



HAL
open science

Un apport de l'histoire des sciences pour l'enseignement des phénomènes liés à la pression

Anne Boulais

► **To cite this version:**

Anne Boulais. Un apport de l'histoire des sciences pour l'enseignement des phénomènes liés à la pression. Education. Université Paris Cité, 2023. Français. NNT : 2023UNIP7139 . tel-04590091

HAL Id: tel-04590091

<https://theses.hal.science/tel-04590091>

Submitted on 28 May 2024

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.

UNIVERSITÉ PARIS CITÉ

École doctorale Savoirs, sciences, éducation (623)
Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)

Un apport de l'histoire des sciences pour l'enseignement des phénomènes liés à la pression

par Anne BOULAIS épouse LE MÉZO-BOULAIS

Thèse de doctorat de Didactique des disciplines - Physique

Dirigée par : Cécile DE HOSSON
et
Nicolas DÉCAMP

Présentée et soutenue publiquement le 15 décembre 2023

Devant un jury composé de :

| | |
|---|---------------------------------|
| Isabelle KERMEN <i>PU à l'Université de Bretagne Occidentale</i> | Présidente du jury - Rapporteur |
| Valérie MUNIER <i>PU à l'Université de Montpellier</i> | Rapporteur |
| Ricardo LOPES COELHO <i>Associate professor à l'Université de Lisbonne</i> | Examineur |
| Laurence MAURINES <i>PU Émérite à l'Université Paris Saclay</i> | Examinatrice |
| Cécile DE HOSSON <i>PU à l'Université Paris Cité</i> | Directrice de thèse |
| Nicolas DÉCAMP <i>MCF-HDR à l'Université Paris Cité</i> | Co-directeur de thèse |

Titre : un apport de l'histoire des sciences pour l'enseignement des phénomènes liés à la pression

Résumé :

Le concept de pression se formalise de façon variable selon l'échelle de description et l'état (statique ou dynamique) du fluide étudié. En contexte scolaire, la pression est majoritairement introduite en tant que grandeur décrivant, au niveau macroscopique, des systèmes statiques. Malgré ce cantonnement aux situations d'équilibre, de nombreuses difficultés de compréhension ont été mises au jour par des recherches en didactique. Si quelques propositions ont déjà été soumises afin d'améliorer l'enseignement des phénomènes liés à la pression, l'état de l'art montre que beaucoup de difficultés recensées dans la littérature demeurent sans solution. Par ailleurs une reconstruction historique de l'émergence du concept de pression au XVIIe siècle révèle une représentation mécaniste de la nature qui contraste avec la représentation hydrostatique contemporaine. Or, une enquête empirique préliminaire met en évidence une corrélation entre la compréhension d'une situation impliquant un liquide au repos et son appréhension par ces deux représentations cumulées. Ainsi l'histoire des sciences apparaît comme un outil prometteur dans la perspective d'améliorer l'enseignement des phénomènes liés à la pression. Cette recherche consiste donc en une reconstruction didactique, c'est-à-dire en l'élaboration d'une ressource basée sur l'histoire des sciences pour enseigner la pression. Un *corpus* de correspondances sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air au XVIIe siècle a été élaboré. Le choix de ce matériau privilégié est gouverné par la volonté de proposer une ressource permettant de définir des objectifs autres que conceptuels, notamment améliorer l'image que les élèves ont de la NoS (Nature of Science). L'appropriation et la transformation du *corpus* par les enseignant·e·s ont été analysées dans le cadre de l'approche documentaire du didactique. Il résulte de cette dernière étude que les exploitations faites par les enseignants sont principalement à visée culturelle, et véhiculent une image édulcorée de la NoS.

Mots-clés : didactique, reconstruction didactique, histoire des sciences, correspondances historiques, pression, formation des enseignants

Title : a contribution of history of science for teaching pressure-related phenomena

Abstract :

The concept of pressure is formalized in a variable way according to the scale of the description and the state (static or dynamic) of the studied fluid. In a school context, pressure is mainly introduced as a quantity describing, at the macroscopic level, static systems. Despite this confinement to situations of equilibrium, many difficulties of understanding have been brought to light by research in didactics. While some proposals have already been submitted to improve the teaching of pressure-related phenomena, the state of the art shows that many difficulties identified in the literature remain unsolved. Moreover, a historical reconstruction of the emergence of the concept of pressure in the 17th century reveals a mechanistic representation of nature which contrasts with the contemporary hydrostatic representation. However, a preliminary empirical investigation highlights a correlation between the understanding of a situation involving a liquid at rest and its apprehension by these two cumulated representations. Thus history of science appears as a promising tool in the perspective of improve the teaching of pressure-related phenomena. This research therefore consists of a didactic reconstruction, that is to say, the development of a resource based on the history of science to teach pressure. A *corpus* of letters on the questions of vacuum and the gravity of the air in the 17th century has been drawn up. The choice of this privileged material is governed by the desire to offer a resource making it possible to define objectives other than conceptual ones, in particular to improve the image that students have of the Nature of Science (NoS). The appropriation and the transformation of the *corpus* by teachers were analyzed within the framework of the documentary approach of didactics. It follows from this last study that the exploitations made by teachers are mainly for cultural purposes, and convey a watered-down image of NoS.

Keywords : didactics, didactic reconstruction, history of science, historical letters, pressure, teacher training

Remerciements

Merci Isabelle, Valérie, Laurence et Ricardo d'avoir accepté de participer à l'examen de ce travail ; merci pour votre enthousiasme *a priori* et *a posteriori* ainsi que pour vos réflexions bienveillantes et inspirantes. Merci tout spécialement à toi Isabelle d'avoir présidé ce jury ; obtenir le label « lu et approuvé par Isabelle Kermen » me remplit de fierté.

