated this organ » (MB8)

« Just this past Monday, for example, I scanned and discussed the attached pages from the most recent AIAA Magazine [The American Institute of Aeronautics and Astronautics] I pointed out the articles where the student noticed winglets on helicopter blades and wondered what they were there for » (I13)

Répartition des enseignants en lien avec les mondes de référence retenus

Concernant la nature de la contextualisation empirique, la répartition des enseignants interrogés est indiquée dans le tableau 8.2.1.

Au sein de l'échantillon analysé, nous n'avons pas constaté de combinaisons de mondes de références autres que celles indiquées dans ce tableau.

Mondes de référence retenus					
<i>Famille</i>	<i>Non abordé</i>	Que cas 'classiques'...	... + Evocation quotidien...	... + Evocation actualités...	... + Evocation recherche...
<i>I CPGE</i>			I7 I11	I9	I5
<i>I USA</i>			I20	I14 I15	I13
<i>U</i>			U2	U6	U5
<i>T</i>	<i>T6</i>	T1 T2		T3	
<i>MB</i>	<i>MB6</i>	MB2 MB4 MB5	MB3 MB7	MB9	MB8
<i>Total</i>	2	5	6	6	4

Tableau 8.2.1
Mondes de référence retenus

On y constate que les sous-familles I CPGE et I USA ainsi que la famille U ne se limitent pas aux cas 'classiques'. Elles présentent toutes les trois une répartition des réponses homogènes sur les trois autres types de réponse.

Au sein de la sous-famille I CPGE, par exemple, les réponses sont variées en termes de nature de la contextualisation empirique retenue : I7 et I11 ne se réfèrent qu'à des exemples du quotidien, mais pas à la recherche ou à l'actualité, contrairement à I5 ou I9.

La sous-famille I CPGE utilise la contextualisation pour introduire la situation d'enseignement (I7 parle de « *teaser* » et I9 de « *teasing* ») et ce, via une référence au quotidien.

La famille T aurait plutôt tendance à se limiter aux cas 'classiques'.

Les réponses de la famille MB sont réparties sur tous les types de réponse.

On constate par ailleurs que chaque enseignant n'apparaît qu'une fois dans ce tableau : aucun ne fait appel à trois types de mondes et couple par exemple la présentation de cas classiques avec l'évocation du monde quotidien et de la recherche.

8.2.2 Objets et phénomènes mentionnés

Aux mondes retenus par les enseignants interrogés nous ajoutons un récapitulatif des types d'objets et de phénomènes qu'ils mentionnent en entretien.

Types d'objets et phénomènes mentionnés

Nous avons retenu la tuyauterie du quotidien (robinet, alimentation en eau de la maison...), les capteurs industriels (tube de Pitot, débit-mètre...), les objets en mouvement dans un fluide (aile d'avion, objet placé dans une soufflerie...). Peuvent également être évoqués le corps humain (sang, poumons, lymphe...), un cours d'eau (une rivière, le fleuve Colorado...) ou des références à la nature autre que celle qualifiée de cours d'eau (par exemple une tornade, un tsunami, un glacier...).

Répartition des enseignants en lien avec les objets et phénomènes mentionnés

Les objets et phénomènes mentionnés par les enseignants sont variés, comme on peut l'observer dans le tableau 8.2.2.

Objets et phénomènes mentionnés							
<i>Famille</i>	<i>Enseignant</i>	Tuyauterie du quotidien*	Capteurs industriels**	Objet en mouvement***	Corps humain****	Cours d'eau	Nature*****
<i>I CPGE</i>	I5 I7 I9 I11	• • •	•	• •	• • •	• • •	•
<i>I USA</i>	I13 I14 I15 I20	• • • •	• • •	• •	•	•	• •
<i>U</i>	U2 U5 U6	• •	•		• •		
<i>T</i>	T1 T2 T3 T6	• • •	• • •	• • •	•	•	•
<i>Total physique</i>		12	8	7	7	5	4
<i>MB</i>	MB2 MB3 MB4 MB5 MB6 MB7 MB8 MB9			• • • •	• • • • • • •		• •
<i>Total MB</i>		0	0	4	8	0	2

Tableau 8.2.2
Types d'objets et phénomènes mentionnés

Tuyauterie du quotidien* : robinet, alimentation en eau de la maison...

Objet en mouvement ** : objet en mouvement dans un fluide du type aile d'avion, balle...

Corps humain*** : sang, poumons...

Nature**** : autre que rivière (par exemple tornade, tsunami, glacier...).

Capteurs industriels***** : tube de Pitot, débit-mètre, autres capteurs...

Le nombre d'objets et phénomènes mentionnés par les enseignants varie de 1 à 5, la réponse la plus fréquente étant 3.

Pour les enseignants qualifiés de physique, il s'agit principalement de la tuyauterie du quotidien, de capteurs industriels et d'objets en mouvement dans un fluide. Le sang est également souvent évoqué.

Les exemples industriels sont peu présents dans le discours de la sous-famille I CPGE alors que dans la sous-famille I USA, sont davantage cités des exemples industriels et moins ceux en lien avec le sang ou une rivière.

Les membres de la famille U se réfèrent à moins d'objets que ceux des familles I ou T. Il s'agit principalement de la tuyauterie du quotidien et du corps humain.

Tous les membres de la famille MB évoquent le sang dans le corps humain et la moitié d'entre eux se réfère à de la tuyauterie du quotidien.

Signalons une contradiction apparue dans le discours de MB4. Concernant l'étude de l'écoulement sanguin, MB4 indique : « *je prends une comparaison et avec je sais pas quoi / les voitures sur l'autoroute /* ». Il ne signale pas en entretien que cette analogie peut être gênante pour étudier l'écoulement d'un fluide. En effet, sur une autoroute, un rétrécissement de la chaussée provoque un ralentissement des voitures, tandis que dans un tuyau, un rétrécissement provoque au contraire une accélération du fluide.

8.2.3 Justifications avancées par les enseignants

Types de justifications avancées par les enseignants en lien avec la variété d'objets et de phénomènes

Nous proposons d'analyser les justifications en lien avec les contextes sociaux (local et institutionnel) et les orientations des enseignants interrogés.

L'enseignant peut ne pas argumenter ses choix en termes de contextualisation empirique (type de réponse noté 'Aucune').

L'enseignant peut se référer à des critères locaux liés à de la logistique, aux conditions matérielles d'enseignement : locaux à disposition, disponibilité d'un accès wifi, taille de l'effectif étudiant, etc... (type de réponse noté 'Local (logistique)'). Le programme du cursus dans lequel l'enseignant exerce peut aussi être évoqué pour justifier ses choix (type de réponse noté 'Institutionnel (programme)').

Les orientations de l'enseignant peuvent être catégorisées.

L'enseignant peut se référer à lui-même (et non à l'élève) pour justifier ses choix (type de réponse noté 'Enseigner').

Il peut également évoquer des raisons pédagogiques où il fait référence aux élèves.

Deux aspects sont considérés ici, selon que l'enseignant se réfère, par exemple à ce qui leur plaît ou non (type de réponse noté 'Apprendre (affectif)') ou selon qu'il évoque l'impact éventuel de

cette variété d'objets et de phénomènes sur l'apprentissage (type de réponse noté 'Apprendre (cognitif)').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse :

Type de justification : 'Aucune'

« Une grandeur abstraite / si je dois l'introduire ben tant pis / (...) Attendez ça va arriver » (I11)

Type de justification : Contexte social 'Local (logistique)'

Concernant l'emploi de vidéos en amphi, MB5 répond : *« ah non / à 200 je peux pas et puis ce n'est pas le lieu / Et en TD c'est plutôt des exercices qu'on fait ensemble mais je ne vais pas leur ramener une petite branche / une grosse branche / ».*

Et d'ajouter d'elle-même : *« Je pourrais mais non // Je pourrais / c'est vrai / ça pourrait être une idée / »*

Type de justification : Contexte social 'Institutionnel (programme)'

« Moi ce que j'ai retenu des nouveaux esprits des // du nouvel esprit des programmes c'est qu'il faut // il faut d'abord se rapprocher de situations réelles / » (I9)

« j'ai retiré / J'ai élagué dans le cours / Dans la première année on a tendance à en mettre trop / Je me suis reconcentré sur les objectifs scolaires du programme / » (T2)

Type de justification : Orientation 'Enseigner'

« Alors euh y a un truc que j'utilise pas [les simulations] mais parce que je suis d'une génération // Moi je suis vieux / » (I5)

U5 juge certains systèmes plus intéressants que d'autres, le plus intéressant étant le système cardiovasculaire et de préciser : *« at least maybe because it's my research area ! » (U5)*

« Pour la mécanique des fluides je vois pas comment je pourrais mettre des photos mais sur le reste oui c'est sûr / Des radios / des photos de patients » (MB5)

Type de justification : Orientation 'Apprendre (affectif)'

I5 justifie le fait de ne pas réaliser de manip de cours pour introduire ses séances de par le très bon niveau de ses étudiants, qui n'ont pas besoin qu'on les motive : *« Ils sont motivés naturellement / » (I5)*

*« they like this stuff [videos] (...) they're engaged » (I15)
« I find students don't respond very well to video / They love demos in class but I was surprised / Videos are not that helpful or useful » (I20)*

« [Les vidéos] Ah ben ils adorent // Déjà ils regardent la télé » (T1)

Type de justification : Orientation 'Apprendre (cognitif) '

« y a un côté ludique qui ne correspond pas à ma démarche de cours » (I5)

« si on peut leur montrer que leur savoir est vivant et utilisable et utilisé c'est loin d'être une mauvaise chose » (I7)

« I try to put things in context so they see the big picture you know / One thing in different situations/ It's the hardest thing / » (I20)

Répartition des enseignants en lien avec les justifications avancées par les enseignants concernant les objets et phénomènes

La répartition des enseignants en lien avec les justifications avancées concernant la variété d'objets et de phénomènes est indiquée dans le tableau 8.2.3.1.

Justifications en lien avec la variété d'objets et de phénomènes							
Famille	Non abordé	Aucune	Contexte social		Orientations		
			Local (logistique)	Institutionnel (programme)	Enseigner	Apprendre (affectif)	Apprendre (cognitif)
<i>I CPGE</i>		I11		I9	I5 I7	I5	I5 I9
<i>I USA</i>			I14			I14 I15 I20	I13 I14 I15 I20
<i>U</i>					U5		U2 U5 U6
<i>T</i>	T6			T2 T3	T1 T2	T1 T2 T3	
<i>MB</i>	MB2 MB3		MB5		MB5	MB4 MB6 MB7	MB8 MB9
<i>Total</i>	3	1	2	3	6	10	11

Tableau 8.2.3.1
Justifications en lien avec la variété d'objets et de phénomènes

On lit dans ce tableau que les réponses de la sous-famille I CPGE liées à leurs justifications proposées en lien avec la variété d'objets et de phénomènes retenus sont contrastées : peu ou pas justifiées pour certains (I7, I11), très argumentées pour d'autres (I5 et I9).

La sous-famille I USA justifie ses choix d'objets et de phénomènes par des raisons pédagogiques. On note également un souci d'intéresser les étudiants (I14, I15, I20) plus marqué que chez les enseignants de la sous-famille I CPGE.

La famille U justifie ses choix d'objets et de phénomènes par des raisons principalement pédagogiques, liées à l'apprentissage.

Les raisons évoquées par la famille T sont variées : centrées sur l'enseignant, liées au programme ou pédagogiques.

Les justifications données par la famille T ne relèvent que d'une catégorie : la composante affective de l'orientation centrée sur les élèves. Il s'agit d'intéresser les élèves.

L'apport en termes d'apprentissage n'est pas évoqué par cette famille.

Les raisons évoquées par la famille MB sont elles aussi variées. Elles peuvent être liées au contexte local (logistique) ou relever d'orientations centrées sur l'enseignant ou sur les élèves.

Parmi les raisons pédagogiques centrées sur les élèves, figurent à la fois une référence au goût des élèves et à leur apprentissage.

Nous présentons de manière détaillée des réponses d'enseignants, par famille et sous-famille, dans le tableau 8.2.3.2.

Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Au sein de la sous-famille I CPGE,

La démarche suivie par I9 est explicitée : « *Pouvoir sans arrêt faire ce lien entre des situations réelles et existantes et // euh et la théorie / Voilà /* ».

I9 indique appliquer ainsi l'approche retenue dans sa filière d'enseignement : il est le seul membre de la sous-famille I CPGE à s'y référer.

I9 évoque des écoulements dans différentes canalisations, qu'il est possible de classer à l'aide du nombre de Reynolds. **Variation des contextes permet de montrer la généralité des résultats énoncés** : « *Ce qui est clair c'est qu'en classant / en faisant des tracés par rapport au nombre de Reynolds on arrive à avoir des comportements reproductibles pour différents types de canalisation /* ».

I9 indique une variété de contextes (écoulements d'eau et d'air, applications qualifiées de industrielles et du quotidien) qu'il exploite au maximum de ce que le programme lui permet. Via l'étude des pertes de charge, c'est l'occasion pour lui de dépasser le modèle associé à la relation de Bernoulli : la confrontation entre expérience et théorie est recherchée et exploitée (« *Par exemple, concernant la relation de Bernoulli, pouvoir justement aller au-delà et dépasser ça et avoir des modèles certes semi-empiriques mais qui fonctionnent bien et qui donnent vraiment la perte de charge de ce qu'on peut avoir ça peut être pas mal /* »).

I9 indique être ouvert à tout type de contextualisation : « *De toute façon toutes les applications sont bonnes à prendre / Absolument toutes les applications sont bonnes à prendre qu'elles soient dans la médecine ou autre chose /* ».

I9 défend cette ouverture et l'associe à une **finalité sociale de l'enseignement** : « *former les*

futurs membres de la société, générer des vocations, valoriser le savoir : Au contraire si on peut leur montrer que leur savoir est vivant et utilisable et utilisé c'est loin d'être une mauvaise chose / Par exemple il est clair que pour repenser à la médecine comme maintenant il y a l'effet Doppler qui a été introduit dans le programme je leur parlerai des échographies Doppler parce qu'en plus pour les futurs parents qu'il sont aussi c'est magnifique de voir le cœur du bébé avec les ventricules et le mouvement du sang alors qu'on perturbe même pas bébé / De voir ça et rien que ça c'est déjà joli et en plus c'est un instrument de mesure concret et qui permet de diagnostiquer des malformations donc c'est d'une importance capitale / De toute façon tout ce qui est instrument de mesure en médecine c'est de la physique et c'est magnifique ce qu'on fait aujourd'hui / C'est magnifique et tout ça avec des connaissances il les auront Enfin de premier cycle / Et ça / ça normalement ça devrait susciter des vocations / Enfin j'espère / ».

Au sein de la sous-famille I USA,

I15 indique que par le passé, il évoquait des barrages, notamment celui ayant cédé en France dans les années 1970, via des images. Depuis, il **se réfère au quotidien des élèves afin de les intéresser davantage** et de dynamiser la situation d'enseignement. Lorsqu'il s'agit de contextes plus techniques comme une soufflerie, l'élément qui y est placé n'est pas traditionnel : par exemple, un fossile de dinosaure (I15) ou un Frisbee (I20).

I5 s'appuie sur des vidéos souvent suggérées par les étudiants eux-mêmes. Il indique que les retours des élèves sont bons.

De plus, I15 cherche à connecter les élèves au « *natural world* ». Il cherche à montrer des comportements réels issus de la nature, en lien avec « *some mysterious phenomenon of fluid mechanics* ».

Pour choisir les contextes empiriques, **I14** indique qu'à titre personnel, de par son domaine de recherche, il est intéressé par la combustion mais il **cherche des contextes en accord avec le profil de ses élèves**. Par exemple, n'ayant pas d'élèves de bio-ingénierie, il n'évoquerait pas *a priori* le cas des capillaires en situation d'enseignement. Il exploite l'actualité en début de séance, en présentant « *the science picture of the day* » afin de tenter d'intéresser les élèves.

Le but de la contextualisation proposée par I13 est de partir de considérations physiques avant de réfléchir en termes mathématiques. I13 essaie de réexploiter un même contexte empirique d'un chapitre à l'autre du cours afin de créer des connexions.

I20 précise la ligne directrice de son cours : construire une vision d'ensemble et montrer qu'un même modèle est exploitable dans différents contextes (« *I try to put things in context so they see the big picture you know / One thing in different situations / It's the hardest thing /* »).

Au sein de la famille U,

U5 indique préférer étudier un domaine en profondeur plutôt que tous de manière superficielle. Il présente le système cardiovasculaire et souhaite mettre en avant l'importance de la mécanique des fluides pour comprendre le fonctionnement de ce système (« *the different cells respond differently* »).

from the different flows and to get them understand that / »).

U5 juge certains systèmes du corps humain plus intéressants que d'autres, le plus intéressant étant le système cardiovasculaire. Sur ce point, la justification proposée est liée à son propre vécu de chercheur : le système cardiovasculaire est son domaine de recherche.

Via différentes contextualisations, il s'agit pour U6 « *to think about real problems* ».

De plus, à travers l'analyse en cours d'articles du *New-York Times*, U6 cherche à stimuler ses élèves (« *to give them ideas of applications* »).

Au sein de la famille T,

Si initialement, en plus d'exemples industriels, T2 abordait également des applications liées à **l'agriculture** (il est fils d'agriculteur), il a arrêté. **Ce domaine lui est apparu trop éloigné du vécu de ses élèves.** Depuis, il s'est recentré sur les contextes du programme et se réfère à l'habitat et à la distribution d'eau mais précise : « *ça construit pas un savoir complet /* ».

Contrairement à T1, T3 estime que « *partir du quotidien pour cette tranche d'âge-là n'est pas justifié* ». T3 indique préférer partir d'une nécessité industrielle ou évoquer par exemple le décollement d'un toit lors d'une tempête.

Au sein de la famille MB,

MB4 évoque des cas cliniques pour intéresser les élèves, « *les accrocher sur quelque chose de clinique* ». L'importance de l'aspect visuel en termes d'apprentissage est mise en avant par MB5, MB6, MB8 et MB9. MB5 suggère comme conseils à un jeune enseignant : « *euh // des schémas parce que mine de rien c'est ça qu'on retient / Moi je suis très visuelle* ». MB8 évoque des « *visual learners* » parmi ses étudiants. A propos d'un graphique sur la pression sanguine, MB9 indique: « *because they can see pressure falling from the beginning / They can see in their mind what's going on (...) going from the heart to the heart* ».

Signalons que concernant l'emploi de vidéos en amphi, la réponse de MB5 s'effectue en deux temps : après avoir annoncé une impossibilité à recourir à un support en séquence d'enseignement, finalement elle se ravise.

Tableau 8.2.3.2

Justifications en lien avec la variété de formes de contextualisation

Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Conclusion sur la catégorie 'objets et phénomènes'

Toutes familles confondues, peu de références à la recherche sont proposées.

L'actualité et la physique du quotidien (robinet d'eau par exemple) sont les principaux mondes cités dans les familles I et U.

La famille T se limite essentiellement aux cas 'classiques' associés au cours à enseigner et dans la famille MB, la répartition entre ces différents mondes est plus homogène.

Les objets et phénomènes proposés se distinguent nettement d'une famille à l'autre : essentiellement techniques et industrielles pour la famille T, quasi limitée au corps humain pour la famille MB.

La famille U se limite à des objets liés au module qu'ils enseignent, ce que l'on retrouve en partie dans la sous-famille I USA et moins dans la sous-famille I CPGE, qui a tendance à peu évoquer des exemples industriels.

Au sein de la population étudiée, on constate deux types de stratégie en tension : l'une consiste à se limiter à un faible nombre de situations (cas des familles U et MB qui n'évoquent dans leur ensemble que 3 types d'objets et phénomènes), l'autre consiste à mener une étude 'en extension' sur un ensemble de situations (cas des familles I et T qui évoquent dans leur ensemble 6 types d'objets et phénomènes).

Les réponses sont argumentées dans chacune des familles mais les arguments retenus diffèrent d'une famille à l'autre. Par exemple, faire varier les formes de contextualisation est indiqué comme étant un atout en termes cognitif pour l'élève par tous les membres de la sous-famille I USA et de la famille U, ce que l'on n'observe chez aucun membre de la famille T.

8.3 Contextes empiriques : recours à un contexte expérimental

Nous abordons ici deux sous-catégories associées au recours à un contexte expérimental : la visée (sous-catégorie 'Visée') et la présence (ou non) de Travaux Pratiques (TP) dans les modules dans lesquels interviennent les enseignants interrogés (sous-catégorie 'TP').

Nous évoquons également les justifications associées à la visée et à un recours à un contexte expérimental.

8.3.1 Visée d'un recours à l'expérimental

Types de réponse en lien avec la visée d'un recours à l'expérimental

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse :
Visée associée à l'expérimental : 'Refus'

« [Concernant la situation présentée à la question Q17 :] je l'ai jamais fait en TP parce que en fait en TP ça marche pas / C'est pas parfait / Parce que normalement si ça redevient grand tu devrais retrouver la même hauteur et en fait dans la réalité ça marche jamais / Donc euh // j'ai dû le faire à l'agreg mais pas depuis » (I11)

Visée associée à l'expérimental : 'Familiarisation pratique'

Rappelons que dans le cas de la familiarisation pratique, il s'agit que « *l'élève expérimente « pour voir », il explore et contrôle peu à peu ses actions : il apprend à maîtriser des pratiques »* (Coquidé, 1998, p.113).

« *Just seeing applications of the variable things »* (I14)

« *C'est juste une illustration de la perte de charge dans le tuyau »* (T2)

« *hands-on approach »* (MB7)

Visée associée à l'expérimental : 'Elaboration théorique'

Dans le cas de l'élaboration théorique, rappelons que « *l'expérimental est mis au service de l'appropriation conceptuelle et modélisante »* (Coquidé, 1998, p.114), il s'agit « *d'expériences pour démontrer, conceptualiser, modéliser »* (Coquidé, 2003, p.168).

« *pour moi chaque expérience elle me / elle me mobilise environ 20 30 minutes chacune parce que je vais au fond de la modélisation c'est-à-dire que je leur montre quelque chose et éventuellement je / après je fais un petit calcul un petit modèle // Ou plusieurs d'ailleurs // Parce que j'essaie de faire comprendre ce qui se passe // Parce que sinon je trouve que c'est gadget // Faire léviter une balle je m'en fiche // »* (I5)

I9 indique qu'existe dans son établissement un dispositif pour visualiser la perte de pression dans une canalisation horizontale: « *ça va donner quelque chose d'intéressant parce que c'est vrai que s'intéresser / que voir que dans une canalisation // raconter que la pression est la même dans une canalisation horizontale / l'expérience montre très vite que c'est pas vrai / Donc // pouvoir justement aller au-delà et dépasser ça (...) ça peut être pas mal »* (I9)

« *So experiments is the source of things you don't understand / Don't fit with theory which is the most interesting because it's the most challenging to understand / »* (I15)

« *un aller-retour puisque théorie et expérience y a un lien dialectique évident »* (T3)

Visée associée à l'expérimental : 'Investigation empirique'

Lors d'une investigation empirique, rappelons que « *l'élève mène un mini-projet ou met en œuvre, en tout ou en partie, une réelle démarche d'investigation scientifique »* (Coquidé, 1998, p.114). Il s'agit « *d'expériences pour tester, contester, argumenter »* (Coquidé, 2003, p.168).

U5 a développé un module dans lequel ses étudiants mènent un travail de laboratoire, orienté recherche, sur la sténose. Il s'agit notamment de développer chez eux un « *understanding how to relate theory to experiments / to simulations and the limitation of experimental data / of computational data // How error may be propagated? (...) A lot of statistics involved to understand (...) Based on actual experimental data / »* (U5)

MB3 évoque une séance de TP où on dissèque un cœur d'agneau ou de mouton ou de porc : « on peut brancher des tuyaux / Ca c'est plutôt jouissif mais cela dépend de la qualité du cœur récupéré / en sentant le caractère coriace de la paroi d'une artère / le caractère simple de la paroi d'une veine / le caractère musculéux du cœur / On peut connecter ça à des aspects théoriques de ce qu'on connaît de l'écoulement / » (MB3)

Répartition des enseignants en lien avec la visée d'un recours à l'expérimental

Concernant la visée associée à l'expérimental, la répartition des enseignants interrogés est indiquée dans le tableau 8.3.1.1.

Visée d'un recours à l'expérimental					
<i>Famille</i>	<i>Non abordée</i>	Inutile	Familiarisation pratique	Elaboration théorique	Investigation empirique
<i>I CPGE</i>		I11		I5 I7 I9	
<i>I USA</i>			I13 I14	I15	I20
<i>U</i>			U6	U2	U5
<i>T</i>			T1 T2 T6	T3	
<i>MB</i>	<i>MB2</i> <i>MB9</i>	MB4 MB5 MB6	MB7 MB8		MB3
<i>Total</i>	2	4	8	6	3

Tableau 8.3.1.1
Visée d'un recours à l'expérimental

On y constate que la majorité des enseignants interrogés expriment des visées relevant de la familiarisation pratique ou de l'élaboration théorique, celles relevant de l'investigation empirique étant peu présentes.

A l'exception de I11, la sous-famille I CPGE a tendance à associer un recours à l'expérimental à une élaboration théorique tandis que la famille T, à l'exception de T3, l'associe plutôt à une familiarisation pratique.

Dans la sous-famille I USA et dans les familles U et MB, les réponses sont plus variées. Par exemple, U5 souhaite confronter ses étudiants à une problématique expérimentale qualifiée de 'recherche' tandis que U6 en reste à une familiarisation pratique.

Nous présentons de manière détaillée des réponses d'enseignants, par famille et sous-famille, dans le tableau 8.3.1.2.

Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Au sein de la sous-famille I CPGE,

I7 qualifie ses futures manipulations de cours d'« *illustratives* » : il s'agit de rendre « *concret* » des notions « *formelles* », énoncées sur polycopié ou au tableau pour certains étudiants qui auraient besoin de « *visualiser la réalisation de ce qu'on / de ce dont on leur parle formellement /* ».

Observer l'évolution de la pression dans une canalisation horizontale permet à I9 de remettre en cause le modèle de l'écoulement parfait.

A l'opposé, I11 l'évacue, les observations expérimentales ne correspondant pas aux prévisions du modèle à enseigner.

Le thème abordé dans les manipulations de cours proposées par I5 est en lien essentiellement avec la relation de Bernoulli, qui a été exposée lors d'une séance précédente. Il justifie un tel déroulement par l'utilisation qu'il souhaite faire de l'expérience : « *une manip de cours si je veux l'utiliser de manière quantitative faut déjà que j'ai les lois* ».

Ce n'est pas d'illustration dont il s'agit, « *faire la manip juste pour éveiller l'esprit* » ne l'intéresse pas : **chaque expérience est une occasion de confronter les prévisions du modèle aux observations. L'expérience est montrée, puis analysée.**

Les manipulations de cours réalisées par I5 ont notamment lieu dans l'air : c'est pour lui l'occasion de réfléchir aux approximations associées à un modèle donné. Par exemple, comment peut-on supposer incompressible l'écoulement d'un gaz qui est *a priori* compressible ? « *C'est imparable* » souligne-t-il. C'est l'occasion également d'évaluer l'importance relative des différents paramètres dans un problème donnée. Par exemple, y a-t-il à tenir compte ou non du terme gravitationnel ? « *c'est bien pour discuter les termes* » indique I5.

I5 souligne que l'expérience qui plait le plus aux élèves c'est d'aspirer plutôt en soufflant. Pour lui, « *c'est typiquement une situation complexe sur laquelle il faut un quart d'heure pour arriver à quelque chose. Même la phrase 'les lignes de champ se resserrent' ne veut rien dire puisqu'en fait l'écoulement est radial /* ».

C'est la réflexion sur le modèle retenu qui justifie pour I5 de consacrer tant de temps à ces manipulations de cours. I5 y voit « *une des richesses* » de ces expériences.

Au sein de la sous-famille I USA,

Si les expériences ont un apport dans un cours, ce n'est qu'à titre illustratif pour I14, afin de visualiser un phénomène.

Par contre, I15 accorde une place importante à l'expérience dans la démarche scientifique, même si dans le module enseigné, il n'y a pas directement recours via des manipulations de cours.

I20 estime les manipulations de cours importantes. Il considère la mécanique des fluides « intuitive », les élèves ayant été confrontés à des écoulements de fluide dans leur quotidien. La manip de cours est l'occasion de connecter ce vécu des élèves au modèle développé en cours. La manip de cours est donc pour I20 à utiliser une fois le modèle présenté, sans quoi, selon I20, cet apport apparaît faible.

I13 précise que le cours est nécessaire mais pas suffisant pour l'apprentissage : **l'élève n'aura appris qu'une fois confronté son savoir à un problème concret.** « *A student learns by applying a material to solve engineering problems (...) they will not learn until they apply the material but they need the material before they can apply it /* ».

A l'écoute de son discours, je suis surpris qu'il n'argumente pas davantage sur l'apport de recourir à l'expérimental dans le module où il enseigne. Je gère mal cet obstacle impromptu. Insistant sur ce point, il me répond en me demandant si j'ai expérimenté tout ce que j'ai appris.

Le lendemain de cet entretien, lors d'un échange de mail, I13 m'écrit : « *Perhaps I did not make myself as clear as I should have. I am not saying that experiment is not useful in learning it most definitely is. I am saying that one can learn the basics of fluid dynamics at the undergraduate level without necessarily taking an experimental lab course. If a lab course were well integrated in the sense that the student was learned to integrate 'hands on' with 'book learning', then the lab course could greatly enhance learning. That is not how labs [at least at the University where he works] are currently taught and the student, in my view, comes away treating lab and lecture courses, and corresponding considers what is perceived as 'hands on' and 'theory' as distinct and somewhat independent. In this context I think that UK and France may do a significantly better than in the US due to the 'independent course' approach here vs. the more extended approach with integrated, but massive exams after a year or two.* »

Je n'avais donc pas saisi que sa réponse était corrélée à sa vision du système éducatif américain actuel, où sont séparés de manière étanche *lecture courses* et *lab sessions*. C'est cette répartition qu'il conteste.

Au sein de la famille U,

U2 voit dans le travail expérimental une manière de retenir plus longtemps le savoir jusqu'alors uniquement livresque : **en laboratoire, l'étudiant est acteur de son apprentissage.**

U6 indique utiliser des vidéos en lien avec des expériences réelles, une fois les équations obtenues. Il s'agit de montrer un exemple illustrant de manière rapide les équations. La démarche réciproque est également menée mais il ne l'énonce pas spontanément de lui-même. Cela nécessite une relance de ma part. Il cite l'exemple de la cavitation qu'il indique aborder qualitativement puis quantitativement.

U5 développe un 'lab' afin d'étudier la sténose et de prouver que le débit sanguin change en fonction des conditions d'écoulement. Il s'agirait d'exploiter les données recueillies, de les comparer à la théorie et aux simulations. Les élèves auraient à comparer leurs résultats expérimentaux à la solution simulée et à expliquer les écarts.

Au sein de la famille T,

T1 indique qu'un TP vise par exemple à tracer la hauteur manométrique d'une pompe centrifuge en fonction du débit et à la comparer à la courbe du constructeur. Un autre TP vise à évaluer des pertes de charge pour différents tuyaux et à vérifier la loi de Venturi. Pour autant, T1 indique que les TP de mécanique des fluides démarrent un mois et demi après le début du cours.

Pour T2, le recours à l'expérimental se limite à une visée pratique : **introduire une grandeur, une définition, une unité, mais pas de réflexion sur le modèle.**

T3 évoque **l'expérience du rétrécissement**, qui constitue **une séquence déclenchante pour l'élève** : face à la maquette, l'élève anticipe un résultat et la confrontation à l'expérience contredit cette prévision.

Le but de T3 est le suivant : *« l'expérience montre que les choses ne sont pas aussi simples que ce que le simple bon sens voudrait »*. Il cherche à montrer aux élèves que l'expérience est *« indispensable », « incontournable »*. Il estime que *« là ça / ça accroche bien l'élève »*. Pour autant, l'expérience ne suffit pas et doit être couplé à de la théorie : *« Mais y a pas que l'expérience qui accroche l'élève / C'est l'expérience et le cours avec / Et si on conçoit pas les deux ensemble / Je dirais pas qu'on fait fausse route mais je dirais qu'on fait que la moitié de la route / »*.

Il encourage à penser un cours de physique en fonction de la place qu'y occupe l'expérience. L'expérience y est nécessaire, en particulier en mécanique des fluides et en particulier pour le profil d'élève de BTS : *« Et // enseigner dans ce type de section ce type de programme en mécanique des fluides // si on veut par une aberration de l'esprit le faire uniquement de façon théorique uniquement papier crayon / on fait complètement fausse route / C'est pas / c'est pas envisageable / Y aura que le prof qui suivra son cours / »*.

Le déroulé qu'il recommande est le suivant : **démarrer avec l'expérience avec comme mot d'ordre « on va voir c'qui s'passe quand // et explication théorique associée »**. **Retour à l'expérience et nouvel élément théorique associé. Le recours à l'expérimental est pour T3 un élément formateur important** : il estime avoir obtenu des *« résultats du point de vue de l'intériorisation par les élèves qui sont pas mal »*.

Dans la famille MB, lorsque des TP sont proposés, ils ont vocation principalement à illustrer le cours.

Par exemple, dans le cas de MB8, les séances de TP durent vingt minutes, par groupe d'une vingtaine d'étudiants et sont en lien notamment avec des variations de volumes de fluides dans des tubes.

On note également l'**absence de coordination entre enseignants au sein d'un même module**, sur l'exemple de MB6 et de l'équipe en charge des TP, qui est dirigée par MB7. MB6 pense qu'en lien avec la mécanique des fluides, les étudiants mesurent la pression artérielle à l'aide d'un stéthoscope, ce qui n'est pas le cas. MB6 précise ensuite : « *I'm not familiar enough with what they do in lab* » .

Tableau 8.3.1.2

Justifications en lien avec la visée d'un recours à l'expérimental Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

8.3.2 Présence de Travaux Pratiques (TP)

Types de réponse en lien avec la présence ou non de Travaux Pratiques (TP)

L'absence de TP associé au module dans lequel l'enseignant interrogé exerce peut-être vécue par lui comme étant un manque ou non (type de réponses noté 'absent et manque' et 'absent sans manque'). Il peut au contraire y avoir un TP associé au module. Ce TP peut être optionnel (type de réponse noté 'TP associé optionnel') ou obligatoire (type de réponse noté 'TP associé obligatoire').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse liés à la question portant sur la présence de Travaux Pratiques (TP) :

Pas de TP associé et ce n'est pas présenté comme étant un manque ('absent sans manque')

« au niveau du programme j'ai vraiment pas grand chose / J'ai perte de charge à illustrer / T'as juste un tuyau et tu montres que la pression elle diminue / » (I11)

« it's purely theory / » (I14)

« Presque pas expérimental / Je laisse ça au physicien / au TP de mécanique des fluides / Je ne fais pas de manipulation sur les écoulements / Je fais ça uniquement avec les mains et je leur explique vaguement avec les mains de manière plus ou moins intuitive ou plus ou moins mathématisée / » (MB3)

Pas de TP associé mais c'est un manque (type de réponse noté 'absent et manque')

« I think it would be great if they add that to this class » (U2)

« [The lab] it's missing but we just can't » (U6)

U6 montre en cours des « *pressure transducers* » : « *They see it [the manometers] but not still the same as having a laboratory experience /* » (U6)

« *unfortunately / we are compressed* » (MB8)

TP associé optionnel

« *I am saying that one can learn the basics of fluid dynamics at the undergraduate level without necessarily taking an experimental lab course* » (I13)

TP associé obligatoire

« *Alors ça se passe comme ça ils ont deux heures de séance de TP pendant toute l'année* » (T1)

Répartition des enseignants en lien avec la présence ou non de Travaux Pratiques (TP)

La répartition des enseignants interrogés en termes de présence ou non de Travaux Pratiques (TP) est indiquée dans le tableau 8.3.2.1.

NB : Dans l'établissement où exerce I5, il n'y a pas de TP spécifique proposé en lien avec la mécanique des fluides. Par contre, son lycée serait bien équipé en manipulations de cours sur ce thème, ce qui aboutit à une séance d'expériences dédiées à la mécanique des fluides : nous avons donc décidé de comptabiliser I5 dans la rubrique 'TP associé'.

Présence de Travaux Pratiques (TP)					
<i>Famille</i>	<i>Non abordée</i>	'absent sans manque'	'absent et manque'	'TP associé optionnel'	'TP associé obligatoire'
<i>I CPGE</i>		I11	I7 I9		I5
<i>I USA</i>		I14 I15		I13	I20
<i>U</i>			U2 U6		U5
<i>T</i>			T2		T1 T3 T6
<i>MB</i>	<i>MB9</i>	MB2 MB3 MB4 MB5	MB8		MB6 MB7
<i>Total</i>	<i>1</i>	<i>7</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>8</i>

Tableau 8.3.2.1
Présence de Travaux Pratiques (TP)

On constate dans ce tableau 8.3.2.1 qu'il n'y pas de TP majoritairement (13 enseignants sur 22, soit environ 60% de l'échantillon analysé), et que pour un quart des enseignants, ce n'est pas un manque.

On y lit également que les réponses obtenues sont contrastées d'une famille à l'autre et au sein de chaque famille.

On constate comme tendance que dans la sous-famille I CPGE, il n'y quasiment pas de recours à des TP en mécanique des fluides et que dans la sous-famille I USA, il n'y a quasiment pas de TP associés obligatoires.

Concernant la famille U, le TP est soit absent et c'est un manque, soit imposé.

Concernant la famille T, des séances de TP en lien avec l'écoulement de fluides sont généralement imposées.

Dans la famille MB, on constate l'absence de séances de travaux pratiques dédiées à l'écoulement de fluides.

Nous présentons des réponses d'enseignants de quelques familles et sous-familles dans le tableau 8.3.2.2.

Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille
<p>Parmi les I CPGE, I5 concentre ses manipulations de cours en mécanique des fluides en une séance et consacre une vingtaine de minutes à chacune (« <i>une manip de cours ça n'a de sens que si on y a consacré assez de temps pour en tirer quelque chose</i> »). C'est lui qui mène les expériences.</p> <p>Signalons qu'I5 et I11 évoquent d'éventuels TP de simulations.</p>
<p>Dans la sous-famille I USA, I13, I14 et I15 indiquent que le recours à l'expérimental s'effectue sous forme de vidéos prises sur Internet.</p> <p>I15 les qualifie de « <i>virtual experiments</i> ».</p> <p>I13 indique que les TP ne sont pas indispensables aux élèves si une condition est vérifiée : « <i>If they learned properly /</i> ».</p>
<p>Dans la famille U, U2 et U6 reconnaissent un manque à ne pas faire manipuler les élèves.</p> <p>U5 et les collègues de son département développent un 'lab' qui devrait être inséré dans le cursus à partir du semestre suivant. U5 espère que les élèves se souviendraient du cours dont il est question durant cet entretien et qu'ils auraient quelques attentes avant l'expérience. Ces séances seraient placées en fin de parcours, en 4^e année. Elles ne seraient donc pas en parallèle du cours de mécanique des fluides. U5 indique que le logiciel Comsol serait utilisé.</p>

Tableau 8.3.2.2
Présence de Travaux Pratiques (TP)
Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

8.3.3 Justifications proposées pour le recours à un contexte expérimental

En termes de justifications proposées par les enseignants, nous ne nous limitons pas ici au recours ou non aux TP.

Nous l'élargissons à l'ensemble des recours à l'expérimental au cours desquels une manipulation a lieu : il peut donc s'agir ici de TP mais aussi de séances de simulations ou de manipulations de cours, menées par les étudiants ou par l'enseignant, lors de séances dédiées ou non.

Types de justifications proposées en lien avec la justification d'un recours à l'expérimental

Que l'enseignant interrogé déclare ou non recourir à de l'expérimental, il le justifie.

Ses justifications peuvent être multiples.

Nous les scindons en deux types, selon qu'elles se réfèrent aux contextes sociaux ou à ses orientations.

En lien avec l'institution, l'enseignant peut évoquer le programme, qui impose ou non de mener des activités expérimentales par exemple (type de réponse de contexte social noté 'Institutionnel (programme)'), ou des contraintes locales : volume horaire à disposition, personnel et matériel disponibles, etc... (type de réponse de contexte social noté 'Local (logistique)').

En termes d'orientations, l'enseignant peut par exemple indiquer ne pas recourir à l'expérimental faute de temps disponible pour préparer les activités expérimentales (type de réponse noté 'Enseigner').

Il peut aussi considérer le recours à l'expérimental comme étant inadapté au type de séquence d'enseignement qu'il a à mener (type de réponse noté 'Apprendre (cognitif) Non nécessaire') ou au contraire le considérer comme nécessaire à l'apprentissage (type de réponse noté 'Apprendre (cognitif) Nécessaire').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse :

Justification d'un non recours à l'expérimental : Contexte social 'Local (Logistique)'

« on peut pas faire d'expériences de cours en salle de cours donc ça ça limite » (I9)

« the problem is the semester is not long enough to cover all the material » (I14)

Justification d'un non recours à l'expérimental : Contexte social 'Institutionnel (programme)'

« y a pas grand chose à faire » (I11)

« j'ai beaucoup de / d'items expérimentaux à voir notamment en élec et donc je ne peux pas quasiment consacrer de séquences à la mécanique des fluides » (I9)

Justification d'un non recours à l'expérimental : Orientation 'Enseigner'

« clairement cette année j'ai pas eu le temps de m'y intéresser » (I9)

Justification d'un non recours à l'expérimental : Orientation 'Apprendre (cognitif) Non nécessaire'

« I am saying that one can learn the basics of fluid dynamics at the undergraduate level without necessarily taking an experimental lab course » (I13)

« outside the box » (I15)

Justification d'un recours à l'expérimental : Contexte social 'Institutionnel (programme)'

« le programme étant calqué sur la spécificité industrielle de la section / le pragmatisme s'impose / Et je dirais surtout qu'il s'impose dans la façon d'enseignement / c'est-à-dire que c'est un enseignement qui doit avoir un très fort support expérimental » (T3)

Justification d'un recours à l'expérimental : Orientation 'Apprendre (cognitif) Nécessaire'

« for me add more demo is definitely the way to / to compensate for being massive mathsy and very rigorous » (I20)

« I want them [ses étudiants] to have an intuition thanks to the lab before calculus which should support that / They don't dictate that / »(T6).

Répartition des enseignants en lien avec la justification d'un recours à l'expérimental

Concernant les justifications proposées pour le recours (ou non) à l'expérimental, la répartition des enseignants interrogés est indiquée dans le tableau 8.3.3.1.

NB : Nous signalons qu'il a été compliqué de placer I5 dans ce tableau. En effet, dans son discours, concernant le recours à l'expérimental, I5 distingue une séance expérimentale constituée de manipulations de cours d'une séance fondée sur des mesures plus quantitatives (banc hydraulique, tuyaux avec plusieurs capteurs de pression...).

Justification d'un recours à l'expérimental							
Famille	Non abordée	Causes d'un non recours à l'expérimental				Causes d'un recours à l'expérimental	
		Contexte sociaux		Orientations		Contexte social	Orientations
		Local (logistique)	Institutionnel (Programme)	Enseigner	Apprendre (cognitif) Non nécessaire	Institutionnel (Programme)	Apprendre (cognitif) Nécessaire
<i>I CPGE</i>		I5 I7 I9	I5 I9	I7 I9	I11		I5
<i>I USA</i>		I14	I14		I13 I14 I15		I20
<i>U</i>		U2 U6					U5
<i>T</i>						T1 T2 T3 T6	T3 T6
<i>MB</i>	<i>MB2</i>	MB3 MB4 MB5				MB6 MB7	
	<i>MB9</i>	MB8			MB8		
<i>Total</i>	<i>2</i>	10	3	2	5	6	5

Tableau 8.3.3.1
Justification d'un recours à l'expérimental

Il argumente la présence du premier type de séance et l'absence du second, d'où notre choix d'indiquer I5 dans le tableau ci-dessus à la fois dans des colonnes de recours et de non recours à l'expérimental.

On y constate que pour la majorité des enseignants interrogés, les justifications d'un recours ou non à l'expérimental sont plurielles.

Elles diffèrent d'une famille à l'autre : elles sont à la fois liées aux contextes sociaux et aux orientations pour la sous-famille I CPGE et essentiellement liées aux orientations pour la sous-famille USA.

Recourir à de l'expérimental (I20) ou non (I13, I15) est un choix plutôt délibéré et non imposé par l'institution.

Pour les U, les justifications sont plutôt liées au contexte social.

Pour les T, les justifications sont liées au contexte institutionnel et aux orientations centrées sur le cognitif.

Les MB justifient leurs réponses essentiellement par des références aux contextes sociaux. Pour un justifier un non recours à de l'expérimental, ils se réfèrent au contexte local et pour justifier un recours à de l'expérimental, ils évoquent le contexte institutionnel.

Nous présentons de manière détaillée des réponses d'enseignants, par famille et sous-famille, dans le tableau 8.3.3.2.

Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

La sous-famille I CPGE justifie ses choix par des causes liées à la fois aux contextes sociaux et aux orientations :

L'absence de matériel dédié à des manipulations en mécanique des fluides revient fréquemment dans les réponses de la sous-famille I CPGE (I5, I7, I9).

L'impact du programme est également évoqué (I5, I9, I11) : I5 précise que la mécanique des fluides n'étant pas évalué aux concours (l'évaluation expérimentale concernerait essentiellement l'électricité et l'optique), aucun TP associé n'a été mis en place dans son établissement. L'absence d'évaluation des TP aux concours est présentée également par I9 comme étant un frein au développement de la pratique expérimentale. De plus, le très grand nombre d'items expérimentaux du programme dans des domaines autres que la mécanique des fluides n'incite pas I9 à proposer un TP de mécanique des fluides.

Par ailleurs, I7 indique ne pas avoir eu le temps de s'y intéresser, n'ayant enseigné ce programme qu'un an. A termes, il s'agirait de manipulations de cours, centrées sur l'effet Venturi, éventuellement l'effet Magnus.

I9 indique également ne pas avoir eu le temps de s'y intéresser (le programme est nouveau), mais compte s'y atteler par la suite. Il s'agirait de manipulations de cours, faute de matériel adéquat et de temps disponible à ce jour.

La sous-famille I USA justifie ses choix par des causes liées essentiellement à ses orientations : recourir à de l'expérimental (I20) ou non (I13, I15) est un choix délibéré et non imposé par la structure d'enseignement.

I14 semble interloqué lorsque je lui demande pourquoi il n'y a pas de TP. Il indique des contraintes liées au contexte institutionnel mais précise aussi que son module ne contient que des *lectures*, il n'y a pas de TP associé à ce cours : « *it's purely theory /* ».

Pour I15 par contre, ne pas recourir à des expériences dans ce module est présenté comme ne résultant que d'un choix personnel : il présente ce cours comme étant introductif, à un niveau *junior*.

Son objectif pour ce module est de fournir aux élèves les outils pour comprendre ce qu'on pourrait attendre dans une situation donnée (« *The solve of understanding of what it should [il insiste sur should] be is what I hope they would come out with /* »). Se confronter à des situations où les résultats annoncés ne sont pas suffisants lui apparaît trop ambitieux à ce niveau (« *outside the box* »). Il l'associerait davantage à un cours de niveau *graduate*. A ce niveau d'étude, il considère qu'une vidéo suffit plutôt qu'une manip decours.

I20 indique la présence dans son module de TP de simulation utilisant le logiciel Comsol et d'un projet couplés aux *lectures*. Il insiste sur **la place importante des projets dans l'université où il exerce et le plaisir qu'éprouvent les étudiants à mener ces projets.**

I20 justifie son choix de recourir à des manipulations de cours plutôt que des vidéos en se référant à ses élèves, qui auraient une certaine lassitude vis-à-vis des vidéos. Ils seraient par contre très réactifs aux manipulations de cours : « *the more of that you give them the better it is* ».

Dans la famille U,

U2 et U6 justifient leur absence de recours à l'expérimental dans leurs modules respectifs par des **contraintes liées au contexte local** (disponibilité de salles, de matériel et de personnel pour U2 ; projet jugé irréalisable pour U6 vu l'effectif étudiant suivant son module).

U2 reconnaît que certaines manipulations de cours pourraient être menées. Introduire des TP nécessiterait de modifier le module mais U2 indique les difficultés administratives que cela impliquerait.

Au sein de la famille T, la justification d'unrecours à l'expérimental est essentiellement liées au contexte institutionnel : c'est un attendu du programme.

Est fait référence au programme ou aux épreuves de l'examen par l'ensemble des enseignants de cette famille, qu'ils soient français ou américains. **T3 et T6 y ajoutent des convictions liées à leurs orientations en termes d'enseignement.**

Bien que proposant des travaux pratiques, les membres de la famille T évoquent des contraintes locales de logistique : les TP proposés sont donc des TP tournants (seuls deux postes sont disponibles dans la salle de TP de T1, un seul dans celle de T6), à raison de séances de 4 heures

hebdomadaires sur la moitié de l'année dans le cas de T1.

Dans la famille MB, les causes d'un recours ou non à de l'expérimental sont essentiellement liées aux contextes sociaux.

Seule MB8 présente une réponse pour justifier l'absence de TP catégorisable en termes d'orientation, l'enseignement étant volontairement limité à du formel dans la formation paramédicale accélérée dans laquelle elle exerce.

Pour autant, MB8 suggérerait comme meilleure façon pour introduire la loi de Poiseuille aux étudiants de leur faire faire la mesure de la pression artérielle sur leurs camarades. Elle indique que c'est mieux quand ils pratiquent mais évoque la contrainte en temps disponible et ne le fait donc pas dans son module.

Tableau 8.3.3.2
Justification d'un recours à l'expérimental
Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Conclusion sur le recours à un contexte expérimental

Pour nombre d'enseignants interrogés, le recours à une expérience n'apparaît pas nécessaire pour mener à bien leur séquence d'enseignement.

La présence de TP associés à un cours sur un écoulement de fluide, tant aux États-Unis qu'en France, est quasi limitée aux membres de la famille T (à quelques exceptions près). Elle est aumieux optionnelle dans la famille I (I13) ou limitée à des TP de simulation (I20). L'existence de projets à mener en mécanique des fluides est faible également (I20, U2).

L'absence d'expérimentation en séquence d'enseignement est justifiée par des raisons locales (logistique) ou institutionnelles. Cette absence est regrettée chez certains (I7, U2), assumée comme résultant d'un choix à faire chez d'autres (I14).

De plus, le recours au visuel est une quasi constante dans le discours des enseignants sur l'expérimental. T1 indique qu'il n'y a pas de difficultés en TP « *parce qu'ils sont assez bien guidés et ils voient ce qu'ils font /* » et I18 le résume en « *to see to believe* ».

Pour beaucoup d'enseignants interrogés, l'expérience est vécue comme ludique ou illustrative. Dès lors, l'expérience peut être perçue par eux comme une valeur ajoutée au cours et il s'agit de favoriser son recours.

Mais dans le même temps, elle n'apparaît pas nécessaire pour mener à bien la situation d'enseignement. Son absence, quand bien même est-elle regrettée, n'est donc pas jugée gênante pour autant pour élaborer une séquence d'enseignement.

Pour d'autres (I5, I9, I13, I15, I20, U5, T3), l'expérience est partie prenante de la démarche développée en cours.

Elle permet l'interaction entre théorie et champ expérimental : les prédictions du modèle sont ainsi confrontées aux données expérimentales. C'est l'occasion de discuter le domaine de validité du modèle et les approximations associées.

La présence de l'expérience, quelle que soit sa forme, est présentée comme nécessaire au processus d'apprentissage.

On constate qu'il s'agit essentiellement d'enseignants de la famille I. Signalons néanmoins que plusieurs membres de cette famille I n'y figurent pas. De même pour la famille U où le travail de modélisation est pourtant important *a priori*.

Nous abordons dans les paragraphes suivants la notion de contextes pédagogiques, via le recours à un contexte historique et le nombre de supports pédagogiques retenus par les enseignants interrogés.

8.4 Contextes pédagogiques : recours à un contexte historique

Nous abordons ici deux sous-catégories associées au recours à l'histoire des sciences: les connaissances dans ce domaine introduites par les enseignants (sous-catégorie 'Connaissances introduites') et la visée qu'ils attribuent à un recours à l'histoire des sciences (sous-catégorie 'Visée'). Nous évoquons également les justifications associées à cette visée.

8.4.1 Connaissances en histoire des sciences introduites par les enseignants interrogés

Types de réponse en lien avec les connaissances en histoire des sciences introduites

Nous avons retenu quatre types de réponse en lien avec les connaissances en histoire des sciences introduites.

Elles peuvent être faibles (type de réponse noté 'Faibles'), limitées à l'énumération de noms, de dates, de portraits insérés dans des photocopiés de cours ou des présentations PowerPoint (type de réponse noté 'Limitées').

Ces connaissances introduites peuvent être maîtrisées, mais uniquement dans le domaine spécifique de recherche ou d'enseignement de l'interviewé (type de réponse noté 'Spécifiques') : par exemple, l'histoire de l'échographie Doppler dans une formation de technicien hospitalier.

Enfin, ces connaissances peuvent être maîtrisées en lien avec la construction historique d'un modèle en mécanique des fluides (type de réponse noté 'Générales').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse liées aux connaissances introduites en histoire des sciences.

'Faibles'

« *Je sais même pas de quelle époque il est Bernoulli* » (T2)

« *Je ne me souviens pas [concernant Poiseuille] / J'ai dû regarder /* » (MB2)

« *ça pourrait mais je n'ai aucune connaissance / Je ne sais pas qui c'est / moi / Poiseuille /* » (MB5)

« *[Poiseuille] it sounds like a French word / Why this one is famous ?* » (MB7)

‘Limitées’ à noms, dates, portrait

« *A la fin de tous mes TD je mets une petite bio d'un des physiciens dont on a rencontré le nom pendant le cours / Par exemple Bernoulli avec une image du physicien déjà pour qu'ils visualisent l'époque / Là je mets une petite bio avec ce qu'il a fait et pourquoi il a contribué à l'histoire des sciences* » (I11)

« *Well to be honest I don't know very much about Bernoulli or Euler (...) I don't know who Navier was / Navier was French / I only know it's a French name / I don't know anything about him /* » (I13)

« *Oh je me rappelle plus / C'était y a 4 ans que j'ai essayé ça / J'avais préparé un petit truc / Je sais plus ce que j'avais dit / J'avais dû parler de Bernoulli / Ca c'est sûr / Non je sais plus / je peux plus te dire /* » (T1)

Un des enseignants interrogés, MB6, indique avoir assisté à une conférence sur l'histoire de la physiologie et de l'anatomie. Elle l'a exploitée pour une formation à destination d'enseignants du secondaire. Signalons qu'elle a eu besoin de relire son powerpoint pour se remémorer les noms de Galien et Harvey et de conclure: « *clearly as you can see it didn't stick in my head /* » (MB6)

« *of course Harvey (...) and then // well / actually I don't know /* » (MB9)

‘Spécifiques’

« *If I have to teach neuroscience I already quite know the history of neuroscience and I have an understanding / If I had to teach History of Fluid Mechanics / I would have to go in* » (U2)

‘Générales’

« *en gros y a une première étape de statique / En gros ce que j'appelle la / la physique des fontaines et des jets d'eau pour les / les // En gros pour savoir si on aura des fontaines dans les villes savoir comment on fera le château de Versailles / Comment il faut pomper de l'eau / Enfin bon ça c'est une première étape qui est autour de la statique et de Bernoulli / Et après effectivement ben euh arrive le problème le problème du 19e siècle où euh on essaie // Euler en effet c'est un peu avant et euh on essaie de mettre en équation / Mais là c'est le cheminement qui est très long / Avant d'arriver à articuler la*

viscosité les non linéarités dans l'équation de Navier-Stokes / Après quoi l'étape 20e siècle je la développe pas du tout » (I5)

« il suffit de prendre le nom des théorèmes pour voir que le déroulement historique est là / Premier théorème c'est celui d'Archimède / Ensuite on passe à Pascal / Puis Bernoulli ça nous mène au 18e siècle / Puis Reynolds au 19e / » (T3)

Répartition des enseignants en lien avec les connaissances en histoire des sciences introduites

Concernant les connaissances introduites en histoire des sciences, la répartition des enseignants interrogés est indiquée dans le tableau 8.4.1.

Nous rappelons que nous n'avons pas étudié les justifications associées à ces réponses (cf tableau 8.1.2. A).

Connaissances en histoire des sciences introduites par les enseignants interrogés				
<i>Famille</i>	Faibles	Limitées	Spécifiques	Générales
<i>I CPGE</i>		I7 I11		I5 I9
<i>I USA</i>		I13 I14 I15 I20		
<i>U</i>			U2 U5	U6
<i>T</i>	T2	T1 T6		T3
<i>MB</i>	MB2 MB5 MB7	MB4 MB6 MB8 MB9	MB3	
<i>Total</i>	4	12	3	4

Tableau 8.4.1
Connaissances en histoire des sciences introduites par les enseignants interrogés

Deux-tiers des enseignants interrogés qualifiés de physique présentent des connaissances sommaires (type de réponses 'Faibles' et 'Limitées') en histoire des sciences en lien avec la mécanique des fluides. Le tiers restant présente des connaissances maîtrisées.

Les familles et sous-familles se distinguent dans cette sous-catégorie de *Personal PCK* : Les réponses des membres de la sous-famille I CPGE se répartissent moitié-moitié entre les types de réponse notés 'Limitées' et 'Générales', tandis que l'ensemble des réponses des membres de la sous-famille I USA est du type 'Limitées'.

Les connaissances des membres de la famille U sont maîtrisées.

Celles de la famille T sont plutôt sommaires, à l'exception de T3.

A l'exception de MB3, les enseignants interrogés de la famille MB présentent des connaissances sommaires en histoire des sciences en lien avec la mécanique des fluides (type de réponses 'Faibles' et 'Limitées').

Des connaissances en histoire des sciences faibles ou limitées à des noms, dates et lois:

Pour $\frac{3}{4}$ des enseignants de la population étudiée (donc qualifiés de physique ou de MB), les connaissances en histoire des sciences en mécanique des fluides sont sommaires (type de réponses 'Faibles' et 'Limitées').

Peu d'enseignants répondent à la question sur les principales étapes de l'histoire des sciences en mécanique des fluides en citant ces étapes.

Beaucoup y répondent en citant les noms de scientifiques associés aux différentes lois apparaissant dans le cours : Bernoulli, Euler, Reynolds (I13, I15, T2, T6). Navier, Stokes, Pitot sont peu évoqués, D'Alembert et Bernoulli père ne sont pas du tout évoqués.

Ces noms connus cités sont éventuellement associés à une image ou à un portrait (I11, MB2), à une loi (I11, I15, T3) ou à des dates (I14, T1, T2). Bien souvent, rien de plus que le nom n'est indiqué.

Il n'y a pas d'état intermédiaire en termes de connaissances en histoire des sciences observé dans l'échantillon d'enseignants étudié : soit les connaissances sont sommaires, soit elles sont maîtrisées.

Rares sont ceux évoquant des étapes de la construction de la mécanique des fluides autrement que par des noms de scientifiques. Il s'agit de I5, I9, T3 et U6.

Ils l'évoquent de manière précise :

Par exemple, U6 évoque les moulins à eau de Paris en 1695. Il se réfère à Bernoulli dans un autre cours via les travaux de celui-ci à Paris sur la « *ground water / to interpret ground water levels along the bases* ». Il évoque un des nombreux livres qu'il possède sur ce thème. Il insiste sur l'idée suivante, novatrice à l'époque de Bernoulli : « *the rivers were an expression of ground water /* ».

I5 est le seul à citer l'existence de l'ouvrage de Darrigol (2005), qu'il possède et commente lors de l'entretien.

La période évoquée dans ce travail de thèse ne semble connue que de I5 et de T3.

Signalons que **le vécu de Poiseuille est méconnu de quasiment tous** (à l'exception de T3), même de la part des enseignants qualifiés de MB.

Dans un cours d'une formation qualifiée de MB, si un nom est signalé, c'est celui d'Harvey. Dans un cours avancé d'une formation qualifiée de MB, la loi de Poiseuille, voire celle de Bernoulli,

sont énoncées. Pour autant, aucun des enseignants interrogés qualifiés de MB n'a d'éléments à signaler concernant Poiseuille. Même en cursus médical français, tant en cours de physique que de cardiologie, aucun élément n'est connu sur Poiseuille, alors même que MB4 indique des éléments d'histoire des sciences sur l'hémodynamique.

Aucun enseignant interrogé qualifié de MB ne connaît l'apport de Poiseuille en physiologie, tant en France qu'aux États-Unis.

A l'exception de MB3 et de MB4, les enseignants qualifiés de MB ne maîtrisent pas davantage l'histoire de la physiologie ou de la biologie. Au mieux, les noms évoqués sont ceux de Darwin ou de Watson et Crick.

Par ailleurs, signalons qu'en entretien, U2 indique que selon lui, tout enseignant-chercheur maîtrise l'histoire des sciences associée à son domaine de recherche.

Le fait qu'il n'en soit pas de même dans d'autres domaines est associé par U2 à la nécessité de la part de l'enseignant-chercheur de fournir un travail supplémentaire pour accéder à ce type de données.

Force est de constater que cette affirmation n'est pas vérifiée au sein de la population enseignante interrogée.

En effet, les enseignants interrogés qui sont aussi chercheurs, tant en France qu'aux États-Unis, n'apparaissent pas comme maîtrisant davantage l'histoire des sciences que ceux n'étant qu'enseignant. Les enseignants-chercheurs se retrouvent en effet réparties dans l'ensemble des catégories, comme ceux n'étant qu'enseignant.

Le travail supplémentaire à fournir intervient probablement parmi les causes de ce constat mais l'argument principal plusieurs fois entendu est plutôt celui d'un choix pédagogique, l'apport de l'histoire des sciences n'étant pas perçu par tous.

Enfin, signalons que lors de l'entretien, il n'a pas été explicitement demandé aux interviewés de justifier leur niveau de connaissances en histoire des sciences.

8.4.2 Visée associée à l'histoire des sciences

Types de réponse en lien avec la visée associée à l'histoire des sciences

Nous avons retenu quatre types de réponse pour la visée d'un recours à l'histoire des sciences : elle peut être absente ou jugée inutile par l'enseignant (type de réponse noté 'Absente ou jugée inutile'), déclarée comme étant annexe, l'enseignant indiquant par exemple que les documents en lien avec l'histoire des sciences sont à lire à la maison (type de réponse noté 'Annexe').

L'enseignant peut considérer le recours à l'histoire des sciences comme étant ludique ou illustratif : il s'agit par exemple d'évoquer une anecdote historique lors d'une séquence d'enseignement (type de réponse noté 'Ludique ou illustrative').

Enfin, le recours à l'histoire des sciences peut être déclaré comme ayant une visée compréhensive (type de réponse noté 'Compréhensive').

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de réponse concernant la visée associée à l'histoire des sciences.

'Absente ou jugée inutile'

« Part of my problem I have with history of science is that people get all hung upon who did what first and I just can't be bothered with these arguments / I just can't / » (I13)

« it's just scientists are not very interesting people / (...) Some of them were very great scientists / It's good to do science / It's not very interesting people and the history // Somewere / but most are just boring nerds just obsessing about details / » (I20)

« intéresser nos étudiants avec ça / je sais pas / » (MB5)

‘Annexe’ (à lire à la maison)

« A little extra » (MB7)

« I think histology / The rest they can learn outside » (MB8)

‘Ludique ou illustrative’ (anecdotes)

Dans les biographies proposées par I11 à ses étudiants, elle y indique notamment quelques dates, le prénom (*« ils adorent ça »*), le nom propre et la nationalité (*« ça les amuse beaucoup donc c'est pas plus mal »*) : *« C'est assez positif / Ça a l'air de les intéresser sinon ils diraient rien du tout / C'est que ça doit les amuser un peu / »*

« Actually we don't really deal to their personalities in great deals / Their names are mentioned on the way through of the syllabus / (...) We concentrate this minimum requirement not to kill people / » (I15)

MB4 indique y recourir *« plus pour les distraire qu'autre chose »*

‘Compréhensive’

« Par exemple le fait que euh la trainée de Stokes n'ait intéressé personne au 19^e siècle parce que c'est totalement contradictoire avec le fait qu'on observait une trainée quadratique / le fait qu'on pouvait pas comprendre tout ça / Donc en gros l'équation de Navier-Stokes c'est un flop pendant 30 ans ça je trouve que c'est passionnant de leur [les étudiants] montrer comment les / les idées se mettent enplace / » (I5)

« Mais euh à titre culturel je pense que c'est important parce que la science c'est une construction très longue sur des temps longs et je pense pas que ce soit clair dans l'esprit des étudiants / Donc moi ça me paraît une composante de la formation qui peut être intéressante » (I9)

« History is important / Even though some of the time the theories are wrong / (...) It's useful for the students to see the progression of understanding in the literature / » (U5)

« J pense que ça fait du bien à l'étudiant de placer les choses dans leur contexte / Donc c'est a priori du plus d'avoir des visions d'histoire des sciences / (...) Donner de la chair humaine à toutes ces choses-là / Faire qu'il y ait des êtres humains derrière c'est bien / Des vrais cerveaux qui font de vrais travaux pour vraiment réfléchir / » (MB3)

Répartition des enseignants en lien avec la visée associée à l'histoire des sciences

Concernant la visée associée à l'histoire des sciences, la répartition des enseignants interrogés est indiquée dans le tableau 8.4.2.

NB :

Concernant cette sous-catégorie, il a été difficile de placer I20.

En effet, dans son discours, I20 évoque l'histoire des sciences tantôt en termes d'histoire des savants, tantôt en termes de controverses historiques : de là, sa réponse ne serait pas catégorisée de la même façon.

Il indique que si l'histoire des sciences correspond à un historique des découvertes et des savants, s'intéresser à ce domaine lui apparaît inutile. Sa réponse serait alors classée à 'Absente ou jugée inutile'.

Il évoque également l'étude de controverses historiques, auquel cas la réponse qu'il apporte serait classée à 'Compréhensive'.

La réponse spontanée qu'il propose associe à l'histoire des sciences un historique des découvertes et des savants : nous avons donc décidé de classer sa réponse à 'Absente ou jugée inutile'.

De même, la question s'est posée pour placer certains MB qui indiquaient ne pas se référer à l'histoire des sciences en séquence d'enseignement et lui préférer l'évocation de la recherche actuelle à laquelle ils associaient une visée compréhensive (MB7, MB8 et MB9).

La recherche actuelle étant un élément de l'histoire des sciences, on aurait pu classer leur réponse à 'Compréhensive'.

Pour autant, ces enseignants distinguent histoire des sciences et recherche actuelle. Nous n'avons donc pas tenu compte pour cette sous-catégorie de PCK de leurs éléments de réponse en lien avec l'évocation de la recherche actuelle.

Visée associée à l'histoire des sciences				
Famille	Niveau 0		Niveau 1	Niveau 2
	Absente ou jugée inutile	Annexe	Ludique ou illustrative	Compréhensive
<i>I CPGE</i>			I11	I5 I7 I9
<i>I USA</i>	I13 I20	I14	I15	
<i>U</i>	U2			U5 U6
<i>T</i>	T1 T2		T6	T3
<i>MB</i>	MB5 MB6 MB9	MB2 MB7 MB8	MB4	MB3
<i>Total</i>	8	4	4	7

Tableau 8.4.2
Visée associée à l'histoire des sciences

Nous proposons trois tendances observées en lien avec la visée associée à l'histoire de sciences et ce, indépendamment de la famille d'enseignants :

Pour certains, il n'y a pas à évoquer l'histoire des sciences en séquence d'enseignement ou alors de manière annexe. Nous qualifions cette tendance de 'niveau 0' et nous l'associons aux types de réponses de visée 'Absente ou jugée inutile' ou 'Annexe'.

Pour d'autres, l'évoquer reste du registre de l'anecdotique : l'apport pédagogique de l'histoire des sciences est indiqué comme étant faible, ce que nous qualifions de 'niveau 1' et que nous associons au type de réponse précédent de visée 'Ludique ou illustrative'.

Pour d'autres enfin, l'évoquer apporte une vraie valeur ajoutée au cours, ce que nous qualifions de 'niveau 2' et que nous associons au type de réponse précédent de visée 'Compréhensive'.

En termes de visée associée à un recours à l'histoire des sciences, la répartition des types de réponses est contrastée, que ce soit entre familles ou au sein de chaque famille.

Parmi les enseignants qualifiés de physique, un tiers n'associe aucune visée à l'histoire des sciences, un tiers lui associe une visée ludique ou illustrative et un tiers une visée compréhensive.

La sous-famille I CPGE se distingue de la sous-famille I USA : à une visée ‘forte’ plutôt compréhensive parmi les I CPGE correspond une visée ‘faible’, entre absente et annexe, parmi les I USA.

Parmi les U, les résultats sont contrastés : pas de visée déclarée par U2, visée compréhensive pour U5 et U6.

Parmi les T, les résultats sont contrastés : pas de visée déclarée par T1 et T2, visée ludique ou illustrative pour T6, compréhensive pour T3.

Au sein de la famille MB, la visée déclarée est plutôt de type absente ou annexe.

8.4.3 Justifications proposées pour la visée associée à l'histoire des sciences

Types de justifications proposées pour la visée associée à l'histoire des sciences

Que l'enseignant interrogé déclare ou non recourir à l'histoire des sciences, il le justifie. Ses justifications peuvent être multiples.

Comme pour le recours à l'expérimental, nous les scindons en deux types, selon qu'elles se réfèrent aux contextes sociaux ou aux orientations.

En lien avec l'institution, l'enseignant peut évoquer le programme, qui impose ou non de recourir à l'histoire des sciences par exemple (type de réponse noté Contexte social ‘Institutionnel (programme)’). Contrairement au cas du recours à l'expérimental, nous n'avons pas rencontré de contraintes locales : il n'y a donc pas ici de type de réponse noté Contexte social ‘Local (logistique)’.

L'enseignant peut aussi évoquer des choix personnels (‘Orientations’) : par exemple, l'enseignant peut indiquer ne pas recourir à l'histoire des sciences faute de connaissances dans ce domaine ou y recourir par goût. Il peut aussi souhaiter ‘récompenser’ les grands savants à les citant durant sa séquence d'enseignement. Nous associons à ces choix le type de réponse noté ‘Enseigner’.

Il peut aussi recourir ou non à l'histoire des sciences pour des raisons pédagogiques centrées sur les élèves (type de réponse noté ‘Orientations Apprendre’) en évoquant par exemple leur goût ou leur dégoût pour l'histoire des sciences (type de réponse noté ‘Apprendre (affectif)’). Des raisons pédagogiques centrées sur l'apprentissage (type de réponse noté ‘Apprendre (cognitif)’ peuvent aussi être avancées pour un recours ou non à l'histoire des sciences.

Nous présentons des extraits d'entretiens associés à ces différents types de justifications :

Justification de la visée associée à l'histoire des sciences: Contexte social ‘Institutionnel (programme)’

« the problem is the semester is not long enough to cover all the material » (I14)

« *I'd like to but I have so little time* » (MB9)

Justification de la visée associée à l'histoire des sciences : Orientations 'Enseigner'

« *quand même il faut citer le nom du bonhomme dont on a pris le nom pour faire une unité / C'est la moindre des choses /* » (T3)

Justification de la visée associée à l'histoire des sciences : Orientations 'Apprendre (affectif)'

« *Historical view of some of these problems really adds a lot of motivation to students /* » (U6)

Justification de la visée associée à l'histoire des sciences : Orientations 'Apprendre (cognitif)'

« *we cut off informations that we think is not relevant at this time* » (MB8).

« *historiquement les mécaniciens des fluides se sont trouvés face à des phénomènes physiques qu'ils n'arrivaient pas à mettre en équation avec l'appareillage mathématique qu'ils avaient derrière eux (...) c'est l'illustration parfaite d'une branche de la physique qui à tout instant s'appuie sur une expérience / quoi /* » (T3).

Répartition des enseignants en lien avec leurs justifications proposées pour la visée associée à l'histoire des sciences

Concernant les justifications proposées en lien avec la visée associée à l'histoire des sciences, la répartition des enseignants interrogés est indiquée dans les tableaux 8.4.3.1. A et 8.4.3.1. B.

Du tableau 8.4.3.1. A, on constate que les enseignants soient qualifiés de physique ou de biomédical, peu se réfèrent au contexte institutionnel pour justifier la visée associée à l'histoire des sciences.

Les justifications sont essentiellement liées aux orientations.

Celles centrées sur l'enseignant ('Enseigner') sont majoritaires.

Chez les enseignants qualifiés de physique, les orientations centrées sur l'élève (affectif ou cognitif) sont quasiment autant présentes que celles centrées sur l'enseignant, à l'exception des membres de la famille T (ces derniers présentent surtout des justifications centrées sur l'enseignant).

Chez les enseignants qualifiés de biomédical, les orientations centrées sur l'apprentissage de l'élève ('Apprendre (cognitif)') sont peu présentes.

Justifications de la visée associée à l'histoire des sciences					
<i>Famille</i>	Aucune	Contexte social	Orientations		
		Institutionnel (programme)	Enseigner	Apprendre (affectif)	Apprendre (cognitif)
<i>I CPGE</i>		I9	I7 I11	I5 I11	I5 I7 I9
<i>I USA</i>		I14 I20	I13 I20	I14 I15 I20	I15 I20
<i>U</i>			U2 U6	U6	U5 U6
<i>T</i>		T2	T1 T2 T3 T6	T1 T3	T3
<i>MB</i>		MB2 MB8 MB9	MB3 MB6 MB7 MB8 MB9	MB4 MB5 MB6	MB3
<i>Total</i>	0	7	15	11	9

Tableau 8.4.3.1. A
Justifications de la visée associée à l'histoire des sciences
Ensemble de la population étudiée

Dans le tableau 8.4.3.1. B, ces données sont reprises mais en classant les enseignants de la population étudiée en fonction du niveau qu'on leur a attribué en termes de visée d'un recours à l'histoire des sciences. Il s'agit donc ici d'une étude à grain plus fin que précédemment.

Dans ce tableau 8.4.3.1. B, faute de place, on n'a pas inséré la colonne *Famille* et on n'a pas toujours représenté les colonnes associées à des types de réponse non proposées par des enseignants d'un niveau donné.

On y constate alors que concernant les enseignants présentant un niveau 0 en termes de visée d'un recours à l'histoire des sciences :

Ils sont quasiment les seuls à se référer au contexte institutionnel, en l'occurrence ici les programmes.

Ils se réfèrent principalement à eux-mêmes en termes d'orientations.

Quasiment aucun d'entre eux ne se justifie via des aspects cognitifs liés à l'apprentissage ('Élèves (cognitif)').

Ces tendances sont constatées quel que soit leur famille d'origine.

Concernant les enseignants présentant un niveau 1 en termes de visée d'un recours à l'histoire des sciences :

Ils ne se réfèrent ni au contexte institutionnel ni aux aspects cognitifs liés à l'apprentissage.

Ces tendances sont constatées quel que soit leur famille d'origine.

Nous n'avons constaté chez ces enseignants que des composantes affectives de l'orientation, centrées sur eux-mêmes ou sur les élèves.

Concernant les enseignants présentant un niveau 2 en termes de visée d'un recours à l'histoire des sciences :

Ils ne se réfèrent quasiment pas au contexte institutionnel.

Les composantes affectives de l'orientation peuvent être centrées sur eux-mêmes ou sur les élèves.

Nous constatons chez tous les enseignants de niveau 2 indiquent une composante cognitive de l'orientation, qui est donc celle majoritaire.

(Quasi non) recours à l'histoire des sciences Niveau 0					Recours à l'histoire des sciences Niveau 1			Recours à l'histoire des sciences Niveau 2			
Contexte social		Orientations			Orientations			Contexte social	Orientations		
Local (logistique)	Institutionnel (programme)	Enseigner	Apprendre(affectif)	Apprendre (cognitif)	Enseigner	Apprendre(affectif)	Apprendre (cognitif)	Institutionnel (programme)	Enseigner	Apprendre(affectif)	Apprendre (cognitif)
					I11	I11		I9	I7	I5	I5 I7 I9
I14	I14 I20	I13 I20	I14 I20	I20	I15	I15					
		U2							U6	U6	U5 U6
	T2	T1 T2	T1		T6				T3	T3	T3
MB8 MB9	MB2 MB8 MB9	MB6 MB7 MB8 MB9	MB5 MB6			MB4			MB3		MB3
3	6	9	5	1	3	3	0	1	4	3	7

Tableau 8.4.3.1. B
Justifications de la visée associée à un recours à l'histoire des sciences
Réarrangement de la population en fonction du niveau attribué à cette visée

Dans le tableau 8.4.3.2, nous proposons un récapitulatif de réponses associées à ces trois niveaux liés à la visée d'un recours à l'histoire des sciences.

Trois niveaux de visée associée à un recours à l'histoire des sciences : récapitulatif

Niveau 0

Ne pas recourir à l'histoire des sciences est un choix assumé par 9 enseignants (I13, I14, U2, T1, T2, MB2, MB5, MB8, MB9).

Ce choix est lié au contexte institutionnel (I14 et T2 indiquent que l'histoire des sciences ne figure pas au syllabus du cours qu'ils ont à enseigner) et local (la contrainte temporelle est évoquée par I14, MB8 et MB9 ; MB9, par exemple, indique avoir peu de temps disponible pour l'histoire des sciences car il privilégie le travail interactif pendant son cours).

Ce choix est lié également aux orientations : manque d'intérêt de l'enseignant et manque d'intérêt supposé des élèves, évoqué par T1 et MB5 notamment (T1 évoque le niveau scolaire de ses étudiants : l'histoire des sciences pourrait avoir de l'attrait pour de 'bons élèves', pas pour les siens, étudiant dans des filières techniques). L'apport de l'histoire des sciences est jugé faible également d'un point de vue pédagogique (MB7).

Dans les réponses de I13 et de I20, l'histoire des sciences est décrite spontanément comme étant l'histoire des découvertes et des savants (qui a découvert quoi le premier ?) : « *Part of my problem I have with history of science is that people get all hung up on who did what first* » (I13). I20 associe l'histoire des sciences à l'histoire des scientifiques de renom et en ce sens, elle présente pour lui peu d'intérêt. I20 l'associe à du commérage. Un tel type d'histoire ne les intéresse pas : « *and I just can't be bothered with these arguments / I just can't /* » (I13).

Recourir à l'histoire des sciences est perçu comme n'ayant qu'un apport secondaire pour l'apprentissage.

Une alternative suggérée est l'évocation de la recherche actuelle (MB7, MB8 et MB9). MB8 privilégie cette approche en citant par exemple en début de semaine ou de mois des informations tirées de BBC news. Elle justifie ce choix par le fait que certains de ses étudiants vont effectuer de la recherche plus tard. Des contacts sont établis avec l'hôpital où travaille son mari et un programme d'initiation à la recherche est proposé aux volontaires. MB7 évoque des techniques actuelles et MB9 évoque le cas des valves artificielles.

Niveau 1

Les enseignants associés au niveau 1 sont ceux pour qui évoquer l'histoire des sciences reste du registre de l'anecdotique : un apport pédagogique lui est associé mais il apparaît faible.

Le recours à l'histoire est indiqué comme ludique (I11, MB4) : « *ça les amuse beaucoup donc c'est pas plus mal* » (I11).

Il permet d'introduire une séance ou de générer une pause lors d'une séance.

L'histoire des sciences est évoquée sous la forme d'anecdotes : MB4 par exemple, débute son cours sur la circulation sanguine en évoquant Aristote mort noyé dans un fleuve.

La notion d'histoire des sciences reste attachée à l'évocation de chercheurs célèbres. Il s'agit de rendre hommage aux savants passés à la postérité : I11 indique que « *souvent si il a donné son nom à une unité / Je trouve que c'est une distinction particulière / (...) je choisis souvent les génies vraiment remarquables en leur disant / voilà lui / c'était vraiment quelqu'un d'exceptionnel /* ».

Mais l'anecdote peut aussi aider à transmettre des messages : I15 emploie une anecdote sur Newton pour montrer que les grands scientifiques n'ont pas nécessairement une attitude exemplaire dans leur vie sociale.

Certains, notamment MB4, voient dans un recours à l'histoire des sciences l'occasion de créer des connexions avec les élèves.

Niveau 2

Les enseignants associés au niveau 2 sont ceux pour qui évoquer l'histoire des sciences fournit une valeur ajoutée importante au cours.

Cela permettrait de promouvoir l'expérimental (T3), de favoriser les connexions entre disciplines (T3 et U6 ; T3 évoque à ses étudiants le parcours de Poiseuille. Le fait que Poiseuille ait été médecin et non physicien les intéressent parfois et T3 d'ajouter : « *Si ça peut leur mettre dans l'idée que quand on a une spécialité ça empêche pas d'aller regarder à côté / c'est pas plus mal /* »).

Recourir à l'histoire des sciences permettrait également d'accéder au mode d'élaboration d'un modèle et à la construction de la pensée au sein d'une communauté scientifique donnée (U5). I5 et I9 insistent sur la durée nécessaire à la construction d'un modèle. Via l'histoire des sciences, I5 peut aussi mettre en avant auprès de ses étudiants l'avancée dans la formalisation du modèle qui s'est opérée au cours du temps : « *signaler que ce formalisme élégant qu'on trouve aujourd'hui / Si on lit l'équation d'Euler euh mais y a rien de tout ça / Y a pas de gradient y a pas de divergence / Y a rien de tout ça / Donc je j'utilise beaucoup d'histoire des sciences dans ce domaine /* ».

Le recours à l'histoire des sciences permettrait également de construire une culture citoyenne (I9 : « *Disons que de manière générale je pense que c'est important qu'ils aient une culture à peu près de quand se sont passées un peu les choses / Il ne s'agit pas de faire une chronologie précise dans chaque domaine mais euh // il me semble important plus pour la formation du citoyen et des cadres scientifiques qu'ils vont devenir d'avoir une idée de quand ont été développées les choses* ») et de penser la société actuelle, en effectuant un parallèle entre passé et présent.

Tableau 8.4.3.2

Réponses associées aux trois niveaux de visée liée à un recours à l'histoire des sciences :
récapitulatif

Conclusion sur le recours à un contexte historique

Les familles I et T déclarent, dans leur ensemble, des connaissances introduites en histoire des sciences équivalentes et plutôt faibles, à quelques rares exceptions près (I5, I9, T3).

Autant la visée d'un recours à l'histoire des sciences est élevée dans la sous-famille I CPGE, autant elle est faible dans la famille T.

Aucun enseignant de la sous-famille I USA ne présente des connaissances introduites et une visée de l'histoire des sciences élevées.

La famille U présente des connaissances introduites 'intermédiaires' en histoire des sciences et une idée nette de la visée associée. Sans figurer parmi les points les plus problématiques, la catégorie 'histoire des sciences' est cependant plutôt du côté des points minorés de cette famille.

La famille MB présente les résultats les plus faibles, tant concernant les connaissances introduites que la visée associée.

On constate des tendances entre les réponses aux deux sous-catégories d'histoire des sciences :

Si les connaissances introduites en histoire des sciences sont générales (I5, I9, U6, T3), alors la visée associée est forte, de type compréhensif.

Si les connaissances introduites en histoire des sciences sont limitées, la visée associée peut être néanmoins élevée (cas de I7). Une faible maîtrise des données historiques en mécanique des fluides n'empêcherait pas pour autant de posséder une visée développée d'un recours à l'histoire des sciences.

Ceux introduisant de très faibles connaissances en histoire des sciences ne perçoivent pas l'apport pédagogique de l'histoire des sciences. Au mieux, l'une d'entre eux suggère la lecture optionnelle d'un document, qui est à mener par les élèves chez eux (MB2).

Enfin, l'intérêt d'aborder l'histoire des sciences en termes d'accès aux phases d'élaboration d'un modèle n'apparaît que faiblement dans les entretiens et la mise en évidence de l'aspect socialement construit des sciences l'est encore moins.

8.5 Contextes pédagogiques : nombre de supports

Répartition des enseignants en lien avec le nombre de supports

L'enjeu est ici uniquement d'indiquer le nombre de supports de contextualisation pédagogique retenue parmi vidéo, simulation et manip de cours afin d'estimer la variété de supports retenus par l'enseignant interrogé pour contextualiser son enseignement.

Les type de réponses associés correspondant à une donnée chiffrée (type de réponses ‘aucune’, ‘une’, ‘deux’ ou ‘trois’), nous ne fournissons pas de citations associées à chacun des types de réponse.

Concernant le nombre de supports de contextualisation pédagogique, la répartition des enseignants interrogés est indiquée dans le tableau 8.5.1.

Nous rappelons que nous n’avons pas étudié les justifications associées à ces réponses (cf tableau 8.1.2. A).

Nombre de supports de contextualisation pédagogique					
<i>Famille</i>	<i>Non abordé</i>	<i>Absente</i>	<i>Une**</i>	<i>Deux**</i>	<i>Trois**</i>
<i>I CPGE</i>		I11	I5 I7 I9		
<i>I USA</i>			I13 I14	I15	I20
<i>U</i>			U2	U5 U6	
<i>T</i>	<i>T6</i>			T1 T2	T3
<i>MB</i>	<i>MB7</i>	MB4 MB5	MB2 MB6 MB9	MB3 MB8	
<i>Total</i>	2	3	9	7	2

Tableau 8.5.1
Nombre de supports de contextualisation pédagogique

**[Une / Deux / Trois] formes retenues parmi vidéo, simulation, manip de cours.

On constate dans ce tableau 8.5.1 que le nombre de formes de contextualisation auxquelles se réfèrent les enseignants va croissant de la sous-famille I CPGE (au plus une forme de contextualisation) à la famille MB, la famille U, la sous-famille I USA et enfin la famille T (entre deux et trois formes de contextualisation en moyenne).

Rares sont les enseignants évoquant plus de deux supports de contextualisation (I20 et T3).

Au sein de la famille I, on note une différence entre les sous-familles I CPGE et I USA concernant les supports retenus : peu de variété chez les premiers et une prédominance du recours à la vidéo chez les seconds.

La vidéo apparaît comme un support de contextualisation pédagogique plus utilisé que la manip de cours ou la simulation dans les familles U, T, MB et I USA.

La sous-famille I CPGE et les enseignants MB exerçant en formation médicale française recourent peu ou pas à la vidéo.

Nous présentons de manière plus détaillée des réponses d'enseignants, par famille et sous-famille, dans le tableau 8.5.2.

Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

La sous-famille I CPGE évoque peu de supports de contextualisation pédagogique.

I5 justifie son non recours aux vidéos et aux simulations par son âge et sa vision de l'enseignement.

I7 évoque « *une banque d'images d'écoulements dans sa tête* », qui ne nécessitent pas selon lui d'être montrées via une vidéo ou une manip de cours.

I9 indique des contraintes en temps pour la préparation de son cours.

Dans la sous-famille I USA, I13, I14 et I15 mettent en avant leur recours à des vidéos prises sur Internet.

Elles sont visionnées et commentées en cours : par exemple, I14 évoque une vidéo YouTube sur la transition laminaire-turbulent d'un écoulement qu'il a employée dans le cours précédent. Généralement, il coupe le son car ce qui est dit dans la vidéo ne correspond pas nécessairement à ce qu'il veut aborder dans son cours.

I13 utilise des images et des vidéos visionnées en amont de la séquence d'enseignement pour contextualiser.

I15 indique ne pas réaliser de manipulations de cours.

Il exploite uniquement des vidéos Youtube en lien avec le quotidien des élèves : il cite par exemple des extraits de l'émission Jackass ou des vidéos en lien avec des sports nautiques. Auparavant, il utilisait des images mais désormais, il n'utilise que des vidéos, souvent suggérées par les étudiants eux-mêmes.

I15 procéderait de la sorte : la vidéo est visionnée devant la classe. Il pose une question de mécanique des fluides en lien avec ce qui est vu dans la vidéo. Les éléments de théorie nécessaires sont construits pendant la séquence d'enseignement puis appliqués à la situation

présentée dans la vidéo.

Il s'agit alors de mener des calculs et I15 insiste sur l'importance de la rigueur dans le raisonnement suivi. La validité du modèle retenu est discutée via ces exemples.

Seul I20 indique utiliser des manipulations de cours, qu'il privilégie aux vidéos (il se réfère à la comparaison suivante : « *You know seeing a tiger on National Geographic or seeing one here it's just not the same thing / it doesn't matter how close it is or how far it is* » (I20)). Il ne se souvient pas s'il a utilisé une manip de cours en lien avec la relation de Bernoulli mais indique : « *but it's good to have* ».

Dans la famille U, le recours à la vidéo et aux simulations est indiqué par U5 et U6 comme étant à visée illustrative.

Dans la famille T, un support utilisé par tous ses membres est la vidéo.

T1 fait visionner des vidéos pendant les temps vides de son exposé de cours.

T2 évoque des vidéos industrielles avec débit-mètres sur Youtube.

Les membres de la famille MB se réfèrent également à des vidéos, à l'exception de MB4 et de MB5.

Le recours à des photos de situations réelles plutôt que des situations schématisées dans les manuels est mis en avant par MB6. Elle utilise la vidéo pour introduire des phénomènes dynamiques. Pour autant, pas de vidéo d'écoulement sanguin dans ses séances de cours mais l'étude d'électro-encéphalogrammes.

Tableau 8.5.2

Nombre de supports de contextualisation pédagogique
Détail de réponses d'enseignants par famille et sous-famille

Conclusion

Représentation des résultats globaux sur les contextes retenus par les enseignants interrogés

Nous proposons ici une synthèse des résultats obtenus en termes de *Personal PCK 'Representation & Strategies'* associés aux 'contextes'. Comme indiqué dans le chapitre méthodologie, pour chaque enseignant retenu pour cette analyse, on code ses réponses en termes

de sous-catégories de *Personal PCK* en associant un chiffre au type de réponse qu'on lui a attribué.

On effectue alors une moyenne de ces valeurs chiffrées par famille et sous-famille.

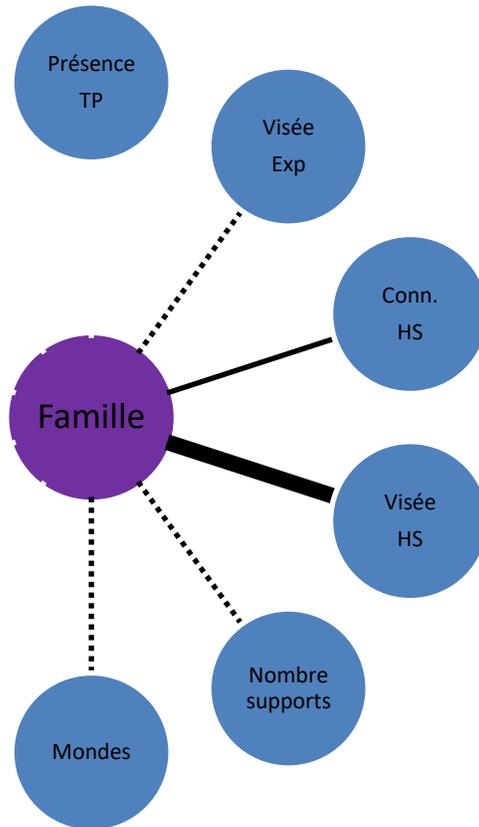
On associe à ces valeurs moyennes obtenues un type de trait comme rappelé dans le tableau 8.6.1.

Dimension	Sous-dimension	Catégorie	Sous-catégorie	Types de réponse	Type de trait associé	
Personal PCK Representations & Strategies	Contextes empiriques	Objets et phénomènes	Mondes de référence	Que scolaire	absence de trait	
				+ quotidien	trait fin en pointillé	
				+ actualités	trait fin en continu	
				+ recherche	trait épais en continu	
		Recours à l'expérimental	Visée	Inutile	absence de trait	
				Familiarisation pratique	trait fin en pointillé	
				Elaboration théorique	trait fin en continu	
				Investigation empirique	trait épais en continu	
				TP	Absence sans manque	absence de trait
					Absence et manque	trait fin en pointillé
	TP associés optionnels	trait fin en continu				
	TP associés obligatoires	trait épais en continu				
	Contextes pédagogiques	Recours à l'histoire des sciences	Visée	Absente ou jugée inutile	absence de trait	
				Annexe	trait fin en pointillé	
				Ludique ou illustrative	trait fin en continu	
				Compréhensive	trait épais en continu	
			Connaissances introduites	Faibles	absence de trait	
				Limitées	trait fin en pointillé	
				Spécifiques	trait fin en continu	
				Générales	trait épais en continu	
Supports		Nombre	Aucun	absence de trait		
			Un	trait fin en pointillé		
	Deux		trait fin en continu			
	Trois		trait épais en continu			

Tableau 8.6.1

Types de traits associés aux types de réponses retenues pour les 'fleurs' liées aux contextes

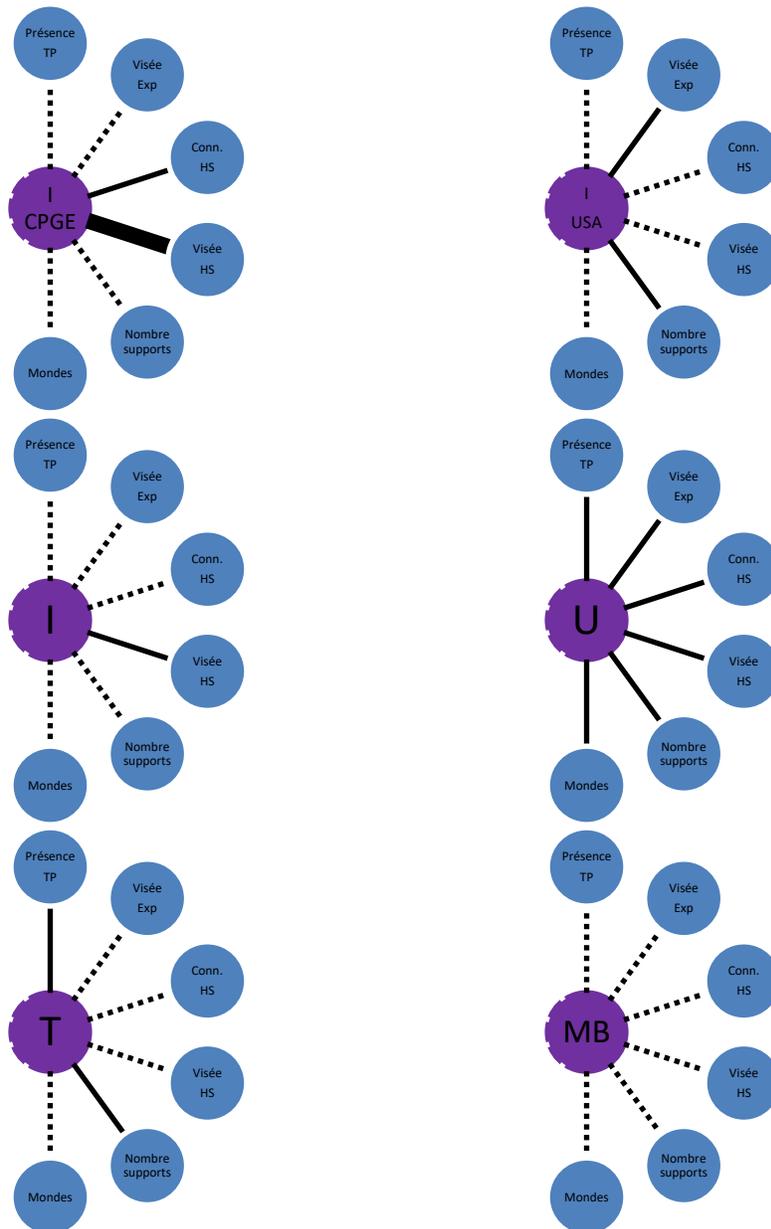
On obtient alors un diagramme en forme de 'fleur' comme indiqué dans le document 8.6.1.



Document 8.6.1
Exemple de bilan sur les contextes sous forme de fleur

On synthétise ainsi les réponses des différentes familles et sous-familles dans le document 8.6.2.

CONTEXTES
Bilan par famille et sous-famille



Document 8.6.2
Bilan sur les contextes par famille et sous-famille

Commentaires sur les résultats globaux associés aux contextes retenus par les enseignants interrogés

A partir du document 8.6.2, on constate que **la famille I présente un profil plutôt homogène de points minorés liés aux contextes** (5 points minorés sur les 6 retenus, à l'exception de la visée d'un recours à l'histoire des sciences).

La famille U présente un profil homogène de points valorisés concernant les contextes (6 points valorisés sur les 6 retenus).

La famille T présente un profil plutôt hétérogène, avec des points majorés et minorés à la fois parmi les éléments liés aux contextes (2 points valorisés sur les 6 retenus en lien avec les contextes, à savoir la présence de TP et le nombre de supports).

La famille MB présente le plus grand nombre de points minorés.

Concernant les contextes, au sein de la famille I, lorsque l'on compare les I CPGE et les I USA, on observe des profils différents entre ces deux sous-familles.

Les deux sous-familles présentent des points minorés liés aux mondes retenus et aux TP.

Par contre, les points valorisés et très valorisés des I CPGE, liés aux connaissances et à la visée d'un recours à l'histoire des sciences, constituent des points minorés des I USA.

De même, la visée d'un recours à l'expérimental et le nombre de supports retenus, qui sont des points minorés des I CPGE, constituent des points valorisés des I USA.

Si on met en perspective ces résultats avec la nature de la discipline (cœur / service), on constate que c'est la famille U, où la physique est une discipline de service, qui présente le plus de points valorisés concernant les contextes. Vient ensuite la famille T, où la physique peut être discipline de cœur ou de service, et ensuite la famille I, où la physique est discipline de cœur. Enfin, la famille MB, où la physique est discipline de service.

Le périmètre d'expertise sur les contextes apparaît plus étendu lorsque l'objet de savoir est un objet (familles I, U et T) plutôt qu'un outil (famille MB).

On constate également que les enseignants américains (U et I USA) semblent présenter un périmètre d'expertise sur les contextes plus étendu que les enseignants français.

Par ailleurs, en reprenant les résultats de ce chapitre, on constate que **les mondes retenus en termes de contextualisation empirique** se limitent aux cas classiques du domaine de formation enseigné (c'est le cas pour la majorité des T), à de la 'physique du quotidien' ou à de l'évocation de l'actualité. Aller jusqu'à chercher à s'appropriier des contextes issus par exemple d'article de recherche est nettement moins proposé. On le trouve cependant davantage chez les familles I et U que chez la famille T. Les membres de la famille MB se répartissent parmi les types de réponse proposés dans cette sous-catégorie de manière plus homogène que dans les autres sous-catégories analysées.

Au sein de la famille I, les mondes retenus sont variés.

Il s'agit de relier le savoir construit au quotidien de l'élève, de créer des ponts et de développer chez l'élève son analyse du monde qui l'entoure.

Par exemple, I15 indique que dans les vidéos et les exposés que les élèves ont à présenter sont évoquées des activités de loisirs : sports nautiques, football, baseball, constitution d'un fusil, mais aussi l'univers adolescent comme les vidéos de Jackass ou l'actualité (tsunami au Japon).

I15 cherche à connecter les élèves au « natural world ». Il cherche à montrer des comportements réels issus de la nature, en lien avec « some mysterious phenomenon of fluid mechanics ».

Cependant, rares sont les enseignants interrogés explicitant l'intérêt de diversifier les contextes afin de montrer l'étendue de la portée d'un modèle donné (I9, I13, I20).

On constate que la sous-famille I USA se limite davantage que la sous-famille I CPGE à des contextes liés au module qu'ils enseignent, de type technique et industriel (les I USA se réfèrent peu au sang ou aux cours d'eau).

Les exemples industriels sont peu présents chez les membres de la sous-famille I CPGE.

Les membres de la famille U ne se réfèrent qu'à des contextes liés au module qu'ils enseignent. Ainsi, U2 n'évoque que des contextes liés à la biophysique : un écoulement sanguin, un peu la respiration. U5 cite différents systèmes du corps humain : système respiratoire et lymphatique notamment.

Les principales sources de contextes retenus par U6 sont liées au génie civil, qui correspond au département auquel est rattaché le module qu'il enseigne. U6 cite les jets d'eau de l'hôtel Bellagio à Las Vegas. Il indique également étudier des manomètres et des transducteurs de pression.

Les contextes retenus par les membres de la famille T sont plutôt reliés aux thématiques à aborder dans leurs modules (par exemple, T1 et T2 utilisent des vidéos présentant des débit-mètres de différente nature).

Au sein de la famille MB, la contextualisation se limite principalement au corps humain. Les autres types de référence sont utilisés uniquement comme outil pédagogique pour illustrer le propos du cours : par exemple, l'analogie avec le ballon est employée par MB5 pour l'étude des poumons et MB7 indique se référer à des exemples du quotidien lorsqu'il s'agit d'expliquer le cours en tête-à-tête avec un étudiant.

Signalons que lorsque les enseignants interrogés justifient leur réponse, c'est dans la catégorie sur les objets et phénomènes qu'ils se réfèrent souvent à l'élève, au bénéfice qu'il peut en tirer. Ce n'est pas aussi marqué pour le recours à l'expérimental par exemple.

Les I sont partagés en termes de **recours à l'expérimental**.

On constate qu'au sein de l'échantillon étudié, les enseignants qualifiés de I, pour qui la visée ressentie de la formation est d'être capable d'exploiter des cas différents de ceux du cours, soutiennent aussi la présence de TP dans la formation (I5, I20).

Par contre, ceux parmi les I pour qui la visée ressentie de la formation est d'appliquer des lois dans un contexte donné indiquent qu'il n'y a pas de TP associés. Certains le regrettent (cas de I CPGE), les autres non, jugeant la présence de TP inutile (cas de plusieurs I USA).

Si la confrontation entre la prévision théorique et la constatation expérimentale est à mettre en avant pour certains (I5, I9), elle est au contraire délibérément occultée par d'autres (I11).

On note une variété de réponses des enseignants I USA et U.

Par exemple, dans la famille U, on constate une démarche expérimentale ambitieuse chez U5 et une approche plus traditionnelle chez U2 et U6.

Pour les U, s'il n'y a pas de TP associé, c'est considéré comme un manque.

Les enseignants de la famille T interrogés ne conçoivent pas un enseignement de mécanique des fluides sans travaux pratiques associés.

On perçoit dans les réponses recueillies qu'il s'agit davantage d'acquérir des connaissances pratiques (mesurer un débit, évaluer une perte de charge, dimensionner un réseau) que d'interroger les modèles retenus.

Seul T3 présente une réponse très construite en termes d'interaction entre théorie et expérimental.

Les réponses sont contrastées au sein de la famille MB : soit la présence de TP associée est jugée inutile (pour la majorité d'entre eux), soit elle est présente (MB6, MB7).

Contrairement aux U et aux MB qui mettent en avant les contraintes matérielles pour justifier l'absence de TP (très grands effectifs en MB, contraintes en matériel et / ou en personnel disponibles pour certains I CPGE, U et MB), les I USA jugent la présence de TP inutile par choix pédagogique.

Les connaissances introduites en histoire des sciences, en lien avec la mécanique des fluides, correspondent à la sous-catégorie analysée qui est minorée pour toutes les familles.

La période évoquée dans ce travail de thèse ne semble connue que de I5 et de T3. Il s'agit pourtant de la période historique correspondant aux attendus de la plupart des programmes et syllabus de cours introductifs à la mécanique des fluides.

La visée d'un recours à l'histoire des sciences est un point minoré pour la majorité des enseignants. Ce constat s'appliquerait en particulier aux I USA, aux T et aux MB. Seule exception pour cette sous-catégorie, les I CPGE, qui ont plutôt tendance à énoncer une pensée construite quant à l'intérêt du recours à l'histoire des sciences en situation d'enseignement.

La variété des supports de contextualisation pédagogique évoqués parmi les manipulations de cours, simulation et vidéo est faible (limitée à une forme) pour moitié des enseignants interrogés. Ce sont ceux de la famille I qui diversifient le moins la forme de support retenu, même s'il s'agit d'aborder des contextes variés.

On note une différence entre les sous-familles I CPGE et I USA concernant les supports retenus : peu de variété chez les premiers et une prédominance du recours à la vidéo chez les seconds.

Les U et les MB diversifient davantage les formes de contextualisation que les I.

Ce sont les T qui les diversifient le plus.

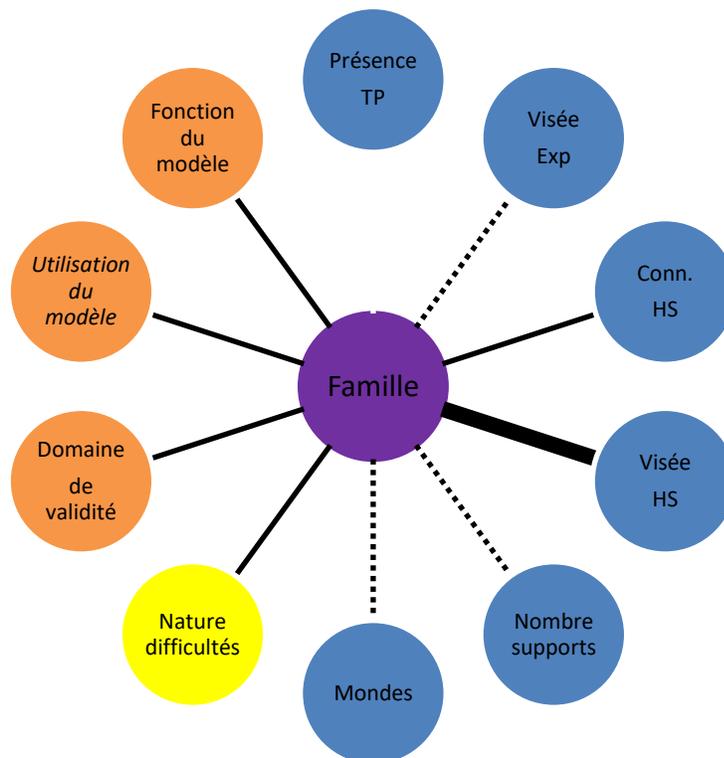
Chapitre 9 Discussion

Nous débutons par un rapprochement des résultats des chapitres 7 et 8 par famille et par périmètre d'expertise, que nous prolongeons par un rapprochement avec des variables explicatives et des résultats indiqués dans la littérature.

9.1 Rapprochement des résultats des chapitres 7 et 8 par famille

9.1.1 Représentation du bilan général des PCK par famille

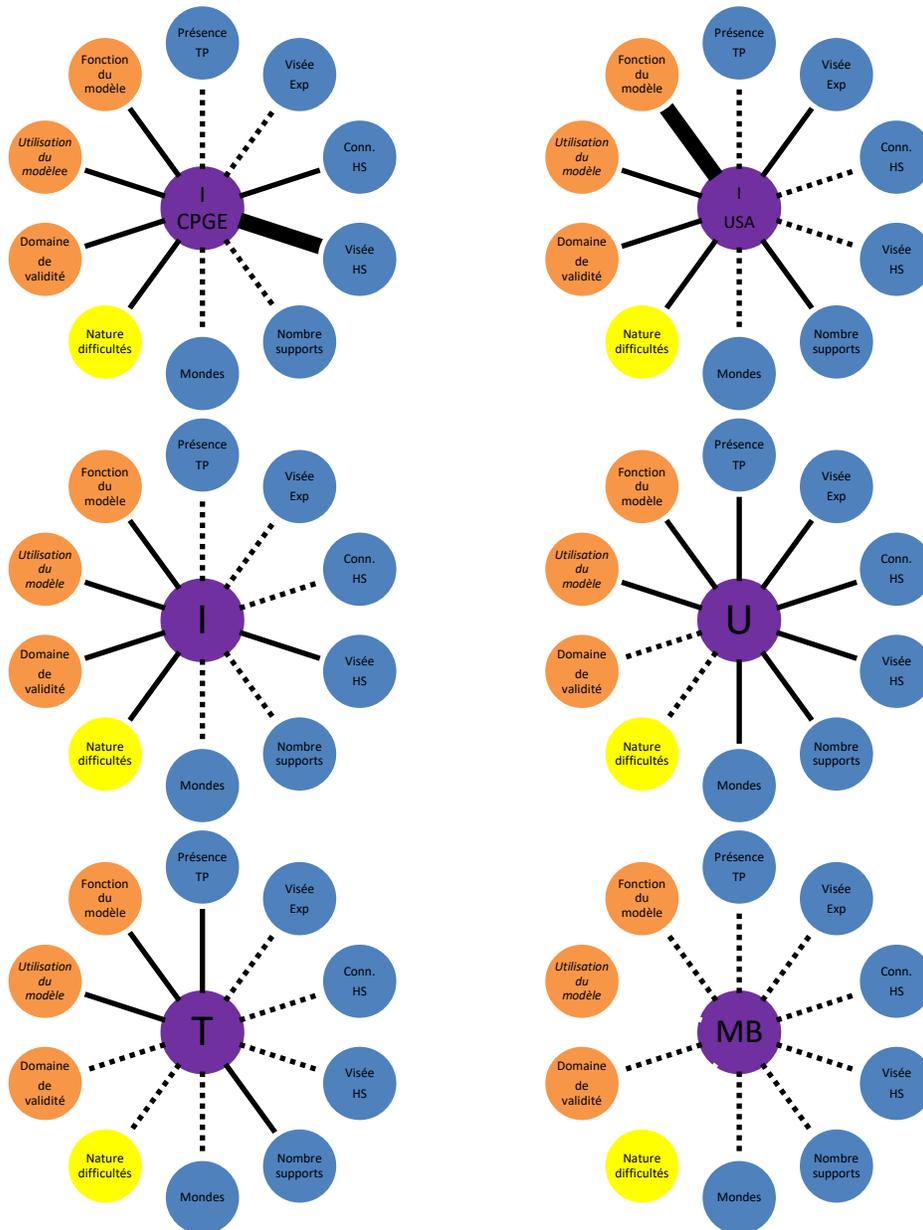
Nous réunissons dans le document 9.1.1 les représentations des résultats obtenus aux chapitres 7 et 8. Y figurent la majorité des éléments liés aux catégories de *Personal PCK* abordées dans ce manuscrit. Nous rappelons que nous avons retenu des éléments liés à ce que les enseignants disent qu'ils font (éléments indiqués avec une police de caractères droit) et un élément lié à ce qu'ils sont susceptibles de faire (élément 'Utilisation du modèle' indiqué en italique). En orange sont représentés les éléments liés aux modèles, en bleu ceux liés aux contextes et en jaune celui lié aux élèves.



Document 9.1.1
Exemple de bilan général sous forme de fleur

Nous représentons les résultats obtenus par famille et sous-famille aux chapitres 7 et 8 dans le document 9.1.2.

Bilan général par famille et sous-famille



Document 9.1.2
Bilan général par famille et sous-famille

9.1.2 Commentaires sur les tendances observées dans les familles et les sous-familles

Nous constatons que des points valorisés et des points minorés se dégagent d'une famille à l'autre. Nous décrivons les familles par homogénéité décroissante des profils observés. Nous détaillons ensuite des éléments de comparaison entre familles et sous-familles.

Les familles U et MB apparaissent comme étant les familles présentant les profils les plus homogènes.

La famille U présente le plus grand nombre de points valorisés (8 sur les 10 retenus) et un profil homogène de points valorisés concernant les contextes (6 points valorisés sur les 6 retenus).

Les points minorés de cette famille concernent le domaine de validité du modèle et la nature des difficultés des élèves.

La famille MB présente le plus grand nombre de points minorés.

Ceux très minorés de la famille MB concernent l'utilisation du modèle et la nature des difficultés des élèves.

La famille I présente un profil homogène de points valorisés en lien avec la démarche de modélisation (3 points valorisés sur les 3 retenus) **et la nature des difficultés des élèves**. Cette famille présente également **un profil plutôt homogène de points minorés liés aux contextes** (5 points minorés sur les 6 retenus, à l'exception de la visée d'un recours à l'histoire des sciences).

La famille T présente un profil plutôt hétérogène, avec des points majorés et minorés à la fois parmi les éléments liés aux modèles et les éléments liés aux contextes (2 points valorisés sur les 3 retenus en lien avec les modèles, à savoir la fonction et l'utilisation du modèle, et 2 points valorisés sur les 6 retenus en lien avec les contextes, à savoir la présence de TP et le nombre de supports). La nature des difficultés des élèves est un point minoré pour cette famille.