Me lancer dans ce projet n'aura définitivement pas été le plus difficile ; le mener à bien fut un tout autre défi. Il aura fallu que je sois rappelée à l'ordre pour que les « papillonnages » prennent l'allure d'une véritable recherche : merci Laurence et Patricia d'avoir accepté de constituer le comité de suivi chargé de redresser la barre quand je partais à la dérive. Merci aussi d'avoir soutenu à quatre reprises et sans équivoque la poursuite de l'aventure doctorale.

Comme ça a du être difficile de la diriger, cette thèse ! Parce qu'il fallait que ce soit une thèse sur la pression, mais sans coup de pression. Il fallait que je sois portée mais pas poussée ; guidée mais pas menée ; assistée mais pas chaperonnée. Ce délicat équilibre que mon sale caractère imposait a perduré pendant sept ans, et j'ose dire que si ça n'avait pas été ce couple là qui en était le garant, on aurait chaviré très vite : merci mille fois Cécile et Nicolas. Je suis on ne peut plus soulagée de ne pas avoir trahit la confiance que vous m'avez accordée et sans cesse renouvelée. Je suis reconnaissante de tous les efforts que vous avez du faire régulièrement pour que nous arrivions à bon port, les dons de votre personne je dirais même, pour toutes ces fois où je vous avez accepté sans rechigner de faire à ma place ce qu'il ne me disait pas de faire.

Merci à toi Nicolas d'avoir présenté pour moi ce travail à Toulouse ; d'avoir accepté d'être le formateur dont le chapitre 6 avait besoin ; d'avoir traduit les extraits de correspondance que je ne trouvais qu'en italien. Rien qu'avec ces trois exemples on devine à quel point tu es dévoué et attentionné. Je t'admire sincèrement pour ta rigueur, ta patience, ton humour, ton esprit critique toujours respectueux, ta maîtrise de la physique et ton humilité qui n'est pas une qualité si répandue chez les esprits aussi brillants que le tien.

Merci à toi Cécile, mon amie, de m'avoir entraînée à marcher dans tes pas. Depuis notre rencontre oh combien bouleversante et déterminante en 2011, je n'ai cessé de grandir à l'aune de tes conseils toujours avisés et de ton parcours exemplaire. Ta foi inconditionnelle en moi rend toujours tout possible : tu me vois si brillante que tu me fais briller ; tu me trouves si drôle que je me fais rire ; tu me récupères en miettes à la sortie de magistère et me voilà docteur. Qui l'eut cru ! Toi, assurément. Il y a peu de choses que je souhaite avec autant de ferveur que d'avoir encore des centaines de fois l'occasion de t'exprimer de vive voix ma gratitude.

Merci maman de m'avoir transmis ton goût non pas pour l'anglais (*sorry*), mais pour l'échange de lettres. Qui saurait dire si ce mode de communication désuet m'aurait autant inspirée si nous n'entretenions pas nous-même une correspondance assidue depuis une quinzaine d'années. Merci aussi d'avoir accepté de traduire ce « charabia » de Boyle.

Merci papa de t'être toujours soucieux de l'avancée de cette thèse, démontrant ainsi ta

fierté et me rappelant qu'il fallait persévérer. Je mesure la chance que j'ai eue de pouvoir étudier à un aussi haut niveau, et il aurait été indigne de ne pas aller jusqu'au bout, surtout pour la fille d'un modèle d'abnégation et de dévouement en matière de travail.

Je tiens à remercier publiquement toutes celles et tous ceux qui ont consacré un peu de leur temps, parfois sans même me connaître, pour mettre une pierre à l'édifice : les profs de physique de la Courneuve pour avoir testé mes brouillons de questionnaire ; les enseignant·e·s stagiaires d'un peu partout en France entre 2018 et 2022 pour avoir répondu au questionnaire « liquides au repos » ; les stagiaires à l'INSPE de Paris en 2022 pour avoir participé à la formation basée sur le corpus autour de la pesanteur de l'air et la résistance du vide ; Erwan, Isabelle G. et Rémi pour nos échanges passionnants sur ce qu'est la pression et sur l'hydrodynamique ; les doctorant·e·s et chercheur·e·s du LDAR avec qui j'ai eu souvent l'occasion, surtout en début de thèse, de discuter de mes problématiques de recherche.

J'ai aussi une pensée émue pour Christiane qui m'a accueillie en 2010 et 2011 à Meudon pour m'initier à l'histoire des sciences. Je regrette évidemment que cette thèse ait duré trop longtemps pour que tu aies le temps de la lire. J'ai beaucoup tardé à écrire le chapitre 3 parce que je ne pensais pas pouvoir le faire sans toi. Tu m'avais pourtant laissé les clés, et j'espère m'être montrée digne de tout ce que tu m'as appris.

J'en viens pour finir au secret d'une thèse qui s'éternise. Malgré tout le temps libre que me confère mon emploi de prof à plein temps, la dépense n'a pas systématiquement été faite en faveur du travail de thèse. Et c'est peu de le dire... Mais il y a une explication physique : quand on avance, à chaque fois qu'il y a un effet de portance il y a inévitablement une force de traînée. Alors spéciale dédicace à vous toutes et tous avec qui j'aime passer du temps et qui ne m'avez pas tant ralentie que donné la force de ne pas me noyer au cours de cette épreuve que je me suis auto-infligée : il y a mes familles, celle dans laquelle j'ai eu la chance de naître et dont je suis si proche, celle qui m'a accueillie comme belle-fille et belle-sœur, et celle que je construis avec Priscilla, tout particulièrement ces deux dernières années avec les naissances de nos filles Erin et Aster ; il y a mes copains, les copains de galère avec qui on a souvent pleuré le même mal, les copains profs, et plus spécialement les copains de Jacques Brel pour qui l'unité de mesure de pression est la pinte.