En termes de modèles et de modélisation, la famille I présente le profil contenant le plus de points valorisés (3 points valorisés sur les 3 retenus).

Les familles U et T présentent les deux mêmes points valorisés, leur point minoré étant le domaine de validité du modèle.

La famille MB présente un profil contenant le plus de points minorés.

En termes de contextes, c'est la famille U qui présente le profil contenant le plus de points valorisés (6 points valorisés sur les 6 retenus).

La famille T présente 2 points valorisés (la présence de TP et le nombre de supports), la famille I un seul (la visée d'un recours à l'histoire des sciences) et la famille MB, aucun.

Concernant la nature des difficultés des élèves, il s'agit d'un point valorisé pour la famille I et d'un point minoré pour les familles U et T.

Au sein de la famille I, lorsque l'on compare les I CPGE et les I USA, ces deux sous-familles présentent **5 points identiques**, à savoir le domaine de validité du modèle, son utilisation, la présence de TP, les mondes évoqués et la nature des difficultés des élèves.

La fonction du modèle, point valorisé chez les I CPGE, est très valorisée chez les I USA. La visée d'un recours à l'expérimental et le nombre de supports, peu valorisés chez les I CPGE, sont valorisés chez les I USA.

Les connaissances en histoire des sciences sont valorisées et le recours à l'histoire des sciences est très valorisé chez les I CPGE alors que ces points sont minorés chez les I USA.

On constate **dans ces deux sous-familles une homogénéité des points liés avec la démarche de modélisation, qui sont valorisés**, voire très valorisé pour les I USA concernant la fonction du modèle.

Concernant les contextes, on observe des profils plus différents entre ces deux sous-familles.

Les deux sous-familles présentent des points minorés liés aux mondes retenus et aux TP. Par contre, les points valorisés et très valorisés des I CPGE, liés aux connaissances et à la visée d'un recours à l'histoire des sciences, constituent des points minorés des I USA. De même, la visée d'un recours à l'expérimental et le nombre de supports retenus, qui sont des points minorés des I CPGE constituent des points valorisés des I USA.

Par ailleurs, on constate qu'en élargissant la palette des catégories de PCK étudiées, la répartition des points majorés et minorés peut varier.

Par exemple, la famille I, qui présente un profil homogène de points valorisés en lien avec les modèles, a un profil plus hétérogène lorsque l'on prend en compte les contextes.

De même, on constate que pour la famille U, qui présente un profil homogène élevé de points associées aux modèles et aux contextes, il apparaît un point minoré lié aux difficultés des élèves. Ainsi, d'un profil homogène élevé associé à des dimensions de *Personal PCK Representations & Strategies*, on constate une possibilité de davantage d'hétérogénéité lorsque l'on aborde des dimensions de *Personal PCK Student Learning & Conceptions*.

Enfin, gardons en tête que les diagrammes du document 9.1.1 reflètent des moyennes réalisées à partir d'effectifs faibles et sur des familles qui présentent parfois une inhomogénéité en leur sein (cas de la famille I par exemple). Ainsi, on a pu constater des variations importantes d'un individu à un autre lorsqu'on les confronte à des questionnements inhabituels.

9.1.3 Commentaires sur les hypothèses de recherche

Nous reprenons ici les hypothèses de recherche évoquées au paragraphe 4.2 que nous commentons.

Comme attendu, les connaissances et le recours à l'histoire des sciences sont plutôt faibles de la part des enseignants interrogés, à l'exception notable de la sous-famille I CPGE.

Le manque de réflexion épistémologique des enseignants sur leurs pratiques enseignantes, notamment en lien avec les modèles, a été constaté chez certains mais un nombre non négligeable d'enseignants présentent au contraire une démarche de réflexion développée sur leurs pratiques.

Par ailleurs, on constate que les enseignants américains (U et I USA) semblent présenter un périmètre d'expertise sur les contextes plus étendu que les enseignants français I CPGE, ce qui corrobore notre hypothèse de recherche. Par contre, l'écart n'est pas aussi marqué qu'attendu

concernant le recours à l'expérimental.

Des écarts ont été repérés en lien avec la discipline de rattachement et le statut du savoir.

Si on met en perspective nos résultats avec la nature de la discipline (cœur / service), il semblerait que le périmètre d'expertise sur les modèles soit plus étendu lorsque la physique est une discipline de cœur que lorsqu'elle est une discipline de service, ce que l'on ne retrouve pas pour les contextes.

En termes de statut du savoir, (objet / outil), il semblerait que le périmètre d'expertise sur les modèles et sur les contextes soit plus étendu lorsque l'objet de savoir est un objet plutôt qu'un outil.

Concernant le changement de modèle opéré par les enseignants en fonction du domaine et des capacités supposées de leurs élèves évoqué par Hodson (2008), nous avons constaté des écarts entre les réponses des enseignants des familles I et MB, vérifiant en cela les propos d'Hodson, mais également des réponses très variées en termes de modélisation notamment, au sein d'une même famille (la famille I par exemple).

Enfin, au sein d'une famille donnée, si l'on considère non seulement les résultats sur les modèles mais aussi ceux sur les contextes, des spécificités individuelles ont été constatées, notamment T3 qui présente une démarche de réflexion sur sa pratique enseignante bien plus développée que ses collègues de la famille T.

9.2 Rapprochement des résultats des chapitres 7 et 8 par 'périmètre d'expertise' relatif aux modèles et aux contextes

A la fin du chapitre 7, nous avons proposé un regroupement des enseignants qualifiés de physique en 3 groupes, en fonction de leur périmètre d'expertise sur les modèles et la modélisation.

Un tel regroupement est-il pertinent pour les caractériser sur les contextes ?

Ceux proposant en entretien une riche vision d'ensemble d'un modèle, comme c'est le cas de la famille I, indiquent-ils avoir recours à une riche variété de contextes ?

Les enseignants ayant été le moins déstabilisé en entretien par les questions liées aux modèles sont-ils les mêmes que ceux qui utilisent la plus grande variété de contextes à disposition ?

9.2.1 Tableau comparatif des enseignants en termes de modèles et de contextes

Dans le tableau 9.2.1, nous reprenons les résultats du tableau 7.5.2 sur la modélisation, que nous couplons à ceux des tableaux 8.2.1, 8.3.1.1, 8.4.2 et 8.5.2 sur les sous-catégories de PCK 'Mondes de référence', 'Visée d'un recours à l'expérimental', 'Visée d'un recours à l'histoire des sciences' et 'Nombre de supports'.

Pour une sous-catégorie donnée de PCK en lien avec les contextes, une couleur de plus en plus intense symbolise un ‘périmètre d’expertise’ de plus en plus élevé dans cette sous-catégorie.

		Modélisation								
		Modélisation limitée			Intermédiaire			Modélisation développée		
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	I11	T1	T2	I7				I20	
	Intermédiaire	I14			I15	U6		I9		T3
	Développée				U5			I5	I13	
Visée recours expérimental	Limitée	I11	I14	T1	T2			U6		
	Intermédiaire					I7	I15		I5	I9
	Développée						U5			I20
Visée HS	Limitée		I14	T1	T2					
	Intermédiaire	I11					I15			
	Développée					I7		U5	U6	I5
Nombre de supports	Limitée	I11	I14			I7				
	Intermédiaire			T1	T2		I15	U5	U6	I5
	Développé									I9
										I13
										I20
										T3

*Tableau 9.2.1
Répartition des enseignants sélectionnés
en lien avec leur périmètre d’expertise sur modèles et contextes*

9.2.2 Commentaires généraux

Au chapitre 7, parmi les enseignants qualifiés de ‘physique’, trois groupes d’enseignants se dessinaient en lien avec leur périmètre d’expertise sur modèles et modélisation : un groupe ‘modélisation développée’ (I5, I9, I13, I20, T3), un groupe ‘modélisation intermédiaire’ (I7, I15, U5, U6, T6) et un groupe ‘modélisation limitée’ (I11, I14, T1, T2).

Si nous observons leur répartition dans le tableau 9.2.1, nous constatons que les enseignants du groupe ‘modélisation limitée’ présentent plus que les autres une variété de nature de contexte empirique, des connaissances en histoire des sciences et une visée associée à l’histoire des sciences limitées. Le recours à l’expérimental est davantage associé à une familiarisation pratique pour eux que pour les autres enseignants.

De plus, en termes de justification de la visée qu'ils associent à l'histoire des sciences, aucun enseignant du groupe 'modélisation limitée' n'évoque un choix pédagogique lié à l'apprentissage alors qu'une majorité des enseignants des deux autres groupes s'y réfèrent.

Il en va de même pour justifier la variété de nature de contexte empirique, à l'exception de I14 (I14 a un vécu d'expert en mécanique des fluides mais est un enseignant novice).

Des choix pédagogiques liés à l'apprentissage apparaissent lorsqu'il s'agit de justifier le non recours à l'expérimental (I11, I14). Par contre, lorsque les membres du groupe 'modélisation limitée' justifient un éventuel recours à l'expérimental, ils ne se réfèrent pas à des choix pédagogiques liés à l'apprentissage mais uniquement à des causes institutionnelles (il s'agit d'appliquer le programme).

En termes de contextes, la distinction entre les enseignants des groupes 'modélisation développée' et 'modélisation intermédiaire' est plus ténue : la répartition de leurs réponses en termes de variété de nature de contexte empirique, de recours à l'expérimental, de connaissances et de visée associée à l'histoire des sciences sont similaires.

De plus, ils sont une majorité à justifier leurs réponses en se référant notamment à des choix pédagogiques liés à l'apprentissage.

Les enseignants du groupe 'modélisation développée' présentent des réponses plutôt riches dans les différentes catégories liées aux contextes.

Deux exceptions sont à noter : l'histoire des sciences pour I13 et I20 et le nombre de supports de contextualisation pédagogique pour I5, I9 et I13.

Concernant l'histoire des sciences, ce constat s'explique par la vision personnelle d'I13 et d'I20 de ce qu'est l'histoire des sciences. Pour le nombre de supports de contextualisation pédagogique, les justifications varient d'un enseignant à l'autre.

9.2.3 Remarque sur la comparaison des enseignants en termes d'attitudes et de périmètre d'expertise sur les modèles

Dans le tableau 9.2.3, nous reprenons les résultats du tableau 7.5.2 sur la modélisation, que nous couplons cette fois-ci à ceux du tableau 7.3.3.1 sur l'attitude émotionnelle des enseignants interrogés face à la question Q17 'pertes de charge'.

Une couleur de plus en plus intense est associée à une attitude de plus en plus assurée.

On n'y constate qu'aucun des membres du groupe 'modélisation limitée' ne présente une attitude assurée face à la question Q17.

Ceux du groupe 'modélisation intermédiaire' se répartissent sur les 3 attitudes retenues et ceux du groupe 'modélisation développée' sont soit perturbés, soit assurés.

En comparant les tableaux 9.2.1 et 9.2.3, nous observons que sur les trois enseignants placés dans la catégorie « contextualisation empirique développée » (U5, I5 et I13), un seul a une attitude assurée (I13).

		Modélisation								
		Modélisation limitée			Intermédiaire			Modélisation développée		
'Attitude'	Perturbé	I11	T1	T2	I7			I5	I9	I20
	Neutre	I14			I15 U5					
	Assuré				U6			I13 T3		

Tableau 9.2.3
Répartition des enseignants sélectionnés
en lien avec leur périmètre d'expertise sur modèles et leur 'attitude'

9.3 Rapprochement des résultats des chapitres 7 et 8 en lien avec les élèves

9.3.1 Commentaire général sur la place des élèves dans le discours des enseignants interrogés

Concernant la prise en compte du mode d'apprentissage des élèves, Bachelard est critique envers les enseignants du début du vingtième siècle et l'évoque en ces termes : « *J'ai souvent été frappé du fait que les professeurs de sciences, plus encore que les autres si c'est possible, ne comprennent pas qu'on ne comprenne pas. Peu nombreux sont ceux qui ont creusé la psychologie de l'erreur, de l'ignorance et de l'irréflexion* » (Bachelard, 1934, p.21). Qu'en est-il de nos jours ?

La place donnée aux élèves par l'enseignant est un aspect important des pratiques attendues d'un enseignant : l'enseignant a-t-il conscience des difficultés de ses élèves ? Prend-il appui dessus pour construire le cours ?

Lors de l'analyse des entretiens menés, on a constaté que la référence aux élèves est quasiment absente du discours de quelques enseignants (I7 et MB1) et que l'élève peut être perçu comme un élément face auquel l'enseignant se confronte (I1).

Pour d'autres, même lorsque les élèves sont cités, ils ne constituent pas pour autant un élément central du discours (T1, I5, MB3).

9.3.2 Commentaires sur les justifications évoquées aux chapitres 7 et 8 en lien avec les élèves

Nous reprenons les éléments collectés en entretien qui ont déjà été évoqués aux chapitres 7 et 8, en observant cette fois-ci comment se répartissent les enseignants en fonction de la prise en compte des élèves dans la justification de leur discours et de leur périmètre d'expertise.

En lien avec **la nature des difficultés des élèves** indiquées par les enseignants, le tableau 9.3.2.1 est une variante du tableau 7.2.4, dans lequel l'enseignant est indiqué en noir, lorsqu'il présente une modélisation limitée, en **gras**, lorsqu'il présente une modélisation intermédiaire et en **gras souligné**, lorsqu'il présente une modélisation développée.

Enseignants qualifiés de 'physique' Nature des difficultés des élèves sur la situation évoquée à la question Q15 ('rétrécissement')				
Famille	Aucune difficulté	Mathématique	Physique	
			Conceptuelles naïves	Liées au modèle
<i>I CPGE</i>	I11		I7	<u>I5</u> <u>I9</u>
<i>I USA</i>	<u>I13</u> I14	I15		<u>I20</u>
<i>U</i>	U5 U6			
<i>T</i>	T2	T1	<u>T3</u>	

Tableau 9.3.2.1

Cas des enseignants qualifiés de physique : nature des difficultés des élèves sur la situation évoquée à la question Q15 'rétrécissement'

Comme indiqué au chapitre 7, les enseignants présentant une modélisation faible ou intermédiaire auraient tendance à ne pas associer de difficultés à la question Q15 'rétrécissement' ou s'ils lui en associent, elles seraient plutôt de nature mathématique, tandis que ceux présentant une modélisation développée lui associeraient plutôt des difficultés liées au modèle.

Signalons que la conception naïve sur le fait que la pression augmente lors d'un rétrécissement, évoquée en entretien par I7 et par T3, a été observée lors de la pré-enquête auprès d'étudiants français et américains. Les élèves semblent suivre un raisonnement spontané en assimilant le comportement du fluide à celui d'un ensemble d'objets solides tassés.

Concernant **les objets et phénomènes**, la répartition des enseignants en lien avec les justifications avancées est rappelée dans le tableau 9.3.2.2. Dans ce tableau adapté du tableau 8.2.3.1, l'enseignant est indiqué en **gras**, lorsqu'il présente une modélisation intermédiaire et en **gras souligné**, lorsqu'il présente une modélisation développée. On rappelle que U2 et T6 ne sont pas classés en termes de périmètre d'expertise en modélisation.

Justifications en lien avec la variété d'objets et de phénomènes							
Famille	Non abordé	Aucune	Contexte social		Orientations		
			Local (logistique)	Institutionnel (programme)	Enseigner	Apprendre (affectif)	Apprendre (cognitif)
<i>I</i> <i>CPGE</i>		I11		<u>I9</u>	<u>I5</u> <u>I7</u>	<u>I5</u>	<u>I5</u> <u>I9</u>
<i>I</i> <i>USA</i>			I14			I14 <u>I15</u> <u>I20</u>	<u>I13</u> I14 <u>I15</u> <u>I20</u>
<i>U</i>					<u>U5</u>		U2 <u>U5</u> <u>U6</u>
<i>T</i>	<i>T6</i>			T2 <u>T3</u>	T1 T2	T1 T2 <u>T3</u>	
<i>MB</i>	<i>MB2</i> <i>MB3</i>		MB5		MB5	MB4 MB6 MB7	MB8 MB9
<i>Total</i>	3	1	2	3	6	10	11

Tableau 9.3.2.2
Justifications en lien avec la variété d'objets et de phénomènes

Parmi les contextes et les orientations, les deux justifications les plus citées par les enseignants pour la variété d'objets et de phénomènes relèvent d'une composante de l'orientation centrée sur

les élèves (cognitive ou affective).

La composante affective de l'orientation centrée sur les élèves est repérée chez 10 enseignants sur les 23 étudiés dont 50% des enseignants qualifiés de physique, parmi lesquels les $\frac{3}{4}$ des I USA, les $\frac{3}{4}$ des T, $\frac{1}{4}$ des I CPGE et aucun U.

La composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves est repérée chez 11 enseignants sur les 23 étudiés dont 60% des enseignants qualifiés de physique parmi lesquels 100% des I USA, 100% des U, la moitié des I CPGE et aucun des T. La population américaine (I USA et U) évoquerait donc davantage la composante cognitive que la population française (I CPGE, T1, T2 et T3).

Ceux qui ne se réfèrent pas aux élèves donnent des justifications relevant d'une orientation centrée sur les enseignants (I7 et MB5), voire aucune justification (I11).

On constate que la référence aux élèves est très présente dans le discours des enseignants justifiant la variété d'objets et de phénomènes déclarée et ce, quel que soit le périmètre d'expertise en modélisation. De plus, le type de justification faisant intervenir les élèves apparaîtrait comme étant propre à chaque famille et sous-famille.

On constate également que davantage d'enseignants proposant une modélisation développée (4 enseignants sur 5) que limitée (2 enseignants sur 4 parmi ceux qualifiés de physique) présentent une composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves.

Concernant **le recours à l'expérimental**, la répartition des enseignants en lien avec les justifications avancées est rappelée dans le tableau 9.3.2.3.

Dans ce tableau adapté du tableau 8.3.3.1, l'enseignant est indiqué en **gras**, lorsqu'il présente une modélisation intermédiaire et en **gras souligné**, lorsqu'il présente une modélisation développée.

Justification d'un recours à l'expérimental							
Famille	Non abordée	Causes d'un non recours à l'expérimental				Causes d'un recours à l'expérimental	
		Contexte social		Orientations		Contexte institutionnel	Orientations
		Local (Logistique)	Institutionnel (Programme)	Enseigner	Apprendre (cognitif) Non nécessaire	Institutionnel (Programme)	Apprendre (cognitif) Nécessaire
<i>I CPGE</i>		<u>15</u> <u>17</u> <u>19</u>	<u>15</u> <u>19</u>	<u>17</u> <u>19</u>	I11		<u>15</u>
<i>I USA</i>		I14	I14		<u>I13</u> I14 I15		<u>I20</u>
<i>U</i>		U2 U6					U5
<i>T</i>						T1 T2 <u>T3</u> T6	<u>T3</u> T6
<i>MB</i>	<i>MB2</i> <i>MB9</i>	MB3 MB4 MB5 MB8			MB8	MB6 MB7	
<i>Total</i>	2	10	3	2	5	6	5

Tableau 9.3.2.3
Justification d'un recours à l'expérimental

Dans l'échantillon analysé, **les enseignants qui n'ont pas recours à l'expérimental** le justifient principalement par le contexte local dans lequel ils exercent ($\frac{3}{4}$ d'entre eux, soit 10 enseignants sur 13, dont 6 enseignants sur 7 qualifiés de physique).

Plusieurs d'entre eux couplent cette justification à une autre, la justification suivante la plus citée relevant de la composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves (5 enseignants sur 13).

Aucun enseignant n'évoque la composante affective de l'apprentissage.

Dans l'échantillon analysé, les justifications **des enseignants qui ont recours à l'expérimental** peuvent être catégorisées pour moitié par le contexte institutionnel (uniquement des membres de la famille T), pour moitié par une composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves (c'est le cas des membres des familles I et U).

Seuls deux enseignants sur les 9 se réfèrent aux deux justifications (T3 et T6).

Aucun enseignant n'évoque de composante affective de l'orientation centrée sur les élèves.

Ceux n'ayant pas recours à de l'expérimental auraient plus tendance à présenter plusieurs justifications que ceux déclarant y avoir recours (5 enseignants sur 13 n'ayant pas recours à de l'expérimental présentent plusieurs justifications tandis que 2 enseignants sur 9 ayant recours à de l'expérimental en présentent plusieurs).

On constate qu'au sein de l'échantillon étudié, la référence aux élèves est aussi prédominante pour justifier un non recours à l'expérimental qu'un recours à celui-ci.

Se référer aux élèves n'est mis en avant qu'à travers une composante cognitive de l'orientation. Personne n'évoque d'aspects liés à une composante affective de l'orientation au sein de l'échantillon étudié.

On constate également que davantage d'enseignants proposant une modélisation développée (3 enseignants sur 5) que limitée (1 enseignant sur 4) présentent une composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves.

Concernant **la visée associée à un recours à l'histoire des sciences**, la répartition des enseignants en lien avec les justifications avancées est rappelée dans le tableau 9.3.2.4.

Dans ce tableau adapté du tableau 8.4.3.1. B, l'enseignant est indiqué en **gras**, lorsqu'il présente une modélisation intermédiaire et en **gras souligné**, lorsqu'il présente une modélisation développée.

(Quasi non) recours à l'histoire des sciences					Recours à l'histoire des sciences			Recours à l'histoire des sciences			
Niveau 0					Niveau 1			Niveau 2			
Contexte institutionnel		Orientations			Orientations			Contexte institutionnel	Orientations		
Institutionnel (programme)	Local (logistique)	Enseigner	Apprendre (affectif)	Apprendre (cognitif)	Enseigner	Apprendre (affectif)	Apprendre (cognitif)	Institutionnel (programme)	Enseigner	Apprendre (affectif)	Apprendre (cognitif)
					I11	I11		<u>I9</u>	I7	<u>I5</u>	<u>I5</u> I7 <u>I9</u>
I14 <u>I20</u>	I14	<u>I13</u> <u>I20</u>	I14 <u>I20</u>	<u>I20</u>	I15	I15					
		U2							U6	U6	U5 U6
T2		T1 T2	T1		T6				<u>T3</u>	<u>T3</u>	<u>T3</u>
MB2 MB8 MB9	MB8 MB9	MB6 MB7 MB8 MB9	MB5 MB6			MB4			MB3		MB3
6	3	9	5	1	3	3	0	1	4	3	7

Tableau 9.3.2.4

*Justifications de la visée associée à un recours à l'histoire des sciences
Réarrangement de la population en fonction du niveau attribué à cette visée*

Les justifications de ceux qui présentent un niveau 0 en termes de recours à l'histoire des sciences ont une composante de l'orientation principalement centrée sur eux-mêmes ($\frac{3}{4}$ d'entre eux) et sont liées à un contexte institutionnel (la moitié d'entre eux).

Les élèves ne sont évoqués que par environ un tiers d'entre eux via une composante affective de l'orientation. Seul un d'entre eux évoque les élèves selon une composante cognitive.

Les justifications de ceux qui présentent un niveau 1 en termes de recours à l'histoire des sciences ont une composante de l'orientation principalement centrée sur eux-mêmes ($\frac{3}{4}$ d'entre eux) ou affective, en lien avec les élèves ($\frac{3}{4}$ d'entre eux). Aucun d'entre eux ne se réfèrent à du cognitif en lien avec les élèves ou aux contextes.

Les justifications de ceux qui présentent un niveau 2 en termes de recours à l'histoire des sciences ont toutes une composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves. Ils ajoutent une justification qui présente une composante affective de l'orientation centrée sur les élèves pour moitié d'entre eux et qui est centrée sur eux-mêmes pour l'autre moitié. Aucun d'entre eux ne se réfère aux contextes.

On constate qu'au sein de l'échantillon étudié, se référer aux élèves pour justifier leurs réponses va crescendo avec le niveau que les enseignants attribuent à la visée d'un recours à l'histoire des sciences : ceux de niveau 0 ou 1 ne se réfèrent quasiment pas à des raisons cognitives pour justifier leurs choix, contrairement à ceux de niveau 2 qui s'y réfèrent tous.

Parmi les 7 enseignants présentant un niveau 2, 3 figurent parmi ceux proposant une modélisation développée et que davantage d'enseignants proposant une modélisation développée (4 enseignants sur 5) que limitée (1 enseignant sur 4) présentent une composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves.

Ainsi, qu'il s'agisse de justifier la variété d'objets et de phénomènes, le recours à l'expérimental ou à l'histoire des sciences, on constate que davantage d'enseignants proposant une modélisation développée que limitée présentent une composante cognitive de l'orientation centrée sur les élèves.

9.3.3 Confrontation des choix d'un enseignant aux propos d'un de ses étudiants

A travers l'exemple d'un étudiant et d'un enseignant associé (I15), nous faisons constater les conséquences sur l'apprentissage d'un étudiant que peuvent avoir certains choix pédagogiques.

I15 figure parmi les enseignants ayant correctement répondu à la question Q17 'pertes de charge'. De plus, il justifie ses choix pédagogiques et se réfère à ses étudiants. Vu son âge, il présente également un vécu important en tant qu'enseignant et chercheur.

Comparé à d'autres enseignants présentant un profil similaire (I12, I13, I16, I5), deux choix pédagogiques, de nature différente, le distinguent : d'une part une volonté de sa part de se limiter à l'étude d'un écoulement 'parfait' sans insister sur le domaine de validité associé et d'autre part un refus assumé de réaliser des manipulations de cours lors de ses séquences d'enseignement.

Une opportunité s'est présentée, permettant de constater une conséquence de ces choix pédagogiques sur un de ses étudiants.

En effet, l'entretien avec I15 a subi une interruption due au passage d'un de ses étudiants qui souhaitait solliciter un rendez-vous avec lui. I15 en profite pour me présenter cet étudiant junior qu'il considère comme un des meilleurs étudiants du groupe. I15 m'invite à l'interviewer. Par politesse, j'accepte et nous convenons d'une date. A ce stade de ma thèse, il avait été décidé d'interviewer uniquement des enseignants. Je procède néanmoins à cet entretien.

S'agissant d'un des meilleurs étudiants du groupe ayant assisté aux cours, les difficultés éventuelles de cet étudiant ne devraient pas être dues *a priori* à un manque de travail ou à un absentéisme notoire de sa part.

Signalons que cet étudiant présente le module de I15 comme étant « *one of the most important class in my life* ». Il évalue la difficulté ressentie de ce module : « *expected it was harder than it was* ».

La contextualisation proposée par I15 semble avoir été perçue par cet étudiant et il l'associe à une sensation de plaisir : « *I'm happy / I developed a feeling for fluid / a behaviour / Fluid mechanics is all around* ».

Cet étudiant partage l'avis de I15 concernant l'absence de recours à de l'expérimental. Cet étudiant n'a pas suivi de séances de TP dans l'université où il étudie actuellement. Il indique que, pour lui, cela n'a pas constitué un manque pour comprendre : « *I didn't need it* » précise-t-il. Lors de l'entretien, il indique se rendre compte qu'il suivait des TP à l'époque où il était dans une autre université, située dans les Caraïbes.

Lorsque lui est présentée la situation du rétrécissement de la question Q15, qu'indique cet étudiant ?

Il écrit sur un papier une formule qui est correcte. Il est perplexe, indiquant que sa première impression était différente de la conclusion notée sur ce papier et précise : « *Now I'm very confused / My intuitive feeling / my perception told me that [that : la réponse fausse] /* ». Cet étudiant perçoit la confrontation entre le résultat du cours, qu'il connaît, et sa conception naïve de la situation envisagée. En effet, il indique : « *maybe he [I15] did teach me something but now my non-smart impression (...)* ».

Précisons que ses difficultés à la question Q15 sur l'étude d'un rétrécissement ne sont pas dues au fait que cette situation soit nouvelle pour lui : il indique l'avoir déjà vue dans ce module.

Lorsque lui est présenté le schéma de la question Q16 'couplage', avec un second tube représenté en amont du rétrécissement, il indique immédiatement : « *really more complicated* ».

Face aux deux schémas de la question Q17 'pertes de charge', il répond : « *none of them make sense* ». Pour lui, la hauteur de liquide devrait être la même dans les trois tuyaux répartis sur la canalisation horizontale.

Cela est cohérent avec le modèle d'écoulement 'parfait' sur lequel I15 insiste : l'écoulement étant incompressible et la section de la canalisation étant constante, la vitesse moyenne est fixée elle aussi. L'écoulement étant supposé 'parfait', la pression est elle aussi fixée : la hauteur d'eau dans les trois tuyaux aurait à être à la même dans le cadre de ce modèle.

Cet étudiant indique ne pas avoir vu la situation représentée sur ces schémas dans les vidéos du module de I15. Ces difficultés le perturbent fortement et il l'exprime physiquement par son

'attitude' lors de l'entretien. Il indique : « *now I'm putting in doubt everything / I thought I knew (...)* I don't like when my confidence goes down as easy as that ».

Se limiter à un modèle d'écoulement 'parfait' permet d'estimer un certain nombre de paramètres et de prévoir l'évolution de grandeurs dans une canalisation donnée (diminution de la pression lors d'un rétrécissement par exemple).

Pour autant, sur une situation classique comme une canalisation de section donnée, ce modèle présente des limites. Sur l'exemple de cet étudiant, présenté comme brillant, on constate le trouble causé par les difficultés vécues.

Conclusion :

Au vu des éléments partiels obtenus dans cette enquête, si au profil partiel d'un enseignant que nous avons construit dans cette étude, nous ajoutons des éléments liés à des catégories de PCK qualifiées de *Personal PCK Student Learning & Conceptions*, nous constaterions que les prises en compte des étudiants et de leur mode d'apprentissage constitueraient des points minorés pour certains, notamment pour une partie des enseignants dont le profil partiel en modélisation et contextes apparaît riche et varié (I5 par exemple).

9.4 Rapprochement des résultats avec les variables explicatives

9.4.1 Variables explicatives abordées : tableaux récapitulatifs

Nous nous limitons ici aux enseignants retenus qualifiés de physique.

Nous cherchons à visualiser l'influence éventuelle de plusieurs variables explicatives sur la répartition de ces enseignants en termes de contextualisation et de modélisation.

Pour cela, nous reprenons le tableau 9.2.1 que nous associons à une partie des variables caractérisant les enseignants interrogés et qui sont fournies en annexe D.1.6.

Pour une variable explicative donnée, nous proposons un code typographique associé aux différentes gammes retenues pour cette variable explicative et nous commentons le tableau obtenu.

Nous procédons de même pour chacune des variables explicatives retenues, qui sont : la formation initiale en mécanique des fluides de l'enseignant interrogé, le lieu de sa formation initiale, son ancienneté en tant qu'enseignant, son domaine de recherche, le niveau d'enseignement et enfin son choix de prendre en charge cet enseignement.

A partir du faible échantillon étudié, nous ne prétendons à aucune conclusion quantitative. Il s'agit ici d'entamer une démarche qui serait à appliquer à des populations adéquates. Le conditionnel est donc encore plus de rigueur dans ce paragraphe que dans les autres.

Formation initiale en mécanique des fluides de l'enseignant interrogé

Dans le tableau 9.4.1.1, nous abordons le niveau de formation reçue par l'enseignant lorsqu'il était lui-même étudiant. L'enseignant est indiqué en noir, lorsqu'il se déclare autodidacte, en **gras**, lorsqu'il indique qu'étant étudiant, il a suivi une mineure en mécanique des fluides enseignée par un enseignant physicien et en **gras souligné**, lorsqu'il indique qu'étant étudiant, il a suivi une majeure en mécanique des fluides enseignée par un enseignant physicien.

		Modélisation		
		Limitée	Intermédiaire	Développée
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	I11 T1 T2	I7	I20
	Intermédiaire	I14	I15 U6	I19 T3
	Développée		U5	I5 I13
Visée recours expérimental	Limitée	I11 I14 T1 T2		
	Intermédiaire		I7 I15 U6	I5 I19 T3
	Développée		U5	I20
Visée histoire des sciences	Limitée	I14 T1 T2		I13 I20
	Intermédiaire	I11	I7 I15	I5 I19 T3
	Développée		U5 U6	
Nombre de supports	Limité	I11 I14	I7	I5 I19 I13
	Intermédiaire	T1 T2	I15 U5 U6	
	Développé			I20 T3

Tableau 9.4.1.1

Répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur formation initiale

Il semblerait que d'avoir reçu un enseignement renforcé en mécanique des fluides ne soit pas suffisant pour avoir développé une expertise en modélisation et contextualisation dans ce domaine (cas notamment de I11 et de I14).

De plus, être autodidacte dans un domaine donné ne serait pas rédhibitoire pour construire une expertise dans l'enseignement de ce domaine (cas de I5, de I20 et de T3).

Dans un autre registre, signalons que lors des entretiens, un seul enseignant, U6, évoque spontanément son propre vécu d'étudiant en lien avec l'histoire des sciences. Il indique avoir suivi deux cours sur l'analyse de Fourier au niveau *senior*, l'un faisant intervenir l'histoire des sciences, l'autre, non. Il signale que celui contenant de l'histoire des sciences « *made the difference* ».

Lieu de formation initiale de l'enseignant

Dans le tableau 9.4.1.2, nous évoquons le lieu où a été formé l'enseignant.

L'enseignant est indiqué en noir s'il est enseignant aux États-Unis (au moment de l'interview) et formé aux États-Unis, en **gras**, s'il est enseignant aux États-Unis (au moment de l'interview) et formé hors des États-Unis, en **gras souligné**, lorsqu'il est enseignant en France et formé en France.

		Modélisation									
		Limitée			Intermédiaire			Développée			
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	<u>I11</u>	<u>T1</u>	<u>T2</u>	<u>I7</u>					<u>I20</u>	
	Intermédiaire	I14			I15	U6		<u>I9</u>		<u>T3</u>	
	Développée					U5		<u>I5</u>	I13		
Visée recours expérimental	Limitée	<u>I11</u>	I14	<u>T1</u>	<u>T2</u>			U6		I13	
	Intermédiaire					<u>I7</u>	I15		<u>I5</u>	<u>I9</u>	<u>T3</u>
	Développée						U5			<u>I20</u>	
Visée histoire des sciences	Limitée		I14	<u>T1</u>	<u>T2</u>					I13 <u>I20</u>	
	Intermédiaire	<u>I11</u>				I15					
	Développée					<u>I7</u>	U5	U6	<u>I5</u>	<u>I9</u>	<u>T3</u>
Nombre de supports	Limité	<u>I11</u>	I14			<u>I7</u>			<u>I5</u>	<u>I9</u>	I13
	Intermédiaire			<u>T1</u>	<u>T2</u>		I15	U5	U6		
	Développé										<u>I20</u>

Tableau 9.4.1.2

Répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur lieu de formation initiale

On constate que quel que soit le lieu de formation, les enseignants se répartissent dans les différents périmètres d'expertise pour les catégories de contextes retenues.

Ancienneté

Dans le tableau 9.4.1.3, nous abordons l'ancienneté de l'enseignant en tant qu'enseignant dans le module pour lequel il est interviewé.

L'enseignant est indiqué en noir s'il est enseignant dans le module depuis moins de 5 ans, en **gras** s'il enseigne ce module depuis une durée comprise entre 6 et 15 ans et en **gras souligné** s'il enseigne dans le module depuis 16 ans ou plus.

		Modélisation								
		Limitée			Intermédiaire			Développée		
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	I11	T1	T2	I7				I20	
	Intermédiaire	I14			I15	<u>U6</u>		19		<u>T3</u>
	Développée				U5		<u>I5</u>		<u>I13</u>	
Visée recours expérimental	Limitée	I11	I14	T1	T2		<u>U6</u>		<u>I13</u>	
	Intermédiaire					I7	I15		<u>I5</u>	19
Visée histoire des sciences	Développée						U5			I20
	Limitée		I14	T1	T2				<u>I13</u>	I20
Nombre de supports	Intermédiaire	I11					I15		<u>I5</u>	19
	Développée					I7	U5	<u>U6</u>		<u>I13</u>
	Limité	I11	I14	T1	T2		I15	<u>U5</u>	<u>U6</u>	
	Développé									I20
										<u>T3</u>

Tableau 9.4.1.3 Répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur ancienneté

Dans l'échantillon analysé, parmi les enseignants présentant un périmètre d'expertise limité en modélisation et en choix de mondes retenus ne figureraient que des enseignants exerçant depuis moins de 5 ans dans un module en lien avec la mécanique des fluides.

Pour autant, d'autres enseignants exerçant depuis moins de 5 ans peuvent tout de même déjà présenter un périmètre d'expertise étendu en modélisation.

La répartition des enseignants en termes de périmètre d'expertise en modélisation et en choix des mondes retenus semblerait montrer que ce périmètre d'expertise augmente avec le nombre d'années d'enseignement du module, ce qui semblerait plus marqué que pour les autres aspects liés aux contextes.

Domaine de recherche

Dans le tableau 9.4.1.4, nous abordons le domaine de recherche de l'enseignant (rubrique 'Lien actuel de l'enseignant interrogé à la mécanique des fluides' en annexe D.1.6.).

L'enseignant est indiqué en noir, si lors de l'entretien, il se présente comme n'étant qu'enseignant, en **gras**, si lors de l'entretien, il se présente comme chercheur dans un domaine proche de la mécanique des fluides et en **gras souligné**, si lors de l'entretien, il se présente comme chercheur en mécanique des fluides.

		Modélisation								
		Limitée			Intermédiaire			Développée		
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	I11		T1	T2	I7				I20
	Intermédiaire		I14			<u>I15</u>		U6	I9	T3
	Développée						<u>U5</u>	I5	<u>I13</u>	
Visée recours expérimental	Limitée	I11	I14	T1	T2			U6		<u>I13</u>
	Intermédiaire					I7	<u>I15</u>		I5	I9
	Développée						<u>U5</u>			I20
Visée histoire des sciences	Limitée		I14	T1	T2					<u>I13</u>
	Intermédiaire	I11					<u>I15</u>			I20
	Développée					I7	<u>U5</u>	U6	I5	I9
Nombre de supports	Limité	I11	I14			I7			I5	I9
	Intermédiaire			T1	T2		<u>I15</u>	<u>U5</u>	U6	
	Développé									<u>I13</u>
									I20	T3

*Tableau 9.4.1.4
Répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur domaine de recherche*

On constate qu'en termes de modélisation, les enseignants se déclarant chercheurs en mécanique des fluides sembleraient présenter un périmètre d'expertise plutôt intermédiaire ou développé. Pour autant, ils ne sembleraient pas présenter des degrés d'expertise en modélisation et contextualisation bien plus développés que ceux se déclarant chercheurs dans un domaine proche de la mécanique des fluides ou que ceux n'étant qu'enseignant.

Niveau d'enseignement

Dans le tableau 9.4.1.5, nous abordons le niveau d'enseignement dans lequel l'enseignant exerce.

L'enseignant est indiqué en noir, s'il enseigne à des *freshman*, *sophomore*, BTS1 ou BTS2, en **gras**, s'il enseigne à des *junior* ou dans des formations d'ingénieurs de niveau L2 et en **gras souligné**, s'il enseigne à des *senior* ou dans des formations d'ingénieurs de niveau L3.

		Modélisation								
		Limitée			Intermédiaire			Développée		
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	I11	T1	T2	I7					I20
	Intermédiaire		I14		I15	U6		I9		T3
	Développée					U5		I5	<u>I13</u>	
Visée recours expérimental	Limitée	I11	I14	T1	T2		U6		<u>I13</u>	
	Intermédiaire					I7	I15		I5	I9
	Développée						U5			I20
Visée histoire des sciences	Limitée		I14	T1	T2				<u>I13</u>	I20
	Intermédiaire	I11					I15			
	Développée					I7		U5	U6	I5
Nombre de supports	Limité	I11	I14			I7			I5	I9
	Intermédiaire			T1	T2		I15	U5	U6	<u>I13</u>
	Développé									I20
										T3

Tableau 9.4.1.5

Répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur niveau d'enseignement

Il semblerait que le niveau d'enseignement n'impacte pas le périmètre d'expertise en modélisation ou contextualisation.

Choix de cet enseignement par l'enseignant interrogé

Dans le tableau 9.4.1.6, nous abordons le choix de l'enseignant interrogé d'enseigner le module indiqué.

L'enseignant est indiqué en noir, si cet enseignement est imposé à l'enseignant interrogé, en **gras** si cet enseignement est déclaré mi-imposé, mi-choisi par l'enseignant et en **gras souligné** si assurer cet enseignement est déclaré choisi par l'enseignant interrogé.

NB : pas d'information obtenue à ce propos pour U6, lors de l'entretien.

		Modélisation								
		Limitée			Intermédiaire			Développée		
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	I11	T1	T2	I7				I20	
	Intermédiaire	I14			I15			I9		T3
	Développée				U5		I5	I13		
Visée recours expérimental	Limitée	I11	I14	T1	T2	I7	I15	I5	I9	T3
	Développée					U5			I20	
Visée histoire des sciences	Limitée		I14	T1	T2				I13	I20
	Intermédiaire	I11				I7	I15			
	Développée					U5		I5	I9	T3
Nombre de supports	Limité	I11	I14			I7		I5	I9	I13
	Intermédiaire			T1	T2		I15	U5		
	Développé								I20	T3

Tableau 9.4.1.6

Répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur choix d'enseigner ce cours

Il semblerait que les enseignants ayant choisi d'enseigner un cours de mécanique des fluides soient plus enclins à présenter un périmètre d'expertise développé en modélisation et en choix de mondes de référence retenus.

9.4.2 Plusieurs variables à considérer

Il ne semblerait qu'aucune des variables prises isolément ne soit suffisante pour expliquer la répartition des réponses recueillies.

Au sein des trois groupes liés à la modélisation, figurent des enseignants de tout âge, exerçant en France ou aux États-Unis, en tant qu'enseignant-chercheur ou uniquement enseignant.

Néanmoins, auraient tendance à figurer parmi le groupe 'modélisation développée' ceux que l'on pourrait qualifier de spécialistes de la mécanique des fluides, de par leur domaine de recherche (I13, I20) ou leur cursus (I9 a mené une thèse en mécanique des fluides). Pour autant, I14, bien que chercheur en mécanique des fluides, appartient au groupe 'modélisation limitée' : ce constat pourrait s'expliquer par le fait qu'il débute dans sa carrière d'enseignant.

L'ancienneté impacterait également l'expertise en modélisation, de manière favorable.

En effet, dans le groupe 'modélisation développée' figurent des enseignants non spécialistes de la mécanique des fluides (I5, T3). Ils n'ont pas suivi de module de mécanique des fluides dans leur cursus et ne sont pas chercheurs. Il s'agit par contre d'enseignants en fin de carrière, qui, à écouter leur discours, semblent avoir construit une démarche réflexive sur leurs pratiques.

9.4.3 Spécificités locales et nationales

Parallèlement aux différences liées aux contextes mentionnées en conclusion du chapitre 8 et à la prise en compte des élèves évoquées plus haut, nous observons également **des spécificités locales liées à de la logistique**. Nous en évoquons deux ici.

L'un est lié au contexte local dans une filière donnée. **La structure d'enseignement universitaire** américain ne semble pas faciliter la coordination entre les prévisions du modèle et les résultats expérimentaux dans la mesure où les modules de *lecture* et de *lab session* sont très souvent totalement découplés. En effet, ces modules ne sont pas assurés par les mêmes enseignants et ne se déroulent pas les mêmes semaines au cours d'un semestre donné. Ils peuvent même être proposés dans le parcours de l'étudiant à des années scolaires différentes, comme signalé par U5 et I13.

Pour autant, lorsque les enseignants I USA interrogés ont à justifier leur non-recours à des TP, ils présentent des réponses fondées sur des raisons pédagogiques et non logistiques, comme I14 et I15 par exemple.

En France, TP et cours n'y sont pas non plus toujours coordonnés, en particulier dans les formations de techniciens. T1, par exemple, indique que les TP de mécanique des fluides démarrent un mois et demi après le début du cours.

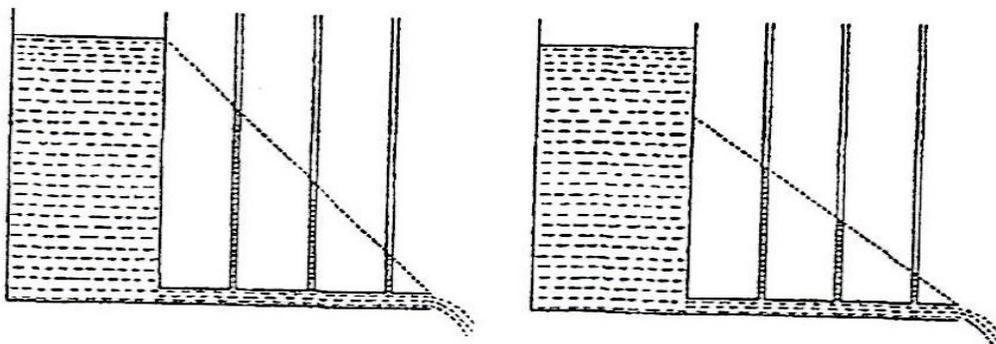
Parmi les I CPGE, le contexte local est indiqué pour justifier un non recours à des TP. Signalons cependant que cet argument n'est jamais présenté seul. Lui est associé un argument sur le contexte institutionnel ou relevant des orientations.

L'autre exemple de spécificité locale est lié à **l'effectif étudiant**. Dans la famille MB, les causes d'un non recours à de l'expérimental sont indiquées par les enseignants interrogés comme étant essentiellement liées au contexte social local. Rappelons que ce sont généralement dans ces formations que les contraintes en personnel y sont les plus marquées : les populations étudiantes dépassent souvent plusieurs centaines d'étudiants et le personnel enseignant dédié se résume souvent à quelques individus.

Nous avons également constaté **des spécificités nationales liées aux syllabus**. Là encore, nous nous limitons à deux exemples.

Le premier concerne l'approche retenue pour étudier un écoulement de fluide, qui varie d'un pays à l'autre. En France, en filière PC (CPGE) par exemple, on met en avant un modèle de milieu continu, régi par des équations locales, alors que lors des entretiens américains menés, c'est le recours à la notion de volume de contrôle qui a été très fréquemment évoqué, beaucoup plus que lors des entretiens français.

Le second exemple ne concerne que la France, à travers les réponses des enseignants de la sous-famille I CPGE à la question Q17 'pertes de charge' (nous rappelons ci-dessous le schéma 6.2.2.3. associé à cette question).



*Figure 6.2.2.3
Situations évoquées à la question Q17*

On a constaté un net écart entre la réponse de I9, qui répond correctement en raisonnant en termes de pertes de charge, et celles de I5 et de I7, qui ne parviennent pas à résoudre le problème posé et qui raisonnent à partir d'équations locales.

Aucun des trois n'avait à enseigner la notion de perte de charge avant la dernière réforme des programmes de CPGE.

Des trois enseignants cités, seul I9 a désormais à l'aborder, dans la filière d'enseignement où il exerce. On pourrait alors avancer l'idée que le concept de pertes de charge lui étant désormais plus familier qu'aux deux autres enseignants, cela constituerait une explication de cet écart de raisonnement.

Pour autant, signalons que le 4^e membre de la sous-famille I CPGE, I11, a, elle aussi, à enseigner désormais le concept de pertes de charge dans la filière d'enseignement où elle exerce. Pour autant, elle ne se réfère pas à ce concept et ne répond pas correctement à la question Q17 : avoir à enseigner un concept, ici celui des pertes de charge, ne serait donc pas une condition suffisante pour que ce concept devienne un élément de la 'boîte à outil' de l'enseignant auquel il pourrait se référer pour répondre à une question inhabituelle.

9.5 Rapprochement des résultats obtenus avec la littérature

Dans cette partie, nous rapprochons nos résultats d'articles et d'ouvrages qui ont déjà été évoqués dans ce manuscrit. Nous abordons successivement les modèles, les contextes empiriques et le recours à l'histoire des sciences.

9.5.1 Rapprochement en lien avec les modèles

Nous adoptons l'ordre d'étude suivi au chapitre 7. Nous mettons nos résultats en perspective notamment avec des éléments de l'analyse de Soler sur les visions réaliste et instrumentaliste des modèles (Soler, 2013).

Concernant **la progression choisie pour introduire les modèles**, choisir une progression d'un écoulement parfait à un écoulement visqueux lors de l'étude d'un écoulement peut se justifier par des raisons pédagogiques. On pourrait cependant également y voir une tendance au réalisme tel qu'évoqué par Soler, qui indique que « *les scénarios d'un ensemble de modèles du même objet, ordonnés du plus simple au plus compliqué, peuvent alors facilement apparaître comme une série de versions se rapprochant toujours davantage du « vrai » scénario identifié à celui de la théorie en vigueur.* » (Soler, 2013, p.204). On pourrait, en particulier, l'appliquer au cas de T7 qui, en entretien, compare la démarche qu'il suit aux couches d'un oignon : on part du cas le plus simplifié puis progressivement on rajoute des couches.

Concernant **le domaine de validité d'un modèle**, les réponses de plusieurs membres de la famille I (I7, I11, I14) sembleraient indiquer qu'ils limitent un modèle à l'association d'une relation mathématique et d'une liste d'hypothèses à énoncer. Leurs attendus en lien avec la relation de Bernoulli seraient que l'élève indique la formule $P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \rho g z_B$ et qu'il énonce que cette formule nécessite un écoulement incompressible, parfait etc...

Dans leurs réponses, il n'est pas apparu qu'ils menaient une réflexion sur le domaine de validité du modèle (par exemple, dans la situation envisagée, qu'est-ce qui légitime d'approximer l'écoulement comme étant incompressible ? Parfait ? etc...), alors qu'il s'agit d'un élément de réflexion important pour la formation d'un futur ingénieur.

Citons également la remarque de T2 sur le fait que pour appliquer la relation de Bernoulli, il faut un fluide incompressible. T2 indique pourtant appliquer la relation de Bernoulli à l'écoulement d'un gaz, qui n'est pas un fluide incompressible, pour expliquer le principe de fonctionnement d'un tube de Pitot, qui est à son programme. Cette contradiction ne perturbe pas T2. L'objectif de T2 étant d'aboutir à la justification du principe de fonctionnement du tube de Pitot, il n'interroge pas les approximations permettant d'y mener, qu'il énonce pourtant en entretien. Se limiter à l'énoncé des approximations n'apparaît pas contraignant pour maintenir la trame de sa démarche de raisonnement.

De plus, nous avons observé que la relation de Bernoulli pouvait être employée sous une forme uniquement « *utilitaire* » (I5), sans explicitation ni exploration de son domaine de validité. Cela peut mener à des aberrations. Par exemple, si on ne fait qu'énoncer la relation de Bernoulli et la

loi de Poiseuille, et si on ne les présente aux étudiants que comme des outils, ces lois risquent d'être associées là où il ne le faut pas, comme nous avons pu le constater dans la première partie de ce manuscrit dans les travaux de Levy (2013).

Nous avons également noté chez une majorité des membres de la famille MB une absence d'interrogation sur le domaine de validité du modèle physique retenu lors de l'évocation de la loi de Poiseuille. Cela peut aboutir au cas limite que représente MB5, pour qui les lois physiques seraient universelles et sans restriction de validité : « *Poiseuille nous dit que / la formule c'est celle-là et c'est pas négociable* » (MB5).

Au contraire, ceux de la famille I qui analysent le domaine de validité du modèle se réfèrent à une vision du modèle plus construite. Leur point de vue pourrait être rapproché de celui de Soler qui conçoit un modèle comme « *un instrument destiné à s'appliquer localement, à résoudre efficacement une classe particulière de problèmes* » (Soler, 2013, p.206).

Concernant **la cohabitation entre les modèles** retenus par les enseignants, l'analyse par les enseignants de la situation de la question Q16 'couplage' (pour laquelle nous rappelons ici le schéma associé à la figure 6.2.2.2.) permet de l'illustrer.

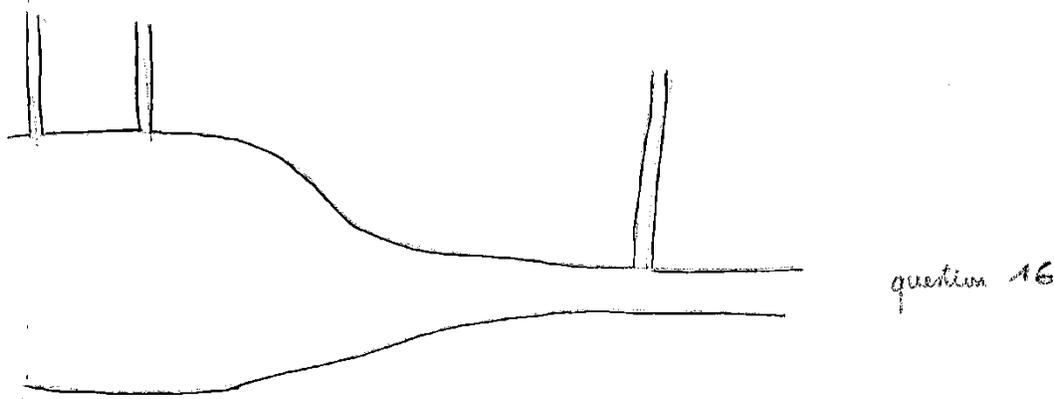


Figure 6.2.2.2
Situation évoquée à la question Q16 'couplage'

I5, I13 et I20 constatent la difficulté d'associer une situation où traditionnellement on suppose l'écoulement parfait à une situation où on tient cas de la viscosité. I5 évoque un emboîtement des modèles, ce qu'on peut rapprocher des propos de Soler et ce, contrairement à I7, qui indique en entretien son désarroi face à l'analyse de la situation du 'couplage' de la question Q16 et pour qui un modèle se rapprocherait de l'association d'une relation mathématique et d'une liste d'hypothèses à énoncer.

Concevoir un modèle comme « *un instrument destiné à s'appliquer localement, à résoudre efficacement une classe particulière de problèmes* » (Soler, 2013, p.185) rendrait l'analyse de cette situation moins clivante. La « *compatibilité est obtenue, et la contradiction dépassée, en interprétant les aspects « littéralement contradictoires » du modèle sur le mode du « comme si ».* Selon une telle interprétation, le modèle ne nie pas l'existence de forces de frottement, il fait « *comme si* » ces forces n'existaient pas. » (ibid., p.205).

Ne pas s'interroger sur la cohabitation des modèles en ne les articulant pas et en n'analysant pas leur domaine de validité peut aboutir à des erreurs de raisonnement.

I5 l'illustre par une anecdote durant l'entretien. Il évoque la modélisation associée à la loi de Torricelli dans un sujet d'écrits d'un concours d'école d'ingénieur, en lien avec la vidange par un trou d'un réservoir rempli. On trouve une vitesse de sortie d'un liquide à travers ce trou en $\sqrt{2gh}$ (loi de Torricelli).

I5 pointe l'erreur de raisonnement de certains enseignants qui annoncent que ce résultat est prévisible puisque conforme à ce qu'on trouverait pour une chute libre. I5 estime au contraire que ce résultat constitue un paradoxe et qu'il doit être signalé aux étudiants : « *un résultat comme celui-là / il faut le vendre comme un paradoxe / et non pas un résultat intuitif / C'est-à-dire que c'est l'inverse / Comment est-il possible que le gradient / que les forces de pression / moins gradient de P / n'aient en moyenne aucun effet ?* ».

De là, I5 évoque à nouveau le sujet de concours dans lequel, une fois cette vitesse obtenue, il est demandé où positionner le trou pour que le jet aille le plus loin possible. Cette dernière question sous-entend une étude de 'mécanique du point' : on bascule de manière implicite d'un modèle qualifié de 'mécanique des fluides' à un modèle qualifié de 'mécanique du point'. Il n'y a pas de réflexion menée sur le basculement d'un modèle de mécanique des fluides à un modèle de mécanique du point : I5 conclut alors que « *ça illustre très bien / le / le côté / artificiel de beaucoup d'exercices de mécanique des fluides /* ».

9.5.2 Rapprochement en lien avec les contextes empiriques

Parmi les éléments évoqués au chapitre 8, nous abordons ici successivement le lien modèle-contexte, la référence au quotidien de l'élève et le recours à l'expérimental.

Rares sont les enseignants interrogés explicitant l'intérêt de diversifier les contextes afin de montrer l'étendue de la portée d'un modèle donné (I9, I13, I20). On peut se demander si ce résultat ne traduirait pas une tendance des enseignants à **n'associer un modèle qu'à une seule situation empirique**.

Il en est de même lorsqu'on aborde avec eux en entretien la situation du 'rétrécissement' schématisée à la question Q15 (pour laquelle nous rappelons ici le schéma associé en figure 6.2.2.1.). Aucun interviewé ne déclare spontanément retravailler la situation du rétrécissement lorsque la notion de perte de charge est abordée. Aucun non plus ne mentionne une quelconque réflexion sur la prise en compte ou non de la viscosité dans cette situation.

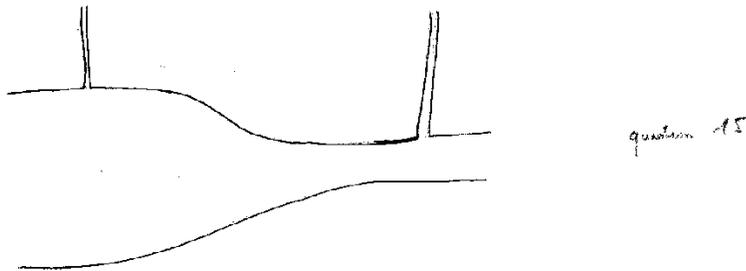


Figure 6.2.2.1
Situation évoquée à la question Q15 'rétrécissement'

La citation de U2, « *this is for Bernoulli equation* », résumerait cette association une situation / un modèle.

Nous retrouvons un tel résultat dans deux enquêtes publiées la même année dans des contextes très différents, l'une en France (Hirn, 1995) et l'autre en Afrique du Sud et Namibie (Smit et Finegold, 1995). Hirn s'intéresse à l'enseignement de l'optique géométrique au collège. Elle y constate que souvent un enseignant associe à un modèle un seul contexte, alors qu'un modèle correspond *a priori* à une diversité de contextes. Smit et Finegold mènent une enquête sur les modèles en physique, et notamment en optique, dans 16 universités auprès d'étudiants qui, au moment de l'enquête, sont en formation d'enseignants de sciences physiques. Ils sont de niveau M1 et ont suivi au moins une année en physique-chimie. Lorsqu'il s'agit de décrire ou d'expliquer plusieurs phénomènes à l'aide d'un modèle, 26% des étudiants associent un modèle à chaque phénomène.

Par ailleurs, concernant **le contexte lié au quotidien de l'élève**, la nécessité de **s'y référer** serait plus marquée pour les élèves avec peu d'intérêt initial pour la matière à apprendre que pour ceux qui présentent déjà beaucoup d'intérêt selon Sevian (Sevian, 2018).

Il apparaît donc cohérent que les références au quotidien soient plus présentes dans le discours des enseignants de la famille T que dans celui des enseignants I CPGE par exemple, qui enseignent à un public sélectionné constitué de 'bons élèves'. I5 indique notamment que ses étudiants n'ont pas besoin qu'on les motive : « / *Ils sont motivés naturellement* / » (I5). On peut néanmoins se demander quels liens entre modèles et contextes les étudiants de CPGE effectuent et quelle image de la physique et des rapports modèle-réalité ils acquièrent dans ce type de formation.

Enfin, que l'enseignant ait **recours à une expérience** lors de ses séquences d'enseignement ne semble pas suffisant pour le prémunir de contre-sens dans une situation où le questionnement est non prototypique, comme l'ont montré les réponses de I11 et de T1 à la question Q17 sur les 'pertes de charge'.

Concernant I11, le fait qu'elle n'ait pas recours à la démarche expérimentale autrement que pour illustrer le résultat attendu pourrait être rapproché de ce que Johsua (1989, p.37) appelle « *l'expérience de renforcement* ».

Concernant T1, son recours à une expérience dans son quotidien d'enseignant est lié aux séances de TP qu'il assure. La mesure de hauteur manométrique est abordée dans l'une, la notion de pertes de charge régulière et singulière apparaît dans une autre. Pour autant, il ne connecte pas la notion de pertes de charge au contexte empirique des deux réservoirs de la question Q17 'pertes de charge'. Il est à noter cependant que T1 n'est pas l'enseignant ayant mis en place les deux TP. Il a repris le travail de son prédécesseur. Se pose alors ici la question de l'appropriation des intentions de ceux qui élaborent des programmes et modules d'enseignement par les enseignants.

9.5.3 Rapprochement en lien avec le recours à l'histoire des sciences ou à des cas contemporains

Nous abordons ici les **éléments évoqués par les enseignants** durant les entretiens ainsi que des **aspects historiques et épistémologiques**

Le peu de contextes disponibles dans les manuels concernant l'histoire de la mécanique des

fluides laissait présager de faibles connaissances introduites de la part des enseignants, ce que les entretiens menés ont confirmé : on a constaté des connaissances très restreintes en histoire des sciences chez une majorité d'enseignants. Ces connaissances introduites se limitent pour beaucoup à la citation de noms, couplés à un portrait et des dates. De plus, la visée associée, jugée inutile ou annexe pour une moitié des enseignants interrogés, est en accord avec les observations déjà menées lors de précédentes enquêtes (par exemple (Guilbert, 1993)).

Notons que parfois, lors des entretiens, un changement dans l'attitude des enseignants est observé lorsque le thème de l'histoire des sciences est abordé. Ainsi, lors des réponses à ces questions en lien avec l'histoire des sciences, les enseignants ont tendance à rire, ce qui est moins le cas pour d'autres questions.

Durant cette phase de l'entretien, un enseignant, I14, éprouve de la gêne, qu'il exprime en tapant avec son crayon sur la table : c'est le seul moment de l'entretien où il adopte une telle attitude.

Nous pensons que ces attitudes peuvent être vues comme un trouble lié à l'évocation de leur méconnaissance sur ce sujet.

Parmi les aspects historiques et épistémologiques figure l'importance d'intégrer l'histoire des sciences dans le cursus. Contrairement à Khoury (2014) qui a montré dans une enquête réalisée auprès d'enseignants universitaires du Liban que ces derniers témoignaient de l'importance de l'intégration de l'histoire et de l'épistémologie des sciences dans un cursus scientifique, nous avons constaté dans notre enquête que de ne pas évoquer l'histoire des sciences était un choix assumé par 9 enseignants de notre échantillon. Ils se répartissent dans toutes les familles étudiées (I13, I14, U2, T1, T2, MB2, MB5, MB8, MB9).

Un autre aspect concerne **l'hommage fait aux « grands » savants.** Dans plusieurs entretiens, à l'évocation des contributeurs majeurs fait également écho l'évocation des chercheurs associés à des polémiques. MB2 cite Haber et MB3 cite Lyssenko.

Un des enseignants interrogés, MB6, cite Galien et Harvey. Elle associe Galien à « *dogma forever* », face à Harvey (« *he broke down the dogma* »).

On peut mettre en parallèle cette opposition entre Galien et Harvey avec celle entre Pasteur et Pouchet, que Latour constate dans l'histoire des scientifiques proposée en France. Il note l'opposition entre Pasteur et Pouchet, où, au-delà des hommes et de leurs méthodes, c'est la raison et le rationnel qui finiraient par l'emporter sur la déraison et l'irrationnel (« *Pasteur réussirait malgré la situation dans laquelle il est* » (Latour, 2003, p.20)). Latour critique une telle histoire, qu'il qualifie de « *modernisatrice* » (*ibid.*, p.23).

De plus, signalons que **les erreurs de raisonnement de ces 'grands hommes' de l'histoire ne sont pas évoquées par les enseignants interviewés.** Par exemple, concernant la cause du mouvement sanguin, Harvey l'attribuait à la chaleur du sang : le cœur n'était pas vu comme une pompe. Cet aspect n'est généralement pas signalé dans les manuels évoquant le travail d'Harvey et ne l'a pas été davantage chez les enseignants interrogés.

En lien avec le travail d'Harvey et son accueil par la communauté universitaire française de l'époque, Grmek (1990d, p.259) conclut qu'« *un personnage et une période historique représentent pourtant, chacun à sa manière, une unité où tout se tient et où la lumière ne brille pas si l'on néglige l'ombre.* ». Une telle mise en perspective n'a pas été observée dans l'échantillon étudié.

Signalons enfin que l'on retrouve également cette idée d'ombre et de lumière chez Bachelard

(1953, p.9), pour qui « *L'histoire des sciences est à cet égard souvent trompeuse. Elle ne restitue presque jamais les obscurités de pensée. Elle ne peut donc bien saisir la rationalité en train de se faire. Nos connaissances actuelles éclairent d'une manière si vive le passé des pensées scientifiques que nous prenons toutes les lueurs pour des lumières. On croit donc à une raison constituée avant tout effet de rationalité* ».

On a pu également constater, chez certains enseignants (I13 et I20), **un rejet de l'histoire des sciences, décrite spontanément comme étant l'histoire des découvertes et des savants** ('qui a découvert quoi le premier ?') : « *Part of my problem I have with history of science is that people get all hung up on who did what first* » (I13). L'histoire des sciences apparaît pour I20 comme étant l'histoire des scientifiques de renom.

I20 l'associe à du commérage. Une telle histoire présente donc peu d'intérêt pour lui. Elle n'intéresse pas davantage I13 : « *and I just can't be bothered with these arguments / I just can't /* » (I13).

On retrouve dans ces réponses le rejet par Bouasse de cette visée de l'histoire des sciences : « *Mais il faut se garder d'envisager l'histoire de la science côté doctrines, à l'instar des historiens qui pataugent dans les grandes idées, les théories vagues, les systèmes du monde, tandis que l'histoire véritable est celle des résultats positifs. Il faut non moins se garder de substituer l'histoire des inventeurs à l'histoire des inventions, de revenir à l'éternelle préoccupation de nos historiens patentés : un lieu, un homme, une date, de discuter indéfiniment ces questions de priorité qui nous sont indifférentes, ô combien ! Car si nous devons croire Archimède sur l'état de la science à son époque, rien ne dit qu'il a découvert tout ce dont il parle. Pour faire équitablement sa part, nous retombons sur les petites conjectures personnelles toujours sujettes à révision. Mais que m'importe qu'Archimède ait volé ses prédécesseurs, son préparateur ou ses élèves ? Que la loi de la réfraction soit de Descartes ou de Snellius, cela change-t-il son importance, son énoncé, à quelques années près la date de son admission définitive ? Qu'on nous fiche une bonne fois la paix avec tous ces racontars de concierges bavardes !* » (Citation de Bouasse dans (Locqueneuxa, 2009, p.272)).

L'histoire des sciences est parfois perçue par certains comme étant un support pour accéder au mode d'élaboration d'un modèle. Ainsi, autant I13 n'associe pas à l'histoire des sciences d'autres visées que celle décrite précédemment, autant I20 précise s'intéresser au processus en lui-même plutôt qu'aux individus.

I20 déclare faire référence à des controverses historiques pour appuyer son argumentaire lors de certaines séquences d'enseignement. Évoquer des points ayant posé problème historiquement lui donne l'occasion de mettre en avant les difficultés conceptuelles qui interviennent dans le thème abordé. Il prend comme exemple le paradoxe de d'Alembert.

Néanmoins, signalons qu'il n'accorde pas de rôle à l'histoire des sciences pour présenter les étapes de construction d'une théorie.

L'histoire des sciences est également perçue comme étant un support possible pour aider à diversifier ses modes de pensée. U5 n'évoque pas l'histoire des sciences de manière générale : il s'agit plutôt pour lui de mettre en perspective une application donnée du corps humain. Quelles sont les principales étapes en histoire des sciences dans son domaine ? Il rit, répond « *stenosis* » et comment les maladies se sont développées. La sténose était vue comme « *a low pressure problem* », ce qui était une hypothèse fautive. « *But historically speaking it was very important*

(...) *Someone said : flow matters / »*. Puis fut publié un autre article, indiquant que ce n'était pas un problème de basse pression mais un problème de haute pression.

Cette évolution est pour lui très importante et permet de conclure auprès des élèves qu'il y a différentes façons d'étudier un même problème. « *You have to think a little bit out of the box / »*.

On pourrait rapprocher ces remarques de l'avis de Buchdal (1993), pour qui l'histoire des sciences ne consiste pas à raconter les théories non retenues de l'histoire mais à lister les différentes manières d'aborder un problème donné à une époque donnée et leur influence sur ce qui est étudié en science.

L'histoire des sciences est aussi annoncée comme étant un support possible pour penser l'état actuel de la société, en effectuant un parallèle entre passé et présent, comme le signalent notamment I11 et T6. Ces deux enseignants aboutissent cependant à des conclusions opposées.

Pour I11, cela permet d'affirmer le progrès de la science, notamment dans ses pratiques : « *il s'agit de pointer la différence de statut entre le savant polyvalent d'autrefois et le chercheur spécialisé de nos jours »* (I11).

Pour T6, cela aboutit à pondérer la supériorité prétendue de la société actuelle par rapport à celles passées.

On pourrait rapprocher ces remarques d'une idée défendue par Durkheim (2014,p.385) : « *C'est une grosse erreur de croire que pour connaître l'homme il suffit de le regarder sous ses formes les plus modernes et les plus achevées. Nous ne pouvons le connaître qu'en l'analysant ; nous ne pouvons l'analyser que par l'histoire »*.

Concernant l'évocation de la **recherche actuelle**, Guyon (1990) signale un retour des physiciens vers la mécanique des fluides dans la deuxième moitié du 20^e siècle, via la description d'états fluides de la matière. La mécanique des fluides y est couplée à la thermodynamique et à la physique des matériaux. Une piste d'enseignement est suggérée par Guyon et liée à cette approche matériaux, ce qui rappelle les travaux de Pierre-Gilles de Gennes et de ses successeurs à l'ESPCI, qui sont évoqués par plusieurs enseignants lors des entretiens menés (I5, I6, I20 et T3).

Ouverture

Nous terminons ce chapitre par deux interrogations.

L'étude de la **construction historique des modèles de référence** en mécanique des fluides réalisée lors de ce travail de thèse nous a montré qu'elle pouvait fournir une piste pour justifier l'approche souvent retenue aujourd'hui dans son enseignement, en France comme aux États-Unis.

En effet, dans un enseignement traditionnel, on débute par l'étude d'écoulements dits 'parfaits' puis on prend en compte la viscosité, ce qui correspond aux grandes étapes du processus historique. T3 me fait remarquer qu'« *il suffit de prendre le nom des théorèmes pour voir que le déroulement historique est là / Premier théorème c'est celui d'Archimède / Ensuite on passe à Pascal / Puis Bernoulli ça nous mène au 18^e siècle / Puis Reynolds au 19^e / Donc euh // on a effectivement / dans le déroulement du programme / on suit le déroulement historique »*.

Certes, certains enseignants, I5 et I13, accordent de l'importance à remettre en cause cet ordre de présentation que l'on pourrait qualifier d'historique, à l'instar de I13, qui insiste sur la justification de son choix durant l'entretien (il met en avant l'importance du concept de viscosité en mécanique

des fluides). De plus, plusieurs enseignants, parmi lesquels I14 et I15, justifient le choix d'une démarche d'un écoulement parfait à un écoulement visqueux pour des raisons pédagogiques (aller du modèle le plus simple au modèle le plus complexe) et non pour des raisons 'traditionnalistes'. Pour autant, beaucoup d'enseignants n'abordent pas d'eux-mêmes la justification de l'ordre de présentation des modèles retenus dans leur cours.

On pourrait donc émettre l'hypothèse qu'en plus de raisons pédagogiques pour choisir l'ordre de présentation des modèles en mécanique des fluides, d'un écoulement parfait à un écoulement visqueux, **une forme de routine** (Robert, 2002) se soit mise en place, routine confortée par l'ordre observé dans plusieurs manuels scolaires, routine non questionnée et potentiellement source de déstabilisation des enseignants.

C'est ce que nous illustrons ci-dessous à partir des cas **des lois de Torricelli et de Poiseuille**.

L'ordre de présentation traditionnel de la relation de Bernoulli et de la loi de Torricelli dans une séquence d'enseignement est l'inverse de l'ordre historique. En effet, dans une séquence d'enseignement traditionnelle, la loi de Torricelli est présentée comme une illustration de la relation de Bernoulli alors qu'historiquement, elle la précède. C'est d'ailleurs la recherche de sa justification théorique qui a en partie mené à la relation de Bernoulli. T3, qui évoque ailleurs en entretien la loi de Torricelli, n'aborde pas cette inversion 'pédagogique' alors qu'il annonce que l'ordre pédagogique correspond à l'ordre historique.

De même, la loi de Poiseuille est souvent présentée dans une séquence d'enseignement traditionnelle comme exemple d'application de l'équation de Navier-Stokes. Le fait qu'elle ait été découverte de manière expérimentale avant d'être justifiée théoriquement n'est quasiment jamais abordé. Comme indiqué par Herrick (1942) dans *American Journal of Physics*, c'est même source d'incrédulité pour plusieurs chercheurs à qui ce point est signalé.

Rappelons que très peu d'enseignants interrogés indiquent posséder des connaissances sur le travail de Poiseuille. Il est à noter que ceux enseignant dans des cursus qualifiés de médical, qui, souvent, parmi les différentes lois déjà citées, n'évoquent que celle de Poiseuille, n'en savent pas pour autant davantage sur lui et son travail.

Comme nous l'avons signalé à différentes reprises, certaines contradictions ne sont pas perçues par les enseignants. Il en est ainsi par exemple de T2, qui indique que pour appliquer la relation de Bernoulli, il faut un fluide incompressible et qui, dans le même temps, applique cette relation à un fluide compressible sans être perturbé par cette contradiction.

On peut alors s'interroger si les savoirs transmis par T2 (et éventuellement d'autres enseignants) ne seraient pas **des pseudo-savoirs**, comme évoqué par Fabre (2007, p.69) qui se réfère à la pensée d'Astolfi : « *On fait souvent à l'école le reproche d'enseigner de manière trop théorique. Le propos d'Astolfi prend le contre-pied de cette critique anti-intellectualiste. Pour lui, les savoirs scolaires ne sont ni véritablement théoriques ni véritablement pratiques, ce sont des pseudo savoirs. Ils sont présentés sous forme de propositions plus ou moins indépendantes ou plus ou moins connectées à d'autres propositions, mais sans jamais se référer à des problèmes. Leur genèse historique est occultée. Et d'autre part, ils ne peuvent véritablement s'engager dans le traitement de nouveaux problèmes, au-delà des exercices proprement scolaires. Ils sont donc sans histoire et sans opérationnalité. Ce rapport au savoir alimenterait la crise de l'école, dans la mesure où les activités scolaires se verraient affectées d'un déficit de sens* ».

Conclusion

Nous concluons en présentant un bilan de l'étude et des pistes pour la formation des enseignants, puis en indiquant les limites de cette étude et des pistes de recherche.

Bilan de l'étude

Les dernières réformes des programmes de lycée et de CPGE dans le cadre du continuum bac-3 / bac+3 mettent en avant les notions de modèle, de contexte ainsi que le recours à l'histoire des sciences. Les enseignants constituant un maillon important de ces réformes, nous avons décidé d'analyser leurs pratiques déclarées, en nous limitant, dans cette étude exploratoire, à des enseignants de premier cycle universitaire, en lien avec l'écoulement d'un fluide. Nous avons ainsi apporté une contribution à des thèmes peu abordés à ce jour par la communauté des didacticiens.

Notre problématique était de caractériser ces pratiques déclarées sous l'angle des modèles et de la modélisation, éléments importants pour développer la réflexion sur la NOS. L'importance du contexte dans une démarche de modélisation nous a incités à étudier également les contextes proposés par les enseignants interrogés. Enfin, nous nous sommes interrogés sur l'influence de la filière et de la discipline de rattachement des enseignants sur leurs pratiques.

Le cadre des PCK nous a guidés pour détecter et analyser différentes facettes de ces pratiques, certaines étant liées à des connaissances et des compétences figurant parmi les *Personal PCK 'Representations & strategies'* et *'Student learning & conceptions'*, d'autres étant liées à des convictions, des *Beliefs*, constituant des *Amplifiers & Filters*, parmi lesquelles figurent des orientations et contextes. C'est l'exploration des *Personal PCK 'Representations & strategies'* qui a été privilégiée dans cette enquête.

Nous avons mené différentes études théoriques sur les PCK, la NOS, les modèles, les difficultés des élèves et des étudiants et avons examiné des manuels d'enseignement. L'analyse de la construction historique d'un modèle d'étude d'un écoulement nous a fourni des pistes pour comprendre les modèles, leur articulation ainsi que le recours à l'expérimental retenus par les enseignants interrogés.

En parallèle, et en interaction constante, une enquête a été menée en plusieurs étapes en France et aux Etats-Unis auprès d'étudiants et d'enseignants. Nous avons conduit 39 entretiens semi-directifs d'enseignants de deux disciplines (physique, biologie) travaillant au sein de différentes filières de formation post-baccalauréat (ingénierie/généraliste, technique, médecine) de deux pays (France et Etats-Unis). Nous avons sélectionné les 23 entretiens les plus riches et en avons réalisé une analyse de contenu thématique à l'aide d'une grille multidimensionnelle que nous avons préalablement élaborée. Nous avons repéré les enseignants selon l'institution dans laquelle ils exercent et avons examiné les modèles et la modélisation qu'ils retiennent, leur prise en compte des difficultés des élèves, les contextes empiriques et pédagogiques qu'ils déclarent employer et les raisons influençant leurs choix.

Comme attendu, la discipline de rattachement de l'enseignant impacte fortement ses pratiques. Ainsi, la population qualifiée de physique a présenté des réponses en lien avec le modèle très différentes de celles de la famille MB. Cette étude a en effet été l'occasion de mettre en avant la différence des approches menées en physique et en biologie-physiologie sur des situations au

demeurant identiques, cette différence d'approche s'expliquant notamment par le fait que ces disciplines ne cherchent pas à répondre aux mêmes types de questions.

Dans le discours des enseignants interrogés de la famille MB, nous n'avons pas perçu d'enjeu à faire réfléchir les étudiants sur la validité des lois énoncées, plus précisément des lois issues de la physique et mobilisées en biologie. Et ce, que l'enseignant évoque ou non le domaine de validité des lois énoncées. Il nous semble que les enseignants risquent alors de transmettre aux étudiants une image idéalisée de la portée de ces lois. Même si cette image n'est pas celle propre à l'enseignant, il paraît difficile que les étudiants en acquièrent une différente. Il nous semble également que les étudiants sont susceptibles de rencontrer des difficultés soulevées par des approches différentes et non explicitées dans chaque discipline.

Au sein d'une même famille ou sous-famille de la population qualifiée de physique, des écarts importants sont apparus, notamment en termes de modélisation et de périmètres d'expertise sur les modèles. Ne pas aborder le domaine de validité peut conduire les étudiants à rencontrer des difficultés, comme observé durant l'enquête sur le cas d'un brillant étudiant aux États-Unis. Laisser se juxtaposer au sein d'un même cours des relations (relation de Bernoulli, loi de Poiseuille...) et ne pas expliciter les approches différentes qui les sous-tendent peut aboutir à des contradictions lorsque les étudiants les associent.

La référence aux étudiants a également fortement varié en fonction de l'élément de la pratique enseignante à justifier et ce ne sont pas nécessairement les enseignants en contact avec les publics les plus fragiles qui ont mis le plus en avant les difficultés éventuelles liées à la relation de Bernoulli par exemple.

Les réactions des enseignants face à des situations inhabituelles observées dans cette enquête auront été elles aussi contrastées : capacité à faire fonctionner le modèle retenu hors du cadre traditionnel chez certains, difficultés chez d'autres qui, pour autant, ont raisonné face à un questionnement inconnu, difficultés et fuite devant un questionnement inconnu chez d'autres.

Ces mises en situation ont permis de révéler des démarches de modélisation nettement différentes d'un enseignant à l'autre. Ainsi, ceux résumant la relation de Bernoulli à un « *knee jerk* » centré sur « *higher velocity lower pressure* » ont eu tendance à figurer parmi ceux butant face à une question inhabituelle.

Un regroupement des enseignants en trois groupes en fonction de leur périmètre d'expertise en termes de modélisation (étendu, intermédiaire et limité) a été établi. Ce regroupement est apparu proche de celui obtenu en répartissant les enseignants en fonction des mondes de référence retenus ou en fonction de la mention des élèves et de leurs difficultés d'apprentissage. Ainsi, dans l'échantillon analysé, face à une question inhabituelle, les enseignants évoquant une variété de mondes de référence ont eu tendance à tenter un raisonnement, quand bien même il n'aboutissait pas, ce qui était moins le cas chez ceux se limitant aux cas prototypiques de leur filière d'enseignement. De plus, dans l'échantillon étudié, ce regroupement des enseignants en fonction de leur périmètre d'expertise en termes de modélisation, valable aussi pour les mondes de référence retenus, n'est cependant pas adapté pour les autres aspects de contextualisation abordés. Nous n'avons pas observé de profils-types aussi marqués pour la contextualisation que pour la modélisation et qui balaièrent l'ensemble des sous-catégories de contextes analysés.

En ce qui concerne les contextes, les membres de la famille I sont apparus partagés en termes de recours à l'expérimental. Les enseignants qualifiés de I, pour qui la visée perçue de la formation était d'être capable d'analyser des cas différents de ceux du cours, soutenaient aussi la présence de TP dans la formation. Par contre, ceux parmi les I pour qui la visée perçue de la formation

était d'appliquer des lois dans un contexte donné indiquaient qu'il n'y avait pas de TP associés. Certains le regrettaient (cas de I CPGE), les autres non, jugeant la présence de TP inutile (cas de plusieurs I USA).

Si la confrontation entre la prévision théorique et la constatation expérimentale est à mettre en avant pour certains enseignants, elle n'apparaît pas nécessaire à d'autres. Cela peut surprendre vu qu'un des objectifs de formation d'un futur ingénieur est de développer sa réflexion sur le modèle et que la confrontation à l'expérience fournit l'occasion de le travailler. Une telle confrontation permet notamment de constater les limites de l'approximation d'un écoulement dit 'parfait'.

Concernant le recours à l'histoire des sciences, seuls les I CPGE lui associent une visée plutôt élevée. A quelques exceptions près, les enseignants interrogés ont présenté des connaissances plutôt faibles en histoire des sciences.

Nous avons également observé un recours à la vidéo plus marqué chez les I USA et les T que chez les I CPGE. Recourir à une vidéo, en lieu et place d'une manipulation de cours, simplifie le travail de l'enseignant et permet d'esquiver la confrontation au réel. Cela permet à l'enseignant d'éviter les complications parfois non prévues de la réalisation d'une expérience en direct mais risque aussi de le priver d'un support pour analyser le domaine de validité d'un modèle donné.

Nous avons constaté une influence de la filière de formation dans laquelle les enseignants exercent, notamment sur les modèles et les contextes retenus. Les visées de formation sont en effet différentes d'une famille à l'autre : pour les I est recherchée *a priori* une vision d'ensemble de la mécanique des fluides avec un modèle prédictif et quantitatif valable dans différents contextes, tandis que pour les T ou les MB, l'objectif visé est lié à un contexte donné, le fonctionnement d'une machine hydraulique pour les T par exemple ou le fonctionnement du système cardiovasculaire pour les MB, les autres objets de référence et mondes évoqués n'étant alors utilisés que comme outil pédagogique pour illustrer le propos du cours sans démarche de modélisation associée.

Par contre, autant la démarche de contextualisation est apparue plus développée chez les enseignants américains que chez les enseignants français, autant la démarche de modélisation n'a pas présenté des différences aussi marquées que ce que l'on supposait entre les deux pays. De manière générale, le pays d'exercice n'est pas apparue dans cette enquête comme le principal facteur impactant les pratiques enseignantes.

Enfin, des spécificités individuelles marquées ont également été observées dans les familles. Ainsi, un enseignant intervenant dans des formations de techniciens et n'étant pas chercheur, a présenté des démarches de modélisation et de contextualisation plus construites et variées que des enseignants-chercheurs intervenant dans des filières généralistes de formations d'ingénieur.

Cette étude, ancrée en didactique, a ainsi permis d'apporter des connaissances sur les pratiques enseignantes en mécanique des fluides en premier cycle universitaire. Un autre point fort de cette étude pourrait être qualifié de théorique, au sens où ont été mis en avant des aspects de ce qui pouvait être regardé dans les pratiques d'enseignement sur les modèles et la modélisation.

Des propositions de questions et de situations ont également été présentées.

Les outils que constituent **le questionnaire construit et la grille d'analyse associée pourraient être réutilisés pour d'autres études sur les pratiques des enseignants, dans d'autres domaines que la mécanique des fluides.**

En effet, la grille d'analyse construite ici présente des aspects spécifiques à cette étude, comme par exemple les types de réponse liés à des situations propres à l'enseignement de la

mécanique des fluides, et d'autres plus généraux et décontextualisés, comme la proposition de catégories sur la visée d'un recours à l'expérimental.

Des pistes pour la formation des enseignants

Les constats que nous avons proposés peuvent aider à dégager des objectifs généraux de formation pour les enseignants du premier cycle du supérieur. Bien qu'ils soient réalisés sur un effectif réduit d'enseignants, il nous semble pouvoir faire l'hypothèse de l'existence de tendances propres à certaines familles et d'autres, communes à toutes. Aussi, une formation axée sur la modélisation et les modèles ou / et le recours à l'expérimental et à l'histoire des sciences pourrait être proposée en commun aux différentes familles d'enseignants tandis qu'il semblerait davantage adapté de sélectionner le public pour une formation axée sur des éléments de réflexion liés, par exemple, à la variété des supports pédagogiques, ou à la variété des mondes empiriques retenus, ou encore à la prise en compte des étudiants.

Dans tous les cas, une réflexion fine sur les contenus à proposer, que ce soit en enseignement ou en formation, serait à mener. Quels éléments communs ? Quels éléments spécifiques ? Quelles articulations, notamment entre disciplines différentes mais aussi entre niveaux d'enseignement ? Que dire, et quand le dire, d'une loi de la physique en enseignement de biologie ou en médecine ?

Les objectifs ci-dessous correspondent à des enjeux importants mis en avant dans la littérature et nous semblent donc devoir être travaillés prioritairement.

Un modèle n'ayant pas vocation à être limité à une situation donnée, il s'agit d'aider l'enseignant à construire un répertoire de situations large et à le questionner. Cela devrait lui permettre de diversifier les contextes empiriques qu'il introduit en classe et à une réelle articulation des champs théorique et empirique.

De plus, la littérature mettant en avant l'importance d'une approche explicite et réflexive pour l'apprentissage de savoirs épistémologiques, il s'agit aussi de l'aider à intégrer dans son enseignement des moments pour travailler des savoirs de cette nature. Les activités et synthèses proposées aux étudiants pourraient mobiliser certains des outils élaborés par les didacticiens travaillant sur la modélisation, par exemple le schéma de Tiberghien et Vince (2005) mettant en regard le champ théorique et empirique que certains manuels d'enseignement du secondaire ont repris. Les étudiants devraient ainsi mieux saisir la portée d'un modèle et son rapport à la réalité.

Par ailleurs, il s'agit aussi d'aider les enseignants à considérer les difficultés et modes de raisonnement des élèves et étudiants pour définir des objectifs d'apprentissage (et ainsi des objectifs-obstacles, Martinand, 1986), en particulier en lien avec la modélisation. Les recherches montrent en effet que des contenus d'enseignement définis ainsi permettent aux étudiants une meilleure appropriation des concepts scientifiques.

En ce qui concerne le recours à l'expérimental, il s'agirait en particulier de développer chez les enseignants leur réflexion sur les visées potentielles associées (par exemple la familiarisation pratique, l'élaboration théorique, l'investigation empirique). Il s'agirait

également de leur montrer qu'il est possible de mener en cours, de manière collective, grâce à un échange direct avec les étudiants, une réflexion sur les modèles étudiés. La mécanique des fluides est en effet un domaine pour lequel existent plusieurs manipulations de cours, simples à mettre en place, rapides à exécuter, peu onéreuses et visuelles, qui, si elles étaient mises en œuvre, permettraient de faire entrer les étudiants dans une démarche de questionnement et de modélisation, de vérifier la légitimité des approximations effectuées et d'interroger la validité du modèle retenu. Signalons par ailleurs que les diverses études réalisées aident à proposer des thèmes pour des activités de type projet.

L'étude historique permet de suggérer des pistes et d'associer des objectifs épistémologiques à des thèmes historico-scientifiques du domaine de la mécanique des fluides. Par exemple, on pourrait mettre en avant l'existence d'avis divers au sein d'une communauté et l'influence socio-économique sur le choix des théories à travers la crise des années 1770, crise particulièrement longue et marquée par un gouffre important entre théoriciens et praticiens. On pourrait également illustrer le contexte culturel d'une théorie scientifique en pointant que la réflexion philosophique sur la notion de mouvement circulaire a influencé les travaux d'Harvey sur la circulation sanguine (Venville, 1997).

Il nous semble qu'un travail sur des objets communs d'enseignement au sein de groupes réunissant non seulement des enseignants de disciplines différentes mais aussi de filières de formation différentes serait susceptible de favoriser un enrichissement des regards et des pratiques.

Les différents outils élaborés au cours de cette recherche pour recueillir et analyser les réponses des enseignants (trame d'entretien et questions, grille d'analyse en termes de catégories et sous-catégories de *Representations & Strategies* et de *Student Learning & Conceptions*, profil enseignant schématisé 'sous forme d'une fleur') sont autant d'outils susceptibles d'être utilisés en formation afin d'amorcer la discussion avec les enseignants sur leurs pratiques et d'aider à leur développement.

Pour terminer, signalons que ces suggestions peuvent également concerner la formation des enseignants du secondaire, ce qui semble d'autant plus approprié que modélisation, contextualisation, expérimental et histoire des sciences, restent les mots clés des programmes d'enseignement de physique-chimie de lycée mis en œuvre à partir de la rentrée 2019 et que la dynamique des fluides fait à présent partie du programme de terminale scientifique.

Limites du travail réalisé et pistes pour des recherches ultérieures

Signalons tout d'abord que si des échanges sur les catégories d'analyse et interprétations des données ont pu avoir lieu au cours de réunions de laboratoire et avec ma directrice de recherche, **la stabilité intersubjective du codage** des entretiens reste à atteindre. En effet, j'ai mené seul le codage des entretiens. Il n'y a pas eu de comparaison avec le codage réalisé par un autre chercheur. Pour autant, le codage a été mené plusieurs fois pour un même enseignant, suite à la

stabilisation de la grille d'analyse.

Les tendances observées auraient à être confortées en augmentant **la taille des échantillons**, qui était **limitée** dans cette étude (49 enseignants pour l'échantillon étudié et 23 enseignants pour l'échantillon analysé). Pour tester les hypothèses sur les variables explicatives, il y aurait à mener une étude quantitative, ce qui nécessiterait l'élaboration d'un questionnaire écrit à faire passer à un échantillon à plus grande échelle. A ce propos, pour analyser de manière statistique l'influence des variables explicatives, on aurait intérêt à remplacer les tableaux retenus au chapitre 9 (paragraphe 9.4.1) par des tableaux chiffrés. Par exemple, le tableau 9.4.1.4 deviendrait le tableau 10. Pour rappel, dans le tableau 9.4.1.4, l'enseignant est indiqué en noir si lors de l'entretien, il se présente comme n'étant qu'enseignant, en **gras**, si lors de l'entretien, il se présente comme chercheur dans un domaine proche de la mécanique des fluides et en **gras souligné**, si lors de l'entretien, il se présente comme chercheur en mécanique des fluides.

		Modélisation												
		Limitée				Intermédiaire				Développée				
Contextualisation empirique (Objets et phénomènes – Mondes)	Limitée	I11		T1	T2	I7							I20	
	Intermédiaire		I14				<u>I15</u>		U6		I9			T3
	Développée							<u>U5</u>		I5		<u>I13</u>		
Visée recours expérimental	Limitée	I11	I14	T1	T2	I7	<u>I15</u>		U6		I9	<u>I13</u>		T3
	Intermédiaire							<u>U5</u>		I5			I20	
	Développée													
Visée histoire des sciences	Limitée	I11	I14	T1	T2		<u>I15</u>					<u>I13</u>	I20	
	Intermédiaire					I7		<u>U5</u>	U6	I5	I9			T3
	Développée													
Nombre de supports	Limité	I11	I14			I7	<u>I15</u>	<u>U5</u>	U6	I5	I9	<u>I13</u>		
	Intermédiaire			T1	T2								I20	T3
	Développé													

Tableau 9.4.1.4
Répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur domaine de recherche

Caractéristique de l'enseignant		Modélisation	Contextualisation empirique	Visée recours Experimental	Visée histoire des sciences	Nombre desupports
Qu'enseignant	I5	3	3	2	3	1
	I7	2	1	2	3	1
	I9	3	2	2	3	1
	I11	1	1	1	2	1
Chercheur proche de la mécanique des fluides	I14	1	2	1	1	1
	I20	3	1	3	1	3
Chercheur en mécanique des fluides	I13	3	3	1	1	1
	I15	2	2	2	2	2

Tableau 10

Nouvelle répartition des enseignants sélectionnés en fonction de leur domaine de recherche

Ici, au vu de la taille de l'échantillon donné, aucune étude statistique n'a été menée. Le tableau 9.3.1.4 était donc suffisant pour essayer de détecter des tendances.

Par ailleurs, cette étude est fondée sur des pratiques déclarées d'enseignants. Nous avons bien conscience des **écarts existant entre le déclaré et le pratiqué**. Latour (2006, p.26), par exemple, rappelle l'existence de tels décalages, qu'il a observés lors de son étude sociologique d'un laboratoire américain. Il indique que « *si nous interrogeons un chercheur sur ce qu'il fait, qui nous répond ? Le plus souvent, c'est l'épistémologie, c'est la philosophie des sciences qui souffle les réponses. Ça parle de méthode scientifique, d'expérience cruciale, de falsification, de paradigme, de concept ou de réalisme rationnel (...)* Plus le chercheur est célèbre, plus sa science est dure, plus il est lettré, et, disons-le, plus il est français, moins ce qu'il dit ressemble à sa pratique ou aux discours moins peaufinés de ses jeunes collaborateurs ».

Nous avons donc cherché à voir ce qu'il en était au sein de l'échantillon étudié en assistant aux cours ('lectures') de plusieurs enseignants (I14, I17, et T7) et en assistant à des séances de travaux pratiques (I18) aux États-Unis.

Nous avons constaté que I17 présentait durant ses cours un décalage marqué avec ses pratiques déclarées, tandis que I14 était plus cohérent.

Nous n'avons pas pu en faire un objet d'étude, ce qui serait à mener.

Un autre aspect limitant notre étude est que **nous n'avons eu accès qu'à des enseignants s'étant déclarés volontaires** pour participer à cette enquête. Généraliser les résultats obtenus nécessiterait de mener une enquête auprès d'enseignants non volontaires *a priori* comme dans l'étude réalisé par Roy auprès d'enseignants du second degré (2014).

Rappelons ensuite que les données exploitées et présentées ici sont partielles. D'une part, parmi les entretiens analysés, **une partie des questions posées n'a pas été traitée.** D'autre part, **parmi les entretiens menés, tous n'ont pas été totalement analysés.**

Afin de prolonger l'étude menée ici, la grille d'analyse que nous avons construite pourrait être employée pour aborder les situations 'contextualisées physiologie' associées à la question Q18 (cf Annexe E.4), complémentaires des situations 'contextualisées physique' des questions Q15 à Q17 (respectivement 'rétrécissement', 'couplage' et 'pertes de charge').

De plus, nous pourrions poursuivre l'exploitation des questions en lien avec les étudiants et examiner celles concernant l'évaluation. L'étude sur les variables explicatives pourrait être prolongée, par exemple le recours aux manuels.

Les caractéristiques des réponses des enseignants et des familles à ces questions pourraient être différentes de celles observées dans cette enquête centrée sur les modèles et les contextes et complèteraient la vision d'ensemble des pratiques enseignantes déclarées.

Nous nous sommes limités ici à l'étude détaillée des entretiens pour lesquels les réponses obtenues étaient les plus fournies. Ceux pour lesquels les réponses sont moins fournies n'auraient pas permis d'obtenir le profil complet des enseignants associés. Cependant, la grille d'analyse étant constituée, conduire une étude de ces entretiens-là permettrait de valider les parties de la grille pour lesquelles des réponses ont été obtenues. Par ailleurs, la meilleure connaissance des enseignants acquise par les entretiens réalisés pourrait être mise à profit pour augmenter la population interrogée et obtenir des réponses fournies grâce à l'anticipation de leurs difficultés et réactions.

Une réflexion sur les questions posées en entretien aurait à être prolongée.

Pour que les enseignants explicitent davantage leur pensée et avoir accès aux raisons de leurs choix et ainsi aux « orientations », il serait souhaitable de systématiser les questions posées et de toujours accompagner une question de « Pourquoi ? ».

Il serait également judicieux de proposer des questions complémentaires. Par exemple, lorsqu'est évoqué comme idée essentielle qu'un écoulement s'effectue des zones de pression élevée vers celles de pression faible, questionner cette idée en demandant à l'enseignant ce qu'il en serait dans le cas d'un élargissement de canalisation où la pression augmente localement.

Il serait par ailleurs nécessaire de trouver des stratégies de relance dans le cas de posture d'évitement.

Afin de perturber le discours établi de certains enseignants et d'accéder ainsi à leurs convictions, il serait possible d'envisager davantage de situations déstabilisantes, en repensant la formulation des questions.

Par exemple, en lieu et place de la question Q8 sur le syllabus, il serait possible de demander à quelle question répondait le programme proposé en mécanique des fluides.

Cette nouvelle formulation a été testée auprès de I7 et l'a déstabilisé. I7 est perturbé : « *(silence)* Il [le programme] répond à quelle question // Euh // alors s'il répond à une question c'est pas moi qui me l'a suis posée le premier puisque ce n'est pas moi qui suis responsable du programme / Euh // Il répond à quelle question / C'est une très bonne question // Celle-là aussi // *(silence)* Ben pff // j'ai l'impression qu'il répond à la même question que pour tout un ensemble d'autres domaines abordés dans l'année / C'est des euh // mettre en place un // mettre en place le // ». Puis ensuite, I7 construit sa réponse : « *un formalisme / une théorie voilà / attachée à un domaine / à un domaine de la physique / Mécanique des fluides / électromagnétisme et cetera // pour // pour toujours la même chose décrire et expliquer des phénomènes naturels ou expérimentaux / Voilà / Jusqu'à un certain point fixé par le programme compte-tenu du temps imparti / J'ai pas décelé de*

// j'ai pas décelé de réponse différente / Plus transcendante / ».

Un thème de réflexion possible pour les questions à poser concernerait le registre des **convictions disciplinaires**, à travers par exemple la manière dont les enseignants évoquent la notion de turbulence dans un cours introductif de mécanique des fluides.

Selon Nordond (1992), il y aurait consensus à peu l'aborder, ce qui résonne avec les propos des enseignants interrogés. Lorsqu'ils l'évoquent en entretien, elle est en effet quasi systématiquement connotée négativement, en particulier par les enseignants de formations médicales (MB6, MB7, MB8), seul MB9 évoquant de manière positive la turbulence dans le cas du système digestif.

Pourtant, Nordond évoque non seulement des aspects négatifs de la turbulence (chocs, dégradation d'énergie), mais également des aspects positifs, comme par exemple *« dissiper une énergie dangereuse ; c'est ainsi que dans certains barrages, grâce à une turbulence volontairement créée, on transforme en chaleur emportée ensuite dans le courant l'énergie cinétique ravageuse des jets d'évacuateurs de crues. »* (ibid., p.167)

Concernant l'analyse des données de cette étude exploratoire en lien avec le périmètre d'expertise en modélisation, nous n'avons abordé que des aspects de la modélisation communs aux différentes formations qualifiées de physique. Il y aurait à creuser la notion de périmètre d'expertise d'un enseignant: quels aspects étudier (modèles, contexte, attitude, élèves etc...)? Quels liens existent entre ces aspects? Ce périmètre est-il le même pour toutes les institutions?

Une réflexion sur le cadre d'étude retenu pour analyser ces entretiens aurait également à être prolongée.

Nous avons pu constater des constructions de modèle et une exploitation de ces modèles variées d'un enseignant à l'autre. Les catégories de PCK retenues sont cependant limitées et ne fournissent qu'un aspect du descriptif des pratiques déclarées des enseignants.

D'autres critères, plus proches des *beliefs & attitudes* anglo-saxons, distinguent également les enseignants interrogés et pourraient être approfondis. Garritz (2012, p.1), par exemple, propose une piste en analysant les pratiques d'enseignants de chimie sur les liaisons intermoléculaires dans une phase condensée sous l'angle de la motivation et de l'intérêt (*« a new element of PCK of the affective type »*).

Rappelons que **la composante affective des pratiques** n'est pas prise en compte de manière explicite dans le modèle de Gess-Newsome, alors qu'on a observé lors des entretiens des 'attitudes' variées concernant cette composante affective. Ainsi, I5, I13, I15 et I20 indiquent le plaisir qu'ils ont à évoquer leurs pratiques et à aborder les contextes présentés en entretien. De plus, ils semblent vivre l'entretien comme un moment de dialogue, ce que T1, U2, U6 et T7 expriment également. Les autres enseignants adoptent une attitude plus neutre, voire retenue. Deux expriment de la suspicion (T3 et T6). D'autres, enfin, vivent l'entretien comme une évaluation (MB2 par exemple).

Notons en outre que lorsque I7 évoque sa vision de ce qu'il attend de l'élève en termes de restitution du cours, il emploie le terme 'affectif' et l'explique : *« Affectif dans le sens où je donne donc j'aimerais bien recevoir en retour / Autant / »*.

Précisons de plus que nous n'avons pas trouvé dans la littérature de synthèse associée aux *Amplifiers & Filters*, proposés par Gess-Newsome suite au sommet sur les PCK en 2012. Dans les articles associés à ce thème, il est indiqué que tel ou tel aspect influence, amplifie, filtre les pratiques enseignantes mais à notre connaissance, à ce jour, il n'y a pas eu de synthèse des

recherches à ce sujet.

Bien que se limitant aux pratiques déclarées des enseignants, **croiser ces pratiques permet d'obtenir des éléments sur la dimension sociale des PCK**, qui n'est pas non plus prise en compte de manière explicite dans le modèle de Gess-Newsome et que Grangeat par exemple nomme 'division of labour' au sein du 'social context'.

Nous nous proposons de l'illustrer sur quelques exemples.

Aux États-Unis, I13 évoque un travail d'équipe très développé au sein de son département tandis que I12, qui appartient au même département, a un avis plus nuancé.

I13 indique par exemple : « *but we made a group decision / All the teachers who teach fluid dynamics / We have a group / you know / a caucus as we call it (...) We have to all agree that we will teach the same material and maybe on a week or two we may deviate from that syllabus but we all have to agree that most of the course we're gonna teach the same material / using the same textbook* », tandis que I12, du même département, fournit comme réponse à la question du syllabus qu'il a retenu par rapport à celui de sa collègue du département qui enseigne en parallèle le même cours que « *No / No / Separate / We're independent / We don't do the same homework /* ». De même pour le syllabus et les examens : le travail en équipe dans ce département ne semble pas aussi développé que ce qu'annonce I13. I12 indique également que le groupe de travail évoqué par I13 ne se serait rencontré qu'une fois en 5 ans pour choisir l'ouvrage et les principaux points à aborder en cours.

De plus, durant l'entretien, I12 présente ses objectifs pour les TP et précise : « *It's pretty obvious what we want to understand /* ». A la question s'il explicite ses attentes aux TA (*Teaching Assistants*) qui gèrent, seuls, les séances de TP, il répond : « *we choose TA that like fluid mechanics and understand it /* ».

Il s'avère qu'une TA en charge de ce TP, I20, a été interviewée : elle indiquait être davantage intéressée par la mécanique que par la mécanique des fluides, qu'elle n'avait pas choisi de gérer ce TP et qu'elle ne reprendrait pas ce poste l'année suivante (« *hopefully not* »). I20 précisait aussi ne pas avoir vraiment reçu de formation mais cela ne lui semblait pas utile puisque, dans ce TP, « *I don't have to organize* ». A la question des objectifs de ce TP, elle répond 'ce qui est dans le poly', « *Practical knowledge / Hm // I don't know really /* » : ce qui était apparent pour I12 ne semble pas l'être pour cette TA en charge des TP. Sa réponse à la question sur le lien entre le TP et le cours se résume à : « *kind of the same knowledge* ».

Lorsqu'il est signalé à I12 que la TA rencontrée ne correspond pas aux critères qu'il a énoncés, il répond : « *well // Sometimes it depends on the graduate office / How much money they have /* ».

Enfin, évoquons le cas de I14, qui achève son PhD au département de mécanique où travaille I12. Concernant le manuel retenu, I14 indique : « *I didn't get my own choice* » et il sourit. La première fois qu'il a rencontré son référent, qui est I12, « *I was told 'use this textbook' [à savoir le manuel corédigé par I12] /* ». I14 signale que personne n'a relu ses cours. Il n'a pas assisté à d'autres cours mais des collègues de son laboratoire ont assisté au sien et lui ont fait des suggestions. Il indique avoir suivi un cours sur « *being a TA* », davantage centré sur une attitude générale à avoir face à des étudiants et sur comment gérer un cours que sur des questions de didactique disciplinaire par exemple.

Croiser les pratiques déclarées permet également d'obtenir des éléments du '**contexte instrumental**' évoqué par Grangeat.

Par exemple, en France, à propos des pertes de charge, I4 évoque en entretien la situation des deux réservoirs évoquée à la question Q17 ('pertes de charge'), avant même que je ne la lui montre. Il me signale une erreur que l'on trouve souvent sur le schéma représentant cette situation

: « je leur fais souvent cette démo en montage / (...) L'erreur c'est d'avoir une droite partant du haut du réservoir et on aligne le niveau libre du liquide (...) Je ne sais pas si c'est une erreur qui est discutée et qui sera popularisée et ce sera très bien ». Cette erreur lui avait été signalée par un de ses collègues didacticiens (décédé depuis).

Le lendemain, I2, qui enseigne dans la même préparation au CAPES que I4, me transmet en fin d'entretien leur polycopié de TP. J'y découvre un schéma proche de celui de la situation des deux réservoirs de la question Q17 'pertes de charge' (cf Annexe C.3.).

Il s'avère que le schéma représenté dans ce polycopié est erroné, ce que I4 ne m'avait pas signalé la veille. Ceci interroge notamment sur la participation de l'ensemble des membres d'une équipe enseignante donnée sur l'élaboration des fascicules de TP.

Par ailleurs, l'aide d'un recours au numérique pourrait être étudiée. En effet, une majorité des enseignants interrogés n'aurait pas recours à la simulation numérique pour enseigner l'écoulement d'un fluide. Par contre, ceux qui l'utilisent (I20, U2, U5 et U6) le font abondamment. Les interactions entre théorie, expérience et simulation pourraient être approfondies (Fraser, 2007 ; Buty, 2010).

Rappelons que nous n'avons pas analysé les réponses sous cet angle des dimensions affectives et sociales et que c'est une piste qui pourrait être explorée, la centrant sur la question du savoir : qui prend en charge tel ou tel aspect ? Que retient l'enseignant de telle ou telle ressource ? Cela reviendrait sans doute à croiser le cadre des PCK avec d'autres cadres (travail collaboratif par exemple).

Nous terminons en suggérant quelques pistes inspirées par certaines réponses d'enseignants qui pourraient être explorées **du côté des élèves** et non pas seulement des enseignants.

Des pistes sont centrées sur les représentations des modèles.

En effet, une partie des confusions et malentendus perçus chez les enseignants en entretien pourraient se retrouver chez les étudiants, notamment concernant l'**articulation des modèles** pour étudier la situation de la question Q16 ('couplage').

Les approximations sur un écoulement pourraient également être abordées. Par exemple, commenter l'application de l'approximation d'écoulement incompressible à un gaz générerait probablement des difficultés chez les étudiants, à l'instar de T2 qui indique qu'« on est dans le cas d'un fluide incompressible / (...) On doit leur définir un fluide incompressible / C'est la base / Un gaz c'est compressible / Un liquide non / L'eau par exemple / ». T2 ne perçoit pas le décalage entre d'une part assimiler ' fluide incompressible' au seul cas d'un liquide et d'autre part illustrer son cours par l'étude de l'écoulement d'un gaz et non d'un liquide autour d'une aile d'avion.

Rappelons à nouveau que dans un document de travail proposant des tests sur les conceptions des élèves sur l'écoulement du sang dans le corps, on a pu constater un amalgame entre **les approximations d'écoulement incompressible et d'écoulement parfait** (Guide, 2010).

On peut s'attendre également à une confusion entre **les propriétés d'un écoulement laminaire et celles d'un écoulement parfait**.

D'autres pistes sont centrées sur les difficultés des élèves et sont liées au contenu disciplinaire. Par exemple, les représentations d'un fluide incompressible, la notion de point d'arrêt dans un écoulement ou les différentes échelles d'étude, entre une approche locale et une approche globale.

D'autres pistes enfin sont centrées sur les difficultés des élèves liées aux démarches de raisonnement. Les quelques entretiens préliminaires menés auprès d'étudiants ont révélé des difficultés de raisonnement chez eux, liées à des conceptions naïves encore présentes après enseignement, notamment lors de l'étude d'un rétrécissement.

La confrontation d'élèves et de leurs enseignants aux situations des questions Q15 à Q18 pourrait constituer une partie de la trame d'entretiens associés à une telle étude.

Lors de ces entretiens éventuels, des situations centrées sur la prise en compte d'une différence de pression pourraient être proposées. Parmi les démarches de raisonnement pouvant poser problème aux étudiants figureraient probablement l'étude d'un écoulement non permanent, les bilans (de matière, d'énergie, de quantité de mouvement, etc.) et le raisonnement causal.

Associer les représentations des modèles chez les élèves aux questions de contenu disciplinaire et de raisonnement permettrait de mieux appréhender leur compréhension des modèles et leur capacité à raisonner et de mieux appréhender le lien entre ces différents aspects, ce qui permettrait de répondre à la nécessité de combler le manque de recherches de ce type mentionné dans la littérature.

Annexes

Annexe A : Eléments de littérature en lien avec des stratégies d'enseignement de l'histoire des sciences

Parmi les documents lus, on constate un recours à l'histoire des sciences recommandé dès la fin du 19^e siècle, tant pour l'enseignement secondaire que supérieur : par exemple, Bouasse signale une telle recommandation pour les programmes de physique en France en 1891 (Locqueneux, 1999).

Des tests ont été réalisés sur des étudiants, futurs enseignants, et sur de jeunes enseignants. Durant leur cursus universitaire, apprendre l'histoire des sciences leur apparaît moins prioritaire qu'apprendre les rouages du métier (Abell, 2007). D'où, par la suite, une non introduction de cette notion en situation d'enseignement.

Promouvoir l'histoire des sciences dans l'enseignement constitue pourtant une piste d'amélioration des pratiques enseignantes, recommandée notamment par la communauté didacticienne et le courant de la NOS.

Nous évoquons ici trois éléments en lien respectivement avec une épistémologie appliquée de l'histoire des sciences, les modes d'exposition de l'histoire des sciences et sa place dans les manuels de physique.

Une épistémologie appliquée

Martinand (1993) pense la place de l'histoire des sciences au sein du système éducatif français et s'interroge sur les conditions d'articulation entre une approche du sens historique et une initiation aux connaissances opératoires.

Il estime qu'en France, le passage des « *leçons de choses* » (*ibid.*, p.92) à une initiation scientifique a donné lieu à deux erreurs d'appréciation de la part des scientifiques : d'une part croire qu'il suffit d'analyser la matière à enseigner et de la simplifier, alors qu'il s'agit de la construire et d'autre part, croire que le savoir enseigné correspond à une période historique du développement de la science, alors que les problèmes à étudier doivent être réélaborés. Il y a à transposer la pratique et la pensée scientifiques en tâches et savoirs scolaires et à légitimer les propositions associées.

Jugeant que les cursus universitaires « *permettent peu de réel contact avec les pratiques de la physique ou de la chimie, dans la recherche, l'industrie, la culture...* » (*ibid.*, p.98), le recours à l'histoire des sciences permettrait de « *nourrir la documentation et la réflexion sur ces pratiques, leurs évolutions, leurs fondements, sans visée didactique immédiate* » (*ibid.*, p.98).