Et il y a toi Priscilla, ma constante fondamentale, inlassablement à mes côtés depuis ce soir de septembre 2007 où tu as eu l'idée géniale de m'inviter à partager ta table à la cantine du lycée Saint Louis. Si cette thèse nous a appris une chose sur la pression, c'est bien qu'elle se propage jusque dans les sphères privées. Merci d'avoir résisté avec moi au caractère chaque année plus pesant de cette décision que j'ai pourtant prise si légèrement en 2016. Merci pour ton soutien, tes conseils, et ton aide précieuse dans l'accomplissement de toutes les petites tâches aussi pénibles que nécessaires pour présenter convenablement le fruit de mes recherches. Tu y es pour beaucoup si cette aventure doctorale se termine. Enfin !

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale | 16 |
| 1 Visées didactiques générales | 16 |
| 1.1 Contenu conceptuel ciblé | 16 |
| 1.2 Type de recherche | 18 |
| 2 Méthodologie générale | 18 |
| 2.1 Recours à l’histoire des sciences | 18 |
| 2.2 Cadre théorique et problématique | 19 |
| 3 Organisation du manuscrit | 20 |
| Références de l’introduction générale | 22 |
| | |
| I Enquêtes préliminaires | 24 |
| | |
| 1 Analyse de contenu | |
| La pression à différents niveaux de description | 27 |
| 1 Introduction | 30 |
| 2 Lois locales à l’échelle mésoscopique | 31 |
| 2.1 Notion de particule de fluide | 31 |
| 2.1.1 Définition | 31 |
| 2.1.2 Propriétés | 31 |
| 2.2 Champs de grandeurs cinématiques : description eulérienne | 32 |
| 2.2.1 Champ de vitesse, lignes et tubes de courant | 32 |
| 2.2.2 Champ d’accélération | 32 |
| 2.2.3 Champ de taux de transformation | 33 |
| 2.3 Dynamique d’une particule de fluide : description lagrangienne | 35 |
| 2.3.1 Accélération lagrangienne d’une particule de fluide | 35 |
| 2.3.2 Bilan des forces volumiques sur une particule de fluide | 36 |
| 2.3.3 Bilan des forces surfaciques sur une particule de fluide | 37 |
| 2.3.4 PFD appliqué à une particule de fluide : loi locale | 39 |
| 2.4 Équations de bilan | 40 |
| 2.4.1 Débit d’une grandeur physique | 40 |
| 2.4.2 Conservation de la masse et équation de continuité | 41 |
| 2.4.3 Conservation de la quantité de mouvement | 42 |

| | | | |
|---|-------|---|----|
| | 2.4.4 | Conservation de l'énergie | 43 |
| 3 | | Lois phénoménologiques macroscopiques | 44 |
| | 3.1 | Différents fluides et écoulements | 44 |
| | 3.1.1 | Fluide newtonien ; écoulements laminaires et turbulents | 44 |
| | 3.1.2 | Fluide et écoulement parfaits | 46 |
| | 3.1.3 | Fluide et écoulement incompressibles | 46 |
| | 3.1.4 | Écoulement stationnaire (ou permanent) | 47 |
| | 3.1.5 | Écoulement homogène | 48 |
| | 3.1.6 | Écoulements irrotationnel et potentiel | 48 |
| | 3.2 | Conditions aux limites | 48 |
| | 3.2.1 | Interface solide / fluide | 48 |
| | 3.2.2 | Interface fluide / fluide | 50 |
| | 3.3 | Relations de Bernoulli | 52 |
| | 3.3.1 | Établissement de la relation générale | 52 |
| | 3.3.2 | Simplification en régime stationnaire | 53 |
| | 3.3.3 | Interprétation énergétique | 53 |
| | 3.3.4 | Exemples d'applications en écoulement stationnaire | 54 |
| | 3.4 | Fluides au repos | 57 |
| | 3.4.1 | Pression thermodynamique | 58 |
| | 3.4.2 | Fluide au repos dans un champ de pesanteur | 58 |
| 4 | | Interprétations à l'échelle microscopique | 62 |
| | 4.1 | Modèle microscopique des fluides | 62 |
| | 4.1.1 | Généralités | 62 |
| | 4.1.2 | Transferts de quantité de mouvement | 63 |
| | 4.1.3 | Interactions intermoléculaires | 65 |
| | 4.1.4 | Bilan : pression d'un fluide | 66 |
| | 4.2 | Application aux gaz | 67 |
| | 4.2.1 | Hypothèses de la théorie cinétique des gaz parfaits | 67 |
| | 4.2.2 | Équation d'état des gaz parfaits | 68 |
| | 4.2.3 | Gaz réels : équation d'état de Van der Waals | 69 |
| | 4.3 | Application aux liquides | 70 |
| | 4.3.1 | Variation de pression dans un champ de pesanteur uniforme | 71 |
| | 4.3.2 | Variation de vitesse et de pression dans un écoulement | 71 |
| 5 | | Conclusion | 72 |
| | 5.1 | Synthèse | 72 |
| | 5.2 | Autres pressions | 72 |
| | 5.3 | La pression dans les programmes scolaires | 73 |
| | | Références du chapitre 1 | 74 |