Martinand estime qu'en termes d'apprentissage de la gestion de classe et de maîtrise curriculaire, « *la formation didactique n'a pas besoin d'histoire des sciences compte tenu des finalités habituelles* » (*ibid.*, p.98). Il insiste par contre sur l'apport de l'histoire des sciences pour développer la « *composante qui s'appuie sur l'innovation et la recherche, et qui assume donc une*

fonction critique et prospective » (ibid., p.98). Lorsque Martinand conseille « *que les élèves puissent mesurer leurs progrès aux obstacles franchis dans le passé par la communauté scientifique, d'inscrire l'acculturation scientifique dans une approche d'ensemble des relations Sciences-Techniques-Structures, de promouvoir l'appropriation de la science comme une aventure humaine, et pas seulement comme l'acquisition de connaissances théoriques et instrumentales et évolutions sociales* » (ibid., p.96), on retrouve ici la position défendue par la communauté de recherche sur la NOS.

Pour Martinand, une telle démarche passe par « *un changement de la conception des activités des élèves* » (ibid., p.96), en mettant en avant des activités de documentation, ce qui nécessite « *la mise à disposition d'outils documentaires pertinents* » : « *il s'agit de considérer la science comme objet de communication* » (ibid., p.96). Parmi les contraintes institutionnelles figure également l'organisation du cursus : « *par exemple, dans l'enseignement français, depuis la réforme de 1902, une question est cruciale pour tout programme : la capacité de réaliser des travaux pratiques, d'organiser ceux-ci sur l'année* » (ibid., p.94).

Deux modes d'exposition : historique et dogmatique

Sartori (2001, p.904) se réfère à l'analyse de Comte sur les deux modes d'exposition de l'histoire des sciences, historique et dogmatique : « *par le premier procédé, on expose successivement les connaissances dans le même ordre effectif suivant lequel l'esprit humain les a réellement obtenues, et en adoptant, autant que possible, les mêmes voies. Par le second procédé, on présente le système des idées tel qu'il pourrait être conçu aujourd'hui par un seul esprit, qui, placé du point de vue convenable, et pourvu des connaissances suffisantes, s'occuperait de refaire la science dans son ensemble* ».

Face au développement d'une science, l'ordre historique devient de moins en moins praticable, contrairement à l'ordre dogmatique. D'où le recours à un ordre dogmatique dans l'enseignement : « *le problème général de l'éducation intellectuelle consiste à faire parvenir, en peu d'années, un seul entendement, le plus souvent médiocre, au même point de développement qui a été atteint, dans une longue suite de siècles, par un grand nombre de génies supérieurs... Il serait certainement impossible d'atteindre le but proposé, si l'on voulait assujettir chaque esprit individuel à passer successivement par les mêmes intermédiaires qu'a dû suivre nécessairement le génie collectif de l'espèce humaine. De là, l'indispensable besoin de l'ordre dogmatique* » (ibid., p.904).

Signalons qu'une même conclusion est énoncée par Bouasse : « *si, pour toutes ces raisons, on nous accorde que la méthode historique d'exposition des sciences expérimentales est pratiquement impossible et dangereuse, vu sa longueur, vu la souplesse d'esprit qu'elle exige chez l'étudiant, la méthode dogmatique se trouve dès lors imposée* » (citation de Bouasse dans Locqueneuxa, 2009, p.225).

Place de l'histoire des sciences dans les manuels scientifiques

Concernant le projet de Conant (cf 2.1.2), le président de l'université d'Harvard, au sortir de la seconde guerre mondiale, de centrer l'éducation en sciences des G. I. sur l'étude de cas historiques, Duschl (2013) signale que Kuhn y a participé. Ce projet l'a nourri pour sa réflexion sur la structure des révolutions scientifiques. Conant a anticipé l'impact de la science, de l'ingénierie et de la technologie sur la société au sortir de la deuxième guerre mondiale. Il a perçu

l'importance de former aux sciences des non-scientifiques, notamment d'explicitier la démarche scientifique. Pour cela il a suggéré de l'illustrer par des cas historiques, les *Harvard Cases in History of Science* appelés aussi *Harvard Case Studies*.

Kuhn propose une analyse des manuels scientifiques (« *Les manuels de langues, comme ceux de science, enseignent comment lire la littérature, non comment la créer ou la juger.* » (Kuhn, 1990, p.257)). Leur visée énoncée serait de participer à la compréhension du paradigme en vigueur dans une communauté de recherche donnée : « *les applications décrites dans les manuels ne sont pas là pour servir de preuves mais parce que leur connaissance fait partie de la connaissance du paradigme, fondement du travail habituel* » (Kuhn, 2008, p.119).

Kuhn en déduit une justification de la faible place qu'y occupe l'histoire des sciences : « *Faits caractéristiques, les manuels scientifiques contiennent juste un peu d'histoire, soit dans un chapitre d'introduction, soit, plus souvent, dans des références sporadiques aux grands héros du passé. Ces références donnent aux étudiants et chercheurs professionnels le sentiment de participer eux aussi à une longue tradition historique. Cependant cette tradition dérivée des manuels, dont les scientifiques arrivent à se sentir les participants, n'a en fait, jamais existé. Pour des raisons qui sont à la fois évidentes et hautement fonctionnelles, les manuels scientifiques (et un trop grand nombre des anciennes histoires des sciences) ne retracent qu'une partie des travaux scientifiques du passé, celle qui peut facilement être considéré comme une contribution à l'énoncé et à la solution des problèmes paradigmatiques de ces manuels.* » (ibid., p.191).

Kuhn légitime cette démarche pour des raisons fonctionnelles (« *La dépréciation du fait historique est profondément et sans doute fonctionnellement intégrée à l'idéologie de la profession scientifique, cette même profession qui accorde tant de valeurs au détail des faits d'un autre genre.* » (ibid., p.192)) et pour des raisons pédagogiques : via un manuel, il s'agit de fournir au lecteur de manière synthétique l'état d'avancement de la réflexion dans une communauté de recherche (« *Cette reconstruction dans son aspect final n'implique pas seulement une multiplication des distorsions (...) Les révolutions y deviennent invisibles ; ce qui est rapporté dans les manuels subit un arrangement tel que le processus impliqué, s'il correspondait à la réalité, nierait toute fonction aux révolutions. Parce que leur but est de mettre l'étudiant rapidement au courant de ce que le groupe scientifique contemporain croit savoir, les manuels exposent les divers concepts, expériences, lois et théories de la science normale en les abordant autant que possible séparément et successivement. Sur le plan pédagogique, c'est inattaquable.* » (ibid., p.194)).

L'efficacité dans la délivrance du message est la priorité (« *L'objectif d'un manuel est de fournir au lecteur, sous la forme la plus économique et la plus facilement assimilable qui soit, un énoncé de ce que la communauté scientifique contemporaine considère qu'elle sait et des principaux usages liés à ce savoir. Tout ce qui concerne la façon dont ce savoir a été acquis (la découverte) et les raisons qui ont mené la communauté à l'accepter (la confirmation) peut être au mieux considéré comme une information en surplus. Même si la présence de ce type d'information donne très certainement une plus-value « humaniste » au manuel et peut permettre de former des scientifiques plus ouverts et plus créatifs, elle complique obligatoirement l'apprentissage du langage scientifique contemporain* » (Kuhn, 1990, p.257)).

Kuhn en conclut : « *j'affirme que la mauvaise direction suivie par les manuels scientifiques est à la fois systématique et fonctionnelle. Il n'est absolument pas certain qu'une vision plus précise*

des processus scientifiques améliorerait l'efficacité des physiciens en matière de recherche » (ibid., p.258).

Il décrit le processus à l'œuvre dans un manuel. Il estime qu'au sein d'une communauté de recherche, une construction progressive du savoir y est proposée, dont la visée correspondrait au questionnement actuel de cette communauté, ce qui s'avère être erroné (« *dès le début de l'entreprise scientifique, suggère implicitement le manuel, les scientifiques ont lutté pour atteindre les objectifs particuliers qui sont matérialisés dans les paradigmes actuels. L'un après l'autre, au cours d'un processus souvent comparé à l'addition de briques à un bâtiment, les scientifiques ont ajouté un fait, un concept, une loi ou une théorie de plus à l'ensemble de connaissances fournies par le manuel scientifique contemporain. Mais ce n'est pas ainsi qu'une science se développe. Bon nombre d'énigmes de la science normale contemporaine n'existent que depuis les révolutions scientifiques les plus récentes. Il n'en est qu'un tout petit nombre qui remontent aux débuts historiques de la branche scientifique qu'ils concernent. Les générations précédentes ont poursuivi leurs propres problèmes, avec leurs propres instruments et leurs propres canons de solution. Et ce ne sont pas les problèmes seuls qui ont changé, mais bien le réseau entier de théories et de faits que le paradigme adapte à la nature.* » (Kuhn, 2008, p.195)). Kuhn (1990, p.311) constate d'ailleurs que « *les révolutions scientifiques suscitent la rédaction de nouveaux manuels* » et note (*ibid.*, p.269) par exemple que « *c'est en connaissant le type de résultats attendus des analyses chimiques que les chimistes inventèrent les techniques permettant de les obtenir. Par conséquent, les manuels actuels de chimie peuvent se permettre d'affirmer que l'analyse quantitative confirme l'atomisme de Dalton tout en oubliant que, historiquement, les techniques analytiques sont fondées sur la théorie elle-même qu'elles confirment. Avant l'annonce de la théorie de Dalton, les mesures ne donnaient pas les mêmes résultats. Il y a des prophéties qui s'accomplissent d'elles-mêmes dans les sciences physiques comme dans les sciences sociales* ».

Kuhn (2008, p.198) insiste sur l'influence du manuel sur notre vision de la nature de la science : « *plus que tout autre aspect particulier de la science, cette forme de littérature pédagogique a déterminé l'image que nous nous faisons de la nature de la science et du rôle de la découverte et de l'invention dans son développement* ». Il estime que cette influence « *s'exerce en partie directement : les manuels sont les sources uniques du tout premier contact qu'ont la plupart d'entre nous avec les sciences physiques. Leur influence indirecte est néanmoins, sans le moindre doute, plus forte et plus étendue. Les manuels ou leurs équivalents sont l'unique dépôt où sont consignés, sous leur forme achevée, les résultats auxquels sont parvenus les physiciens modernes* » (Kuhn, 1990, p.250).

« *Aucun manuel ne contient un tableau qui vise à infirmer ou infirme effectivement la théorie décrite. Les lecteurs des manuels contemporains acceptent les théories exposées sur la foi de l'autorité de l'auteur et de la communauté scientifique, et non pas en raison de la présence de tableaux [demeures].* » (*ibid.*, p.252).

Il rappelle l'importance du manuel tout au long du cursus scolaire d'un étudiant en science : « *jusqu'aux stades vraiment ultimes de la formation d'un homme de science, les manuels sont substitués systématiquement à la littérature scientifique créatrice dont ils dérivent. Etant donné que c'est leur confiance dans leurs paradigmes qui rend possible cette technique pédagogique, peu de scientifiques accepteraient de la modifier. Pourquoi, après tout, l'étudiant en physique devrait-il lire les œuvres de Newton, Faraday, Einstein ou Schrödinger, alors que tout ce qu'il doit*

savoir sur ces travaux est récapitulé sous une forme beaucoup plus courte, plus précise et plus systématique dans un certain nombre de manuels modernes ? » (Kuhn, 2008, p.226).

Un tel rapport au manuel complique un éventuel enseignement de l'histoire des sciences : « Les historiens des sciences rencontrent souvent ce genre d'aveuglement sous une forme particulièrement frappante. Parmi les divers groupes d'étudiants, ceux qui ont une formation scientifique sont très souvent les plus valorisants. Mais ce sont aussi généralement les groupes les plus agaçants au départ. Parce que les étudiants de science « Connaissent la réponse juste », il est particulièrement difficile de leur faire analyser une science plus ancienne en ses propres termes. » (ibid., p.228).

Le type de recours au manuel évoqué par Kuhn s'inscrit dans le cadre plus général de la formation de l'étudiant en science où *« la connaissance scientifique est enfermée dans la théorie et les règles ; on donne des problèmes pour entraîner l'étudiant à appliquer celles-ci avec plus de facilité (...) L'aptitude qui en résulte de voir qu'un certain nombre de situations se ressemblent et sont soumises à la loi $f = m a$, est, me semble-t-il, l'essentiel de ce qu'acquiert un étudiant en faisant des problèmes à titre d'exemples, soit avec un crayon et du papier, soit dans un laboratoire bien conçu. Après en avoir résolu un certain nombre, qui varie beaucoup d'un individu à l'autre, il considère les situations devant lesquelles il se trouve placé comme scientifique sous la même forme que les autres membres de son groupe de spécialistes. Ce ne sont plus pour lui les mêmes situations que celles qu'il avait rencontrées au début de sa formation. Dans l'intervalle, il a assimilé une manière de voir autorisée par le groupe et éprouvée par le temps. » (ibid., pp.255-258).* Kuhn se réfère par exemple à Daniel Bernoulli qui *« découvre comment assimiler au pendule de Huyghens l'écoulement de l'eau par un orifice » (ibid., p.258).* Ce point est décrit en détail par Darrigol dans son ouvrage sur l'histoire de la mécanique des fluides (Darrigol, 2005).

Kuhn constate donc que les manuels influent sur la vision de la NOS des lecteurs. Il justifie la place qui est laissée à l'histoire des sciences dans les manuels scolaires : **le but d'un manuel scientifique est de fournir au lecteur l'état des connaissances sur une thématique donnée de la manière la plus synthétique possible. C'est l'efficacité dans la transmission du message qui y est recherchée.**

La fonction accordée à l'histoire des sciences ne peut donc y être qu'annexe. Les éléments d'histoire des sciences retenus ont comme rôle de confirmer la vision synthétique proposée dans le manuel. L'évocation des principaux contributeurs parmi les chercheurs vise à conforter le lecteur dans le sentiment de partager le projet d'une communauté de recherche.

Un exemple de vision sur l'histoire des sciences : le cas d'enseignants-stagiaires québécois

Guilbert (1993) s'intéresse à l'idée de science chez de futurs enseignants québécois via une enquête menée auprès de 36 étudiants inscrits principalement à un certificat en enseignement collégial ou secondaire. Guilbert présente ses résultats sur leur vision de l'histoire des sciences qui reposerait *« sur le présupposé suivant : NOS connaissances actuelles sont un acquis sur lequel il n'est pas nécessaire de revenir, sur lequel on peut bâtir d'autres connaissances. En ce sens, il reste moins de choses à découvrir même s'il en reste beaucoup. »* Cela *« semble induire une autre croyance selon laquelle il était plus facile de « faire des découvertes » au tout début de*

la science moderne puisqu'il y avait plus de choses à découvrir. Cette opinion rejoint une vision réaliste qui implique que les connaissances scientifiques tendent vers les lois de la nature. » (ibid., p.13).

Contrairement aux manuels qui insistent sur l'influence de la science sur la société, les enseignants interrogés mettent en avant l'influence de la société sur la science, notamment « *les contraintes liées à l'obtention de sources de financement qui semblent au cœur du problème* » (ibid., p.16).

Comme preuve de l'impact de la vision déformée de l'histoire des sciences chez ses futurs enseignants, Guilbert se réfère à la notion de 'hasard' qui serait avancée par ces étudiants lorsqu'il s'agit d'évoquer une avancée scientifique. Cela ne surprend pas Guilbert « *puisque l'histoire événementielle en foisonne* » (ibid., p.20). Ce manque de connaissances historiques « *demeure un obstacle à leur compréhension du fonctionnement, des contraintes, des limites et des motivations de la science actuelle* » (ibid., p.22).

Se maintient la croyance en un antagonisme entre la science d'hier et celle d'aujourd'hui : vision qualifiée de naïve pouvant « *résulter d'un enseignement implicite reçu tout au long du cursus scolaire ou de leur expérience personnelle* » (ibid., p.24). « *Devant la « dure » réalité de ce qu'est la science du vingtième siècle, les futurs enseignants chercheraient à protéger leur image idéalisée de la science en se disant qu'autrefois la science était pure, objective, désintéressée et que, si la science d'aujourd'hui n'est plus ce qu'elle était, ce n'est pas par impossibilité mais bien par détérioration ; il suffirait de retrouver la pureté d'antan* » (ibid., p.24).

Guilbert conclut qu'une « *meilleure compréhension de la part des futurs enseignants des modes de construction du savoir scientifique et des contingences socio-historiques n'est pas qu'un débat théorique mais éminemment pratique. En effet, le développement d'une autonomie intellectuelle et d'une capacité de recul critique face aux experts passe par une démystification du « Savoir scientifique », et par conséquent par une vision plus contemporaine de l'épistémologie et de l'histoire des sciences. C'est un enjeu pédagogique, démocratique et éthique* » (ibid., p.26) : on retrouve ici des constats et préconisations formulées par la communauté de recherche sur la NOS.

Annexe B : Eléments d'histoire de la mécanique des fluides

Nous débutons cette annexe en rappelant la frise du document 5.2.1 qui retrace les principales étapes qui ont eu lieu en mécanique des fluides entre le 17^e siècle et la première moitié du 20^e siècle.

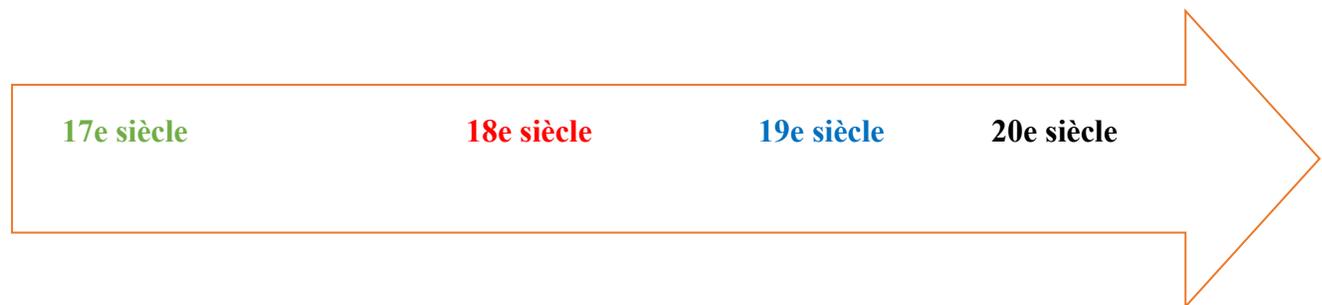
Écoulement via un orifice

Torricelli, Newton

Prise en compte de la viscosité

Navier, Stokes

Helmholtz, Reynolds, Poiseuille



Écoulement « parfait »
Bernoulli (père et fils),
D'Alembert, Euler

Couche limite
Von Karman,
Prandtl

Document 5.2.1
Principales étapes de l'histoire de la mécanique des fluides
du 17^e siècle à la première moitié du 20^e siècle

Dans cette annexe, nous adoptons un ordre chronologique pour présenter ces éléments d'histoire des sciences en mécanique des fluides.

Dans le système éducatif actuel, l'accent étant mis sur les contributions individuelles, nous avons suivi ce type de présentation.

Le cas de l'écoulement sanguin est ensuite abordé, de manière séparée, mais en suivant la même trame.

B.1. Les prémisses

Nordon se réfère à Bachelard pour indiquer que jusqu'à la mort de Léonard de Vinci, la science hydraulique en est au stade d'un esprit pré-scientifique. Et d'indiquer que cela perdure chez certains savants jusqu'au 18^e siècle : « *L'œuvre de Bernardin de Saint-Pierre est une longue parodie de la pensée scientifique* » (citation de Bachelard dans Nordong, 1992, p.44).

L'apport de Stevin

Parmi les contributions marquantes précédant le siècle des Lumières, Nordon évoque Simon Stevin (1548-1620), inspecteur des digues en Hollande. Il publie en 1586 un traité abordant le « *paradoxe hydrostatique* » : « *La pression sur une portion de plan formant le fond d'un réservoir ne dépend que de la hauteur du liquide qui la surmonte* » (Nordong, 1992, p.45).

Descartes voyage en Hollande en 1621 et s'intéresse aux problèmes abordés par Stevin. Galilée s'y intéresse également à la même période. Dans la lignée des travaux de Stevin, Pascal aborde le problème de la presse hydraulique en 1647 et Euler conclut ce travail en 1749 en énonçant que « *La pression exercée par l'eau sur un corps immergé s'exerce partout perpendiculairement à la surface du corps, et la force qui agit sur tout élément d'un corps immergé est égale au poids d'un cylindre vertical d'eau dont la base est cet élément et dont la hauteur est égale à la profondeur où l'élément est immergé* » (*ibid.*, p.46).

L'apport de Pascal

Nordon (1992, p.50) cite Pascal (1623-1662) concernant « *trois erreurs dans le monde* » à cette époque: croire que l'air est léger, que les éléments ne pèsent pas en eux-mêmes et que les effets observés dans certaines conditions se poursuivraient sans limite. Nordon l'associe au poids de la tradition et à des généralisations abusives issues d'expériences menées et constate, en lien avec les fontainiers d'Italie, que « *de simples artisans ont été capables de convaincre d'erreur tous les grands hommes qu'on appelle philosophes* » et que « *les expériences sont les véritables maîtres qu'il faut suivre dans la physique* » (citation de Galilée dans Nordong, 1992, p.52).

L'apport de Torricelli

Torricelli publie en 1641 un ouvrage dont un chapitre, *De motum aquarum*, est consacré au mouvement des fluides. Nordon précise qu'il « *utilise la dynamique de Galilée, mais c'est un simple point de départ, accepté ex abrupto, un résultat de la dynamique des solides transféré aux liquides à condition d'en considérer les gouttes élémentaires comme des solides indéformables* » (Nordong, 1992, p.54). Nordon estime qu'avec cette loi, Torricelli « *ouvre une porte de cinématique sans savoir que la dynamique est derrière* » (*ibid.*, p.54).

Torricelli étudie le mouvement de l'eau à la sortie d'un vase qui a été percé d'un trou étroit. Il choisit un vase large de niveau d'eau maintenu constant, permettant d'assurer un écoulement quasi-permanent. Il est à noter que Torricelli a rencontré Galilée et que ses travaux ont dû l'inspirer, notamment l'idée du mouvement parabolique. 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. Il constate que le jet d'eau ne parvient pas à monter jusqu'au niveau de la surface libre du réservoir. Il en conclut que « *L'expérience mesme semble en quelque façon prouver ce principe, bien qu'aussi elle semble en quelque façon le détruire* » (citation de Torricelli dans Blay, 2007, p.122). Huygens conclut à ce propos que la loi de Torricelli n'a pu être « *desmontrée par raison, mais seulement prouvée par expérience* » (citation de Huygens dans Blay, 2007, p.123).

Il s'agit alors de justifier la loi de Torricelli.

Blay (2007, p.9) indique que « *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* ».

Newton par exemple y contribue par la notion de veine contractée liée à la forme du jet observé en sortie d'un orifice étroit d'un réservoir. De plus, le livre II des *Principia* traite des milieux résistants et de la mécanique des fluides.

Signalons également la contribution de d'Alembert à ce sujet. Il tente une analogie entre la modification de la trajectoire d'un solide passant de l'air à l'eau et la réfraction de la lumière, qui est supposée constituée de particules. Cette analogie n'est finalement pas retenue: « *il fallait considérer le problème hydrodynamique dans sa spécificité* » (Paty, 1998, p.11).

L'évolution de l'hydraulique et de l'hydrodynamique du 17^e siècle au 18^e siècle

En parallèle de ces interrogations autour de la loi de Torricelli, **l'hydraulique**, qu'Eckert (2006) associe aux jeux d'eau des fontaines, **se rapproche d'une discipline scientifique** suite aux révolutions scientifiques des 16^e et 17^e siècles. Et ce, en particulier, dans le nord de l'Italie, où le savoir-faire en hydraulique rayonne ensuite à l'étranger. Eckert évoque l'intérêt à l'époque pour le siphon et son recours pour des problèmes d'alimentation en eau des villes, suggéré dans des traités, notamment celui de Mariotte (*Traité de Mouvement des Eaux*).

Au 18^e siècle, les académies royales s'intéressent à l'écoulement des fluides. En France, la construction du château de Versailles constitue un catalyseur. Nordon évoque les expériences de Couplet en 1732 sur la conduite d'amenée entre le réservoir de la place Dauphine à Versailles « *appelé le réservoir des bonnes eaux* » et celui des petites Ecuries du château de Versailles (Nordon, 1992). Euler est mandaté par le Roi Frédéric II de Prusse concernant un problème hydraulique au château de Sans-Souci. Euler propose une solution en 1754 et généralise les résultats en 1755. Il est à noter cependant que concernant l'alimentation en eau des fontaines du château de Sans-Souci, Euler n'est pas écouté. Le problème de canalisation perdure et le roi Frédéric II le lui reproche. Eckert (2006, p.545) estime que la cause de ce problème réside davantage dans la gestion du projet de construction de Sans-Souci que dans un décalage entre théorie et pratique venant d'Euler : « *the major cause of the failure was the King's stinginess ; compared to other 17th and 18th century water art constructions the Sansouci project was poorly organised and performed by men who were not qualified for their task. Blaming Euler, who -correctly- had analysed the cause for the failure but otherwise was not involved with the constructions, is more revealing about the King's ignorance and maliciousness than about Euler's alleged inability to combine theory with practice* ».

De plus, entre le 17^e siècle et le 18^e siècle, Hahn (1964) souligne **une évolution des manuels d'hydraulique**. Jusqu'au 17^e siècle, les ouvrages en hydraulique sont de tradition artisanale. Les données sont fournies en l'état et énumérées par ordre alphabétique. Tant qu'on ne cherche pas de nouvelles méthodes, cette approche dans la rédaction des ouvrages convient.

A partir de la fin du 17^e siècle, une démarche pédagogique est adoptée dans l'ordre des chapitres : il s'agit désormais d'enseigner. Faire comprendre la progression dans le raisonnement permet de construire des connaissances nouvelles. La démarche est systématique. Ce changement d'approche résulte de l'influence cartésienne (il s'agit notamment de trouver les fondements et de mettre en évidence les conséquences des connaissances construites).

C'est à cette période qu'apparaît le mot 'science' pour qualifier l'hydraulique.

Dès lors, il y a nécessité de construire une théorie avec comme principes : « *Prendre les idées les plus claires et les plus évidentes et les organiser logiquement afin d'en constituer un tout cohérent.* » (Hahn, 1964, p.11).

La difficulté est que les gens de terrain ayant tenté cette démarche ne sont pas partis des « *Bons* » fondamentaux.

Des connaissances de terrain sont établies mais il n'en va pas de même des connaissances théoriques, d'où une remise en cause de la situation par les savants de l'époque (Huygens notamment).

Pour autant, Hahn constate un conservatisme chez les praticiens au 18^e siècle qui les pousse à ne pas tenir cas des innovations. Et de citer Pierre Bouguer (1757) : « *quelquefois on regarde comme trop difficile, d'agir avec pleine lumière ou de suivre l'enchaînement de toutes les vérités intermédiaires ; on renonce, par paresse ou par impuissance, à l'avantage de voir parfaitement clair. On ferme les yeux, pour ainsi dire, en se servant du prétendu principe, et on s'élance vers le but, autant qu'il est possible, pour s'épargner la peine de s'y rendre pas à pas.* » (*ibid.*, p.13).

C'est dans ce contexte qu'interviennent les savants en hydrodynamique. Il y a une double origine à leurs travaux, à savoir d'une part la démarche de raisonnement de la mécanique rationnelle, qui est de généraliser, et d'autre part la transformation qui s'est déjà opérée dans les arts pratiques et qui pousse les artisans à solliciter les savants. Hahn souligne que cette seconde origine est souvent oubliée.

Abordons dès lors la période correspondant au siècle des Lumières.

Blay signale deux étapes : la construction d'un corps de science (de Torricelli jusqu'à Lagrange) puis ses développements (avec notamment la prise en compte de la viscosité, au 19^e siècle). Dans son ouvrage, Blay (2007, p.10) s'intéresse à la première étape, à la « *construction d'une rationalité* ».

Guilbaud (2007), lui, évoque deux périodes pour le développement de l'étude des écoulements au 18^e siècle : une première période, correspondant à une évolution des idées, et une deuxième période, que Guilbaud dénomme « *l'étape du retour vers le concret* » (*ibid.*, p.27).

En lien avec la première période, nous présentons les apports de Daniel Bernoulli, de son père Jean Bernoulli, de d'Alembert et d'Euler.

Puis, en lien avec la deuxième période, nous évoquons les conflits entre d'une part les théoriciens de l'Académie et d'autre part les ingénieurs et artisans mécaniciens de la marine. Les premiers, parmi lesquels figure d'Alembert, construisent le domaine de recherche qualifié d'hydrodynamique, tandis que les seconds, parmi lesquels figure Borda, construisent le domaine de recherche nommé hydraulique.

L'existence de deux appellations distinctes révèle l'ampleur du fossé entre les deux communautés.

B.2. Le siècle des Lumières : évolution des idées

L'apport de Daniel Bernoulli

Daniel Bernoulli travaille sur l'écoulement des fluides dans la lignée de son père Jean mais également, signale Hahn (1964, p.16) citant Huber, suite à sa rencontre avec Pietro Antonio Michelotti, médecin vénétien, lors de son séjour à Venise. Michelotti publie un texte dans lequel il aborde « *les fluides du corps comme s'ils agissaient uniquement suivant les lois de la physique* ». Huber indique que l'hydrodynamique a influencé les études du corps humain mais Hahn ajoute que la réciproque pourrait être vraie également.

Blay (2007) note que Daniel Bernoulli introduit le terme d'hydrodynamique dans le langage scientifique dans une lettre du 25 août 1734. Elle est adressée à un professeur de Strasbourg auquel il annonce la publication prochaine de l'ouvrage qu'il a rédigé de 1725 à 1733 lors de son séjour à Saint Pétersbourg. C'est dans le chapitre 12 que figure ce qu'on appelle aujourd'hui l'« *équation de Bernoulli* ».

Le texte initial d'*Hydrodynamica* est écrit en latin. Seulement trois traductions sont alors réalisées, en russe, en anglais et en allemand.

Deux idées nouvelles y figurent : le principe de conservation des forces vives (*vis viva* : « *La descente réelle est égale à la montée potentielle* » (Kuhn, 2008)) et le découpage du fluide en tranches transversales pour étudier l'écoulement.

Daniel Bernoulli énonce en ces termes le principe des forces vives : « *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 retrouvée le repos* » (extrait d'*Hydrodynamica*).

Daniel Bernoulli distingue le cas d'une ouverture de celui d'une canalisation.

Guilbaud précise que Daniel Bernoulli lie la pression et la vitesse aux frontières du volume global de fluide, en régime permanent. 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), le fluide est découpé en couches parallèles et Daniel Bernoulli recourt au principe de conservation des forces vives.

L'apport de Jean Bernoulli

Jean, le père de Daniel Bernoulli, aurait antidaté son manuscrit l'*Hydraulique* pour s'octroyer la paternité de cette théorie. Guilbaud rappelle que Jean Bernoulli, professeur d'Euler, a eu vent des résultats de son fils, dont la première version de l'*Hydrodynamica* date de 1733 mais n'est publiée qu'en 1738. Ce décalage est dû à la guerre de succession de Pologne et à l'état de santé de l'éditeur strasbourgeois de Daniel Bernoulli. Jean Bernoulli achève son texte en 1740, et fait publier le tout en 1742 sous le titre « *Hydraulique, aujourd'hui pour la première fois découverte et directement démontrée à partir de fondements purement mécaniques. Année 1732.* »

Indépendamment de cette anecdote, sa présentation s'avère être complémentaire de celle de son fils : Jean Bernoulli cherche si le principe de conservation des forces vives ne découlerait pas d'un principe plus général. Il pose 11 définitions, qu'il couple aux lois de la mécanique.

Jean Bernoulli utilise lui aussi l'hypothèse des couches parallèles. Cependant, dans sa démarche, il applique la deuxième loi de Newton à chacune des couches et non uniquement au fluide dans son ensemble.

Sa démarche repose sur le principe d'hydrostatique.

Sa démarche repose également sur « *le constat d'un phénomène « négligé et considéré jusqu'alors comme de nulle importance », la formation d'une gorge, c'est-à-dire d'une diminution de la section réelle de l'écoulement consécutive à l'apparition d'une zone de fluide tourbillonnaire ou stagnante dans le cas d'une brusque variation du diamètre de la conduite* » (Guilbaud, 2007, p.177).

Jean Bernoulli perçoit le statut interne de la pression mais l'assimile, dans son rôle, à une force.

Il réussit à l'exprimer dans le cas d'un écoulement non stationnaire, ce qui constitue une avancée par rapport aux travaux de son fils et a une influence sur les travaux d'Euler et de d'Alembert.

L'apport de d'Alembert

D'Alembert cherche à unifier les lois antérieures (Paty, 1998).

Il s'interroge sur les propriétés d'un fluide, différentes de celles d'un solide : « *pour appliquer cette méthode [celle qu'il développe pour éviter le recours au principe de conservation des forces vives] à la question dont il s'agit ici, nous devons examiner d'abord quels doivent être les mouvements des particules du fluide, pour que ces particules ne se nuisent points les unes aux autres* » (citation de d'Alembert dans Blayc, 2007, p.207).

Concernant la structure d'un fluide, deux visions s'opposent : l'hypothèse cinétique de Bernoulli considérant que les particules de fluide sont animées d'un mouvement interne, irrégulier et permanent et l'hypothèse statique de Newton. D'Alembert reconnaît son ignorance sur ce point (« *La cause de la fluidité est encore inconnue* ») et définit un fluide comme étant « *un corps composé de particules très petites, détachées, et capables de se mouvoir librement* ».

D'Alembert cherche à associer les lois de l'hydrodynamique à celles de la dynamique. Cherchant une visée générale du phénomène, il souhaite recourir au minimum d'hypothèses mais ne peut se passer de celle de Bernoulli, à savoir le parallélisme des couches de fluide. Cela réduit la portée des résultats trouvés au cas d'objets présentant une ouverture suffisamment étroite, ce que signale également Blay. D'Alembert, dans *le Traité des Fluides*, en 1744, utilise donc lui aussi l'hypothèse des couches parallèles. Il suppose que tous les points d'une couche de fluide perpendiculaire à l'écoulement ont même vitesse, inversement proportionnelle à la section considérée. Il exploite également un autre principe, « *par le biais duquel il ramène les lois du mouvement des fluides à celles de leur équilibre* » (Guilbaud, 2007, p.178). Pour d'Alembert également, la pression est assimilée à une force s'exerçant contre une paroi. L'apport majeur du texte de d'Alembert est de fournir une preuve au principe de conservation des forces vives, qui apparaît dès lors comme une intégrale première du mouvement.

L'autre apport de ce texte est lié aux questions qu'y pose d'Alembert, notamment concernant la validité de l'hypothèse du parallélisme des couches de fluide lors d'un écoulement, cette hypothèse étant invalidée par l'expérience. C'est l'occasion d'introduire la notion de particule fluide et de vitesse dépendant à la fois du temps et des coordonnées de position, 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, 1744)).

D'Alembert l'effectue dans le texte qu'il rédige en 1747, à l'occasion de sa candidature à un prix sur les vents de l'Académie de Berlin (signalons qu'un autre concours, pour un prix de cette même académie, est reporté de 1749 à 1752. Aux yeux du jury, dont Euler était membre, les travaux présentés n'expliquaient pas suffisamment les écarts observés entre théorie et expérience). La notion de champ de vitesse est introduite et lui est appliqué le formalisme du calcul différentiel (prémisse des équations aux dérivées partielles vérifiées par le champ de vitesse).

D'Alembert et Daniel Bernoulli ne s'appréciaient guère, Daniel Bernoulli écrivant à Euler à propos du *Traité des Fluides* : « *j'ai vu avec déception qu'à part quelques petites choses il n'y a rien d'autre à voir dans son hydrodynamique qu'une impertinente suffisance* ». A propos du texte rédigé par d'Alembert pour le Prix sur les vents : « *sa « pièce sur les vents » ne veut rien dire, et lorsqu'on la lit en entier, on en sait à peu près autant sur les vents qu'au début de la lecture* ».

D'Alembert conteste à Daniel Bernoulli d'avoir appliqué la conservation des forces vives dans des cas où « *la loi de continuité* » n'est pas valide. Guilbaud insiste sur ce point, précisant que ce sera source de polémiques dans les années 1770, entre d'Alembert et Borda.

Concernant la formulation des lois de la dynamique des fluides, d'Alembert les met en parallèle avec celles de la dynamique du solide. D'Alembert, introduisant son *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*, annonce : « *Un des plus grands avantages qu'on tire de notre théorie c'est de pouvoir démontrer que (cette loi) a lieu dans le mouvement des Fluides comme dans celui des Corps solides* ». Comme Newton, d'Alembert assimile le fluide à un assemblage de corpuscules sphériques. Mais contrairement à Newton, il les suppose tangents les uns aux autres, tant dans les liquides que dans les gaz. D'Alembert ne recherche pas de lien avec la statique des fluides, cette dernière reposant sur des lois expérimentales. D'Alembert perçoit la statique des fluides comme un cas particulier de dynamique des fluides.

Par ailleurs, D'Alembert 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 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.

Le travail de d'Alembert 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.

D'Alembert explicite la place qu'il accorde à l'expérimental dans l'élaboration de sa théorie : « *La mécanique des Corps solide n'étant appuyée que sur des Principes Métaphysiques et indépendants de l'Expérience, on peut déterminer exactement ceux de ces Principes qui doivent servir de fondement aux autres. La Théorie des fluides, au contraire, doit nécessairement avoir pour base l'Expérience dont nous ne recevons même que des lumières fort bornées* » (citation de d'Alembert dans Dugas, 1996, p.278). Il précise également qu'« *il n'existe pas de science sans raisonnement, ou ce qui est la même chose, sans théorie* » (*ibid.*, p.300).

Dans sa préface de son *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* d'Alembert indique : « *dès les premiers pas qu'on veut faire dans la Théorie des fluides, on s'aperçoit aisément combien le secours de l'expérience est nécessaire pour en connaître les propriétés. Mais chercherons-nous à nous éclairer dans un sujet si compliqué par des expériences multipliées à l'infini ? Presque toutes celles que nous pouvons tenter sur cette matière sont si mêlées de circonstances qui nous éloignent de la précision, et nous dérobent, pour ainsi dire, la vérité, qu'elles ne doivent être regardées pour la plupart que comme un moyen de confirmer et d'appuyer nos calculs. L'Art consiste donc à les réduire et à les simplifier pour en former un véritable Corps de science, et pour en déduire une Théorie certaine et lumineuse* ». D'Alembert évoque

également les limites du mode de pensée de son époque : « *ne pas ériger trop légèrement des formules d'algèbre en vérités ou propositions physiques... L'esprit de calcul qui a chassé l'esprit de système règne peut-être un peu trop à son tour. Car il y a dans chaque siècle un goût de philosophie dominant : ce goût entraîne presque toujours quelques préjugés et la meilleure philosophie est celle qui en a le moins à sa suite* » (ibid., p.279).

L'apport d'Euler

Euler utilise la démarche de d'Alembert et introduit le concept de pression interne au fluide : il aboutit aux équations « *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, p.182).

Concernant la démarche d'Euler, Darrigol ne s'attarde pas sur les fontaines du château de Sans-Souci et insiste davantage sur sa vision du fluide comme étant une distribution continue de masse. Les avancées obtenues au préalable en mécanique des milieux continus par lui et d'Alembert sont ainsi transposables à l'étude d'un écoulement. En particulier, le recours aux équations aux dérivées partielles. Darrigol (2005, p.215) y voit 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* ».

Dugas (1996, p.287) cite Euler pour évoquer l'objectif suivi par ce dernier : « *La généralité que j'embrasse, au lieu d'éblouir nos lumières, nous découvrira plutôt les véritables lois de la nature dans tout leur éclat et on y trouvera des raisons encore plus fortes d'en admirer la beauté et la simplicité* ».

Euler évalue les variations d'un volume élémentaire de fluide en écoulement pendant une durée élémentaire. Il la couple à la conservation de la masse puis exprime l'accélération de ce volume et obtient les équations du mouvement. Dugas (ibid., p.288) cite Euler déclarant : « *j'espère d'en venir heureusement à bout, de sorte que s'il reste des difficultés, ce ne sera pas du côté de la mécanique, mais uniquement du côté de l'analytique* ».

Euler, à propos de ses confrères estime que « *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 leur 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* » (citation d'Euler dans Dugas, 1996, p.292). Dugas (ibid., p.292) 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* ».

L'apport de Lagrange

La démarche de généralisation et d'unification de la mécanique, initiée par Euler et d'Alembert, s'achève avec Lagrange (1736-1813), qui explicite que dynamique et hydrodynamiques ont « *des*

branches d'un principe unique, et comme des résultats d'une seule formule générale » (citation de Lagrange dans Blayd, 2007, p.259).

A ce propos, Lochak (1996, p.10) évoque le rôle structurel des mathématiques en physique : « *toutes les grandes théories ont pour base des équations différentielles. Mais les mathématiques ne se réduisent pas à ce rôle instrumental, elles sont partie intégrante de la théorie et prennent part à sa vision du monde.* ». Il estime également que « *l'expression mathématique d'une théorie est, à son tour, génératrice d'intuition. La théorie s'élève en généralité et devient plus féconde (...) non seulement parce que cette forme permet de faire des calculs utiles, mais plus encore parce qu'elle permet d'apercevoir, à travers des formules qui parlent à l'esprit, des propriétés nouvelles, des lois et des analogies qui, autrement, eussent échappé* » (ibid., p.10).

La révolution due à Lagrange est que sa démarche est purement analytique : pas de géométrie comme c'était l'usage jusqu'alors (dans mécanique *analytique*, 1788 : « *on ne trouvera point de Figures dans cet Ouvrage. Les méthodes que j'y expose ne demandent ni constructions, ni raisonnements géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une marche régulière et uniforme. Ceux qui aiment l'Analyse, verront avec plaisir la mécanique en devenir une nouvelle branche, et me sauront gré d'en avoir étendu le domaine* » (citation de Lagrange dans Blayd, 2007, p.259). Lochak rappelle que la géométrie est très présente dans les *Principia* et que Newton n'y emploie pas le calcul infinitésimal qu'il avait pourtant construit : « *La géométrie appartient en quelque chose à la mécanique ; car c'est de cette dernière que dépend la description des lignes droites et des cercles sur lesquels elle est fondée* » (citation de Newton dans Lochak, 1996, p.42). La géométrie est à nouveau exploitée après Lagrange, mais sous une nouvelle forme.

Les équations aux dérivées partielles en physique sont « *nécessaires pour formuler la mécanique des corps déformables (...) L'équation différentielle partielle est entrée dans la physique théorique comme une servante, mais, peu à peu, elle y est devenue maîtresse, en étant apparue comme l'expression naturelle des phénomènes élémentaires de la physique* » (citation d'Einstein dans Paty, 1998, p.113).

L'étape suivante au siècle des Lumières est la résolution de ces équations différentielles obtenues en mécanique des fluides. A ce propos notamment, D'Alembert échange de nombreuses lettres avec « *m. de La Grange* », résidant à Turin. D'Alembert le soutient auprès du roi Frédéric II pour qu'il obtienne le poste laissé vacant par Euler à l'Académie de Berlin.

L'approche analytique d'Euler, de d'Alembert et de Lagrange ne leur permet pas d'obtenir une solution générale de l'équation différentielle trouvée : « *s'il ne nous est pas permis de pénétrer à une connaissance sur le mouvement des fluides, ce n'est pas à la mécanique et à l'insuffisance des principes connus du mouvement qu'il faut en attribuer la cause, mais l'Analyse même nous abandonne ici* » (citation d'Euler dans Dugas, 1996, p.291) et « *par cette découverte d'Euler, toute la mécanique des fluides fut réduite à un seul point d'Analyse, et si les équations qui la renferment étaient intégrables, on pourrait, dans tous les cas, déterminer complètement les circonstances du mouvement et de l'action d'un fluide mû par des forces quelconques ; malheureusement, elles sont si rebelles qu'on n'a pu jusqu'à présent en venir à bout que dans des cas très limités* » (citation de Lagrange dans Dugas, 1996, p.291).

A cette période, on passe de considérations pratiques à des problèmes plus généraux et abstraits. Des exemples sont cités par Hahn, dont la terre vue comme un liquide en rotation soumis à des forces newtoniennes attractives. Les théoriciens font de moins en moins référence aux données expérimentales pour élaborer leurs modèles (Hahn, 1964).

En 1768, D'Alembert illustre le paradoxe obtenu avec les résultats théoriques de l'époque concernant la résistance au mouvement d'un objet dans un fluide incompressible. Euler se réfère à Newton et Mariotte pour dépasser le paradoxe de d'Alembert et indique : « *thus I do not see, I admit, how one can satisfactorily explain by theory the resistance of fluids. On the contrary, it seems to me that the theory, developed in all possible rigor, gives, at least in several cases, a strictly vanishing resistance ; a singular paradox which I leave to future geometers for elucidation* ». Paty (1998, p.194) indique que le paradoxe de d'Alembert, « *signalant en fait les limitations de l'hydrodynamique classique* », n'est levé qu'au 20^e siècle, grâce à la théorie des sillages.

Guilbaud (2007, p.184) indique que « *Les hydrodynamiciens se retrouvent ainsi confrontés à une véritable impasse théorique. (...) L'approche analytique, censée leur permettre de dépasser cette dernière approximation [l'hypothèse des couches de fluide parallèle qui n'était pas validée par les résultats expérimentaux], achève quant à elle, et contre toute attente, de creuser ce que Roger Hahn décrit comme « Un gouffre entre la théorie et l'expérience »* ».

Face aux difficultés, c'est aux théoriciens de se tourner vers les gens de terrain, mais avec des questions nouvelles. Ils ne peuvent donc pas se contenter des savoirs pratiques, inchangés. Hahn (1964, p.20) précise qu'il s'agit de « *faire des expériences plutôt que d'en avoir* » et évoquant Koyré, « *C'est à partir du moment où il fut question d'« expérimentation » et non plus d'« expérience » que l'hydrodynamique est devenue une scientia activa* » (ibid., p.20).

Le cas de l'Encyclopédie

Précisons ici comment est traité l'écoulement des fluides, à cette époque, dans *l'Encyclopédie*. Pour la rédaction des articles sur les arts et les métiers, Diderot et d'Alembert consultent des ouvriers et artisans.

Rappelons que l'ordre encyclopédique repose sur une tentative de classification des savoirs (inspiré de la ramification de Bacon), sur une indication de l'élément de la ramification auquel l'article se réfère et sur un renvoi (liaison des matières).

Néanmoins, cet ordonnément ne constitue pas une démarche suffisante pour distinguer le savoir des savants du savoir des ingénieurs car la démarche consistant à associer les deux n'en est qu'à son balbutiement à l'époque de l'impression de *l'Encyclopédie*.

L'ordre encyclopédique n'est que partiellement mis en place dans les rubriques liées aux sciences (physique, mécanique, physique-mathématiques). Il est également difficile de classer les « *Arts et métiers* » dans les rubriques existantes.

Allier connaissances théoriques et savoir-faire pratiques est une démarche en construction au 18^e siècle.

Guilbaud (2012) cherche à faire apparaître les relations entre les différents savoirs théoriques et pratiques dans *l'Encyclopédie*. Il effectue pour cela une recherche par mots-clés. 24 articles sont assemblés. Guilbaud les identifie, vérifie si chaque article n'est pas qu'une traduction de la *Cyclopaedia* anglaise de Chambers, déjà publiée, et vérifie leurs sources. D'Argenville publie des articles plutôt qualifiés d'hydraulique. Les champs d'application sont l'art militaire, la marine et l'hydraulique. Guilbaud propose des sous-groupes pour ces articles.

Guilbaud constate seulement deux apports de l'article « *Résistance des fluides* » de d'Alembert par rapport à l'article « *Resistance* » de la *Cyclopaedia* de Chambers dont il est largement inspiré.

Le premier apport de cet article est que d'Alembert y indique les résultats obtenus depuis Newton concernant le problème d'un solide en mouvement dans un fluide.

Signalons en effet que pour expliquer la résistance d'un fluide au mouvement d'un corps solide, Newton présente successivement deux hypothèses : dans un premier temps, il assimile le fluide à un amas de particules élastiques se repoussant mutuellement. Newton aboutit alors à une estimation de la résistance de valeur moitié de celle mesurée expérimentalement. Dans un second temps, il suppose les particules contiguës au sein du fluide. Il obtient une résistance valant un quart de la valeur précédemment obtenue.

Face à l'échec de la démarche proposée par Newton, il est nécessaire d'aborder le problème autrement. La double difficulté est l'impossibilité de résoudre les équations trouvées et l'absence de résultats expérimentaux concordant qui pourraient être comparés à la théorie. D'Alembert indique par exemple que « *ces expériences sont si peu d'accord entr'elles, qu'il n'y a (...) encore aucun fait suffisamment constaté sur ce point* » (citation de d'Alembert dans Guilbaud, 2012, p.221). Ayant conscience de l'écart entre le modèle proposé par Newton et les résultats expérimentaux, d'Alembert ne cherche pas à relier le modèle proposé à ses domaines d'application.

Le second apport de cet article « *Résistance des fluides* » est que d'Alembert y fournit une synthèse de la théorie de la résistance, en accord avec ce qui est indiqué dans l'article « *fluide* ». D'Alembert constate l'impasse dans ce domaine à l'époque : « *[cette matière] pourroit bien être du nombre de celles où les expériences faites en petit n'ont presque aucune analogie avec les expériences faites en grand (...), où chaque cas particulier demande presque une expérience isolée, & où par conséquent les résultats généraux sont toujours très-fautifs & très-imparfaits* » (citation de d'Alembert dans Guilbaud, 2012, p.223). Et d'Alembert de conclure, sur le cas d'étude d'une aube: « *toutes ces circonstances dérangent tellement ce calcul, d'ailleurs très épineux sans cela même, que je crois qu'il n'y a que l'expérience seule qui soit capable de résoudre exactement le problème dont il s'agit* » (citation de d'Alembert dans Guilbaud, 2012, p.237).

Dans l'article « *fleuve* », d'Alembert constate là-aussi le fossé entre prévisions théoriques et résultats expérimentaux. Il signale même des limitations quant à la validité des résultats expérimentaux à cause d'une faible fiabilité des appareils de mesure.

Il n'y a pas d'information dans *l'Encyclopédie* concernant la manœuvre des bateaux et pas de liens non plus d'indiqués dans *l'Encyclopédie* entre l'architecture navale et la résistance des fluides.

L'article « *gouvernail* » est l'exception où théorie et pratique sont liées.

De l'article « *vaisseaux* » Guilbaud fournit la citation suivante : « *L'expérience est la base de toutes les règles des constructeurs. Cette expérience consiste à comparer la bonté de différents bêtiments de divers gabarits, & à choisir une moyenne forme qui réunisse les diverses qualités de ces bêtiments. Ils se reglent encore sur les poissons, & ils s'imaginent que de tous les poissons, celui qui va le mieux, doit avoir la forme convenable à un parfait vaisseau. Ce poisson est selon eux le maquereau : ce sont les portions de cet animal que l'on doit suivre. Ainsi l'a du-moins fait un des plus fameux constructeurs François : « c'est M. Hendrick ». Ailleurs, concernant une référence à un ouvrage d'architecture navale : Celui-ci dépouillé d'algebre & de démonstrations, se renferme dans la pratique, & offre des méthodes si simples & si claires, qu'il peut mettre en état quiconque le posséderoit bien, de dresser les plans de toutes sortes de bêtiments (...)* » (*ibid.*, p.228).

Signalons ici que Pitot (1695-1771) a travaillé sur la manœuvre des vaisseaux et la mesure d'un courant à surface libre et que l'abbé Venturi a perfectionné un dispositif de prise de mesure de pression inventé par Pitot. Pitot s'étonnait que « *personne n'ait pensé à lui ravir plus tôt cette invention si simple* » (citation de Pitot dans Nordonb, 1992, p.76).

Via l'écart entre l'article de d'Alembert sur « *Balistique et projectile* », qui suit un point de vue de théoricien, et l'article de Le Blond sur « *jet (Art militaire)* », qui suit un point de vue appliqué, Guilbaud (2012, p.235) constate que « *L'un pointe du doigt les écarts importants récemment révélés entre la théorie galiléenne et l'expérience là où le second s'en affranchit sans ciller* » et de citer un extrait de la conclusion de l'article de d'Alembert : « *il faut avouer franchement que la pratique a tiré jusqu'ici peu d'avantage de ces sublimes spéculations. Quelques expériences grossières, & une pratique qui ne l'est guere moins, ont jusqu'à présent guidé les Artilleurs sur ce sujet* ».

Dans l'article « *Hydraulique* », d'Alembert fournit quelques compléments à l'article déjà publié dans la *Cyclopaedia* de Chambers : il complète la liste des contributeurs à ce champ de recherche (Daniel et Jean Bernoulli ainsi que lui-même). Il ajoute aussi une référence à Bélidor et signale la distinction entre hydraulique et hydrodynamique : « *Les Mathématiciens ont donné le nom d'hydrodynamique à la science générale des mouvements des fluides, & ont réservé le nom d'hydraulique, pour celles qui regardent en particulier le mouvement des eaux, c'est-à-dire l'art de les conduire, de les élever, & de les ménager pour les différens besoins de la vie* » (*ibid.*, p.236).

B.3. Le siècle des Lumières : « *retour vers le concret* »

Dans la deuxième moitié du 18^e siècle sont entrepris des démarches pour améliorer les connaissances théoriques des praticiens. Des ouvrages sont édités avec vocation, comme le rappelle Guilbaud (2012, p.209), de « *faciliter l'intelligence des sublimes spéculations* » de la théorie et de « *mettre en état de faire une application précise des règles* » que les savants ont établies.

D'Alembert constate dans la préface de son *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides* que « *La comparaison de la Théorie et de l'Expérience... est peut-être impossible* » (Hahn, 1964, p.19). Hahn signale le paradoxe que constitue cette phrase en comparaison avec les propos de d'Alembert dans son discours préliminaire de *l'Encyclopédie*. Hahn (*ibid.*, p.19) estime que « *L'idéalisation de la réalité n'est pour lui [d'Alembert] qu'une source d'échec* ». Le fossé entre la théorie et l'expérience, déjà sensible avec l'hypothèse du parallélisme des couches de fluide, est agrandi par cette approche, au lieu d'être comblé.

La théorie ne parvient pas non plus à expliquer la perte de charge observée dans les canalisations. La théorie élaborée par Bernoulli, d'Alembert et Euler est alors évacuée par les hydrauliciens au profit de formules empiriques.

Evoquons ce point via l'exemple du Chevalier Charles de Borda, qui rejette le parallélisme des couches de fluide et remet en cause la conservation des forces vives.

L'apport de Borda

La mécanique des fluides au 18^e siècle serait un bon exemple de développement de la méthode expérimentale (Dugas, 1996).

Dugas (1996) aborde les travaux de Borda sur les pertes de force vive dans les fluides lorsque la conduite varie brusquement de diamètre.

Borda est un ingénieur militaire et marin français, « *il a dirigé en 1775 une expédition aux Canaries pour préciser la position de ces îles où l'on fixait alors le zéro des longitudes* » (Nordonb, 1992, p.70) (suite à cette expédition, le navire école de l'Ecole Navale portera son nom de 1840 à 1913).

Dugas (1996, p.298) évoque les résultats des travaux expérimentaux de Borda sur la résistance de l'air : d'une part, « *on ne peut évaluer la résistance totale de l'air sur une surface par la somme des résistances partielles de chacun de ses éléments. (...) Cette conclusion est très importante. Elle montre que la résistance est un phénomène qui s'observe globalement et fait apercevoir qu'on ne peut l'atteindre par intégration à partir d'une loi simple. D'autre part, la résistance globale est proportionnelle au carré de la vitesse et au sinus de l'angle d'incidence (et non au carré de ce sinus [comme énoncé par Newton])* ».

Concernant la résistance de l'eau, Borda se limite à vérifier qu'elle est proportionnelle au carré de la vitesse.

Borda conclut que « *La théorie ordinaire du choc des fluides ne donne que des rapports absolument faux et, par conséquent, il serait inutile et même dangereux de vouloir appliquer cette théorie à l'art de la construction des vaisseaux* » (Dugasa, 1996, p.300).

Borda mène de nouvelles expériences à l'Académie Royale de Marine de Brest en 1765. Il propose une démarche « *en rupture totale avec la tradition mathématique portée en France par d'Alembert* » (Guilbaud, 2012, p.185), qu'il présente à l'Académie des sciences en mars 1766, en présence de d'Alembert. Ainsi démarre la crise de l'hydrodynamique des années 1770.

La crise de l'hydrodynamique des années 1770

C'est une controverse qui va agiter l'Académie des sciences, controverse entre une approche plutôt théorique et une approche plutôt expérimentale. D'Alembert, Condorcet et Bossut soutiennent la première approche. Borda et des ingénieurs soutiennent la seconde (Bossut, par exemple, réalise des expériences à l'Ecole royale du Génie de Mézières. Guillaume (2015, p.34)) présente cette école en ces termes : « *L'école du génie de Mézières est créée entre 1748 et 1750, première école décentralisée. Elle fonde toute sa pédagogie sur la mathématique - 3 heures par jour - et l'architecture qui, avec la stéréotomie, le dessin, les coupes, est aussi une géométrie appliquée. L'abbé Bossut, nommé à 22 ans professeur de mathématiques introduit l'étude de la perspective, de la théorie des ombres, des éléments du calcul infinitésimal, de la mécanique et de l'hydrodynamique* ».

Le conflit s'exprime notamment pour la désignation du lauréat d'une « *place d'associé à l'Académie royale des sciences de Paris* », finalement obtenue par Borda au détriment de Bossut (*ibid.*, p.34).

Un autre exemple est l'obtention par Bossut, au détriment de Borda cette fois-ci, du poste de « *Chaire d'hydrodynamique du Louvre créée en 1775 par Turgot, ami proche de d'Alembert et Condorcet* » (Hahn, 1964, p.21). Guilbaud indique que Condorcet justifie en ces termes son 'lobbying' auprès de Turgot pour le choix de Bossut : « *La théorie des fluides est trop peu avancée pour résoudre le problème général* » qui « *ne peut être bien résolu qu'après avoir fait des expériences* » (citation de Condorcet dans Guilbaud, 2008, p.189), cela requérant « *Un homme qui réunisse la théorie à la pratique* » et non « *Un mécanicien qui s'est occupé d'hydraulique* »

comme le sont les ingénieurs des Ponts et Chaussées (*ibid.*, p.190). Et Guilbaud de citer Condorcet qui présentait l'hydrodynamique pratique comme étant une discipline « *peu cultivée en France* », « *Abandonnée aux ingénieurs des ponts et chaussées* », alors qu'en Italie elle a été confiée constamment aux savants les plus célèbres (*ibid.*, p.190).

Cette chaire d'hydrodynamique du Louvre, créée en en lien avec l'école d'architecture et non avec l'école des Ponts et Chaussées ou le génie maritime en raison des conflits évoqués dans le paragraphe précédent, vise un effort d'intégration entre approches théorique et expérimentale. Influencé par Condorcet, Turgot a des connaissances scientifiques et perçoit leur impact sur la société avant même de devenir ministre. Hahn précise que « *Turgot croyait fermement à la valeur de la science et voulait en faire un instrument de réforme pour le pays* » (*ibid.*, p.22).

Le conflit s'exprime également lors du projet de Canal de Picardie visant à relier le bassin parisien à la Hollande. L'intérêt économique du projet est très important. Son coût et sa faisabilité, mal établis. Turgot nomme trois académiciens pour réaliser des expériences sur la résistance des fluides et présenter un rapport à ce propos : d'Alembert, Condorcet et Bossut. Il n'y a aucun représentant du Corps des Ponts et Chaussées, que Condorcet déteste.

Le projet de la chaire au Louvre n'est pas concluant, l'unification de l'expérience et de la théorie n'ayant pas été réalisée. A cela s'ajoute la Révolution française, qui détruit les structures de l'Ancien Régime.

Concernant Borda et Bossut, Guilbaud insiste sur l'aspect de « *pionniers de la nouvelle approche visant à réconcilier les deux grands pôles d'attraction de la discipline, la science et la pratique* » (*ibid.*, p.191) mais avec des divergences de points de vue, chacun appartenant à des communautés différentes.

Hahn (1964) attribue la difficulté à intégrer les deux approches au fait que les buts des hydrodynamiciens et des hydrauliciens sont différents. L'hydrodynamique reste une science, malgré les liens avec les savoirs artisanaux et les arts pratiques. On n'en est pas encore au stade de sciences fondamentales et de sciences appliquées. La fusion est dès lors impossible alors qu'un retour vers le concret faisait beaucoup espérer.

A ce propos, Hahn remet en cause une idée répandue en histoire des sciences : la croyance en une fusion des sciences et des techniques, des théories et des pratiques. Cette croyance semble vérifiée *a posteriori* mais est souvent réfutée lorsqu'on s'intéresse à un cas précis, ici celui de l'hydrodynamique. « *L'hydrodynamique au XVIIIe siècle n'est pas née simplement de la fusion de deux traditions. Il y eut des rencontres, des interférences, des influences réciproques entre celles-ci mais pas l'intégration totale. (...) à chaque rencontre les deux traditions se sont en quelque sorte transformées* » (*ibid.*, p.25). Les interactions entre sciences et techniques font avancer l'une et l'autre (Descartes influence les savoirs artisanaux et les données du terrain impactent les modèles des savants). Turgot en avait conscience et cherchait à faire évoluer l'ensemble.

Pour Hahn, si cela n'a pas eu lieu, ce n'est pas uniquement un problème sociologique. Il envisage d'examiner de l'intérieur la science de l'hydrodynamique : les instruments expérimentaux à disposition étaient-ils assez développés ? Le recours à un raisonnement de type milieu continu a-t-il freiné les possibilités ? Les théoriciens étaient-ils trop préoccupés par les problèmes d'axiomatisation au détriment des conditions aux limites des équations trouvées ?

De par la démarche de Bossut et de Borda, la réconciliation entre les deux approches, théorique et expérimentale, s'enclenche : 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, via la création de l'École Polytechnique qui propose un nouveau type d'enseignement contenant entre autres de l'hydrodynamique et que suivent notamment Navier,

Coriolis, Saint-Venant. Plus tard, ils y enseigneront, ainsi qu'à l'Ecole des Ponts et Chaussées, tout en étant membres de l'Académie. Hydrodynamique et hydraulique sont réconciliées. C'est l'objet du paragraphe suivant où nous abordons la contribution de Navier et de Stokes et présentons très succinctement les autres apports de la première moitié du 19^e siècle.

Précisons que l'Ecole Polytechnique, fondée en 1794, a été source d'inspiration pour de nombreux pays en termes de structure de formation : Baudet rappelle la création d'écoles polytechniques à Prague (1806), à Vienne (1815) et à Varsovie (1825). Il rappelle également qu'en 1817, « *sylvanus Thayer, impressionné par les méthodes de l'Ecole Polytechnique, les introduit à West Point [première école d'ingénieur militaire américaine]* » (Baudet, 2003, p.127).

« *C'est en effet pour les besoins de la formation d'ingénieurs d'un haut niveau que des savants français tentèrent d'élaborer des théories des divers aspects de la technique transmissibles par l'enseignement* » (Baudet, 2003, p.113).

B.4. La première moitié du 19^e siècle

Darrigol indique que le 19^e siècle permet la réconciliation entre l'hydrodynamique et l'hydraulique via l'étude de problèmes concrets d'écoulement.

Cette réconciliation entre de ces deux approches n'est néanmoins visible qu'au début du 20^e siècle. Darrigol estime en effet que ce fossé perdure jusqu'au 20^e siècle, citant Wien qui oppose les deux démarches en 1900 : « *in hydrodynamics... the real processes differ so much from the theoretical conclusions, that engineers have had to develop their own approach to hydrodynamics, usually called hydraulics. In this approach, however, both foundations and conclusions so much lack rigor that most results remain confined to empirical formulas of very limited validity* » (citation de Wien dans Darrigol, 2005, p.215).

La notion de viscosité

Concernant la notion de viscosité, Nordon signale qu'elle est déjà utilisée au 14^e siècle. Newton parle davantage de « *fluidité* » que de viscosité. Nordon (1992, p.111) précise que « *Léonard de Vinci, Galilée et Mariotte évoquent les frottements internes et examinent empiriquement comment ils modifient la valeur ou la direction d'un courant* ». Nordon signale également que d'Alembert distingue deux catégories de fluide : ceux qualifiés de « *parfaits* » (Nordon indique que les anglo-saxons les nomment « *fluides idéaux* ») dont traite sa théorie et ceux visqueux, manipulés dans les expériences, qui ne la vérifient pas parce qu' « *il est impossible de distinguer, par exemple, l'effet qui vient de la force d'inertie d'avec celui qui résulte de la ténacité, et ceux-ci d'avec l'effet que peut produire la pesanteur et le frottement des particules* » (*ibid.*, p.111).

Le terme de ténacité est également employé par Newton : Nordon indique que Newton ne parvient pas à mettre en équation la résistance fluide au déplacement, « *qui vient de... la ténacité et du frottement* » (*ibid.*, p.106).

Nordon (1992, p.72) signale que « *dès le milieu du XVIII^e siècle, il n'est guère de mémoire sur les fluides qui ne cite la viscosité et les frottements* ». Nordon cite l'abbé Venturi : « *Les physiciens les plus sages sont en défiance contre toute théorie abstraite du mouvement des fluides* » (citation de Venturi dans Nordonb, 1992, p.73).

Newton aurait abordé la propagation d'un fluide à la manière de celle d'un son. Venturi en montre les limites lors d'expériences à l'École du Génie militaire de Modène et conclut que « *La contraction de la veine est toute autre chose que l'hyperboloïde newtonienne* » (citation de Venturi dans Nordonb, 1992, p.73).

Concernant la résistance des fluides, d'Alembert indique que « *rien n'est plus difficile que de donner là-dessus des règles précises et exactes* ». Nordon (1992) évoque les corrections de Newton à ce propos entre les deux premières éditions des *Principia*, suite aux remarques de Jean Bernoulli. Daniel Bernoulli critique Newton puis modifie son point de vue.

Nordon signale que c'est Newton qui établit qu'étudier un corps en mouvement dans un fluide au repos est équivalent à étudier un fluide en écoulement autour d'un corps immobile. Nordon rappelle que « *Newton traite la résistance du solide en entier et conçoit l'importance de profiler l'arrière aussi bien que l'avant, et surtout l'arrière autrement que l'avant* » (Nordong, 1992).

Un paradoxe est associé à du Buat, expérimentateur de premier plan qui, ayant été missionné par Louis XVI pour améliorer la marine royale, dispose de crédits illimités pour ses expériences. Ce paradoxe est que la résistance n'est pas la même pour un fluide en mouvement autour d'un obstacle et pour cet obstacle en mouvement dans un fluide au repos, contrairement à ce que prévoyaient Newton et d'Alembert.

Du Buat conteste l'application des résultats obtenus pour des orifices à l'étude des canaux et des rivières. Dugas le cite : « *je me mis donc à considérer que si l'eau était parfaitement fluide et coulait dans un lit de la part duquel elle n'éprouvât aucune résistance, elle accélérerait dans son mouvement à la manière des corps qui glissent sur un plan incliné... Puisqu'il n'en est pas ainsi, il existe quelque obstacle qui empêche la force accélératrice de lui imprimer de nouveaux degrés de vitesse. Or en quoi peut consister cet obstacle, sinon dans le frottement que l'eau essuie de la part des parois du lit, et dans la viscosité du fluide ? (...) Quand l'eau coule uniformément dans un lit quelconque, la force qui l'oblige à couler est égale à la somme des résistances qu'elle essuie soit par sa propre viscosité, soit par le frottement du lit* » (citation de Du Buat dans Dugasa, 1996, p.303). Il propose une formule empirique exprimant la résistance des parois dans un canal. Dugas précise qu'elle « *ne sera dépassée en précision que par Darcy (1857) et Bazin (1869)* » (*ibid.*, p.304).

Sur la figure du document B (Annexe C.1.), Nordon signale la zone hachurée en amont de l'obstacle, zone de fluide stagnant pour d'Alembert. Les difficultés de d'Alembert concernant la situation du contournement d'un obstacle sont liées à l'axiome que « *rien ne se fait par sauts dans la nature* » : une ligne de courant ne peut donc pas heurter de front un obstacle. Cette erreur est liée à « *L'idée erronée [de d'Alembert] qu'un filet liquide ne peut pas s'écraser sur la paroi. La zone arrière, au contraire, contient toute l'explication de la résistance de fluides réels. Ce sera la théorie du sillage* » (Nordonc, 1992, p.105).

Dugas signale également que Coulomb, avant Stokes, soutient que la vitesse d'un fluide au voisinage d'une paroi est nulle et qu'il n'y a pas ensuite de discontinuité de la vitesse au sein du fluide. Dugas souligne également le travail minutieux d'expérimentateur de Coulomb. Guillaume (2015, p.36) précise que Coulomb est un « *brillant officier du génie sorti de Mézières et élève de Bossut qui y enseigne notamment la théorie des maximi et des minimi formulée par Euler vers 1730* ». Dugas évoque une citation de Montaigne par Coulomb dans un de ses textes : « *La Raison a tant de formes que nous ne savons à laquelle nous prendre ; l'Expérience n'en a pas moins* » (Dugasa, 1996, p.306). Evoquant les travaux de 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 » (ibid., p.308)

La nature des parois n'intervient que tard dans les formules empiriques ayant trait aux écoulements. Cela débute avec les canaux, ouvrages beaucoup plus fréquents que les tuyaux jusqu'au milieu du 19^e siècle. Les premiers résultats concernent donc des écoulements à surface libre, étendus ensuite au cas des conduites. Nordon (1992) estime à une centaine le nombre de formules en lien avec les pertes de charge, dues essentiellement à des français et des Anglais, « *Ce qui reflète la prééminence de ces deux pays en hydraulique pendant les trois premiers quarts du XIX^e siècle* ».

Ce nombre élevé de formules atteste du domaine de validité limité de chacune de ces formules, liées aux conditions de réalisation des expériences.

Darcy, ingénieur en canaux chargé du projet du canal de Bourgogne, perçoit l'influence du lit du canal sur les pertes de charge.

L'apport de Navier

Navier, puis Poisson, Barré de Saint-Venant et Stokes obtiennent la même équation régissant l'écoulement d'un fluide, mais par quatre cheminements différents.

Navier, Cauchy, Poisson, Saint-Venant, contrairement à Stokes, partent de la théorie élastique des solides pour accéder à l'équation de Navier-Stokes. Darrigol signale qu'il n'y a pas vraiment d'opposition entre l'approche corpusculaire de Laplace et celle des milieux continus de Poisson et de Fourier. Cauchy, Poisson et Saint-Venant sont d'accord pour affirmer qu'un solide continu n'existe pas : l'aspect discontinu de la matière est abordé. Poisson part des molécules, puis somme. Cauchy part de l'étude des symétries et utilise la géométrie infinitésimale. Toutefois, chacun emprunte à la démarche des autres.

Néanmoins, les méthodologies sont différentes d'un chercheur à l'autre, d'où le rejet par chacun des travaux antérieurs des autres.

De plus, les domaines d'application sont très différents d'un chercheur à l'autre.

Navier s'intéresse aux conditions aux limites d'un écoulement et aboutit à l'introduction d'un coefficient lié au glissement de la couche liquide sur la paroi. Cette hypothèse est réfutée à la suite des travaux de Stokes et de Poiseuille.

Une des avancées du 19^e siècle est la découverte de l'écriture des lois de l'élasticité.

Navier y travaille avant de formuler ses résultats d'hydrodynamique. Il utilise une hypothèse moléculaire, qui n'est pas retenue par la suite. Néanmoins, Dugas (1996) insiste sur son importance dans la structuration de ce modèle.

De la nécessité de nouvelles stratégies

De nouvelles stratégies pour associer l'expérience et la théorie sont mises en place au 19^e siècle. Darrigol (2008) constate qu'il n'y a eu aucun progrès en mécanique des fluides dû à une seule approche mathématique. Toutes les avancées du 19^e siècle sont dues à des physiciens qualifiés d'ingénieurs, familiers des problèmes pratiques. Darrigol signale que cela s'explique en mécanique des fluides : il s'agit d'équations différentielles non linéaires avec une infinité de degrés de liberté. Il y a donc très peu de cas où on sait résoudre ces équations.

Il n'y a pas pour autant de démarche inductive. La démarche suivie en mécanique des fluides 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 les fondements théoriques et les problèmes concrets. Ces schémas nécessitent beaucoup de créativité et améliorent profondément la compréhension des phénomènes.

Parmi ces nouveaux concepts imaginés au 19^e siècle, figurent :

La viscosité, concept développé par Navier, élève de l'X et des Ponts. Il veut appliquer des théories mathématiques à des problèmes concrets. Navier a notamment cherché à améliorer la compréhension de la perte de charge dans une canalisation : ses résultats ont été validés dans le cas d'un capillaire mais pas dans le cas d'une canalisation de plus grande taille, ce qu'il a mal vécu. Il utilise une hypothèse atomique plutôt qu'une approche continue pour obtenir les équations du mouvement en trois dimensions d'un corps élastique et pour déduire la nécessité d'ajouter un terme de viscosité dans l'équation d'Euler. Il s'agit d'une grande avancée : d'une part, ce terme supplémentaire tient compte des interactions moléculaires. D'autre part, sa démarche est à la fois cohérente avec une approche appliquée qualifiée d'ingénieur et avec une approche théorique. Il lie une approche 'macroscopique' régie par des équations aux dérivées partielles et la théorie moléculaire de Laplace. Néanmoins, son approche ne convainc pas ses contemporains.

La vorticité, élaborée par Helmholtz. En partant d'une étude des sons produit par un orgue, en combinant l'équation d'Euler au théorème de Green afin d'améliorer le modèle acoustique trouvé, Helmholtz redécouvre l'équation de Navier-Stokes.

Son apport réside dans la recherche de solutions à cette équation. Il en déduit l'élaboration du concept d'écoulement potentiel et de la notion de vortex, qu'il caractérise. Helmholtz suggère alors d'étudier le vecteur tourbillon plutôt que le vecteur vitesse pour décrire un écoulement. Par analogie avec l'électromagnétisme, il montre comment obtenir le champ de vitesse à partir du vecteur tourbillon.

La notion de vortex joue un rôle majeur dans les écoulements turbulents. Néanmoins, les théorèmes énoncés par Helmholtz ne s'appliquent que dans des cas particuliers d'écoulement.

Darrigol précise la démarche d'investigation suivie par Helmholtz : il part de l'étude d'un problème concret, à savoir prévoir la hauteur des tuyaux d'un orgue. Il trouve alors une première solution qui l'amène à une digression théorique aboutissant à l'élaboration d'une nouvelle structure conceptuelle aux applications beaucoup plus vastes que le problème initial abordé.

La notion de 'surfaces de discontinuité', hypothèse formulée par Helmholtz lorsqu'il étudie la formation et le maintien de vibrations sonores dans un tuyau d'orgue. Il observe l'absence d'oscillations, contrairement à l'équivalent électrique, ce qui constitue pour lui un paradoxe : il suppose alors l'existence d'une discontinuité de la vitesse liée à la circulation d'une couche de fluide sur une autre. Cette discontinuité s'avère être explicable par un modèle de vortex. Cette surface est instable. Helmholtz appliquera ensuite ce modèle à l'étude des mouvements atmosphériques. Cette notion de 'surfaces de discontinuité' n'est pas retenue à la fin du 19^e siècle. Thomson la présente comme une fiction mathématique et estime que, pour résoudre le problème de la résistance hydraulique, il faut travailler avec l'équation de Navier-Stokes.

Les instabilités et la turbulence. Stokes croit à la validité des lois d'Euler et de Navier. Ce qui manque, c'est une meilleure connaissance de leurs solutions et de leur stabilité. Pour Stokes et Helmholtz, en mécanique des fluides, l'instabilité est importante et constitue la clé pour relier théorie et expérience. Par contre, Thomson se réfère à l'hypothèse du fluide 'parfait' vérifiant

l'équation d'Euler et au théorème des vortex d'Helmholtz, envisagés comme permettant d'établir une théorie de la matière et de l'éther. Thomson se rend compte de l'impossibilité de son modèle via l'instabilité des anneaux de vortex.

En 1839, Hagen constate que la force de frottements visqueux, proportionnelle à la vitesse, devient proportionnelle au carré de la vitesse au-delà d'une certaine vitesse. Reynolds le caractérise plus précisément en 1883. Reynolds comprend qu'il s'agit d'une compétition entre deux phénomènes, l'inertie et la viscosité. Il conçoit une théorie statistique de la turbulence fondée sur la théorie cinétique des gaz. Levi souligne que « *La condition naturelle du fluide est, pour Reynolds, non pas l'ordre mais le désordre* » (citation de Levi dans Nordonf, 1992, p.119). Les résultats de Reynolds n'ont pas un retentissement immédiat.

Darrigol insiste sur l'aspect crucial de l'observation pour percevoir que l'instabilité joue un rôle majeur dans une conciliation éventuelle entre hydrodynamique et hydraulique.

Les approches 'régionales' et 'asymptotiques'. C'est Rankine, professeur en ingénierie à Glasgow, qui introduit la notion de couche limite dans les années 1850-1860. Plus tard, Froude améliore les travaux de Rankine sur l'étude de la résistance au mouvement d'un bateau. Lors de l'étude d'écoulements à nombre de Reynolds élevé, Prandtl introduit une approche asymptotique (cas limite où la viscosité tend vers zéro) et une approche régionale (des solutions à l'équation de Navier-Stokes différentes d'une région à l'autre).

Ainsi, c'est l'association entre une approche théorique et une approche expérimentale qui permet d'obtenir des avancées.

Darrigol met également en avant le rôle que jouent les défis expérimentaux. Ils constituent le démarrage du travail d'Helmholtz, via l'étude des tuyaux d'orgue, qui n'apporte rien en mécanique des fluides *a priori*. Néanmoins, la notion d'écoulement potentiel s'avère être plus facile à étudier qu'un écoulement quelconque.

Les défis expérimentaux favorisent également le passage d'une théorie, la théorie élastique de Laplace, à une autre, celle de Navier.

Observer des écoulements a permis d'obtenir des propriétés des solutions du problème. Par exemple, supposer l'existence d'une couche limite.

L'obstacle majeur réside dans les mathématiques.

Ainsi, en mécanique des fluides, les équations fondamentales s'avèrent être connues dès le début. Ce qui a mis du temps, c'est de pouvoir les appliquer à des cas concrets.

L'écart entre fondements et phénomènes est encore plus grand en mécanique des fluides que dans d'autres domaines où il existe aussi le problème qu'une meilleure connaissance de la théorie n'améliore pas nécessairement de manière directe la connaissance des problèmes pratiques.

Les schémas conceptuels évoqués par Darrigol illustrent la structure modulaire de la physique, où chaque module peut lui-même être une théorie.

Ces modules sont de nature différente, ils sont réducteurs et servent à tantôt 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 a été dépassée. Concernant l'évolution d'une théorie, Darrigol indique trois étapes qui sont applicables au cas de la mécanique des fluides : la théorie est homogène au début, s'en suit une structure modulaire puis une évolution, suite à la confrontation de la théorie avec l'expérience et suite aux tentatives réductionnistes, qui cherchent à trouver une théorie plus générale.

Nous nous proposons d'évoquer maintenant quelques éléments concernant l'étude de l'écoulement sanguin. Les noms associés à cette étude sont généralement Galien et Harvey. Nous abordons également les contributions de Poiseuille et d'Hagenbach.

B.5. Le cas de l'écoulement sanguin

Il ne s'agit pas ici d'effectuer un historique de la médecine ou de ses branches que sont la physiologie ou la cardiologie mais d'aborder succinctement l'apport de deux savants. L'un, Harvey (1578-1657), qui est évoqué dans quasiment tous les manuels et l'autre, Poiseuille (1797-1869), qui est beaucoup moins cité. Situer l'apport d'Harvey (1628) nécessite néanmoins au préalable de présenter le paradigme retenu jusqu'alors : celui de Galien (129-environ210).

L'apport d'Harvey

Le modèle de Galien

Hecketsweiler (2010, p.177) rappelle que dans le modèle de l'Antiquité de l'écoulement sanguin, le sang se répand dans le corps comme l'eau dans le jardin : « *Les conduits des jardins vous donneront de ceci une idée fort nette. Ces conduits distribuent de l'eau à tout leur voisinage ; plus loin elle ne peut pas arriver ; aussi est-on forcé, à l'aide de beaucoup de petits canaux dérivés du grand conduit, d'amener le cours d'eau dans chaque partie du jardin.* ».

Parker (2009) indique deux points de la vision de Galien qui sont en lien avec l'écoulement du sang : l'un correct, à savoir qu'il n'y a que du sang dans les artères et rien d'autres, et l'autre erroné, à savoir que les artères font entrer le sang en se dilatant alors que c'est l'inverse.

Hecketsweiler cite Galien indiquant que les mouvements du cœur aspirent le sang au cours de la diastole « *Comme un soufflet aspire l'air* » (citation de Galien dans Hecketsweiler, 2010, p.177). Hecketsweiler (*ibid.*, p.177) indique également que « *Le pouls n'est pas rapporté au passage d'une onde de sang mais à un mouvement propre des artères, à ce que l'on appelle leur faculté pulsatile* ».

Grmek (1990) rappelle que le système galéniste, en vigueur jusqu'au 17^e siècle, est cohérent et explicatif. Il indique que d'une part, pour une bonne thérapeutique, il faut connaître à la fois la qualité et la quantité de la maladie et du médicament (« *n'examine pas la maladie seulement dans sa nature mais encore dans son intensité. Cette connaissance exige une longue pratique, tant pour d'autres raisons que pour cette circonstance qu'on ne peut décrire ni expliquer verbalement l'intensité de chaque affection* » (citation de Galien dans Grmek, 1990, p.42)) et que d'autre part que les quantités ne sont pas connaissables de manière exacte (la médecine serait conjecturale).

Pour les Anciens, qui suivent le modèle de Galien, le sang veineux et le sang artériel coulent en parallèle, de manière centrifuge, le sang veineux depuis le foie et le sang artériel, depuis le cœur. Il existe des fluctuations mais pas de retour du sang. La principale analogie retenue pour la source du mouvement est l'aimant et non la pompe.

La remise en cause du modèle galéniste

L'essor de méthodes nouvelles en sciences de la vie va remettre en cause la vision galéniste. Cet essor est associé par Grmek à l'influence de Bacon et de Santorio Santorio (1561-1636) : pour Bacon, à partir de faits dûment constatés en nombre fini, on obtient une règle générale. Bacon influence les membres de la *Royal Society* de Londres. Santorio Santorio, lui, introduit en physiologie et en médecine la mesure systématique de paramètres (Grmek, 1990).

Santorio Santorio ne suit pas la vision de Galien sur l'aspect conjectural de la médecine. Il introduit l'analyse quantitative des phénomènes vitaux. Par exemple, il utilise un thermomètre avec un protocole bien établi pour suivre la fièvre : il s'agit de mesurer la température pendant une même durée et toujours au même endroit. Cela lui permet de remettre en cause l'idée acceptée jusqu'alors que le corps est plus froid la nuit que le jour.

Dans la vision d'Hippocrate, la santé est l'harmonie des humeurs, d'où un équilibre entre les matières consommées et celles rejetées par l'organisme. Pour Santorio Santorio, un homme est malade lorsqu'il présente un déséquilibre de ces masses. Par ses mesures, il prouve par exemple l'existence d'une transpiration insensible à travers les poumons et la peau. De là il remet en cause l'idée que le corps vivant est plus léger que le corps mort grâce à l'âme encore présente dans le corps vivant qui l'allègerait.

Le thermomètre utilisé par Santorio Santorio est un système ouvert, donc soumis aux variations de pression atmosphérique. C'est Torricelli qui met en évidence cet effet.

De plus, Ibn An-Nas, avant Harvey, remet en cause le modèle de Galien. Galien lui-même avait conscience des limites de son modèle. Grmek (1990, p.94) précise que « *c'est en systématisant encore davantage la doctrine et en l'épurant de compromis que les galénistes ont éliminé le passage pulmonaire du schéma traditionnel* ». Harvey a cherché à réhabiliter les remarques oubliées de Galien et c'est à ce titre qu'Harvey le cite dans son ouvrage.

Servet, dont Harvey a été l'élève à Padoue, remet en cause lui aussi le modèle de Galien, ce qui aboutit à un autodafé de ses ouvrages. Néanmoins, Servet, ne propose pas un circuit fermé pour modéliser l'écoulement sanguin.

Les hypothèses d'Harvey

Grmek rappelle l'énoncé des hypothèses d'Harvey concernant l'aspect circulatoire du sang au sein de l'organisme : « *Mais pour qu'on ne nous accuse pas de nous contenter de mots, de faire des assertions spécieuses, sans fondements, et de vouloir innover à tort, nous posons trois hypothèses, qui, si elles sont vraies, démontreront clairement ce que j'avance et en feront l'éclatante vérité : le sang, poussé par la contraction du cœur, passe continuellement de la veine cave dans les artères, en si grande quantité que les aliments ne pourraient y suffire, et la totalité du sang suit ce passage en un temps très court. Le sang, poussé par les pulsations artérielles, pénètre continuellement dans chaque membre et chaque partie du corps, et il entre ainsi bien plus que la nutrition du corps ne l'exige, et bien trop pour que la masse du sang y puisse suffire. Les veines ramènent constamment du sang de chaque membre du cœur.* » (citation d'Harvey dans (Grmek, 1990a, p.108).

Les valvules veineuses sont identifiées par Fabrice d'Acquapendente (1537-1619). C'est un de ses élèves, Harvey (1578-1657), qui met en évidence leur fonction : s'opposer au reflux sanguin. Les résultats d'Harvey sont formulés en 1628 : « *the sole and only end of the motion and contraction*

of the heart » (citation d'Harvey dans Stefanovska, 1999, p.33). L'idée d'Harvey est de proposer le passage du sang de l'artère à la veine via des tissus supposés spongieux et la percolation du sang dans les poumons : « *Le sang va des artères aux veines et non en sens inverse, et qu'entre ces deux vaisseaux, il y a soit des anastomoses, soit des porosités intra-tissulaires qui permettent le passage du sang* » (citation d'Harvey dans Cadet, 2008, p.104).

Cadet présente les valvules veineuses comme jouant le rôle de « *clapets anti-retour* » (*ibid.*, p.105), particulièrement utiles pour permettre le retour du sang au cœur. Lorsque les valvules ne fonctionnent plus, des varices apparaissent.

L'idée de circuit fermé proposée par Harvey est probablement liée à l'importance du cercle dans la pensée philosophique de l'époque, qui est dominée par la vision téléologique du monde d'Aristote, dans laquelle la perfection du mouvement circulaire est mise en avant pour expliquer le monde (Porter, 2003).

Précisons également qu'émettre des hypothèses puis les vérifier via de la dissection et de la vivisection est un des aspects novateurs de la démarche d'Harvey. Grmek (1990a) insiste sur le fait qu'Harvey s'inspire en cela de Galilée et non de Bacon.

Une conception mécaniste de la vie

Signalons une autre remise en cause du modèle galéniste, celle de Descartes, qui a finalement été « *déblayée* » si on reprend les termes de Kuhn. Elle s'inscrit dans un courant mécaniste que Grmek analyse et dont nous présentons ici un bref historique.

Aristote introduit le terme d'organisme par analogie avec les machines de guerre de l'époque : l'organisme est perçu comme un ensemble d'instruments. Par exemple, le bras est comparé à la catapulte.

La vision d'Aristote n'est que partiellement mécaniste : elle n'aborde pas l'origine du mouvement. A l'époque d'Aristote, le mouvement d'une machine est passif : la source d'énergie est le travail musculaire de l'homme ou de l'animal (« *Les machines peuvent avoir des structures qui restituent une force emmagasinée mais n'ont pas d'âme, seul moteur véritable.* » (citation d'Aristote dans Grmek, 1990, p.117).

Le sens qu'Aristote attribue au terme « *mouvement* » n'est pas réductible à un déplacement matériel : tout mouvement aurait une finalité. « *C'est le désir qui, en définitive, donne mouvement au corps, désir qui, propriété purement vitale, appartient à l'âme et non au corps* » (*ibid.*, p.117).

Dans la théorie biomécaniciste d'Erasistrate (3e siècle avant JC, école d'Alexandrie), « *Le corps humain est un tout (...) mû grâce à 3 systèmes de canaux : artères, veines et nerfs* » (*ibid.*, p.117).

Les artères contiendraient le pneuma, les veines, le sang et les nerfs une sorte de fluide appelé esprit nerveux.

Galien n'a pas une vision mécaniste du corps humain. Il existerait en chaque être vivant une force spirituelle.

Le Moyen-Age ne fournit pas d'apport à la vision mécaniste. On comprend qu'une machine peut en commander d'autres mais pour autant, cela n'a pas d'impact sur la pensée biologique.

Par contre, il existerait des analogies biologico-mécaniques dès le 16^e siècle mais « *Descartes qualifiait son hypothèse mécaniste de paradoxe* » (*ibid.*, p.122).

Le net développement de cette vision mécaniste se produit au 17^e siècle, avec la découverte des lois fondamentales de la mécanique.

Grmek (*ibid.*, p.123) conclut que « *de l'Antiquité au siècle des Lumières, on constate une sorte de simplification progressive des doctrines biologiques, simplicité qui atteint son paroxysme avec*

la croyance en une complète réduction de l'organisme animal et même humain à des dispositifs mécaniques grossiers ».

Par exemple à Saint-Germain-en-Laye, de nouvelles machines hydrauliques apparaissent où la machine commandant est dissociée de celle exécutant le mouvement. Grmek le relie à l'idée de l'animal-machine de Descartes : la force motrice serait de la chaleur située dans la cavité cardiaque, comme pour Aristote. Deux substances fondamentalement différentes composeraient l'humain, la matière et l'âme pensante, localisée dans le cerveau, placée sur l'axe central.

Descartes croit à la circulation du sang et défend cette idée mais pour lui, le cœur n'est pas une pompe mais une espèce de moteur à explosion. Le sang y bouillirait, se dilaterait et irait ensuite dans les poumons où il serait refroidi.

Grmek y voit deux erreurs de raisonnement dues à l'accord de Descartes vis-à-vis d'affirmations scholastiques, à savoir l'existence de chaleur innée et le fait que la diastole correspondrait au choc de la pointe du cœur. En fait, lors de cette phase, le cœur y est en systole. De plus, le cœur serait perçu comme un ballon de chair élastique dilatable, alors que c'est un muscle.

Les iatrophysiciens mettent en avant le rôle de l'expérience

L'œuvre de Galilée est présentée par Grmek comme un support idéologique de toute une école biologique et médicale : l'iatrophysique.

L'iatrophysique œuvre à introduire l'expérience quantitative dans les sciences biologiques (Grmek, 1990). Voltaire critique la démarche cartésienne : « *Descartes fit le contraire de ce qu'on devait faire : au lieu d'étudier la nature, il voulut la deviner (...) Un homme qui dédaigna les expériences, qui ne cita jamais Galilée, qui voulait bâtir sans matériaux, ne pouvait élever qu'un édifice imaginaire.* » (citation de Voltaire dans Grmek, 1990, p.132).

La remise en cause de Descartes s'effectue notamment à travers les travaux de Borelli sur la vivisection d'un cerf, couplée à la mesure de sa température. C'est le 'coup de grâce' à la théorie cartésienne de la fonction cardiaque. Borelli n'admet pas l'automatisme rigide des mouvements organiques et fait intervenir l'équivalent de l'âme végétative des Anciens. Grmek précise que Borelli a peu d'impact en France du fait de la tradition galénique. Signalons que la théorie d'Harvey sur la circulation sanguine est complétée par un disciple de Borelli, l'anatomiste bolonais Marcello Malpighi (1628-1704).

Grmek(1990) signale également l'influence de l'iatrophysique sur Jean Bernoulli, qui utilise le calcul infinitésimal au service de la physiologie et de la médecine. Grmek (*ibid.*, p.135) s'interroge : « *l'attachement de Bernoulli à la doctrine iatrophysique eut-il une influence sur les médecins français ? Cette question reste encore ouverte* ».

L'évolution de la pensée en hémodynamique suite aux travaux d'Harvey

Signalons que la définition d'un vaisseau diffère des Anciens aux Modernes : pour les Anciens, c'est la qualité du sang qu'il contient qui importe alors que pour les Modernes, c'est la direction dans laquelle le sang se déplace qui importe.

Après Harvey, il y a redéfinition des vaisseaux reliant le cœur aux poumons.

Signalons qu'Harvey n'a jamais observé de capillaire, son travail étant antérieur à la découverte du microscope (Parker, 2009). C'est Marcello Malpighi (1628-1694) qui utilise en 1661 cet instrument pour observer des capillaires, confortant ainsi l'idée d'un mouvement circulaire du sang, des artères aux veines.

Nous résumons l'influence des travaux d'Harvey en hémodynamique dans le tableau B.1, construit à partir de données d'un ouvrage de Porter (Porter, 2003).

Eléments comparés	Avant Harvey	Après Harvey
Influences philosophiques et non technique	Modèle de Galien qui a perduré environ 1500 ans	Perfection du mouvement circulaire, liée à la vision téléologique du monde d'Aristote Mécanisme, rôle de la machine (Descartes, Boyle, Hooke) Iatrophysique : la physique serait la clé de la médecine
Théorie	Théorie des humeurs : santé et maladie sont vues comme une balance de fluides. Les saignées sont fondées sur la vision galénique du pléthore : trop de sang implique fièvre, apoplexie, mal de tête	Structures locales anatomiques et mécaniques
Vision du sang et de son mouvement associé	Le sang est le liquide de la vie, nourrissant le corps quand on est en bonne santé, causant fièvre et inflammation quand on est malade Concocté dans l'organisme, il est transporté par les veines et irrigue l'organisme	Mouvement circulaire dû aux battements du cœur Le cœur est vu comme un muscle
Contradiction	Aspiration du sang lors de la diastole	Expulsion du sang par le ventricule lors de la contraction systolique
Influence sociale	Médecins parisiens réputés conservateurs	<i>Royal Society</i> de Londres, lieu d'échanges entre médecins et 'philosophes naturalistes' (dénommés plus tard scientifiques)
Influence technique envisagée		Microscope (1661), qui a permis la découverte des globules rouges
Interprétation de l'écoulement sanguin	Vertu, esprit, observation	Interprétation hydraulique et mesures

Tableau annexe B1
Influence des travaux d'Harvey en hémodynamique

Parker signale que le second grand ouvrage d'Harvey n'est pas passé à la postérité car il contient trop d'erreurs.

Stefanovska (1999) estime que c'est avec Harvey que débute la physiologie moderne. Elle rappelle que ses résultats n'ont été pleinement acceptés qu'au bout de deux siècles.

Signalons enfin que la co-influence des poumons et du cœur dans le maintien du débit sanguin et des niveaux de pression doit encore être clarifiée (*ibid.*). La circulation sanguine à travers ces deux organes est souvent traitée de manière séparée dans les manuels de premier cycle universitaire : il s'agit principalement d'analyser d'une part le mouvement dans le cœur et / ou les veines et d'autre part les échanges gazeux dans les poumons.

L'apport de Poiseuille

Des interactions entre Sciences et médecine au 19^e siècle, avant les travaux de Poiseuille

Les interactions entre Sciences et médecine sont déjà notables avant les travaux de Poiseuille : Euler, par exemple, effectue des prémisses d'étude quantitative sur le sang (« *if God wanted us to understand flow in the arteries, he would not have made the equations so difficult.* » (citation d'Euler dans Parker, 2009, p.113)).

Stephen Hales, vicaire de Tuddington, au Royaume-Uni, effectue les premières mesures de pression sanguine : un tube en verre vertical est connecté à l'artère fémorale d'un cheval et il est constaté que le sang monte à 2,47 m (Grmek, 1990).

Thomas Young étudie la propagation d'une onde sanguine dans les artères « *en transposant les idées de Newton sur les fluides compressibles : le sang est incompressible et l'élasticité des parois vient remplacer la compressibilité du fluide* » (Nordonb, 1992, p.81). Caro signale que Young en 1808 met en parallèle le mouvement d'un liquide dans le corps d'un animal et dans un corps inanimé : « *the mechanical motions, which take place in an animal body, are regulated by the same general laws as the motion of inanimate bodies... and it's obvious that the inquiry, in what manner and in what degree, the circulation of the blood depends on the muscular and elastic powers of the heart and the arteries, supposing the nature of those powers to be known, must become simply a question belonging to the most refined departments of the theory of hydraulics.* » (citation de Young dans Caro, 1978, p.xvii).

Guillerme (2015, p.43) note que, « *à vrai dire, depuis la fin du XVIII^e siècle, la médecine s'est peu à peu infiltrée dans les sciences et les techniques de l'ingénieur d'abord parce que les cloisons qui séparent aujourd'hui ces deux savoirs sont à cette époque très peu étanches : les médecins pensent comme les ingénieurs à l'hygiène sociale, ils s'immiscent comme eux dans les hautes mathématiques (Young), dans l'étude des matériaux (Kirwan, John) et certaines techniques médicales comme l'injection sont employées avec succès dans les travaux publics. Ensuite parce que les sciences médicales connaissent durant l'Empire et sous la Restauration un essor qui leur assure une large publicité au sein de la communauté scientifique. De ce point de vue on ne peut négliger ni l'apport de Bichat dont l'Anatomie générale (1800) instaure le concept de tissu pour désigner la constitution des organes ni celui de Magendie qui travaille dès la fin des années 10 sur le système nerveux et le fluide cérébro-spinal impliquant la notion de « moteur », de transmission mécanique* ».

Citons aussi l'exemple d'Helmholtz, nommé chirurgien dans les hussards à 21 ans et qui devient professeur de physiologie à Königsberg, puis professeur de physique à Berlin (Nordonb, 1992). Signalons cependant qu'« *au XIXe siècle, Helmholtz s'est heurté à une résistance opiniâtre de la part des physiologistes quand il prétendit que l'expérimentation physique pouvait apporter des éclaircissements à leur spécialité* » (Koenigsberger, 1906, p.65)

Concernant le mouvement des artères, le fait qu'elles se contractent et se dilatent en phase avec le cœur est connu depuis 1777. Mais savoir que ces deux mouvements sont contrôlés par le même type de nerf date de 1831 (Ernst Weber). Alfred et Ernst Weber sont frères : l'un est physicien (étude théorique des ondes dans un tube élastique) et l'autre médecin (étude expérimentale) (Parker, 2009). Ils travaillent en 1845 sur l'action inhibitrice du nerf vagal sur l'action du cœur, déjà suggéré par Volkmann en 1837. Peu de temps après, l'autre type de nerf inhibant l'action du cœur, le nerf sympathique, est découvert par Claude Bernard (Stefanovska, 1999).

Les travaux de Poiseuille

Poiseuille débute ses études à l'Ecole Polytechnique. L'X ayant fermé un an, Poiseuille part en médecine. Il soutient un doctorat sur la force de l'aorte, puis il étudie l'écoulement sanguin (hémodynamique) : « *mentionnons simplement le cas de Poiseuille sorti de Polytechnique en 1824, reçu docteur en médecine en 1828 et qui s'attache à mesurer la pression artérielle (...) Il est difficile de se rendre compte des rapports que ce Polytechnicien-médecin entretient avec son ancienne Ecole. On sait qu'il a lu les travaux de Biot sur la lumière et le Mémoire sur l'écoulement linéaire de diverses substances liquides par des tubes capillaires de verre de Girard publié en 1817, qu'il connaît parfaitement les lois de Fourier sur la propagation de la chaleur. Sa thèse de médecine, Recherches sur la force du cœur aortique, l'emmène à étudier les causes du mouvement du sang dans les vaisseaux capillaires et à remporter le prix de physiologie expérimentale de l'Académie de médecine en 1833* » (Guillaume, 2015, p.43).

Guillaume (2015) souligne également l'influence du physicien Petit sur le développement des qualités expérimentales de Poiseuille.

Les mesures *in vivo* du sang posent problème à l'époque. Poiseuille choisit donc d'étudier d'autres liquides. Et ce, dans des capillaires fins, en verre. Il étudie l'influence de la longueur du capillaire, de son diamètre, de l'écart de pression et de la température sur le débit, pour l'eau et pour d'autres fluides. Dans ses expériences, il monte jusqu'à 8 atm (explosion à 10 atm). Il emploie dix tubes de diamètres différents, allant de 15 à 600 μm . Ces tubes sont ensuite découpés pour faire varier le paramètre longueur. Il fait varier la température de 0°C à 45°C lors d'une série de mesures. Le dispositif expérimental mis en place est complexe. Le problème de la reproductibilité des mesures le pousse à l'améliorer. Poiseuille tient cas de facteurs correctifs. Un travail soutenu est mené sur la mesure du diamètre des capillaires utilisés. Leur dépendance en température, qui n'est pas linéaire, est étudiée.

Les effets d'entrée dans le capillaire sont authentifiés mais il n'y a pas d'explication précise fournie. Il s'avère que dans le cas où la longueur du capillaire est faible, les molécules de fluide ne se déplacent pas de manière rectiligne. Les résultats obtenus dans le cas où la longueur est faible ont été insérés dans une deuxième série de mesure, ce qui rappelle la remarque de Kuhn (2008) sur le fait de forcer les résultats à entrer dans des cases.

Poiseuille observe que lorsque le diamètre diminue, la longueur minimale pour que la loi fonctionne diminue elle aussi. Il compare ce résultat à son étude de l'écoulement sanguin dans une grenouille et conclut sur la longueur minimale pour une artère.

Dans le travail de Poiseuille, le concept de réseau y est déjà adopté : « nous entendons par capillaires les petits vaisseaux qui terminent les artères, et donnent naissance aux veines ; ces vaisseaux... tout en se divisant et se réunissant pour former ordinairement une sorte de réseau, conservent le même calibre » (citation de Poiseuille dans Guillaume, 2015, p.43). Le vocabulaire technique employé reste néanmoins très proche de celui de ses contemporains, ingénieurs : « en comprimant l'abdomen, la pression du sang dans les gros troncs des vaisseaux est alors augmentée ; il se porte vers les branches et les rameaux des artères et des veines et les dilate ; l'élasticité de leurs parois est mise en jeu par cette dilatation, et lorsque l'abdomen n'est plus comprimé, la pression du sang dans les troncs diminue tout à coup ; le sang doit alors être chassé à son tour des rameaux des artères et des veines vers les troncs ». « Le sang se meut donc dans des tubes vivants comme le ferait un liquide dans un tube inerte. La comparaison entre le réseau sanguin et le réseau hydraulique n'est pas simplement métaphorique ou fortuite : d'importantes discussions entre Amussat, Bouillaud, Blandin, Gerdy et Velpeau au sujet des accidents qui suivent l'entrée de l'air dans les veines ont lieu à l'Académie entre 1829 et 1831, contemporaines des recherches de Girard à Paris et de Poncelet à Metz sur les mouvements de l'air dans les tuyaux de conduite, des préoccupations de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale qui propose en 1827, cinq prix d'une valeur totale de 13500 Francs pour trouver les meilleures techniques relatives aux tuyaux, des études d'Ampère qui invente le solénoïde - i. E. « en forme de tuyau » - en 1822 pour développer les champs électro-magnétiques. Poiseuille qu'il faut considérer comme le premier théoricien de la circulation au sens large du terme, montre que la connexion des rameaux extrêmes, ces capillaires, maintient une pression uniforme dans l'ensemble du réseau comme l'avait démontré 20 ans plutôt de Prony. » (Guillaume, 2015, p.44).

La portée des travaux de Poiseuille

On reconnaît aujourd'hui la grande qualité de ses mesures au vu de l'estimation de la viscosité de l'eau qui peut en être déduite. Il est à noter cependant que Poiseuille ne fait pas référence dans ses écrits au coefficient de viscosité dynamique η alors que ce paramètre est déjà introduit par Navier en 1823. Poiseuille évoque un coefficient de proportionnalité dépendant du fluide et de la température.

Les résultats de Poiseuille sont validés par la communauté scientifique via des mesures similaires aux siennes pour le mercure et l'éthylether. Pour autant, de son vivant, Poiseuille est moyennement reconnu par sa communauté de recherche.

La visée de ses manipulations est liée *a priori* aux traitements médicaux. Néanmoins, on ne sait pas où il a travaillé et comment il a été financé. L'hôpital de la Salpêtrière est parfois évoqué. Pour Herrick (1942), la loi de Poiseuille est un exemple de contribution à la physique du travail de physiologistes : Poiseuille suggère d'étudier la circulation sanguine pour résoudre des problèmes d'hydraulique.

Stefanovska (1999, p.33) souligne l'influence de l'opinion admise à l'époque de Poiseuille : « his quest for the utmost possible precision was motivated in part by the fact that accepted opinion, including that of the authorities of his time, Thomas Young and Claude Navier, held that Q is approximately proportional to D^3 . » Sa découverte, décrite comme entièrement expérimentale, surprend les hydrauliciens. Cette loi est en opposition avec les lois trouvées à l'époque. On en déduit que même si la pression n'est pas celle atmosphérique, l'écoulement s'effectue à débit constant et que l'écoulement capillaire du sang est régi par le cœur, via notamment l'élasticité des parois.

Herrick (1942) évoque la « Beauté » de cette loi, sa simplicité et sa reproductibilité de nos jours.

Parker (2009) signale également que la loi de Poiseuille n'est pas vérifiée dans les artères, mais comme elle est simple, elle fait référence.

Avant Poiseuille, Girard a observé l'existence d'une couche près des parois, où le liquide est au repos. L'apport de Poiseuille est de constater que cette couche est beaucoup plus fine que les prévisions théoriques. Poiseuille retient l'hypothèse de différentes couches de liquide lors d'un écoulement, ce qui permet d'expliquer le mouvement des globules rouges lors de l'écoulement du sang (mouvement de translation – rotation ou les deux selon la couche de fluide où ils se situent). Poiseuille introduit le manomètre à mercure pour la mesure de la pression artérielle.

De plus, l'influence du diamètre d'une conduite sur le débit volumique pose aussi problème aux hydrauliciens de l'époque (Navier notamment s'y intéresse).

Le résultat de Poiseuille valide l'hypothèse de nullité de la vitesse du fluide au contact des parois. Son travail a également un impact sur la reconnaissance de la communauté naissante des rhéologues.

Signalons que cette loi est désormais indiquée comme étant la loi de Hagen-Poiseuille, cela en hommage au travail d'Hagen, hydraulicien allemand. Il distingue un écoulement laminaire d'un écoulement turbulent et obtient une estimation du nombre de Reynolds critique (d'après le travail de Prandtl et Tietjens). Il étudie également l'effet d'entrée dans une canalisation.

En lien avec cette loi de Hagen-Poiseuille, Hagen travaille avec trois tubes de longueurs et de diamètres différents. Il passe d'un exposant 4,12 à 4 pour la dépendance du débit volumique D_v par rapport au diamètre. Hagen ajoute un terme en D^2 dans la relation. Ni Poiseuille, ni Hagen n'introduisent le coefficient de viscosité dynamique η .

La preuve de la loi de Poiseuille

La première preuve mathématique de la loi de Poiseuille est due à Hagenbach.

Par ailleurs, Stokes, à l'Université de Cambridge, a également résolu ce problème en 1845, via l'équation de Navier-Stokes. Stefanovska (1999, p.33) indique que « *it was Georges Stokes himself who, in 1845, solved the problem of Poiseuille flow as an application of the Navier-Stokes equations, but he did not publish his results because he believed that they conflicted with experiment : he was evidently unaware of Poiseuille's work* ».

Mais ses résultats étant différents de ceux de Bossut et de Du Buat, il ne publie pas, doutant de son hypothèse de nullité de la vitesse du fluide au contact des parois : « *but having calculated, according to the conditions which I have mentioned, the discharge of long straight circular pipes and rectangular canals, and compared the resulting formulae with some of the experiments of Bossut and Du Buat, I found that the formulae did not at all agree with experiment* » (citation de Stokes dans Sutera, 1993, p.12).

Conclusion

Comme l'a mis en avant Darrigol, c'est par l'association d'une approche théorique et d'une approche expérimentale que les avancées en mécanique des fluides ont été possibles. D'une

théorie homogène on passe à une structure modulaire qui évolue, d'une part grâce aux confrontations entre expérience et théorie et d'autre part grâce aux tentatives réductionnistes.

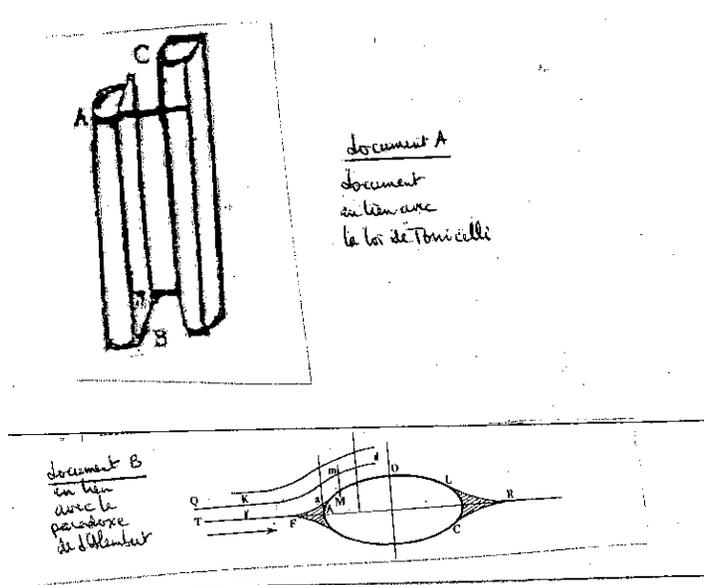
L'étude de l'écoulement sanguin révèle les interactions à double sens entre la physique et la médecine ainsi que l'influence des courants de pensée sur la construction de nouvelles théories. Par exemple l'importance du cercle en philosophie a facilité l'émergence de l'idée d'une circulation en boucle fermée pour le sang au sein d'un organisme.

Le travail minutieux de Poiseuille et la justification tardive de ses résultats mettent en avant la construction d'un modèle dans une communauté de recherche donnée.

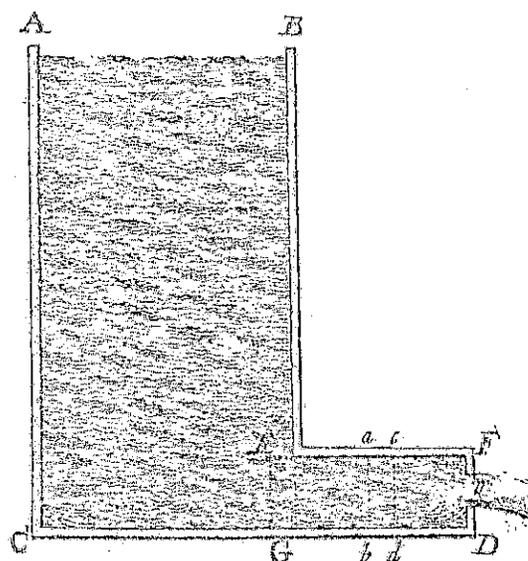
Annexe C : Extraits de sources diverses (ouvrages, manuel, journal...)

C.1. Extraits d'ouvrages

Document	Source
A	Nordon, 1992, p.68
B	Nordon, 1992, p.100
C	Darrigol, 2005, p.8
D	Darrigol, 2005, p.9
E	Blayc, 2007, p.203



document C Fig. 1.4. Daniel Bernoulli's figure accompanying his derivation of the velocity-dependence of pressure. ([1738] plate).