2 Première enquête empirique

| | |
|--|-----------|
| État de l'art | 75 |
| 1 Introduction | 78 |
| 2 Idées pouvant faire obstacle à la compréhension | 78 |
| 2.1 Propriétés supposées de la pression au niveau macroscopique | 79 |
| 2.1.1 La pression n'existe que dans les situations exceptionnelles . . . | 79 |
| 2.1.2 La pression est une force pressante | 79 |
| 2.1.3 La pression est égale au poids <i>du fluide</i> | 81 |
| 2.1.4 Les forces de pression ne se propagent pas de façon isotrope . . | 81 |
| 2.1.5 La pression varie horizontalement dans un fluide | 82 |
| 2.1.6 La pression dans un liquide dépend des caractéristiques du conte- nant | 82 |
| 2.1.7 La pression augmente avec l'altitude | 84 |
| 2.1.8 La poussée d'Archimède n'a rien à voir avec la pression | 84 |
| 2.1.9 Le vide n'existe pas | 85 |
| 2.1.10 La pression est une propriété intrinsèque du fluide | 85 |
| 2.2 Interprétations de la pression au niveau microscopique | 85 |
| 2.2.1 Difficultés d'assimilation du modèle particulaire | 85 |
| 2.2.2 La pression n'est reliée qu'à la densité particulaire | 86 |
| 2.2.3 Seuls les aspects cinétiques peuvent changer dans un liquide . . | 86 |
| 3 Raisonnements mis en œuvre | 87 |
| 3.1 Raisonnement animiste | 87 |
| 3.2 Raisonnement finaliste | 87 |
| 3.3 Raisonnement causal | 88 |
| 3.3.1 Raisonnement linéaire causal | 88 |
| 3.3.2 Caractéristiques des explications causales | 88 |
| 3.4 Raisonnement local | 90 |
| 3.4.1 Concentration sur une sous-partie du système au détriment de son ensemble | 90 |
| 3.4.2 Concentration sur le système au détriment de l'extérieur | 90 |
| 3.5 Raisonnement mécanique | 91 |
| 3.5.1 Adhérence force / vitesse | 91 |
| 3.5.2 Attribution d'une force aux objets | 91 |
| 3.5.3 Focalisation sur les mouvements | 92 |
| 3.6 Raisonnement mathématique | 92 |
| 4 Propositions didactiques | 92 |
| 4.1 Pour l'enseignement d'un modèle particulaire des gaz | 93 |
| 4.1.1 Une séquence d'enseignement inspirée de l'histoire des sciences . | 93 |
| 4.1.2 Une séance d'élaboration d'un modèle par les élèves | 93 |
| 4.2 Pour l'enseignement des propriétés thermoélastiques des gaz | 94 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.1 | Une approche microscopique basée sur la théorie cinétique des gaz | 94 |
| 4.2.2 | Une approche macroscopique basée sur l'histoire des sciences . . | 95 |
| 4.2.3 | Former les enseignant·e·s par le changement conceptuel | 95 |
| 4.3 | Pour l'enseignement de l'hydrostatique | 96 |
| 4.3.1 | Un modèle particulière pour définir la pression dans un liquide . | 96 |
| 4.3.2 | Un modèle à l'échelle mésoscopique pour comprendre la pression en présence de gravité | 96 |
| 5 | Conclusion | 97 |
| | Références du chapitre 2 | 98 |

3 Reconstruction historique

| | | |
|-------|--|------------|
| | La crise autour du vide et de la pesanteur de l'air au XVIIe siècle | 103 |
| 1 | Introduction | 106 |
| 2 | Paradigme scientifique dans l'Europe de 1630 | 107 |
| 2.1 | Contexte idéologique et institutionnel | 107 |
| 2.2 | Contexte scientifique à propos des fluides | 107 |
| 2.2.1 | Le vide et le plein | 107 |
| 2.2.2 | La pesanteur de l'air | 108 |
| 2.2.3 | Hydrostatique | 109 |
| 2.3 | Contexte technique : systèmes de pompage et de siphonnage | 110 |
| 3 | Naissance et vie de la querelle | 111 |
| 3.1 | D'un problème technique vers un problème scientifique | 111 |
| 3.1.1 | Limite d'aspiration des pompes et siphons | 111 |
| 3.1.2 | Généralisation de la limite | 112 |
| 3.2 | Mise à l'épreuve de l'hypothèse du vide | 114 |
| 3.2.1 | Négation <i>versus</i> affirmation du vide | 114 |
| 3.2.2 | Négation des propriétés du vide (apparent ou réel) | 117 |
| 3.3 | Mise à l'épreuve de l'hypothèse de la pesanteur de l'air | 120 |
| 3.3.1 | Argumentations à propos de l'hypothèse | 120 |
| 3.3.2 | Première confirmation expérimentale : l'expérience du Puy de Dôme | 123 |
| 3.3.3 | Seconde confirmation expérimentale : l'expérience du vide dans le vide | 124 |
| 4 | Au-delà de la crise | 126 |
| 4.1 | Exploitations du dispositif de Torricelli | 126 |
| 4.1.1 | Au profit de la science : à propos de la nature de l'air | 126 |
| 4.1.2 | Au profit de la technique : développement des baromètres . . . | 127 |
| 4.2 | Généralisation du concept de « pression » | 128 |
| 4.2.1 | Du phénomène à la grandeur physique | 128 |
| 4.2.2 | Unification des fluides | 128 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2.3 | Fluides en écoulement : hydrodynamique | 129 |
| 4.2.4 | Interprétations microscopiques | 129 |
| 5 | Conclusion | 129 |
| 5.1 | Synthèse | 129 |
| 5.2 | Mise en relation avec les enquêtes précédentes | 130 |
| 5.3 | Perspectives | 131 |
| 5.3.1 | Vers une reconstruction didactique | 131 |
| 5.3.2 | Vers une enquête empirique supplémentaire | 131 |
| | Références du chapitre 3 | 132 |