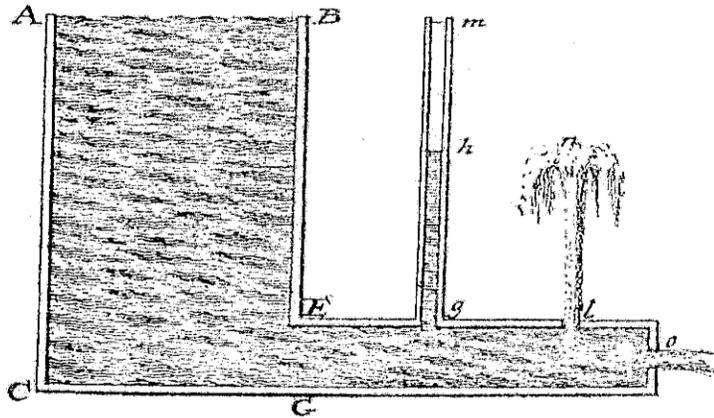
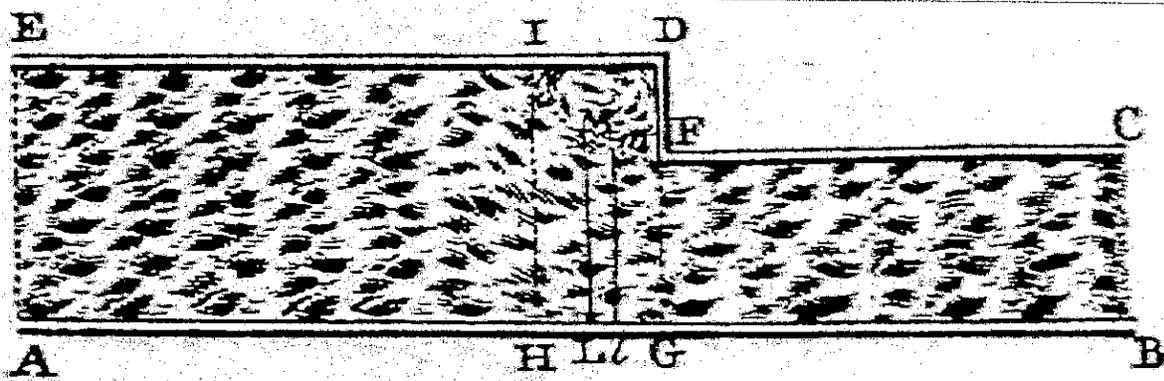


Fig. 1.5. Effects of the velocity dependence of pressure according to Daniel Bernoulli ([1738] plate).

document D

13



(Jean Bernoulli, *Hydraulica Nunc primum detecta ac demonstrata directe ex fundamentis puri mechanicis*, Opere omnia, tome IV, Lausanne et Genève 1742, première partie
Traduction anglaise par l'auteur

document E

C.2. Article du quotidien *l'Union*

Région>Départements>Marne>Reims

En volant du carburant les étudiants mettent leurs connaissances en pratique...

Publié le 19/12/2014 Par L'union-L'Ardennais



Ils ont 18 et 19 ans, sont étudiants à la faculté des sciences de Reims et planchent notamment sur la mécanique des fluides, le transvasement des liquides. Les cours théoriques c'est bien, les travaux pratiques c'est mieux... à condition de rester dans les clous. Tout le contraire de l'expérience menée par les deux larrons.

Exploitant leurs connaissances universitaires, ils ont bricolé un dispositif très ingénieux – avec soufflet et vannes quart de tour – pour siphonner du carburant sans se salir ni avoir besoin d'aspirer, tuyau à la bouche.

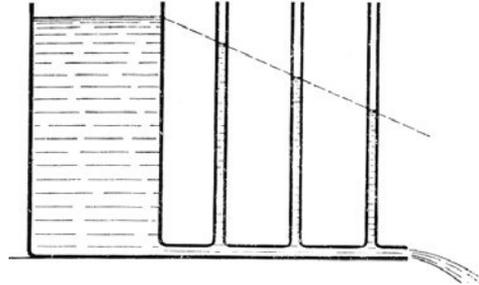
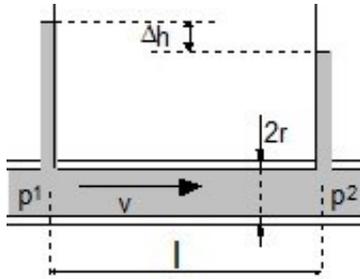
À la nuit tombée, mardi vers 23 heures, les deux étudiants se sont rendus à Cernay-lès-Reims, rue Jules-Ferry. Ils ont forcé les réservoirs de deux voitures mais pas de chance pour eux, ils ont été surpris par un témoin. Débandade à l'arrivée des gendarmes.

Les apprentis délinquants n'ont pas eu le temps de rejoindre leur voiture. Le premier s'est fait prendre tout de suite, le second a été retrouvé après avoir vainement tenté de se dissimuler dans le village. Tout penauds, ils n'ont pu que reconnaître les faits.

C.3. Extraits d'un polycopié d'un centre de préparation au CAPES (2014)

8. Écoulements laminaire avec pertes de charge : Poiseuille

8.1. Rappel



Pour un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique horizontale, le débit-volume d'un fluide est donné par :

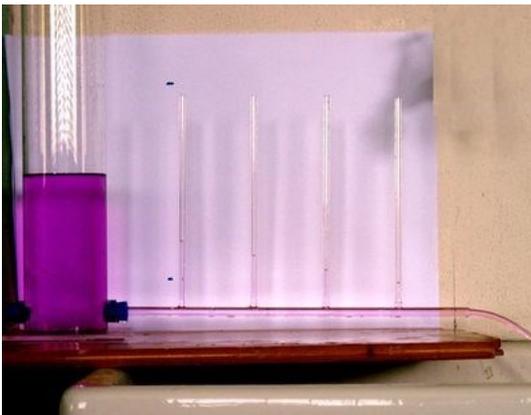
$$q_v = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot (p_1 - p_2)$$

avec :

- q_v : débit-volume ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- r : rayon intérieur (m),
- η : viscosité dynamique du fluide ($\text{Pa} \cdot \text{s}$),
- ℓ : longueur entre les points (1) et (2) (m),
- p_1 et p_2 : pression du fluide aux points (1) et (2) (Pa).

8.2. Expérience

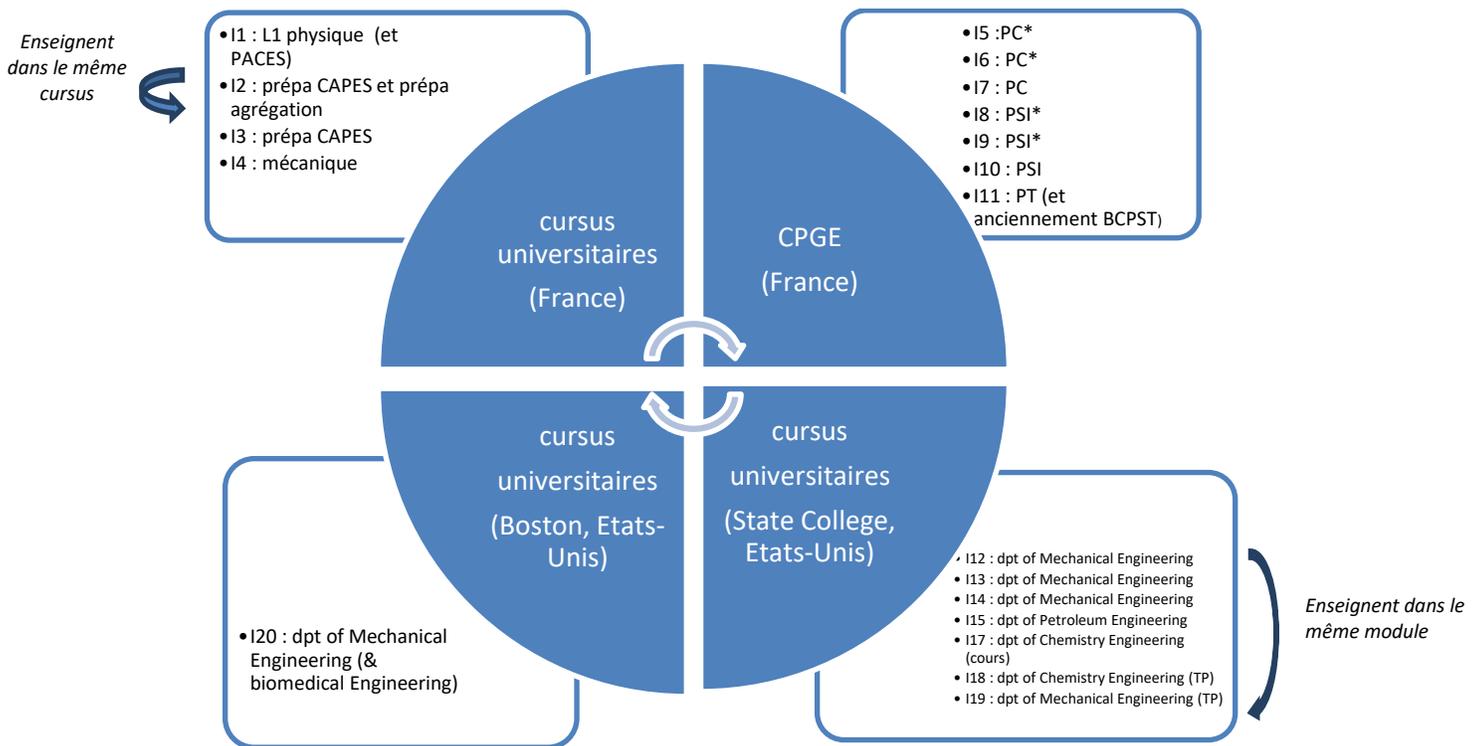
Connaissant le rayon intérieur du tube de vidange, on détermine les différences de pression par la mesure des différences de hauteurs. Le débit volumique est déterminé en mesurant le volume évacué pendant un temps donné.



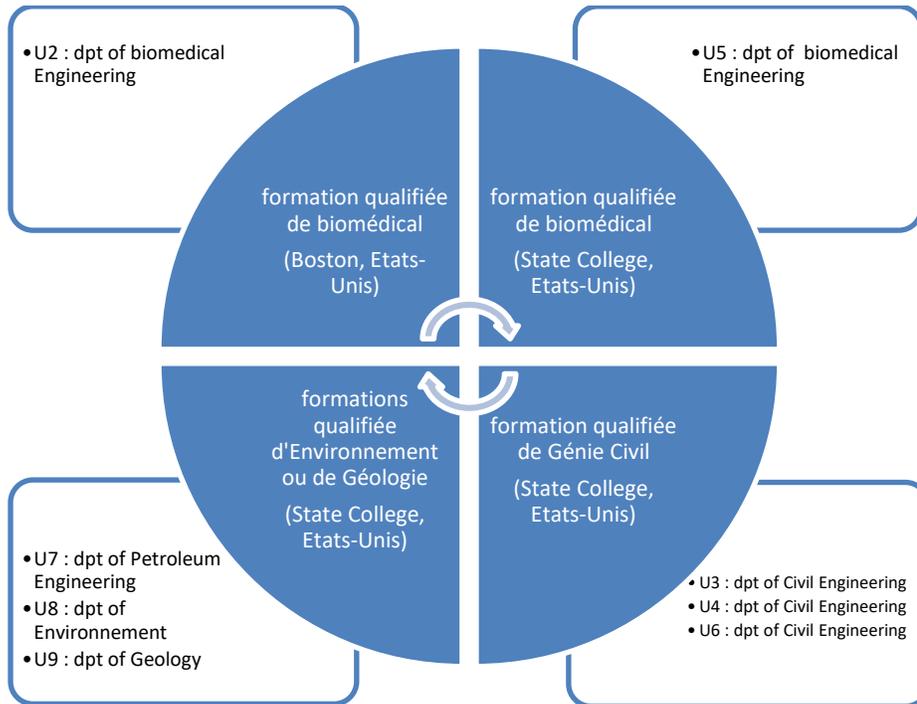
Annexe D : Données sur l'enquête

D.1. Répartition des interviewés

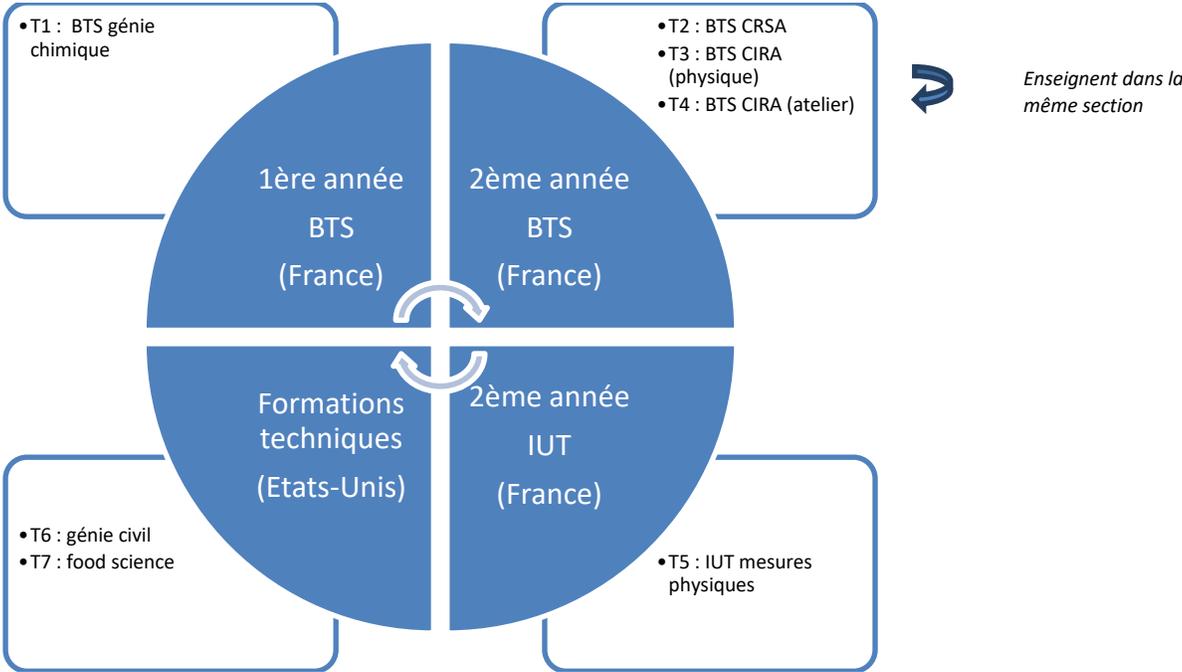
Répartition des interviewés exerçant dans des formations d'ingénieurs : famille I



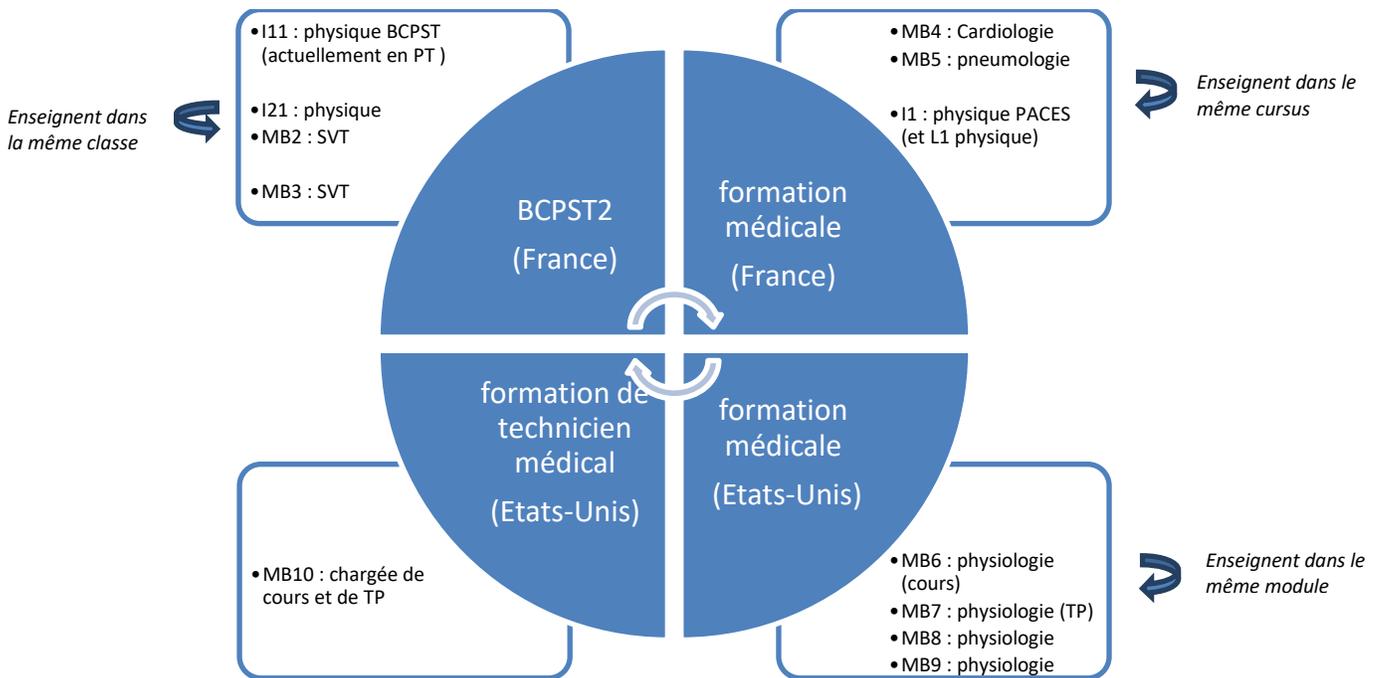
Répartition des interviewés exerçant dans des formations d'ingénieurs 'utilisateurs' : famille U



Répartition des interviewés exerçant dans des formations de techniciens : famille T



Répartition des interviewés exerçant dans des formations biomédicales : famille MB et quelques membres de la famille I



Caractéristiques professionnelles des enseignants interrogés

Sur l'exemple d'un article de Coquidé (1998) et de Van Driel (2005) sont fournis ci-dessous deux tableaux récapitulatifs des caractéristiques professionnelles des enseignants interrogés (tableau D.1.6. A et D.1.6. C). Un descriptif du codage retenu dans ces tableaux est indiqué dans le tableau D.1.6. B.

Enseignant	Sexe	Pays d'exercice	Origines*	Grade**	Type établissement***	Niveau d'enseignement
I5	M	F	3	2	2	2
I7	M	F	3	2	2	2
I9	M	F	3	2	2	2
I11	F	F	3	2	2	2
I13	M	USA	1	3	2	3
I14	M	USA	2	0	2	0
I15	M	USA	2	3	2	2
I20	M	USA	2	3	2	1
U2	M	USA	2	3	2	3
U5	M	USA	1	3	2	2
U6	M	USA	1	3	2	2
T1	M	F	3	2	1	0
T2	M	F	3	1	1	0
T3	M	F	3	2	1	0
T6	M	USA	1	2	1	1
MB2	F	F	3	2	2	2
MB3	M	F	3	2	2	2
MB4	M	F	3	3	2	3
MB5	F	F	3	3	2	3
MB6	F	USA	1	3	2	0
MB7	F	USA	1	2	2	0
MB8	F	USA	1	2	2	0
MB9	M	USA	1	3	2	0

Tableau D.1.6. A
Récapitulatif des caractéristiques professionnelles des enseignants interrogés

Caractéristique professionnelle	Description	Chiffre associé
Origines* de l'enseignant interrogé	Enseignant aux États-Unis (au moment de l'interview) et formé aux États-Unis	1
	Enseignant aux États-Unis (au moment de l'interview) et formé hors États-Unis	2
	Français	3
Grade** de l'enseignant interrogé	TA (Teaching Assistant) ou certifié ou enseignant professionnel aux États-Unis	1
	Agrégé ou PRAG (dénomination pour un agrégé exerçant à l'université) ou que chargé de cours ou de TP aux États-Unis (hors TA)	2
	Maître de conférences ou professeur d'université ou Professor aux États-Unis	3
Type établissement*** dans lequel exerce l'enseignant interrogé au moment de l'interview	BTS ou iut ou communitycollege	1
	Cpge ou université ou university aux États-Unis	2
Niveau d'enseignement auquel exerce l'enseignant interrogé	Freshman ou BTS1	0
	Sophomore ou bac+1 ou BTS2	1
	Junior ou bac+2	2
	Senior ou bac+3	3
Ancienneté** : ancienneté en tant qu'enseignant (et non spécifiquement en tant qu'enseignant dans ce cours)	Moins de 5ans	1
	Entre 6 et 15ans	2
	16 ans ou plus	3
Formation enseign. méca flu* : lire 'Formation de l'enseignant interrogé en mécanique des fluides '	L'enseignant interrogé se déclare autodidacte	1
	L'enseignant interrogé, lorsqu'il était étudiant, a suivi une mineure enseignée par un enseignant autre que physicien	2
	L'enseignant interrogé, lorsqu'il était étudiant, a suivi une mineure enseignée par un enseignant physicien	3
	L'enseignant interrogé, lorsqu'il était étudiant, a suivi une majeure enseignée par un enseignant physicien	4
Lien actuel enseign. méca flu** : lire 'Lien actuel de l'enseignant interrogé à la mécanique des fluides '	Qu'enseignant ou casparticulier	1
	L'enseignant interrogé se présente comme chercheur dans un domaine éloigné de la mécanique des fluides	2
	L'enseignant interrogé se présente comme chercheur dans un domaine proche de la mécanique des fluides	3
	L'enseignantinterrogéseprésentecommechercheuren mécaniquedes fluides	4
Choix de cet enseignement par l'enseignant interrogé	Imposé à l'enseignant interrogé	1
	Mi imposé, mi choisi par l'enseignant interrogé	2
	Choisi par l'enseignant interrogé	3

Tableau D.1.6. B
Descriptif du récapitulatif des caractéristiques professionnelles des enseignants interrogés

Enseignant	Formation enseign. méca flu*	Lien actuel enseign. méca flu**	Choix ensgt	Ancienneté**
I5	0	0	0	2
I7	2	0	0	0
I9	3	0	0	0
I11	3	0	0	1
I13	3	3	2	2
I14	3	2	0	0
I15	3	3	0	1
I20	0	2	1	0
U2	2	2	1	1
U5	3	3	2	1
U6	2	2	–	2
T1	0	0	0	0
T2	0	0	0	0
T3	0	0	0	2
T6	2	0	–	2
MB2	1	0	0	1
MB3	0	0	0	2
MB4	1	1	2	2
MB5	1	1	0	0
MB6	2	1	2	1
MB7	2	0	0	0
MB8	1	0	–	1
MB9	1	1	2	2

Tableau D.1.6. C
Suite du récapitulatif des caractéristiques professionnelles des enseignants interrogés

D.2. Annexe du chapitre 6 (Méthodologie)

Nous détaillons ici quelques éléments liés au chapitre 6.

Passage des thèmes de réflexion initiaux à une catégorisation sous l'angle des PCK

Le tableau D.2.1 présente les thèmes abordés lors des différents entretiens menés (pré-enquête auprès d'étudiants, pré-enquête puis enquête auprès d'enseignants). Parmi ces thèmes sont également précisés ceux travaillés dans ce manuscrit. Il y a un astérisque dans les cases du tableau contenant une expression qui a été raccourcie, faute de place disponible dans la case.

	Thème abordé	Pré-enquête étu.*	Pré-enquête ens.*	Enquête ens.	Travaillé dans ce manuscrit
	Public visé interviewé	étudiant	enseignant	enseignant	enseignant
Partie A de l' enquête ens.*	Parcours perso*		•	•	•
	Goût MF*		•	•	•
	Sources		•	•	
	Lien MF/cursus suivi*	•	•	•	•
	Lien MF/quotidien*	•	•		•
	Lien MF/recherche*	•	•		•
	Comp. Autres domaines*	•			
	Evolution pg*		•		
Partie B de l' enquête ens.*	Vision d'ensemble du cours	•	•	•	•
	Evaluation		•	•	
	Rapport élèv/ens*		•	•	
	Présence exptal*	•	•	•	•
	Recours HS*		•	•	•
	Démarche intro mdl*		•	•	•
Partie C de l' enquête ens.*	Modélisation		•	•	•
	Contexte tradi physique *	•	•	•	•
	Contexte tradi physio*			•	
	Hors contexte tradi physique *		•	•	•

Tableau D.2.1
Thèmes abordés lors des différentes phases de l'enquête

Dans le tableau D.2.2 on précise ce que signifient ces abréviations.

Abréviation	Signification associée
Pré-enquête étu.*	pré-enquête auprès d'étudiants
Pré-enquête ens.*	pré-enquête auprès d'enseignants
Enquête ens.*	enquête auprès d'enseignants
Parcours perso*	parcours personnel de l'interviewé
Goût MF*	goût de l'interviewé pour la mécanique des fluides
Rapport élèv/ens*	rapport élèves / enseignant
Comp. Autres domaines*	comparaison de la mécanique des fluides avec d'autres domaines de la physique (mécanique du point, etc...)
Evolution pg*	évolution des programmes d'enseignement de mécanique des fluides
Lien MF/cursus suivi*	lien entre la mécanique des fluides et le cursus suivi par les étudiants auxquels la séance est proposée
Lien MF/quotidien*	lien entre la mécanique des fluides et la 'physique du quotidien'
Lien MF/recherche*	lien entre la mécanique des fluides et la recherche scientifique actuelle
Contexte tradi physique *	situations présentées à l'interviewé issues d'un contexte traditionnel d'un enseignement de physique
Contexte tradi physio*	situations présentées à l'interviewé issues d'un contexte traditionnel d'un enseignement de physiologie
Hors contexte tradi physique *	situations présentées à l'interviewé qu'il peut percevoir comme étant hors des contextes qualifiés de physique qui lui sont traditionnels
Présence exptal*	présence de l'expérimental
Recours HS*	recours à l'histoire des sciences
Démarche intro mdl*	démarche(s) d'introduction du modèle

Tableau D.2.2
Dénominations des abréviations du tableau D.2.1

Nous indiquons dans le tableau D.2.3 le lien entre les questions associées à la trame de l'enquête et les thématiques abordées initialement.

	Thème abordé	Enquête ens.	Travaillé dans ce manuscrit	Questions associées de la trame de l'enquête
	Public visé interviewé	enseignant	enseignant	
Partie A de l' enquête ens.*	Parcours perso*	•		
	Goût MF*	•		
	Sources	•		
	Lien MF/cursus suivi*	•		
	Lien MF/quotidien*			
	Lien MF/recherche*			
	Comp. Autres domaines*			
	Evolution pg*			
Partie B de l' enquête ens.*	Vision d'ensemble du cours	•	•	8/ Would you describe the pace of the course XX that you teach please ? 9/ What do you expect to furnish to students through this course ?
	Evaluation	•		
	Rapport élèv/ens*	•		
	Présence exptal*	•	•	12/ Do you use experiments or refer to phenomena through activities in your course ? Which ones ? How do you choose them ? Why ?
	Recours HS*	•	•	11/ When teaching quantum mechanics and relativity, instructors use several articles dealing with History of Science. Do you use History of Science in your fluid flow course ? Why ? What historic milestones should be mentioned ?
	Démarche intro mdl*	•	•	12/ (...) What do you expect from quoting this experiment or phenomenon ? (...) 14/ How do you introduce Bernoulli equation ? (...)
de l' enquête ens.	Modélisation	•	•	

Contexte tradi physique *	•	•	15/ Have you used this situation in your course ? How do you use it ? Why ? (...) 16/ (...) Here again, have you used this situation in your course ? How do you use it ? Why ?
Contexte tradi physio*	•		
Hors contexte tradi physique *	•	•	17/ (...) These pictures are taken from different editions of the same book. Surprising, isn't it ?

Tableau D.2.3

Lien entre les questions associées à la trame de l'enquête et les thématiques abordées initialement

Dans le tableau D.2.4 nous reprenons les thèmes initialement travaillés dans ce manuscrit ainsi que les extraits de questions de l'enquête associées à ces thèmes. Nous les replaçons dans le cadre d'étude des PCK retenu dans le chapitre sur la problématique pour aborder la question du modèle et des contextes lors de l'étude d'un écoulement. Pour ce faire, pour chacun de ces thèmes, nous indiquons le type de questionnement (modèle, contextes, élèves) ainsi que les catégories de PCK associées.

	Thème travaillés dans ce manuscrit	Catégories de PCK associées	Travaillé dans ce manuscrit	Questions associées de la trame de l'enquête
Partie B de l'enquête ens.*	Vision d'ensemble du cours	Caractéristiques du modèle	•	8/ Would you describe the pace of the course XX that you teach please ? 9/ What do you expect to furnish to students through this course ?
	Présence exptal*	Expérimental	•	12/ Do you use experiments or refer to phenomena through activities in your course ? Which ones ? How do you choose them ? Why ?
	Recours HS*	Histoire des Sciences	•	11/ When teaching quantum mechanics and relativity, instructors use several articles dealing with History

			of Science. Do you use History of Science in your fluid flow course ? Why ? What historic milestones should be mentioned ?
	Démarche intro mdl*	Contextualisation pédagogique + Contextualisation empirique + Histoire des Sciences + Expérimental	• 12/ (...) What do you expect from quoting this experiment or phenomenon ? (...) 14/ How do you introduce Bernoulli equation ? (...)
Partie C de l' enquête ens.*	Modélisation	Structure du modèle	•
	Contexte tradi physique *	Contextualisation empirique + Caractéristiques du modèle + Utilisation du modèle + Difficultés des élèves	• 15/ Have you used this situation in your course ? How do you use it ? Why ? (...) 16/ (...) Here again, have you used this situation in your course ? How do you use it ? Why ?
	Hors contexte tradi physique *	Utilisation du modèle + Difficultés des élèves	• 17/ (...) These pictures are taken from different editions of the same book. Surprising, isn't it ?'

Tableau D.2.4
Lien entre les questions associées à la trame de l'enquête
et les thématiques abordées initialement

Description des modules proposés par les enseignants interrogés

Présentons le type de modules liés à l'écoulement d'un fluide et proposés par les différentes familles d'enseignants, en France et aux États-Unis.

Cas de la famille I

En France, en CPGE, la mécanique des fluides est au programme de Deuxième année (en filières PC, PSI, PT et BCPST 2 notamment). C'est imposé pour tous les étudiants de ces filières.

Rappelons qu'en CPGE, c'est le même enseignant qui a à charge cours, travaux dirigés, travaux pratiques et suivi de projets, appelés TIPE pour 'Travaux d'Initiative Personnelle Encadrés'. Le traitement de la mécanique des fluides s'étale sur deux à trois semaines, à raison d'une dizaine d'heures hebdomadaires. Rarement des travaux pratiques associés sont proposés.

Il y a environ entre une trentaine et une cinquantaine d'étudiants par classe. Pour des raisons historiques, les cours se déroulent dans les salles de classe de lycées et non à l'université.

Aux États-Unis, le cours est proposé à des *junior* (I15, I17), voire des *senior* (I12, I13). Éventuellement, mais c'est plus exceptionnel *a priori*, à des *sophomore* (I14) ou des *freshmen* (I20).

Le cours s'étale sur une partie d'un semestre ou sur un semestre entier, à raison de deux à trois séances de 50 minutes environ par semaine. Il peut s'agir d'un module propre à la mécanique des fluides (I12, I13, I15) : dans ce cas sont étudiés des écoulements tant internes qu'externes ; des éléments sur les écoulements compressibles et turbulents peuvent être abordés.

Il peut s'agir aussi d'un module dans lequel la mécanique des fluides est couplée à un autre domaine : phénomènes diffusifs (I20), thermodynamique (I14) ou transferts thermiques (I14, I17).

C'est un cours imposé (I12, I13, I15, I17) ou optionnel (I14, I20). Les étudiants proviennent des *College of mechanical engineering* (I12, I13, I20), *air & space* (I14), *chemical engineering* (I17), *gaz & petroleum* (I15), voire *industrial engineering* (I14) ou bioingénierie (I20).

Dans la majorité des cas, il s'agit uniquement d'un cours magistral (*lecture course*) : des travaux pratiques associés (*lab sessions*) ne sont pas prévus (I14, I15), sont optionnels (I12, I13) ou proposés un an et demi après le cours magistral (I17). Seul le module géré par I20 propose des *lecture courses* couplés à des *lab sessions* via un projet à mener sur le semestre. Dans tous les cas, l'enseignant en charge des lectures n'intervient pas pendant les *lab sessions*.

Les locaux où se déroulent les situations d'enseignement sont de taille intermédiaire entre la salle de classe de lycée et le grand amphî (il y a environ entre une cinquantaine et une centaine d'étudiants). I12 précise qu'un de ses anciens étudiants est présent lorsqu'il faut mettre en place des manipulations de cours. *A priori*, pas d'autres intervenants n'ont été indiqués lors des entretiens.

Cas de la famille U

De par les contacts obtenus, la famille U interrogée n'est composée que d'enseignants américains. Ils exercent dans des formations d'ingénieurs avec la mécanique des fluides enseignée dans une mineure : il s'agit de mécanique des fluides 'appliquée à...!.

Les formations sont liées à du biomédical, du génie civil, de l'environnement ou de la géologie. Il s'agit de *lecture course*, avec ou sans *lab sessions*.

Comme pour les I USA, les locaux où se déroulent les situations d'enseignement sont de taille intermédiaire entre la salle de classe de lycée et le grand amphi (il y a environ entre une cinquantaine et une centaine d'étudiants là aussi).

Cas de la famille T

En France, en STS (Section de Techniciens Supérieurs menant à l'obtention d'un BTS, Brevet de Technicien Supérieur), la mécanique des fluides est au programme de plusieurs sections. C'est un cours imposé pour tous les étudiants de ces sections.

Dans les sections de STS visitées, c'est le même enseignant qui a à charge cours, travaux dirigés et travaux pratiques, ce qui n'est pas nécessairement le cas dans d'autres sections. La mécanique des fluides est traitée soit en première année (T1, T3), soit étalée sur les deux années de STS (T2) et occupe environ deux mois sur les deux ans. Des travaux pratiques associés sont quasi systématiquement proposés.

Il y a environ entre une vingtaine et une trentaine d'étudiants par classe. Pour des raisons historiques, les cours se déroulent dans les salles de classe de lycées et non à l'université.

Aux États-Unis, les situations rencontrées ont été différentes : le module de T6 étant destiné à des étudiants qui travaillent en parallèle, il s'agit de *week-ends and night courses*. Les étudiants sont rattachés aux départements de génie civil et de mécanique.

T7 propose son cours à des « *agricultural system manager students* » qui sont « *volunteered for this course* ». Il s'étale sur deux semestres et traite de : « *rheology / fluid flow / heat transfer / mass transfer* ». S'il enseignait en cursus ingénieur, il insisterait davantage sur les phénomènes de transport et encore plus sur le « *momentum equation* ». T7 réalise un dessin lors de l'entretien : pour un cursus qualifié d'ingénieur, peu d'applications et beaucoup de théorie. En *food science*, c'est l'inverse. Il n'aborde quasiment que les fluides newtoniens.

L'intitulé du cours de T8 est *cardio ultrasound and cardiovascular ultrasound*. T8 présente le cursus comme étant *a small program*. Dans son cours sur les ultrasons, les deux chapitres liés à l'écoulement sanguin sont *hemodynamics* et *Doppler*.

Cas de la famille MB

En France, dans un cursus médical, l'écoulement d'un fluide est abordé par un physicien en PACES (Première Année Commune des Études de Santé) dans le cadre d'un module de physique puis est abordé par des médecins les années suivantes. Ces cours en médecine sont de niveau L1 et L3 (MB4 et MB5 enseignent en troisième année de médecine). MB5 assure un cours similaire aux étudiants sages-femmes et aux étudiants kinés.

En BCPST2 (formation d'ingénieurs agronomes), l'écoulement d'un fluide est traité dans le cours de physique (MB1 par exemple) et dans celui de Sciences de la Vie et de la Terre (SVT) (MB2 et MB3). Le cours de BCPST2 est de niveau L2.

Les enseignants américains interrogés qualifiés de MB font cours à des *freshmen* (1ère année) de cursus médical ou paramédical. C'est également un cours imposé pour ceux de *prenursing*, *physical therapy* (MB9) et pour ceux de *premedical schools*, *kinesiologists*, *physician assistants* (MB6, MB7, MB8). C'est un cours choisi par d'autres, ingénieurs ou bioingénieurs notamment

(on parle d'*elective course*) : MB6 évoque un choix par défaut pour ces étudiants-là, qui chercheraient ainsi à éviter d'avoir à suivre un cours de chimie par exemple.

Ce cours s'intitule *physiology* (MB6), *anatomy and cardiovascular physiology* (MB9) ou *anatomy* (MB8), physiologie cardiovasculaire (MB4), UE800 en médecine (c'est l'intitulé général mais chaque université y met ce qu'elle veut, selon MB5. La seule contrainte indiquée correspond aux 200 items de l'Examen Classant National (ECN)).

En BCPST2, la partie du programme associée s'intitule *L'organisme : un système en interaction avec son environnement* (Bulletin officiel, 2013). La sous-partie dédiée à l'écoulement sanguin est un exemple d'intégration d'une fonction à l'échelle de l'organisme. MB3 indique qu'« *il n'y a pas de hiérarchie / On s'en sert un peu dans tous les sens* ». MB2 évoque les points du programme de BCPST2 associés à de la mécanique des fluides : « *physiologie cardiovasculaire / respiration / convection du manteau / mouvements atmosphériques et océaniques / sève / osmose //* ».

A l'exception de la formation de sages-femmes et des BCPST qui ont une structure équivalente à une classe (environ une quarantaine d'étudiants), le cours fourni dans les autres formations l'est souvent à un groupe d'étudiants de taille importante (> 100 étudiants en amphithéâtre, 150 pour MB8, 200 pour MB5. MB5 précise néanmoins que tous les étudiants ne viennent pas : la moitié assisterait au cours), voire très importante (jusqu'à 650 étudiants pour MB6). Dans ce cas, l'enseignant est secondé par une vingtaine de TA (*Teaching Assistant*) présents dans l'amphithéâtre. Lors de l'entretien, MB7, la collègue de MB6 en charge des TP associés au cours de MB6, indique de garder en mémoire le nombre important d'étudiants auxquels ces TP sont proposés. A noter enfin qu'en France, l'enseignant est seul en amphithéâtre.

La durée du cours impartie est faible : 3 heures pour tout le système cardiovasculaire pour MB8, « *pour la respiration j'ai 7 heures* » signale MB5.

Les données caractérisant les modules proposés par les enseignants interrogés sont résumées dans le tableau D.2.5.

Formation	Volume horaire du module	Effectif de la 'classe'
CPGE	≈15h	≤ 50
College of Engineering	≈15h	50 ≤ X ≤ 100
STS ou IUT	≈15h	≤ 50
PACES	quelques heures	100
Preméd	quelques heures	100

Tableau D.2.5
Tableau récapitulatif des caractéristiques des modules proposés
par les enseignants interrogés

On constate donc que les conditions d'enseignement varient énormément d'une formation à l'autre, en termes de volume horaire dédié à l'enseignement de l'écoulement d'un fluide et en termes de nombre d'étudiants concernés par un cours.

Annexe E : Trame des entretiens

Nous reproduisons ici la trame des questionnaires proposés lors des pré-enquêtes auprès d'étudiants (juin 2014) et d'enseignants (hiver 2014) et lors de l'enquête auprès d'enseignants (2015).

La structure du questionnaire est semblable à celle présentée dans d'autres travaux de recherche (Havdala, 2007).

E.1. Trame de la pré-enquête auprès des étudiants (juin 2014)

Bonjour,

Merci de m'aider pour mes recherches en didactique. Comprendre comment les étudiants appréhendent un cours est difficile à étudier. Cet entretien n'est pas un examen, tu ne seras pas jugée. L'idée est d'exprimer librement ses pensées, comme elles viennent.

L'entretien va porter sur le cours de prépa de mécanique des fluides. Peu importe que tu te souviennes ou non des formules du cours.

1/ Si tu devais expliquer à un lycéen ce qu'est la viscosité, que lui dirais-tu ?

2/ Si tu devais citer les grandes idées du cours de mécanique des fluides, que dirais-tu ?

3/ Si un lycéen demandait de comparer la mécanique des fluides et la mécanique du point / du solide, que lui dirais-tu ?

4.1/ Je montre un dessin et indique : un écoulement s'effectue de gauche à droite dans une canalisation. On insère deux fines tiges de verre aux endroits indiqués.

Qu'observerait-on ? Puis enchaîner sur :

4.2/ Quels seraient les paramètres pertinents pour étudier cet écoulement ?

4.2. Bis/ De quoi dépend la nature de l'écoulement ?

Quelle serait la répartition des forces de viscosité dans ce type de canalisation ?

4.3/ En fonction de la réponse : y a-t-il des forces de viscosité au centre ? Si on les comparait à celles sur les bords, que pourrait-on en dire ? Sur les bords, si on comparait les forces de viscosité en bas ou en haut de la canalisation, que pourrait-on en dire ?

5.1/ Je montre le dessin suivant et indique : un écoulement s'effectue de gauche à droite dans une canalisation identique à la précédente. On insère une troisième tige de verre en amont de la canalisation. Qu'observerait-on ?

5.2/ Avez-vous eu l'occasion de voir une expérience de ce type ?

6/ La mécanique des fluides, ça intervient dans la vie de tous les jours ?

7/ Y a-t-il encore des découvertes à réaliser en mécanique des fluides ?

8/ La mécanique des fluides, est-ce utile pour un ingénieur ?

E.2. Trame de la pré-enquête auprès des enseignants (hiver 2014)

Bonjour, je mène une enquête sur l'enseignement lié à l'écoulement des fluides. Accéder au vécu d'un enseignant est très aidant pour un tel travail. Je cherche des pistes, des informations, via ces entretiens. Merci encore d'avoir accepté de m'aider.

Je vais démarrer avec quelques questions générales sur ce thème.

1/ Quelles sont les grandes idées du cours de mécanique des fluides de spé PC / BCPST... ?

2/ As-tu déjà enseigné ce cours ? As-tu rencontré des difficultés particulières ? Si non, anticipes-tu des difficultés ? Lesquelles ?

3/ Si tu avais à aider un jeune collègue débutant, que lui conseillerais-tu pour construire son cours de mécanique des fluides ?

4/ Que cherches-tu à évaluer dans cette partie du programme ? Je te propose de se limiter à la situation suivante, qui est traditionnellement introduite lors de cet enseignement...

Je montre un dessin et indique : un écoulement s'effectue de gauche à droite dans une canalisation. On insère deux fins tubes de verre aux endroits indiqués.

5/ Reprends-tu cette situation dans ton cours ? Anticipes-tu des difficultés particulières ?...

Je montre alors le dessin suivant et indique : un écoulement s'effectue de gauche à droite dans une canalisation identique à la précédente. On insère un troisième tube de verre n en amont de la canalisation.

6/ Là encore, reprends-tu cette situation dans ton cours ? Anticipes-tu des difficultés particulières ?

7/ Dans les exercices, il est parfois question de perte de charge : comment un élève comprendrait cette expression ? Enchaîner en montrant les dessins : voici ce qu'on peut trouver dans un même manuel. Ça surprend, non ?

8/ Dans un manuel (*Hprépa*, que je montrerai à l'interviewé), sur la même page, apparaissent deux systèmes élémentaires, tantôt rectangulaire, tantôt ayant la forme d'un parallélogramme. Quelle représentation privilégier ?

9/ Dans un ouvrage de référence anglo-saxon, le Sternheim & Kane, on peut lire (p.352) : « *Nature has arranged that the flow in blood vessels is normally laminar rather than turbulent* ». Quels commentaires cela t'inspire-t-il ?

Maintenant, quelques questions sur les élèves :

10/ Est-ce que les élèves te posent des questions relatives à la mécanique des fluides ? Si oui, de quel type ?

J'ai ciblé la loi de Poiseuille, qui est très souvent citée dans un cours de mécanique des fluides.

11/ Les élèves demandent-ils à quoi elle sert ?

12/ Les élèves demandent-ils si elle est encore utilisée en pratique ?

Maintenant, des questions plus générales :

13/ Quelle formation as-tu reçu dans ce domaine ?

14/ Est-ce que ce domaine t'intéresse ? Lis-tu actuellement sur ce domaine ?

15/ La mécanique quantique, le domaine des nanoparticules, sont souvent qualifiés de physique moderne. Pourrait-on en dire autant de la mécanique des fluides ?

16/ On entend souvent qu'il faut partir de la physique du quotidien pour accrocher les élèves. Est-ce le type d'approche que tu suis dans ton cours ? A quel(s) domaine(s) empruntes-tu les situations abordées en cours ? Y aurait-il un domaine à privilégier ?

17/ J'ai pu constater que dans le BUP, un certain nombre d'articles ont pour thème l'histoire des sciences. Te sers-tu de ce type d'approche ?

18/ Quel type de contextes utilises-tu pour préparer le cours ? Quel type de contextes utilises-tu en séance ?

19/ Avec les nouveaux programmes, l'approche proposée en mécanique des fluides n'est plus la même en PC, PSI et BCPST : pourquoi différencier d'une filière à l'autre ?

20/ Un élève suivant un cursus scientifique autre que qualifié d'ingénieur reçoit un cours de physique qui est nécessairement restreint. La mécanique des fluides devrait-elle y figurer ?

21/ Enfin, la mécanique des fluides n'apparaît dans les programmes de prépa que depuis 1995. Pour quelles raisons ?

E.3. Trame des entretiens menés aux États-Unis (printemps 2015)

INTERVIEWS FRAME

In bold: my comments to lead the interview ; listing the points I should focus on.

In italic: comments I would tell during the interview.

A/ Teacher's own experience: the professor tells me what he did (Questions 1 to 10)

B/ Course's building: the professor tells me what he did (Questions 11 to 14)

C/ New situations: the professor reacts on the documents I showed him/her (15 to 22)

Modifications: 20 to 22

Thanks for your help. I am looking for news and areas for reflection about teaching fluid flow in undergraduate degree.

A/ Teacher's own experience: the professor tells me what he/she did.

1/ Have you chosen to teach the course XX?

2/ Is your research field linked with fluid flow?

3/ At what point in your experience did you study fluid flow?

4/ Are you interested in this field? Currently, are you reading about it?

5/ Do you think that fluid flow should be part of the curriculum of all students in undergraduate degrees? (Scientific, engineering) why?

6/ Have you already taught this course? How many years and for which students?

7/ Which textbook did you choose for this course? Refer to their syllabus? Why?

What type of resources do you use to prepare your course? Why?

Which references are trust worthy? Why? Or how do you use these resources? Or the data that you find in these resources may not always mesh: which one do you select?

B/ Course's building: the professor tells me what he/she did.

8/ Would you describe the pace of the course XX that you teach please?

8i/ Does your course requisite other courses? What do you assume students already know?

8ii/ How would you describe these students to who you teach this course?

9/ What do you expect to furnish to students through this course?

10/ What kind of reaction from the students do you expect? (Else, do you anticipate reactions? Which ones?)

11/When teaching quantum mechanics and relativity, instructors use several articles dealing with History of Science.

Do you use History of Science in your fluid flow course? Why?

What historic milestones should be mentioned?

12/ Do you use experiments or refer to phenomena through activities in your course? Which ones? How do you choose them? Why?

Under which form do you use or refer to them (You experiment? Students do? Through activities: motion pictures? Pictures? Exercise?)? Why?

Judging from the example they indicate me:

Where do you locate this experiment or phenomenon in your course? Why? What do you expect from quoting this experiment or phenomenon?

Could you describe how you use it or refer to it and explain why? How do you introduce it?

What do you say about it? Do you ask questions?

Do you draw students' attention to a particular point? How do you proceed the lesson?

13/ Which representation/schematizations do you use in your course? How do you represent/schematize this experiment or phenomenon? The data obtained?

14/ How do you introduce Bernoulli equation? **Dealing with the pace:** which pace is used towards the model?

Where are experiments/phenomena inserted?

Detailing: introduction; hypothesis: how is this phenomenon be modeled? What kind of proof?; expression; applications; experiments ; limits ; students' difficulties.

C/ New situations: the professor reacts on the documents I showed him/her.

Direct your attention to the following case, which is usually introduced in this course.

I show a picture and indicate: *there is a flow from left to right in a tube. We insert two thin glass tubes before and after bottleneck.*

15/ Have you used this situation in your course? How do you use it? Why?

I show a picture and indicate: there is a flow from left to right in a tube like the previous one. We insert a third thin glass tube before bottleneck.

16/ Here again, have you used this situation in your course? How do you use it? Why?

17/ Some exercises deal with 'head loss': how does a student understand this statement? *Then, I show pictures:* 'these pictures are taken from different editions of the same book. Surprising, isn't it?'

Examples to comment on: 1 in physics (student's answer) +1 in biology +1 in physiology. I have to precise what they will have to comment on. Would you use these situations? Why? How would you use them?

18/ **Example 1: fountains? Or piping?** Have you used this situation in your course? In French books, they hardly ever draw what is before and what is after the canalization. What do you think of this type of representation? In French curriculum, they don't talk about the entrance of pipes and elbows. Is it the same in your course? What do you think of this type of representation?
Blood circulation: starting with a question about what they know about blood circulation. Do the same for xylem.

19/ What do you evaluate in that course? Are experiments used during evaluations?

20/ If you had to change something what would it be? / What would you evolve in your course?
OR: In your course / in your course's curriculum, what would you change?

21/ After the talk we've just had, is there a point on which you'd like to add something?

22/ If needed for other questions, may I meet you again?

Remarques :

La question 19, en lien avec l'évaluation, conclut l'entretien. Son équivalent dans la trame du pré-entretien ayant été source d'un certain malaise chez les enseignants français interrogés, il s'est agi d'observer la réaction des autres enseignants sur ce point.

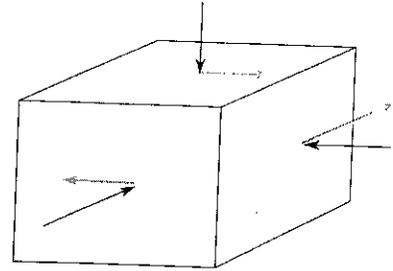
Les questions 20 à 22 ont été suggérées par un chercheur américain du *College of Education* de Penn State. Elles ont été posées lors des premiers entretiens américains mais n'ont pas été retenues par la suite, les réponses associées ayant été jugées peu pertinentes.

E.4. Documents présentés en interview

Document présenté lors de la pré-enquête auprès des enseignants (question Q8) :

1.4 Viscosité et dissipation d'énergie

Si, dans l'expérience décrite, le fluide était parfait, il continuerait de tourner indéfiniment après l'arrêt du plateau tournant et son énergie cinétique resterait constante. Plus généralement, un fluide visqueux en écoulement, contrairement à un fluide parfait, dissipe l'énergie mécanique tant que la vitesse relative de ses éléments n'est pas nulle.



Doc. 4. Forces de pression (en noir) et de cisaillement (en vert).

2 Force de viscosité (ou cisaillement) dans un fluide réel

2.1. Cisaillement et pression

Dans le modèle du fluide parfait, nous avons réduit la force de contact entre deux éléments de fluide à la seule force de pression, qui est normale à leur surface de séparation. Les observations sur les fluides réels ne peuvent s'expliquer que par une composante tangentielle de la force de contact, appelée *force de cisaillement* (doc. 4).

Par ailleurs, toutes les expériences montrent que l'équation de la statique des fluides $\text{grad } P = \vec{f}_{\text{vol}}$, qui ne prend en compte que la pression, s'applique indifféremment aux fluides visqueux ou non visqueux. Les forces internes de cisaillement, en effet, s'opposent à la déformation des éléments de fluide, et deviennent nulles lorsque ceux-ci ne se déforment plus au cours du temps.

Ces forces, opposées aux vitesses relatives des éléments de fluide, ont une puissance totale négative, ce qui correspond bien à une *dissipation* d'énergie mécanique.

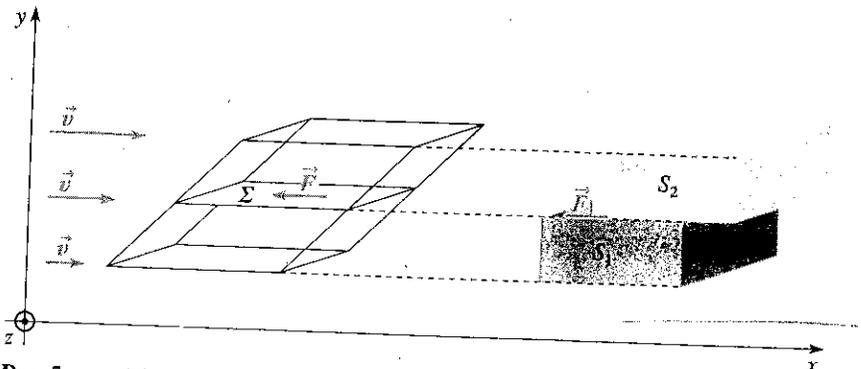
2.2. Champ de vitesse unidirectionnel de la forme :

$$\vec{v} = v(y, t)\vec{e}_x$$

Étudions le cas simple où les plans parallèles à (Ox, Oz) glissent les uns sur les autres. Ce cas, *a priori* irréaliste, peut être une bonne approximation d'un écoulement laminaire réel, si les dimensions selon (Ox) et (Oz) sont très grandes devant l'épaisseur selon (Oy) .

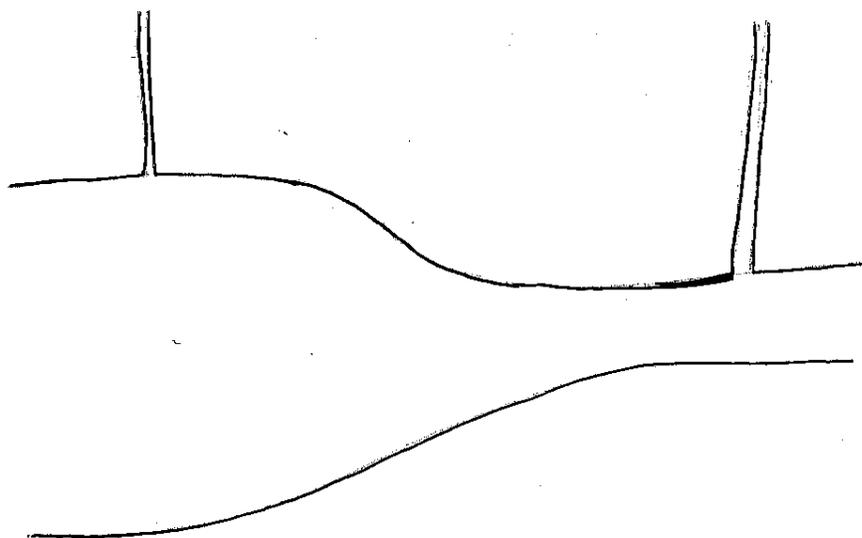
Comme $\text{div}(\vec{v}) = 0$, cet écoulement peut être celui d'un fluide incompressible.

Considérons deux éléments de fluide, S_1 et S_2 , séparés par la surface Σ , d'aire S , normale à (Oy) (doc. 5).

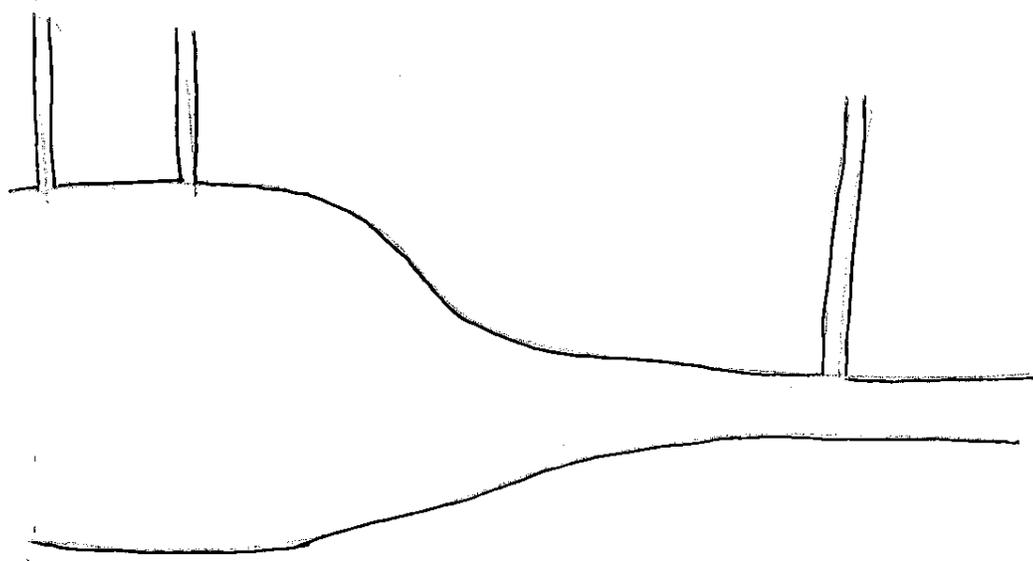


Doc. 5. v est ici une fonction croissante de y . La force de cisaillement \vec{F} exercée par S_1 sur S_2 s'oppose à la déformation du système constitué par S_1 et S_2 , ou encore empêche S_2 de glisser sur S_1 .