4 Deuxième enquête empirique

| | | |
|-------|---|------------|
| | Liquides au repos : compréhension des enseignant·e·s | 135 |
| 1 | Introduction | 138 |
| 2 | Problématique | 139 |
| 2.1 | Conceptualisation des fluides au repos | 139 |
| 2.1.1 | Définitions générales | 139 |
| 2.1.2 | Cas des situations impliquant un liquide au repos | 140 |
| 2.2 | Hypothèses | 142 |
| 2.2.1 | Cadre de rationalité et type de situation impliquant un liquide au repos | 142 |
| 2.2.2 | Compréhension des situations impliquant un liquide au repos | 143 |
| 3 | Méthodologie | 144 |
| 3.1 | Situations soumises aux participant·e·s | 144 |
| 3.1.1 | Situation A (objet suspendu) | 145 |
| 3.1.2 | Situation B (tube retourné) | 145 |
| 3.2 | Questions posées à propos des deux situations | 148 |
| 3.2.1 | Expliquer la situation décrite et schématisée | 148 |
| 3.2.2 | Prévoir l'évolution du paramètre m ou h | 148 |
| 3.3 | Justifications proposées | 152 |
| 3.3.1 | Points généraux de vigilance | 152 |
| 3.3.2 | Sets de propositions pour chaque situation | 153 |
| 3.3.3 | Analyse des justifications proposées | 153 |
| 4 | Résultats | 157 |
| 4.1 | A propos des répondant·e·s | 157 |
| 4.1.1 | Profil des enseignant·e·s sollicité·e·s | 157 |
| 4.1.2 | Effectifs répondants | 158 |
| 4.2 | Résultats bruts | 159 |
| 4.2.1 | Réponses aux questions d' <i>explication</i> | 159 |
| 4.2.2 | Réponses aux questions de <i>prévision</i> | 162 |
| 4.3 | Facteurs de performance | 165 |
| 4.3.1 | Type de justification et performance | 165 |

| | | |
|--|---|------------|
| 4.3.2 | Nombre de cadres mobilisés et performance | 165 |
| 5 | Discussion | 168 |
| 5.1 | Retour sur les hypothèses | 168 |
| 5.1.1 | Pertinence des deux cadres de rationalité définis | 168 |
| 5.1.2 | Différences de conceptualisation entre les deux situations | 168 |
| 5.2 | Compréhension des situations par les enseignant·e·s | 168 |
| 5.2.1 | Bilan général | 168 |
| 5.2.2 | Corrélations la compréhension et cadre(s) mobilisé(s) | 169 |
| 5.3 | Perspectives | 170 |
| 5.3.1 | Élargir l'étude | 170 |
| 5.3.2 | Former les enseignant·e·s | 170 |
| 6 | Synthèse | 172 |
| | Références du chapitre 4 | 173 |
| Conclusion des enquêtes préliminaires | | 174 |
| II Reconstruction didactique | | 176 |
| Introduction à la reconstruction didactique | | 177 |
| 5 Élaboration d'une ressource | | |
| | <i>Corpus de correspondances sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air</i> | 181 |
| 1 | Introduction | 182 |
| 2 | Les correspondances : un atout pédagogique et didactique | 183 |
| 2.1 | Intérêt motivationnel | 183 |
| 2.2 | Intérêt épistémologique | 184 |
| 2.2.1 | Éclairer les interactions entre scientifiques | 184 |
| 2.2.2 | Éclairer les enjeux, les démarches, les méthodes scientifiques | 184 |
| 2.3 | Intérêt conceptuel | 185 |
| 2.4 | Intérêt culturel | 186 |
| 3 | Choix opérés pour la constitution du <i>corpus</i> | 186 |
| 3.1 | Choix pragmatiques : accessibilité des ressources | 187 |
| 3.2 | Choix généraux de fond : exclusions et sélections d'extraits | 187 |
| 3.2.1 | Conformité avec les programmes scolaires | 187 |
| 3.2.2 | Pertinence vis-à-vis de l'état de l'art | 189 |
| 3.2.3 | Inscription dans la NoS | 190 |
| 3.2.4 | Cohérence et historicité du corpus | 191 |
| 3.3 | Choix généraux de forme : retravail des extraits retenus | 192 |
| 3.3.1 | Éléments de nature scientifique | 193 |
| 3.3.2 | Éléments de langage | 194 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.3.3 | Notes de bas de page | 196 |
| 4 | Présentation du <i>corpus</i> de correspondances sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air au XVII ^e siècle | 197 |
| | EXTRAIT A : Lettre de Galilée à Baliani, 6 août 1630 | 198 |
| | EXTRAIT B : Réponse de Baliani à Galilée, 26 octobre 1630 | 198 |
| | EXTRAIT C : Lettre de Magiotti à Mersenne, 12 mars 1648 | 199 |
| | EXTRAIT D : Lettre de Torricelli à Ricci, 11 juin 1644 | 200 |
| | EXTRAIT E : Réponse de Ricci à Torricelli, 18 juin 1644 | 201 |
| | EXTRAIT F : Lettre de Du Verdus à Mersenne, fin juillet 1644 | 202 |
| | EXTRAIT G : Lettre de Pascal à Périer, 15 novembre 1647 | 203 |
| | EXTRAIT H : Réponse de Périer à Pascal, 22 septembre 1648 | 204 |
| | EXTRAIT I : Lettre de Boyle à son neveu, 20 décembre 1659 | 205 |
| | Références du <i>corpus</i> | 206 |
| 5 | Analyse du <i>corpus</i> : éléments exploitables <i>a priori</i> | 207 |
| 5.1 | En réponse à des objectifs motivationnels | 207 |
| 5.1.1 | Humanisation de la science et des savants | 207 |
| 5.1.2 | Statut de l'erreur | 207 |
| 5.1.3 | Appui sur des faits concrets | 208 |
| 5.2 | En réponse à des objectifs épistémologiques | 208 |
| 5.2.1 | Visées et caractéristiques générales de la science | 208 |
| 5.2.2 | Objets d'étude | 209 |
| 5.2.3 | Ressources disponibles pour l'étude | 209 |
| 5.2.4 | Produits de l'étude | 210 |
| 5.2.5 | Processus d'élaboration des produits | 210 |
| 5.2.6 | Attitudes permettant l'étude | 212 |
| 5.2.7 | Rôle de la communauté scientifique et interactions en son sein | 212 |
| 5.2.8 | Interactions entre science et société | 213 |
| 5.2.9 | Dimension temporelle de l'élaboration de la connaissance | 213 |
| 5.3 | En réponse à des objectifs conceptuels | 213 |
| 5.3.1 | Enseignement par la controverse | 214 |
| 5.3.2 | Résonances avec les difficultés d'élèves | 214 |
| 5.3.3 | Outils et leviers | 215 |
| 5.4 | En réponse à des objectifs culturels | 216 |
| 5.4.1 | Repères chronologiques | 216 |
| 5.4.2 | Monde savant au XVII ^e siècle | 217 |
| 6 | Synthèse | 218 |
| | Références du chapitre 5 | 219 |