Documents présentés lors des pré-enquêtes et lors de l'enquête auprès des enseignants
(questions Q15 et Q16 de l'enquête) :

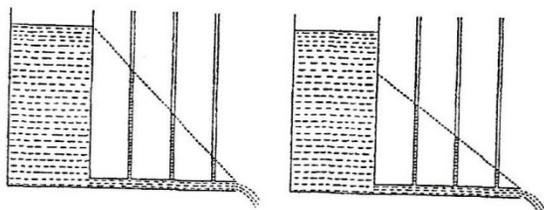


question 15



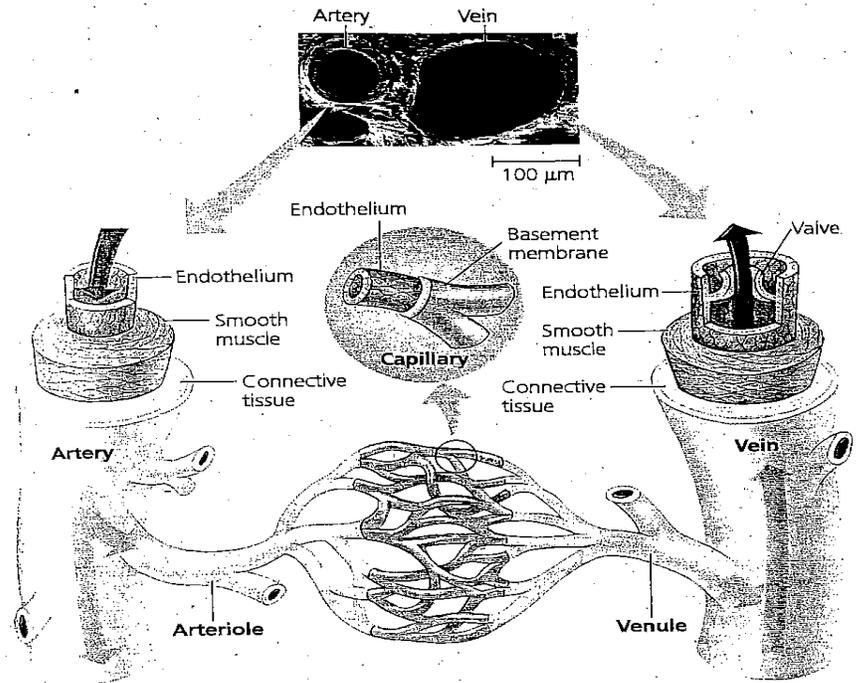
question 16

Documents présentés lors de la pré-enquête et de l'enquête auprès des enseignants (question Q17 de l'enquête) :



Documents 1 à 5 présentés lors de l'enquête auprès des enseignants (question Q18 de l'enquête) :

document
①



▲ Figure 42.9 The structure of blood vessels. This micrograph (SEM) shows an artery next to a thinner-walled vein.

document
②

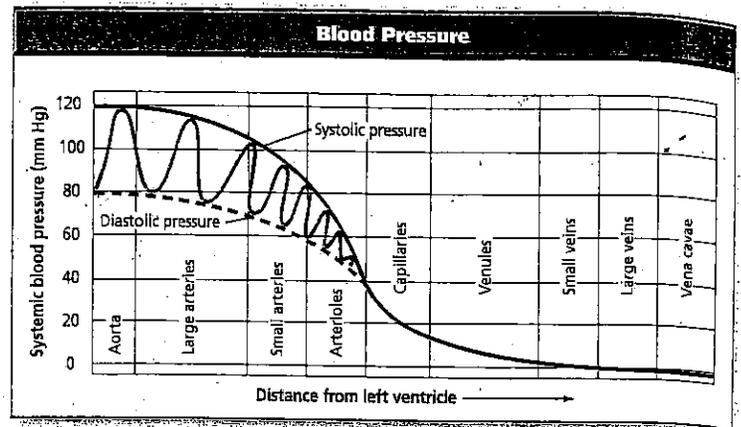
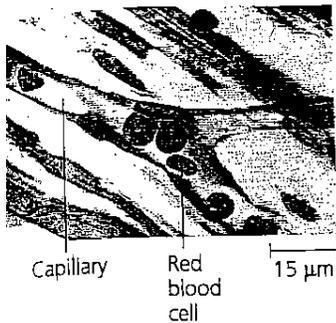
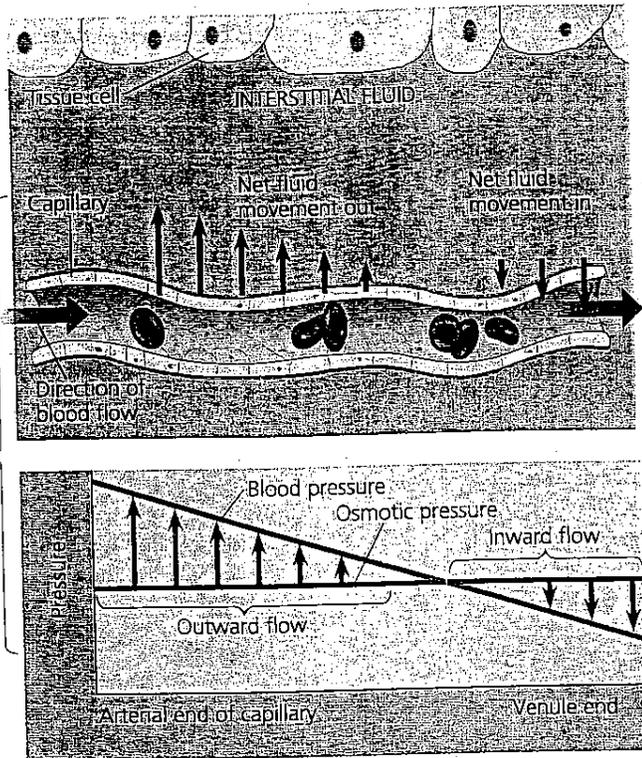


Figure 37.12
Blood pressure rises and falls with each heart beat. Pressure is exerted on all vessels throughout the body. However, blood vessels near the left ventricle are subjected to higher pressure than vessels that are farther away. Blood pressure usually is measured in the artery of the upper arm.

document
3



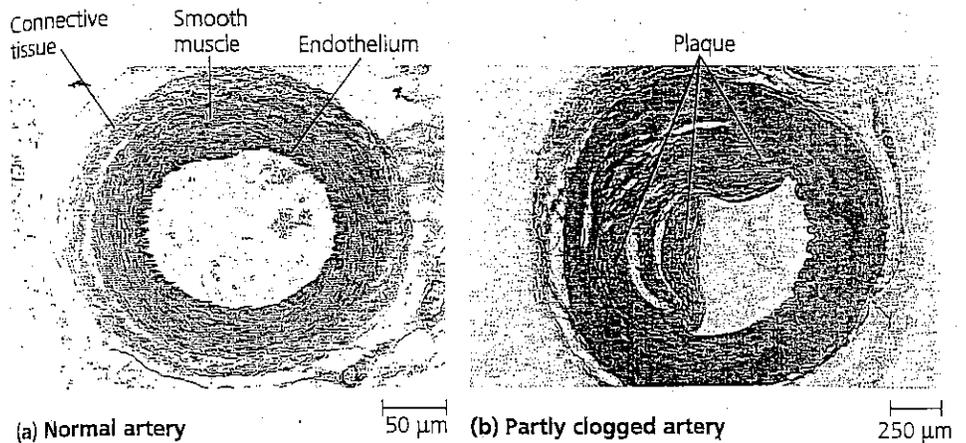
At the arterial end of a capillary, blood pressure is greater than osmotic pressure, and fluid flows out of the capillary into the interstitial fluid.



At the venule end of a capillary, blood pressure is less than osmotic pressure, and fluid flows from the interstitial fluid into the capillary.

▲ **Figure 42.14 Fluid exchange between capillaries and the interstitial fluid.** The micrograph at top left shows red blood cells traveling through a capillary (LM).

document
4



▲ **Figure 42.18 Atherosclerosis.** These light micrographs contrast a cross section of (a) a normal (healthy) artery with (b) an artery partially blocked by an atherosclerotic plaque. Plaques consist mostly of fibrous connective tissue and smooth muscle cells infiltrated with lipids.

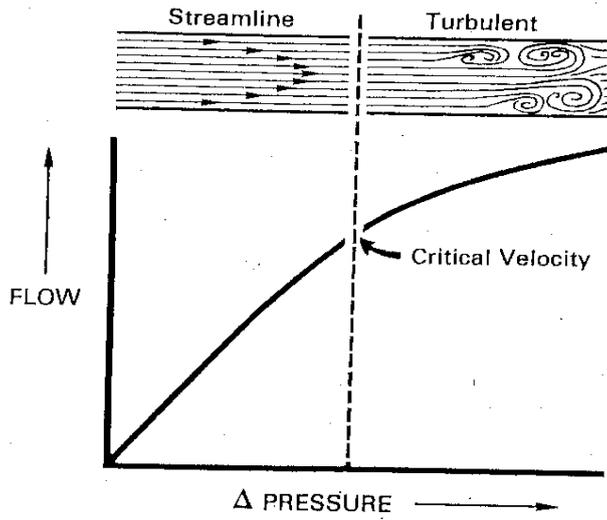


Figure 2-7. Relationship between velocity of flow and turbulence. (From T. C. Ruch and H. D. Patton, *Physiology and Biophysics*, Philadelphia: W. B. Saunders Co., 1974.)

E.5. Remarques sur la trame de l'enquête

A la question 18 de la trame du questionnaire de l'enquête, il s'agit de commenter des situations issues d'ouvrages de physiologie et de biophysique. Parmi les cinq documents sélectionnés pour la question 18 et indiqués précédemment, seuls ceux numérotés 2, 3 et 5 ont été retenus. Ces trois documents n'ont pas été systématiquement présentés aux enseignants : tout dépendait du temps disponible en fin d'entretien.

Le document 2 indique la pression sanguine en fonction de la distance au ventricule gauche du cœur. A travers le commentaire de ce graphique il est notamment demandé de repérer le type de vaisseau sanguin présentant le plus de pertes de charge. Ce document 2 permet de tester la compréhension de la notion de perte de charge et la mise en application de la loi de Poiseuille. Il est ensuite demandé si un étudiant verrait des connexions entre ce document et celui des deux réservoirs de la question Q17.

Le document 3 aborde les phénomènes ayant lieu au niveau de capillaires sanguins. Il s'agit de commenter le document, notamment la photo réelle de globules rouges dans un capillaire. Le dessin évoque les zones d'échange entre le capillaire et le fluide interstitiel. Sur le graphique associé sont représentées les pressions sanguine et osmotique. Il est ensuite demandé si un étudiant verrait des connexions entre ce document et le document 2 en termes de pertes de charge et enfin, si un étudiant appliquerait ou non à cette situation les lois vues en cours de mécanique des fluides.

Le document 5 présente, lui, la courbe fournissant le débit (*flow*) en fonction de la différence de pression (ΔP) pour deux régimes d'écoulement qualifiés de *streamline* et de *turbulent*, régimes dont une représentation imagée est fournie au-dessus du graphique.

Les situations de la question 18, sortant du contexte traditionnel d'un enseignant de physique, permettent par ailleurs d'aborder la thématique de l'interdisciplinarité, qui est mise en avant en France dans la réforme du collège et en préambule des programmes de CPGE notamment.

Ces situations de la question 18 permettent également de rendre cette partie de l'entretien symétrique entre enseignants de cursus qualifiés de biomédical et ceux qualifiés de physique : tous sont à un moment ou un autre de l'entretien confrontés à des situations non usuelles pour eux.

Neulieb (1975) fournit un exemple de questionnaire à choix multiples sur la circulation sanguine. Il y exploite la courbe de la pression sanguine du document 2 et un schéma de circuit qualifié de dérivation. Retrouvant cette courbe de la pression sanguine dans de nombreux manuels de physiologie, il nous a paru intéressant de l'aborder en entretien.

Les documents 2 et 3 sont *a priori* inconnus des enseignants qualifiés de physique. Seules les personnes enseignant ou ayant enseigné en filière biomédicale sont *a priori* familières des situations évoquées dans ces deux documents.

Il est à noter que la courbe du document 5 n'est quasiment jamais évoquée dans les ouvrages de mécanique des fluides consultés, tant en France qu'aux États-Unis, à l'exception du document en Annexe C.3. Elle est donc *a priori* inconnue de la plupart des personnes interrogées.

Bibliographie

- Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de physique-chimie ; classe terminale de la série scientifique. (2011). *Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Hors-Série)*, 8, 1–15.
- Programme physique PC. (2014). *Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Numéro Spécial)*, Annexe 2(1), 1–37.
- Programme physique BCPST 1. (2013). *Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Hors-Série)*, 3, 1114–1125.
- Programme physique BCPST 2. (2013). *Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Hors-Série)*, 3, 1539–1551.
- Programme de l'enseignement de physique-chimie en classe terminale de la série scientifique. (2001). *Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Hors-Série)*, 4, 73–105.
- Programme d'enseignement spécifique de physique -chimie en classe de première de la série scientifique. (2010). *Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Numéro Spécial)*, 9.
- Référentiels de compétences des mentions de Licence (2015). <http://multimedia.Enseignementsup-recherche.gouv.fr/referentiel2015>
- What is blood doing in our bodies ? The humanized Physics Project.* (2010).
- Abd-el-khalick, F. (2013). Teaching with and about Nature of Science, and Science teacher knowledge domains. *Science & Education*, 22(9), 2087–2107.
- Abell, S. K. (2008). Twenty Years Later: Does pedagogical content knowledge remain a useful idea? *International Journal of Science Education*, 30(June 2015), 1405–1416.
- Abell, S. K., & Lederman, N. G. (2007). Nature of Science : Past, Present, and Future. In *Handbook of research on science education* (pp. 831–842).
- Allchin, D. (2003). Scientific myth-conceptions. *Science Education*, 87(3), 329–351.
- Allchin, D. (2011). Evaluating Knowledge of the Nature of (Whole) Science. *Science Studies and Science Education*, 95, 518–542.
- Allchin, D. (2000). How Not to Teach History in Science. *Journal of College Science Teaching*, 30, 33–37.
- Allchin, D. (2005). William Harvey & Capillaries. *The American Biology Teacher*, 67(1), 56–59.
- Allchin, D. (2011). The Minnesota Case Study Collection: New Historical Inquiry Case Studies for Nature of Science Education. *Science & Education*, 21(9), 1263–1281.
- Allchin, D. (2004). Pseudohistory and Pseudoscience. *Science & Education*, 13(3), 179–195.
- Allchin, D. (2012). Toward Clarity on Whole Science and KNOWS. *Science Education*,

96(4), 693–700.

- Allchin, D., Andersen, H., & Nielsen, K. (2014). Complementary Approaches to Teaching Nature of Science : Integrating Student Inquiry, Historical Cases, and Contemporary Cases in Classroom Practice. *Science Education*, 98(3), 461–486.
- Astolfi, J.-P. (1992). *L'école pour apprendre* ((8e édition) ESF).
- Bachelard, G. (1953). *Le matérialisme rationnel* (Quadrige PUF).
- Bachelard, G. (1973). *Essai sur la connaissance approchée* ((4e édition), Vrin).
- Bachelard, G. (1983). *Le Nouvel esprit scientifique* ((15e édition), PUF).
- Bachelard, G. (1986). *La formation de l'esprit scientifique* (Vrin).
- Bachelard, G. (1953). *Le rationalisme appliqué* ((4e édition), PUF).
- Bachelard, G. (2002). *Études*. (Vrin) (2e ed.).
- Badeer, H. S. (2001). Hemodynamics for medical students. *Advances in Physiology Education*, 25(1), 44–52.
- Baldock, & Chanson. (2006). Undergraduate teaching of ideal and real fluid flows : the value of real-world experimental projects. *European Journal of Engineering Education*, 31(6), 729–739.
- Baudet, J. (2003). *De la machine au système : histoire des techniques depuis 1800* (Vuibert).
- Beaud, S., & Weber, F. (2003). *Guide de l'enquête de terrain* (La Découverte).
- Bell, R. L. (n. D.). *Teaching the nature of science : three critical questions*.
- Bell, R. L., Matkins, J. J., Gansneder, B. M., Street, E., & William, C. (2011). Impacts of contextual and explicit instruction on preservice elementary teachers' understandings of the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(4), 414–436.
- Berry, A., Friedrichsen, P., & Loughran, J. (2015). PCK : its genesis and exodus (by Lee Shulman). In *Re-examining Pedagogical Content Knowledge in Science Education, Teaching and Learning in Science Series* (Routledge, p. 270).
- Bertram, A. (2014). CoRes and PaP-eRs as a strategy for helping beginning primary teachers develop their pedagogical content knowledge. *Educación Química*, 25(3), 292–303.
- Besson, U. (2001). *Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides. Etude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement*. (Thèse de doctorat, Université Denis Diderot, France).
- Besson, U., & Viennot, L. (2004). Students' conceptions of fluids. *International Journal of Science Education*, 26(14), 1683–1714.
- Bishop, K., & Denley, P. (2007). Professional knowledge of the science teacher: a worldwide perspective. In O. U. P. McGrawHill (Ed.), *Learning science teaching* (pp. 1–12).
- Blay, M. (2007). Le principe de conservation des forces vives en question : Jean Bernoulli et

- Jean d'Alembert. In *la science du mouvement des eaux* (Belin).
- Blay, M. (2007). S'efforcer de rendre raison. In *la science du mouvement des eaux*(Belin).
- Blay, M. (2007). Introduction. In *la science du mouvement des eaux* (Belin).
- Blay, M. (2007). Daniel Bernoulli : l'introduction du principe de conservation des forces vives. In *la science du mouvement des eaux* (Belin).
- Blondin, C., Closset, J.-L., & Lafontaine, D. (1992). Raisonnements naturels en hydrodynamique. *Revue Française de Pédagogie*, 100, 71–80.
- Boyer, R., & Tiberghien, A. (1989). Des opinions de professeurs et d'élèves sur l'enseignement des sciences physiques au lycée. *BUP*, 712, 306–321.
- Brown, P. (2009). Do beliefs change? Investigating prospective teachers' science teaching orientations during an accelerated post-baccalaureate program. In *Esera* (pp. 1–39). Istanbul.
- Burguière, E., & Martinand, J.-L. (2002). Entretien. *Recherche et Formation*, 40, 87–94.
- Buty, 2010. Cours TICE master 2 Paris Denis-Diderot (document interne).
- Cadet, R. (2008). La circulation. In *L'invention de la physiologie* (Belin, pp. 88–113).
- Calmettes, B. (2014). Cohen-Azria, Lahanier-Reuter & Reuter. Conscience disciplinaire. Les représentations des disciplines à la fin de l'école primaire. *Rdst*, 9, 211–214.
- Caro, C. G., Pedley, T. J., Schroter, R. C., & Seed, W. A. (1978). The mechanics of the circulation. In *The mechanics of the circulation* (pp. xiii–xxvi).
- Carroll, R. (2001). Cardiovascular pressure-flow relationships : what should be taught ? *Advances in Physiology Education*, 25, 8–14.
- Cavendish, J., Carter, L., & Tsimikas, S. (2008). Recent advances in hemodynamics: noncoronary applications of a pressure sensor angioplasty guidewire. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, 71, 748–758.
- Chalon-Blanc, A. (1997). *Introduction à Jean Piaget*. (L'Harmattan).
- Chalon-Blanc, A. (2011). *Piaget, Constructivisme - Intelligence : l'avenir d'une théorie* (PU Septentrion).
- Charlot, B. (1997). *Du rapport au savoir : éléments pour une théorie* (Anthropos).
- Charlot, B. (2006). La question du rapport au savoir : convergences et différences entre deux approches. *Savoirs*, 10, 37–43.
- Chevallard, Y. (2002). Approche anthropologique du rapport au savoir et didactique des mathématiques. In *3e journées d'étude franco-québécoises* (pp. 1–20).
- Chordnork, B., & Yuenyong, C. (2014). Constructing CoRe as a Methodological for Capturing Pedagogical Content Knowledge : A case study of Thailand Teachers Teaching Global Warming. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 116, 421–425.

- Clément, P. (1991). Sur la persistance d'une conception : la tuyauterie continue digestion-excrétion. *Aster*, 13, 133–155.
- Closset, J.-L. (1992). Raisonnements en électricité et en hydrodynamique. *Aster*, 14, 143–155.
- Clough, M. P. (2010). The Story Behind the Science: Bringing Science and Scientists to Life in Post-Secondary Science Education. *Science & Education*, 20(7–8), 701–717.
- Clough, M. P. (2006). Learners' Responses to the Demands of Conceptual Change: Considerations for Effective Nature of Science Instruction. *Science & Education*, 15(5), 463–494.
- Clough, M. P., & Olson, J. K. (2007). Teaching and assessing the nature of science: An introduction. *Science & Education*, 17(2–3), 143–145.
- Coquidé, M. (1998). Les pratiques expérimentales : propos d'enseignants et conceptions officielles. *Aster*, 26, 109–132.
- Coquidé, M. (2003). Face à l'expérimental scolaire. *Education, formation : nouvelles questions, nouveaux métiers* (Dir. J. P. Astolfi), (ESF, pp. 153-180).
- Cross, D. (2010). Action conjointe et connaissances professionnelles de l'enseignant. *Education et Didactique*, 4, 39–62.
- Darrigol, O. (2003). The Spirited Horse, the Engineer, and the Mathematician : Water Waves in Nineteenth-Century Hydrodynamics. *Arch. Hist. Exact Sci.*, 58, 21–95.
- Darrigol, O. (2008). Empirical challenges and concept formation in the history of hydrodynamics. *Centaurus*, 50, 214–232.
- Darrigol, O. (2002). Stabilité et instabilité en mécanique des fluides au XIXe siècle. *Revue d'histoire des mathématiques*, 8, 5–65.
- Darrigol, O. (2002). Between Hydrodynamics and Elasticity Theory : The First Five Births of the Navier-Stokes Equation. *Arch. Hist. Exact Sci.*, 56, 95–150.
- Darrigol, O. (2005). *Worlds of flow* (Oxford Univ Press).
- Demirdogen, B. (2016). Closing the gap between beliefs and practice : Change of pre-service chemistry teacher. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 818–841.
- Develay, M. (2001). *Propos sur les sciences de l'éducation*.(ESF).
- Dodds, S. R., Bourne, N. K., & Chant, A. D. B. (1996). Effect of flow on the resistance of modelled femoral artery stenoses. *British Journal of Surgery*, 83, 957–961.
- Douady, R. (1992). Des apports de la didactique des mathématiques à l'enseignement. *Repères Irem*, 6, 132–158.
- Douady, R. (1994). Ingénierie didactique et évolution du rapport au savoir. *Repères Irem*, 15, 37–61.
- Doyle, A., Seery, N., Gumaelius, L., Canty, D., & Hartell, E. (2019). Reconceptualising PCK research in D&T education. *International Journal of Technology and Design Education*,

29, 473–491.

- Driver, Newton, & Osborne. (2000). Establishing the Norms of Scientific Argumentation in Classrooms. *Science Education*, 84, 287–312.
- Drouin, A. (1988). Le modèle en questions. *Aster*, 7, 1–20.
- Dugas, R. (1996). Essais sur la résistance des fluides (Borda, Bossut, Du Buat). Coulomb et les lois du frottement. In *histoire de la mécanique* (Jacques Gabay, p. 649).
- Dugas, R. (1996). Equations de Navier. In *histoire de la mécanique* (Jacques Gabay, p. 649).
- Dugas, R. (1996). Hydrodynamique de Daniel Bernoulli. D'Alembert et la résistance des fluides. Equations d'hydrodynamique d'Euler. Borda et les pertes de force vive dans les fluides. In *histoire de la mécanique* (Jacques Gabay, p. 649).
- Dumez, H. (2013). *Méthodologie de la recherche qualitative* (Vuibert).
- Dumez, H. (2007). Pragmatisme et recherche sur les organisations. *Aegis*, 3(4), 1–45.
- Dumez, H. (2009). L'erreur de diagnostic dans l'étude de cas : celle des acteurs et celle du chercheur. *Aegis*, 5(4), 20–26.
- Durkheim, E. (2014). *L'évolution pédagogique en France* (Quadrige PUF).
- Durkheim, É. (1999). *Education et sociologie* ((7e édition), PUF).
- Duschl, R. A., & Grandy, R. (2013). Two Views About Explicitly Teaching Nature of Science. *Science & Education*, 22(9), 2109–2139.
- Eames, C., Williams, J., Hume, A., & Lockley, J. (2011). *CoRe : A way to build pedagogical content knowledge for beginning teachers*.
- Eckert, M. (2006). Hydraulics for royal gardens: water art as a challenge for 18th century science and 21st century physics teaching. *Science & Education*, 1–10.
- El Khoury, R., Boujaoude, S., & El Hage, F. (2014). Etude exploratoire des points de vue épistémologiques des enseignant(e)s universitaires de sciences. Cas d'une faculté de sciences libanaise et francophone. *Spiral-E*, 53, 41–65.
- Ercikan, K., & Roth, W.-M. (2009). Section IV: rethinking the relationship between the general and the particular. In *Generalizing from Educational Research: Beyond Qualitative and Quantitative Polarization* (Routledge).
- Estrela, T. (2005). Ce que disent les enseignants sur leurs savoirs professionnels. In *5ème Colloque International Recherche(s) et Formation* (pp. 1–5).
- Evens, M., Elen, J., & Depaepe, F. (2015). Developing Pedagogical Content Knowledge: Lessons Learned from Intervention Studies. *Education Research International*, 23.
- Fabre, M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère Nouvelle*, 38, 53–67.
- Fabre, M. (2007). Des savoirs scolaires sans problèmes et sans enjeux. La faute à qui? *Revue*

- Française de Pédagogie*, 161, 69–78.
- Fabre, M., Altet, M., & Rayou, P. (1999). *Hétérogénéité et réussite dans le premier cycle universitaire*.
- Farge, M., Nguyen van yen, R., & Schneider, K. (2012). Problème de la dissipation dans les écoulements turbulents pleinement développés. In *GDR Turbulence* (pp. 1–8).
- Farwell, H. W. (1944). Loss of Head in Fluid Motion. *American Journal of Physics*, 12(5), 307.
- FergusonHessler, M. G. M., & de Jong, T. (1987). On the quality of knowledge in the field of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 55(6), 492–497.
- Fernandez, C. (2014). Knowledge base for teaching and pedagogical content knowledge (PCK): some useful models and implications for teachers' training. *Problems of Education in the 21st Century*, 60, 79–100.
- Fraser, D. M., Pillay, R., Tjatindi, L., & Case, J. M. (2007). Enhancing the learning of Fluid Mechanics using computer simulations. *Journal of Engineering Education*, 96(4), 381–388.
- Friedrichsen, P., Van Driel, J. H., & Abell, S.K. (2010). Taking a closer look at science teaching orientations, *Science Education*, 358-376
- Gaidioz, P., & Tiberghien, A. (2003). Un outil d'enseignement privilégiant la modélisation. *BUP*, 97(1), 71–83.
- Garritz, A. (2014). Pedagogical Content Knowledge. In *Encyclopedia of Science Education* (pp. 733–736). Springer.
- Garritz, A. (2015). PCK for dummies. *Educación Química*, 26(2), 77–80.
- Garritz, A., & Ortega-Villar, N. (2012). Interviews and content representation for teaching condensed matter bonding. An affective component of PCK? In *NARST Conference*. Indianapolis.
- Gess-Newsome, J. (1999). PCK: an introduction and orientation. In *PCK and Science Education* (Kluwer Aca, pp. 3–17).
- Grangeat, M. (2015). *Understanding Science Teachers' Professional Knowledge Growth*. Rotterdam: Sense Publishers.
- Grmek, M. (1990). L'usage des instruments de mesure dans l'expérimentation biologique. In Payot (Ed.), *La première révolution biologique : réflexions sur la physiologie et la médecine du XVIIe siècle* (p. 358).
- Grmek, M. (1990). L'émergence de la médecine scientifique sous le règne de Louis XIV. In Payot (Ed.), *La première révolution biologique : réflexions sur la physiologie et la médecine du XVIIe siècle* (p. 358).
- Grmek, M. (1990). La personnalité de Galilée. In Payot (Ed.), *La première révolution biologique : réflexions sur la physiologie et la médecine du XVIIe siècle* (p. 358).

- Grmek, M. (1990). La découverte de la circulation du sang. In Payot (Ed.), *La première révolution biologique : réflexions sur la physiologie et la médecine du XVIIe siècle* (p. 358).
- Grossman, P. L. (1990). A tale of two Hamlets. In C. U. Teachers College (Ed.), *The making of a teacher. Teacher knowledge and teacher education* (pp. 1–18).
- Grotberg, J. B. (2011). Respiratory fluid mechanics. *Physics of Fluids*, 23, 1–15.
- Guilbaud, A. (2012). A propos des relations entre savoirs théoriques et pratiques dans l'Encyclopédie : le cas du problème de la résistance des fluides et de ses applications. *Recherches Sur Diderot et Sur l'Encyclopédie*, 47, 207–242.
- Guilbaud, A. (2007). *L'hydrodynamique dans l'oeuvre 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, Université Lyon 1, France).
- Guilbert, L., & Meloche, D. (1993). L'idée de science chez des enseignants en formation : un lien entre l'histoire des sciences et l'hétérogénéité des visions ? *Didaskalia*, 2, 7–30.
- Guillerme, A. (1986). L'émergence du concept de réseau 1820-1830. *Cahier / Groupe Réseaux*, 5, 30–47.
- Guyon, E., Hulin, J.-P., & Petit, L. (1990). Un enseignement de mécanique des fluides par des physiciens. *BUP*, 721, 185–201.
- Hahn, R. (1964). *L'hydrodynamique au 18ème siècle. Aspects scientifiques et sociologiques*. Palais de la Découverte.
- Halbwachs, F. (1975). La physique du maître. *Revue Française de Pédagogie*, 33, 19–29.
- Hasni, A. (2012). Les liens interdisciplinaires vus par des enseignants de sciences et technologies et de mathématiques du secondaire au Québec. *Rdst*, 5, 131–156.
- Hasni, A. (2014). Réflexions sur la notion de contextualisation des apprentissages en sciences et technologies : significations, apports et dérives potentielles. *Bulletin Du CREAS*, 2, 10–13.
- Havdala, R., & Ashkenazi, G. (2007). Coordination of Theory and Evidence : Effect of Epistemological Theories on Students ' Laboratory Practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(8), 1134–1159.
- Hecketsweiler, P. (2010). *Histoire de la médecine : des malades, des médecins, des soins et de l'éthique biomédicale* (Ellipses).
- Henze, I., Van Driel, J., & Verloop, N. (2007). The Change of Science Teachers ' Personal Knowledge about Teaching Models and Modeling in the Context of Science Education Reform. *International Journal of Science Education*, 29(15), 1819–1846.
- Henze, I., Van Driel, J. H., & Verloop, N. (2008). Development of Experienced Science Teachers' Pedagogical Content Knowledge of Models of the Solar System and the Universe. *International Journal of Science Education*, 30(10), 1321–1342.

- Herrick, J. F. (1942). Poiseuille's observations on blood flow lead to a law in hydrodynamics. *American Journal of Physics*, 10, 33–39.
- Hestenes, D. (1997). Modeling methodology for physics teachers. *AIP Conference Proceedings*, 399, 935–958.
- Hirn, C. (1995). Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique de classe de quatrième? *Didaskalia*, 6, 39–54.
- Hodson, D. (2008). Exploring nature of science issues : students' views and curriculum images. In *Towards Scientific Literacy* (pp. 23–40). Sense Publishers.
- Irzik, G., & Nola, R. (2010). A Family Resemblance Approach to the Nature of Science for Science Education. *Science & Education*.
- Jameau, A. (2011). Les connaissances des enseignants en sciences : une étude de cas dans l'enseignement de la mécanique au collège. *Actualité de La Recherche En Education et En Formation*, (septembre), 1–10.
- Jameau, A. (2013). *Les connaissances mobilisées par les enseignants dans l'enseignement des sciences : analyse de l'organisation de l'activité et de ses évolutions*. Université de Bretagne occidentale.
- Janik, T., Najvar, P., Slavik, J., & Trna, J. (2009). On the dynamic nature of physics teachers' pedagogical content knowledge. *Orbis Scholae*, 3(2), 47–62.
- Jeannin, L., Veillard, L., & Tiberghien, a. (2010). Appropriation de nouvelles ressources d'enseignement par des professeurs de physique-chimie en seconde. *Recherches En Didactique Des Sciences et Des Techniques*, 1, 267–292.
- Johsua, S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, 8, 29–53.
- Jouin, B. (2002). Les sciences physiques dans leur fonction de service par rapport à la technologie au lycée professionnel. *Aster*, 34, 1–8.
- Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369–387.
- Justi, R., & Gilbert, J. (2003). Teachers' views on the nature of models. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1369–1386.
- Kaminski, W. (1991). *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*. (Thèse de doctorat, Université Denis Diderot, France).
- Kaminski, W. (n. D.). *Compte-rendu d'innovation. Un support d'enseignement du mécanisme de la vision inspiré de l'histoire des sciences*.
- Karaman, A. (2016). Professional Development of Elementary and Science Teachers in a

- Summer Science Camp : Changing Nature of Science Conceptions. *Australian Journal of Teacher Education*, 41(3), 158–192.
- Karlotoglou, P., Koumaras, P., & Psillos, D. (1995). Différenciation conceptuelle : un enseignement d'hydrostatique, fondé sur le développement et la contradiction des conceptions des élèves. *Didaskalia*, 7, 63–90.
- Kelly, G. J., & Duschl, R. a. (2002). Oward a research agenda for epistemological studies in science education, 1–51.
- Kermen, I., & Meheut, M. (2008). Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants. *Didaskalia*, 32, 77–116.
- Kirschner, P. a., & van Merriënboer, J. J. G. (2013). Do Learners Really Know Best? Urban Legends in Education. *Educational Psychologist*, 48(December 2014), 169–183.
- Koenigsberger, L. (1906). *Hermann von Helmholtz* (Dover Publications).
- Koulaidis, V. & Tsatsaroni, A., 1999. Un cadre pour reconsidérer l'enseignement des sciences. Distinguer expérimentation et expérience. *Aster*, 28, pp.167–190.
- Kuhn, T. (2008). *La structure des révolutions scientifiques* (Champs Sciences).
- Kuhn, T. (1990). *La tension essentielle : tradition et changement dans les sciences* (Gallimard).
- Lamine, B. A. M. (n. D.). *Quelle formation didactique pour les futurs assistants de l'enseignement des sciences à l'université ?* (L'éducation en débats, analyse comparée, Vol. 2).
- Lamine, B. A. M. (2000). *Pertinence et limites de la notion de « rapport au savoir » en didactique des sciences. Rapports aux savoirs et apprentissage des sciences.*
- Lange, J. M. (2005). Rencontre entre deux disciplines scolaires, biologie et mathématiques : première approche des enjeux didactiques de la formation des enseignants de biologie. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 5(1), 485–502.
- Latour, B. (2003). *Un monde pluriel mais commun* (Édition de l'Aube).
- Latour, B. (2007). *Petites leçons de sociologie des sciences* (La Découverte).
- Latour, B., & Woolgar, S. (2006). *La vie de laboratoire : la production des faits scientifiques* (La Découverte).
- Lavonen, J., Jauhiainen, J., Koponen, I. T., & Suonio, K. K. (2004). Effect of a long-term in-service training program on teachers' beliefs about the role of experiments in physics education. *International Journal of Science Education*, 26(3), 309–328.
- Lebrun, N. & de Hosson, C. (2017). Repérer des conceptions d'étudiants : un pas vers l'enrichissement des connaissances professionnelles didactiques d'enseignants-chercheurs de physique. *Rdst*, 15, 59-96.

- Lederman, J. S., Lederman, N. G., Bartos, S. A., Bartels, S. L., Meyer, A. A., & Schwartz, R. S. (2014). Meaningful Assessment of Learners' Understandings About Scientific Inquiry — The Views About Scientific Inquiry (VASI) Questionnaire. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(1), 65–83.
- Lederman, N. G. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of the research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 331–359.
- Lehane, L., & Bertram, A. (2016). Getting to the CoRe of it: A review of a specific PCK conceptual lens in science educational research. *Educacion Quimica*, 27, 52–58.
- Lenoir, Y. (2014). Les contextualisations de la pratique d'enseignement. *Bulletin Du CREAS*, 2, 4–9.
- Lessard, C. (2006). Le débat américain sur la certification des enseignants et le piège d'une politique éducative evidence-based. *Revue Française de Pédagogie*, 154, 19–31.
- Levy, S. T. (2013). Young children's learning of water physics by constructing working systems. *International Journal of Technology and Design Education*, 23, 537–566.
- Lhoste, Y., & Peterfalvi, B. (2009). Problématisation et perspective curriculaire en SVT : l'exemple du concept de nutrition. *Aster*, 49(79–108).
- Li, S. F., Cole, M., Forest, R., Chilstrom, M., Reinersman, E., Jones, M. P., Yadav, K. (2010). Are 2 smaller intravenous catheters as good as 1 larger intravenous catheter? *The American Journal of Emergency Medicine*, 28(6), 724–727.
- Locqueneux, R. (1999). Les XVIIIème et XIXème siècles. In *Une histoire des idées enphysique*. (Vuibert).
- Locqueneux, R. (2009). *Henri Bouasse : réflexion sur les méthodes et l'histoire de la physique* (l'Harmattan).
- Lorillot, V. (2007). Quels rapports aux savoirs scientifiques en arts appliqués ? Le cas d'enseignants de sciencesphysiques et d'enseignants d'arts appliqués. *Actualité de La Recherche En Education et En Formation*, 1–11.
- Mairone, C. (2007). Symposium - Rapports au(x) savoir(s) : du concept aux usages De l'institution scolaire au professeur des écoles: quel(s) rapport(s) au savoir "Evolution des êtres vivants"? *Actualité de La Recherche En Education et En Formation*, 1–13.
- Martin, J., Mitchell, J., & Newell, T. (2003). Development of a concept inventory for fluid mechanics. In *Frontiers in Education* (p. Vol. 1, pp. T3D-T3D).
- Martinand, J. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, (2), 89–99.
- Martinand, J.-L. (1995). La référence et l'obstacle. *Itinéraires de Recherche, Perspectives Documentaires En Éducation*, 34, 7–22.
- Martinand, J.-L. (2003). L'éducation technologique à l'école moyenne en France : problèmes de didactique curriculaire. *La Revue Canadienne de l'enseigneemnt Des Sciences Des*

- mathématiques et Des Technologies*, 3(1), 101–116.
- Martinand, J.-L. (2012). Education au développement durable et didactique du curriculum. In *XIXème colloque AFIRSE* (pp. 1–17).
- Martinand, J.-L. (1983). Questions pour la recherche : la référence et le possible dans les activités scientifiques scolaires. In *Atelier international d'été : Recherche en didactique de la physique* (pp. 227–255).
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière* (Peter Lang).
- Martinand, J.-L. (1988). Quelques apports des recherches en didactique à l'enseignement des sciencesphysiques. *BUP*, 706, 891–913.
- Maulini, Benetti-Capitanescu, Mugnier, Perrenoud, Progin, Veuthey, & Vincent. (2012). Qu'est-ce qu'une "bonne pratique" ? Raison pédagogique et rapport à l'efficacité chez les futurs enseignants. *Questions Vives*, 6(18), 1–16.
- Maurines, L. (1986). *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Paris 7.
- Maurines, L. (1998). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *BUP*, 800, 1–22.
- Maurines, L. (2001). Regards croisés de l'histoire des sciences et de la didactique de la physique sur le concept d'onde. In *Université d'été* (pp. 1–13). Poitiers.
- Maurines, L., Ramage, M., & Beaufils, D. (2013). La nature des sciences dans les programmes de seconde de physique-chimie et de sciences de la vie et de la terre, *Rdst*, 19–52.
- Maurines, L., & Saltiel, E. (1988). Mécanique spontanée du signal. *BUP*, 707 (1), 1023–1041.
- Méheut, M., & Psillos, D. (2004). Teaching-learning sequences : aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26(5), 515–535.
- Mitchell, J., & Martin, J. (2006). Use of Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer. Concept Inventories to Assess Student Learning in Core Courses. In *girep*.
- Mora Muñoz, L., Buzzo, R., Martinez-Mardones, J., & Romero, A. (2006). Preparation of guides, on mechanics of fluids, for the physic's teaching based on the investigatory methodology. In *XV Chilean Physics Symposium* (pp. 1–6).
- Musset, M. (2009). Sciences en classe, sciences en société. *Dossier d'actualité Veille et Analyses*, 45, 1–15.
- Nordon, M. (1992). Emergence de l'esprit scientifique. In *L'eau démontrée : du Moyen Âge à nos jours* (Masson, p. 242).
- Nordon, M. (1992). Annexes. In *L'eau démontrée : du Moyen Âge à nos jours* (Masson, p. 242).
- Nordon, M. (1992). La mécanique élémentaire des fluides parfaits. In *L'eau démontrée : du Moyen Âge à nos jours* (Masson, p. 242).

- Nordon, M. (1992). La résistance des fluides. In *L'eau démontrée : du Moyen Âge à nos jours* (Masson, p. 242).
- Nordon, M. (1992). L'ordre secret de la turbulence. In *L'eau démontrée : du Moyen Âge à nos jours* (Masson, p. 242).
- Nordon, M. (1992). Plongée dans les fluides visqueux. In *L'eau démontrée : du Moyen Âge à nos jours* (p. 242).
- Nordon, M. (1992). Les terrifiants pépins de la réalité. In *L'eau démontrée : du Moyen Âge à nos jours* (Masson, p. 242).
- Oliver, J. S., & Park, S. (2008). Revisiting the Conceptualisation of Pedagogical Content Knowledge (PCK): PCK as a Conceptual Tool to Understand Teachers as Professionals. *Research in Science Education*, 38(3), 261–284.
- Ouvrier-Bonnaz, R. (2013). Pratiques de référence et situations d'apprentissage entre didactiques et psychologie, les référentiels d'activité professionnelle en question. In *Colloque Jean-Louis Martinand* (pp. 1–13).
- Park, S., & Chen, Y. (2012). Mapping Out the Integration of the Components of Pedagogical Content Knowledge (PCK): Examples From High School Biology Classrooms. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(7), 922–941.
- Parker, K. H. (2009). A brief history of arterial wave mechanics. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 47, 111–118.
- Paty, M. (1998). Mouvement des fluides et dérivées partielles. In *D'Alembert* (Les Belles Lettres, p. 205).
- Pélissier, L., Venturini, P., & Calmettes, B. (2007). L'épistémologie souhaitable et l'épistémologie implicite dans l'enseignement de la physique. De l'étude sur l'enseignement en seconde à la démarche d'investigation au collège. In *ReForHST* (pp. 8–13).
- Pfifner, J. (1976). Poiseuille and his law. *Anaesthesia*, 3, 273–275.
- Piaget, J. (1988). *Où va l'éducation* (Folio).
- Porter, R. (2003). *Blood and guts* (Penguin).
- Psillos, D. (2004). An epistemological analysis of the evolution of didactical activities on teaching-learning sequences : the case of fluids. *International Journal of Science Education*, 26(5), 555–578.
- Psillos, D. (1999). Teaching fluids : intended knowledge and students' actual conceptual evolution. *International Journal of Science Education*, 21(1), 17–38.
- Reuter, Y. (2007). La conscience disciplinaire. *Éducation et Didactique*, 1(2), 57–71.
- Ribaric, S., & Kordas, M. (2011). Teaching cardiovascular physiology with equivalent electronic circuits in a practically oriented teaching module. *Advances in Physiology Education*, 35, 149–160.

- Rice, A., & Kitchel, T. (2017). Teachers' Beliefs about the Purpose of Agricultural Education and its Influence on their Pedagogical Content Knowledge. *Journal of Agricultural Education*, 58(2), 198–213.
- Robardet, G. (1998). La didactique dans la formation des professeurs de sciences physiques face aux représentations sur l'enseignement scientifique. *Aster*, 26, 31–58.
- Robert, A., & Rogalski, J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : Une double approche. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(4), 505–528.
- Roditi, É. (2013). Une orientation théorique pour l'analyse des pratiques enseignantes en didactique des mathématiques. *Recherches En Didactiques*, 15, 39–60.
- Rogalski, J. (2003). Y a-t-il un pilote dans la classe ? Une analyse de l'activité de l'enseignant comme gestion d'un environnement dynamique ouvert. *Recherches En Didactique Des mathématiques*, 23(3), 343–388.
- Rollnick, M., Bennett, J., Rhemtula, M., Dharsey, N., Rollnick, M., Bennett, J., & Rhemtula, M. (2008). The Place of Subject Matter Knowledge in Pedagogical Content Knowledge : A case study of South African teachers teaching the amount of substance and chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, 30(10), 1365–1387.
- Roy, P., & Hasni, A. (2014). Les modèles et la modélisation vus par des enseignants de sciences et technologies du secondaire au Québec. *McGill Journal of Education*, 49(2), 349–372.
- Rumelhard, G. (1988). Statut et rôle des modèles dans le travail scientifique et dans l'enseignement de la biologie. *Aster*, 7, 21–48.
- Ryder, J., & Leach, J. (1999). University science students' experiences of investigative project work and their images of science. *International Journal of Science Education*, 21(9), 945–956.
- Ryder, J., & Leach, J. (2000). Interpreting experimental data : the views of upper secondary school and university science students. *International Journal of Science Education*, 22(10), 1069–1084.
- Ryder, J., Leach, J., & Driver, R. (1999). Undergraduate science students' images of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(2), 201–219.
- Sartori, E. (2001). 2000 raisons de faire de l'histoire des sciences. *BUP*, 834, 897–908.
- Schwartz, R. S., Lederman, N. G., & Crawford, B. a. (2004). Developing views of nature of science in an authentic context: An explicit approach to bridging the gap between nature of science and scientific inquiry. *Science Education*, 88(4), 610–645.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ... Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654.

- Seeger, R. J. (1953). On fluid dynamics in physics teaching. *American Journal of Physics*, 21, 29–46.
- Seker, H., Welsh, L. (2005). The comparison of explicit and implicit ways of using history of science for students understanding of the nature of science, pp. 1–10.
- Sennett, R. (2009). *Ce que sait la main : la culture de l'artisanat* (Albin Michel).
- Sensevy, G., & Santini, J. (2006). Modélisation : une approche épistémologique. *Aster*, (43), 163–188.
- Sensevy, G., & Amade-escot, C. (2007). Une présentation de “Those who understand: Knowledge Growth in Teaching.” *Éducation Et Didactique*, 1(avril).
- Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., & Laubé, S. (2008). An Epistemological Approach to Modeling : Cases Studies and implications for science teaching. *Science Education*, (92), 424–446.
- Séré, M.-G., & Beney, M. (1997). Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des expériences : observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire scientifique. *Didaskalia*, 11, 75–102.
- Sevian, H., Dori, Y. J., & Parchmann, I. (2018). How does STEM context-based learning work: what we know and what we still do not know. *International Journal of Science Education*, 40(10), 1–13.
- Shulman, L. S. (2007). Ceux qui comprennent. Le développement de la connaissance dans l'enseignement. *Éducation et Didactique*, 1(1), 97–114.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and Teaching : Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1–21.
- Sido, X. (2017). Les mathématiques au baccalauréat professionnel. Élaboration d'un enseignement en tension entre pratiques disciplinaire et professionnelle (1985-1995). *Revue Française de Pédagogie*, 198, 23–34.
- Smit, J. J. A., & Finegold, M. (1995). Models in physics : perceptions held by final-year prospective physical science teachers studying at South African universities. *International Journal of Science Education*, 17(5), 621–634.
- Soler, L. (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*, (52), 177–214.
- Souza Barros, S., & Elia, M. F. (1974). Les attitudes des enseignants : comment elles influent sur la réalité de la classe. *ICPE*, 1–10.
- Stefanovska, A., & Bracic, M. (1999). Physics of the human cardiovascular system. *Contemporary Physics*, 40, 31–55.
- Strait, L. A., Inman, V. T., & Ralston, H. J. (1947). Sample illustrations of physical principles selected from physiology medicine. *American Journal of Physics*, 15, 375–382.

- Thomas, G. (2012). Changing Our Landscape of Inquiry for a New Science of Education. *Harvard Educational Review*, 82(1), 26–51.
- Thomasset, T. (2011). Jean-Louis Marie Poiseuille. Retrieved from www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/.../Jean Louis Marie Poiseuille. Pdf
- Thompson, S. E., & Katul, G. G. (2012). Hydraulic determinism as a constraint on the evolution of organisms and ecosystems. *Journal of Hydraulic Research*, 50(6), 547–557.
- Tiberghien, A. (1994). Modelling as a basis for analyzing teaching - learning situations. *Learning and Instruction*, 4, 71–87.
- Tiberghien, A. (2008). Connaissances naïves et didactique de la physique. In Armand Colin (Ed.), *Les connaissances naïves* (p. 223).
- Tiberghien, A., & Baker, M. (1999). *Etude de la mise en oeuvre et de l'élaboration des notions fondatrices dans les situations d'enseignement : le cas de l'enseignement des sciences et des mathématiques*.
- Tiberghien, A., & Vince, J. (2005). Etude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers Du Français Contemporain*, 10, 153–176.
- Tseitlin, M., & Galili, I. (2005). Physics Teaching in the Search for Its Self. *Science & Education*, 14, 235–261.
- Van Dijk, E. (2014). Understanding the heterogeneous nature of science : a comprehensive notion of PCK for scientific literacy. *Science Education*, 98(3), 397–411.
- Van Dijk, E., & Kattmann, U. (2007). A research model for the study of science teachers' PCK and improving teacher education. *Teaching and Teacher Education*, (23), 885–897.
- Van Driel, J. H., & Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modeling in science. *International Journal of Science Education*, 21(11), 1141–1153.
- Van Driel, J. H., & Verloop, N. (2002). Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education. *International Journal of Science Education*, 24(12), 1255–1272.
- Van Driel, J. H., Bulte, A. M. W., & Verloop, N. (2005). The conceptions of chemistry teachers about teaching and learning in the context of a curriculum innovation. *International Journal of Science Education*, 27(3), 303–322.
- Veillard, L., Tiberghien, A., & Vince, J. (2011). Analyse d'une activité de conception collaborative de ressources pour l'enseignement de la physique et la formation des professeurs. Le rôle de théories ou outils spécifiques. *Activités*, 8(2), 202–227.
- Venturini, P., Calmettes, B., Amade-escot, C., Terrisse, A., Venturini, P., Calmettes, B., ... Terrisse, A. (2007). Analyse didactique des pratiques d'enseignement de la physique d'une professeure expérimentée. *Aster*, 45, 211–234.
- Venturini, P. (2007). The Contribution of the Theory of Relation to Knowledge to Understanding Students' Engagement in Learning Physics. *International Journal of*

- Science Education*, 29, 1065–1088.
- Venturini, P. (2007). Utilisation du rapport au savoir en didactique de la physique : un premier bilan. In *Actualité de la recherche en éducation et en formation Symposium: Rapport(s) au(x) savoir(s): du concept aux usages* (pp. 1–8).
- Venturini, P. (2009). Comparaison des rapports aux savoirs de la physique et des SVT. *Revue Française de Pédagogie*, 166, 45–58.
- Venville, G. J., & Treagust, D. F. (1997). Analogies in biology education : a contentious issue. *The American Biology Teacher*, 59(5), 282–287.
- Viennot, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire* (Hermann).
- Viennot, L. (1980). Pratique de l’algèbre élémentaire chez les étudiants en physique. *BUP*, 622, 783–820.
- Viennot, L. (1987). Recherche en didactique autour de la transition Secondaire-Supérieur. *BUP*, 699, 1251–1268.
- Viennot, L. (1993). La causalité dans le raisonnement des étudiants. *Didaskalia*, 1, 13–27.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique la part du sens commun*. De Boeck Université.
- Vigour, C. (2005). *La comparaison dans les sciences sociales. Pratiques et méthodes* (La découverte).
- Weltner, K. (1988). Response to “On the problem of explaining lift.” *American Journal of Physics*, 56(9), 853.
- Weltner, K. (1987). A comparison of explanations of the aerodynamics lifting force. *American Journal of Physics*, 55(1), 50–54.
- West, D. C., Pomeroy, J. R., Park, J. K., Gerstenberger, E. a., & Sandoval, J. (2000). Critical Thinking in Graduate Medical Education. *Jama*, 284(9), 1105.

Titre : 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 Etats-Unis

Mots clés : Modélisation ; Nature of Science (NOS) ; Pedagogical Content Knowledge (PCK) ; Histoire des sciences ; Mécanique des fluides ; Enseignants de premier cycle universitaire.

Résumé : Réseau d'eau, circulation sanguine, montée de la sève, sont quelques-uns des phénomènes dont la compréhension repose sur celle du mouvement des fluides. Notre travail porte sur l'enseignement de l'écoulement interne d'un fluide au niveau du premier cycle de l'enseignement supérieur.

Inscrit dans le champ de recherche de la NOS (Nature of Science) et ayant pour thème la modélisation, notre travail est centré sur les enseignants. Nous explorons une des dimensions introduites pour caractériser leurs pratiques dans le cadre des PCK (Pedagogical Content Knowledge), celle relative au savoir enseigné, notamment aux stratégies d'enseignement adoptées. Nous analysons la structure des modèles introduits et les contextes empiriques retenus, le recours à l'expérimental proposé et les démarches de modélisation mises en œuvre. Nous étudions également les contextes pédagogiques mobilisés, en particulier le recours à l'histoire des sciences, et l'influence éventuelle de la discipline d'enseignement et de la filière de formation.

Réalisé selon une méthodologie mixte, combinant analyse qualitative et semi-quantitative, notre travail est exploratoire.

Nous avons conduit 39 entretiens semi-directifs d'enseignants de deux disciplines (physique, biologie) travaillant au sein de différentes filières de formation post-baccalauréat (généraliste-ingénierie, technique, biologie-médecine) de deux pays (France et Etats-Unis).

Nous avons sélectionné les 23 entretiens les plus riches et en avons réalisé une analyse de contenu thématique à l'aide d'une grille multidimensionnelle que nous avons préalablement élaborée et affinée. Nous avons cherché à dégager les dimensions institutionnelle et individuelle des pratiques en examinant les ressemblances et différences se manifestant au sein des différents groupes de population

Nous mettons en évidence une homogénéité de la population « médecine-biologie » et une hétérogénéité de la population « généraliste-physique » en termes de pratiques de modélisation et de contextualisation et ce indépendamment du pays d'exercice de l'enseignant. Nous avons utilisé des questions et des situations non prototypiques afin d'étudier l'expertise des enseignants. Nous mettons en évidence également une faible présence du recours à l'expérimental et à l'histoire des sciences.

Title : Undergraduate teachers and an internal fluid flow : modeling and contextualizing in several disciplines and course trainings in France and in the USA

Keywords : Modeling ; Nature of Science (NOS) ; Pedagogical Content Knowledge (PCK) ; History of Science ; Fluid mechanics ; undergraduate teachers.

Abstract : Water network, blood circulation, sap flow in a tree are three phenomena studied in different disciplinary fields but all linked with an internal fluid flow. Our work deals with the teaching of such phenomena in undergraduate courses at the university level.

Our work is inscribed within the Nature of Science (NOS) research field and deals with modeling and teachers. We use Pedagogical Content Knowledge (PCK) as our theoretical framework in order to explore the knowledge teachers teach, particularly the strategies dimension. We analyze the structure of the models they introduce, and the empirical contexts and the modeling processes they propose. We also study the pedagogical contexts, especially the use of the history of science, and the potential influence of the types of discipline and of training course on the practices.

We use a methodology mixing qualitative and semi-quantitative analysis in this exploratory.

We made 39 semi-structured interviews of physics and biology teachers working in different training courses (generalist-engineering physics, technical physics, and bio-medical) from 2 countries (France and the USA).

We selected the 23 most structured interviews and we analyzed their responses using a grid that we created and refined. We tried to identify the institutional and personal dimensions of the teachers' way of teaching by examining the similarities and differences among teachers' families.

We show that the 'biomedical' family is homogeneous in terms of modeling and contextualizing contrary to the 'generalist-engineering physics' family and reveal no difference according to the country. We also show that authentic experiments and history of science are rarely introduced in teaching. Questioning teachers about unusual situations helped us to study their expertise.

n°578 : Sciences de l'homme et de la société (SHS)