6 Évaluation de la ressource

Dans le contexte de la formation initiale d'enseignant·e·s de physique-chimie 221

| | | |
|---|------------------------|-----|
| 1 | Introduction | 222 |
|---|------------------------|-----|

| | | |
|-------|--|------------|
| 2 | Élaboration du scénario de formation | 222 |
| 2.1 | Objectifs de recherche | 223 |
| 2.1.1 | Cadre organisateur de la formation | 223 |
| 2.1.2 | Hypothèses et questions de recherche | 224 |
| 2.2 | Objectifs de formation | 225 |
| 2.2.1 | Contenu : besoins identifiés | 225 |
| 2.2.2 | Modalité : analyse réflexive | 226 |
| 2.3 | Structure du scénario de formation | 226 |
| 3 | Méthodologie de recherche | 227 |
| 3.1 | Recueil de données | 227 |
| 3.1.1 | Productions écrites | 227 |
| 3.1.2 | Captations audio | 228 |
| 3.2 | Analyse des transformations du <i>corpus</i> | 229 |
| 3.2.1 | Propriétés des documents supports | 229 |
| 3.2.2 | Nature des situations d'apprentissage | 230 |
| 3.2.3 | Apports du <i>corpus</i> | 230 |
| 3.3 | Analyse de l'appropriation du <i>corpus</i> | 234 |
| 4 | Résultats | 235 |
| 4.1 | Questionnaire préliminaire | 235 |
| 4.1.1 | Profil des enseignant·e·s sondé·e·s | 235 |
| 4.1.2 | Motivations en faveur de l'histoire des sciences | 235 |
| 4.1.3 | Réticences vis-à-vis d'un tel recours | 236 |
| 4.2 | Transformations du <i>corpus</i> | 236 |
| 4.2.1 | Propriétés des documents support | 236 |
| 4.2.2 | Nature des situations d'apprentissage | 237 |
| 4.2.3 | Apports du <i>corpus</i> | 238 |
| 4.3 | Appropriation du <i>corpus</i> | 239 |
| 4.3.1 | Première étape du processus d'appropriation (partie I) | 239 |
| 4.3.2 | Deuxième étape du processus d'appropriation (partie II) | 242 |
| 4.3.3 | Questionnaire critique | 243 |
| 5 | Discussion | 245 |
| 5.1 | Évaluation du <i>corpus</i> | 245 |
| 5.2 | Apport de l'histoire des sciences | 246 |
| 5.3 | Image de la NoS véhiculée par les documents et scénarios | 246 |
| | Références du chapitre 6 | 247 |
| | Conclusion de la reconstruction didactique | 248 |
| | Conclusion générale | 251 |
| 1 | Principaux résultats | 251 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 1.1 | Difficultés recensées | 251 |
| 1.2 | Notre apport pour y remédier | 253 |
| 2 | Perspectives | 254 |
| 2.1 | Formation des enseignant·e-s | 254 |
| 2.2 | Autres apports envisageables autour du concept de pression | 255 |
| 2.2.1 | À partir de notre ressource | 255 |
| 2.2.2 | À propos d'autres facettes du concept de pression | 255 |
| 2.3 | Compréhension et cadres de rationalité | 255 |
| 2.3.1 | Réplication de l'enquête réalisée | 256 |
| 2.3.2 | Ouverture à d'autres champs disciplinaires | 256 |

Annexes **258**

| | | |
|----------|---|-----|
| ANNEXE A | : Formulaire mathématique | 258 |
| ANNEXE B | : Détail des justifications choisies par les enseignant·e-s | 260 |
| ANNEXE C | : Tests statistiques sur les résultats observés | 263 |
| ANNEXE D | : Scénario de formation | 266 |
| ANNEXE E | : Questionnaire préliminaire | 269 |
| ANNEXE F | : Texte introductif au <i>corpus</i> | 271 |
| ANNEXE G | : Consigne | 273 |
| ANNEXE H | : Questionnaire critique | 274 |
| ANNEXE I | : Transcription (partie I) | 276 |
| ANNEXE J | : Transcription (partie II, binôme 8) | 313 |

Liste des figures **369**

Liste des tableaux **371**

Introduction générale

1 Visées didactiques générales

1.1 Contenu conceptuel ciblé

La recherche que nous présentons dans ce manuscrit vise la notion de « pression » ainsi que les phénomènes et concepts connexes. D'un point de vue institutionnel, ces contenus d'enseignement se situent actuellement à différents niveaux des cycles primaires et secondaires en France.

Au cycle 2 tout d'abord, si le terme « pression » ne figure pas au programme il est tout de même question de l'air dont la matérialité est mise en évidence par des expériences impliquant des instruments tels que la seringue ou la pompe à vélo qui sont communément associés à l'idée de pression :

| Connaissances et compétences associées | Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève |
|---|---|
| Existence, effet et quelques propriétés de l'air (matérialité et compressibilité de l'air). | Mettre en œuvre des dispositifs simples (seringues, ballons, pompes à vélo, récipients de formes variées, etc) visant à éprouver la matérialité de l'air. |

TABLE 1 – Extrait du B.O. n°31 du 30 juillet 2020 **Programme d'enseignement du cycle des apprentissages fondamentaux (cycle2)**

Aux cycle 3 et 4 les contenus conceptuels enseignés ne sont pas mis en relation ni de près ni de loin avec la notion de pression. La distinction entre les liquides et les gaz est faite en terme de volume et de forme ; au cycle 4 une approche microscopique est envisagée pour interpréter les transformations chimiques, et non pour expliquer les propriétés pressantes des liquides et des gaz. Les propriétés de la matière directement reliées à la notion de pression réapparaissent seulement dans les programmes de lycée général, ce qui signifie qu'avant ce niveau d'enseignement ou à défaut de celui-ci, les jeunes français·e-s n'appréhendent pas le concept de pression dans le cadre institutionnel.

En classe de seconde générale ni la pression ni les phénomènes et notions connexes ne constituent un objet d'apprentissage ; seules sont envisagées d'éventuelles mesures de pression en tant que « grandeur d'intérêt » illustrant le fonctionnement d'un capteur.

Il faut attendre une spécialisation en physique-chimie au niveau première puis terminale pour aborder explicitement et plus largement le concept de pression. Tout d'abord au niveau première dans le thème « mouvement et interactions » (tableau 5.1). Ensuite en terminale les élèves parvenant jusqu'à ce niveau d'enseignement abordent la poussée d'Archimède puis la notion de pression dans les fluides en mouvement à l'occasion de la partie « modéliser l'écoulement d'un fluide ». Par ailleurs la pression est de nouveau abordée dans le thème « L'énergie : conversion et transfert » dans lequel le modèle du gaz parfait est évoqué (tableau 3).

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| <p>échelle de description. Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température.</p> <p>Modèle de comportement d'un gaz : loi de Mariotte.</p> <p>Action exercées par un fluide sur une surface : forces pressantes.</p> <p>Loi fondamentale de la statique des fluides.</p> | <p>Expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide et le comportement microscopique des entités qui le constituent.</p> <p>Utiliser la loi de Mariotte. <i>Tester la loi de Mariotte, par exemple en utilisant un dispositif comportant un microcontrôleur.</i></p> <p>Exploiter la relation $F = P.S$ pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface plane S soumise à une pression P. Dans le cas d'un fluide incompressible au repos, utiliser la relation fournie exprimant la loi fondamentale de la statique des fluides : $P_2 - P_1 = \rho g(z_1 - z_2)$. <i>Tester la loi fondamentale de la statique des fluides.</i></p> |

TABLE 2 – Extrait du B.O. spécial n°1 du 22 janvier 2019 **Programme de spécialité physique-chimie de première générale**

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| <p>Poussée d'Archimède.</p> <p>Écoulement d'un fluide en régime permanent. Débit volumique d'un fluide incompressible.</p> <p>Relation de Bernoulli. Effet Venturi.</p> | <p>Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. <i>Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.</i></p> <p>Exploiter la conservation du débit volumique pour déterminer la vitesse d'un fluide incompressible.</p> <p>Exploiter la relation de Bernoulli, celle-ci étant fournie, pour étudier qualitativement puis quantitativement l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent. <i>Mettre en œuvre un protocole expérimental pour étudier l'écoulement permanent d'un fluide et pour tester la relation de Bernoulli.</i></p> |
| <p>Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression.</p> <p>Équation d'état du gaz parfait.</p> | <p>Relier qualitativement les grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.</p> |

TABLE 3 – Extraits du B.O. spécial n°8 du 25 juillet 2019 **Programme de spécialité physique-chimie de première générale**

La mise en cohérence des circonstances variées dans lesquelles la notion de pression est mobilisée en physique sera l'objet du premier chapitre de ce manuscrit. Nous situerons ainsi les différentes entrées des programmes officiels dans ce vaste panorama, et justifierons *a posteriori* comment ces items que nous avons identifiés comme liés à la notion de pression le sont effectivement, notamment dans les cas où le terme « pression » n'apparaît pas explicitement.

Notons qu'au début de ce travail doctoral, en 2016, la notion de pression apparaissait plus tôt et plus clairement dans les programmes officiels. Au collège était définie la grandeur physique pression comme le résultat de la mesure effectuée avec un manomètre. On trouvait aussi en seconde générale ce qui relève désormais du programme de spécialité de première. La portée de notre travail était donc potentiellement plus grande que ce à quoi elle est désormais réduite si l'on prétend contribuer à améliorer l'enseignement de notions prévues par les institutions.

1.2 Type de recherche

La relation entre les contenus d'enseignements liés à la pression et les apprenant·e·s est un sujet qui a déjà été bien étudié en didactique, comme nous l'exposerons dans la revue de littérature au chapitre 2. Bien que de nombreuses autres recherches sur cet axe pourraient encore être envisagées, nous avons fait le choix de conduire une recherche majoritairement portée sur l'interaction entre le contenu conceptuel visé, à savoir la pression, et les enseignant·e·s. Tout d'abord nous avons conduit une enquête empirique inédite à propos de la compréhension que les enseignant·e· ont eux mêmes de quelques situations liées à la pression. Dans un second temps, et c'est le cœur de ce travail doctoral, nous avons cherché des solutions pour l'enseignement de phénomènes dont la littérature montre qu'ils sont source de difficultés pour les élèves.

2 Méthodologie générale

2.1 Recours à l'histoire des sciences

Parmi les différents outils et *media* mobilisables pour améliorer l'enseignement des phénomènes et concepts scientifiques, nous avons fait un choix en faveur de l'histoire des sciences, en dépit du décalage indéniable entre la science qui est enseignée et la science telle qu'elle s'est faite (Hulin, 1984). Nous pensons qu'un recours éclairé et raisonné à l'histoire des sciences préserve des écueils régulièrement évoqués dans la littérature : risques de complexifier le propos, de faire retenir les idées fausses aux élèves, de s'éloigner des objectifs du programme, ou encore de faire de l'histoire des sciences « naïve » (Guedj & al., 2007 ; de Hosson & Schneeberger, 2011). Bien que l'efficacité du recours à l'histoire des sciences ne soit pas admise unanimement, l'encouragement institutionnel impose presque de voir dans un tel recours le plus de bénéfices possibles. Et ceux-ci sont nombreux, pour les élèves bien entendu, mais aussi pour les enseignant·e·s qui,

rappelons-le, constituent le pôle central autour duquel s'articule notre recherche.

Ainsi, acculturer les enseignant·e·s à l'histoire des sciences leur permettrait premièrement d'affiner leur compréhension des concepts de base (Hulin, 1984 ; Borghi & al., 1993), deuxièmement d'anticiper les difficultés potentielles de leurs élèves ou étudiant·e·s sur un sujet donné (de Hosson & Caillarec, 2009 ; de Hosson & Schneeberger, 2011), et troisièmement d'inspirer leur enseignement (Brunold, 1958 ; de Hosson & Décamp, 2015), notamment en trouvant des leviers pour surmonter les difficultés supposées ou avérées des élèves.

À ces trois arguments en faveur de l'usage de l'histoire des sciences par les enseignant·e·s s'ajoutent ceux qu'un tel recours promet pour les élèves eux-mêmes. En se gardant de proposer une histoire récapitulacionniste n'éclairant que les génies (Beaufils & Maurines, 2011) et éludant une trop grande part des cheminements (Brunold, 1958), les élèves peuvent percevoir le discours scientifique comme une construction humaine (Guedj, 2005), favorisant ainsi leur motivation et améliorant l'image qu'ils ont de la science. Au prix d'un minimum d'authenticité historique on peut aussi y voir l'occasion de fournir aux élèves quelques repères culturels (Audigier & Fillon, 1991). Enfin, et ce dernier argument rejoint celui que nous avons évoqué plus haut, les élèves pourraient être les bénéficiaires directs des leviers didactiques dont fourmille l'histoire des sciences.

2.2 Cadre théorique et problématique

Notre volonté de mettre à profit l'histoire des sciences dans cette élaboration de solutions pour l'enseignement des phénomènes liés à la pression n'est pas inédite. A de nombreux égards notre recherche se structure conformément au cadre théorique de la « reconstruction didactique » élaboré par de Hosson (2011) et dont se réclament de récentes recherches en physique (de Hosson & Décamp, 2011), en chimie (Canac & Kermen, 2018) ou encore en sciences de la vie et de la Terre (Bosdeveix, 2016 ; Pelé, 2023) : « Nous définissons donc une reconstruction didactique comme une séquence d'enseignement conçue sur la base d'informations historiques explicites et se donnant pour but l'apprentissage d'un concept ou d'une loi physique. » (de Hosson, 2011, p.34)

L'élaboration d'une séquence d'enseignement dans le cadre de la reconstruction didactique est ainsi fondée sur une lecture orientée de l'histoire des sciences, dont de Hosson (2011) formule ainsi les caractéristiques :

Dans cette perspective, nous admettrons qu'il existe un « programme » didactique de reconstruction historique. Selon ce programme, l'exploration historique conduite par le didacticien obéit à un « principe de lecture déterminé » d'une part par l'analyse du savoir à enseigner, d'autre part par l'analyse des difficultés des élèves (enquête psycho-cognitive). (*ibid.*)

En proposant nous-même une reconstruction historique du concept de pression éclairée par une analyse de contenu à propos de ce qu'est la pression en physique, et d'une enquête empirique recensant les difficultés des élèves à ce sujet, nous nous rapprochons du programme de recherche prévu dans le cadre théorique de la reconstruction didactique.

Nous prenons toutefois quelques distances avec ce dernier, notamment à l'endroit de la reconstruction didactique à proprement parler. En effet, nous n'allons pas jusqu'à l'élaboration d'une séquence d'enseignement mais nous nous arrêtons à l'élaboration d'une ressource pour l'enseignement, ressource que les enseignant·e·s doivent s'approprier et transformer pour enseigner. Ce choix de proposer une ressource intermédiaire entre la reconstruction historique et la séance « prête à l'emploi » tient à deux préoccupations. La première est de laisser aux enseignant·e·s la liberté de sélectionner les éléments historiques qu'ils et elles trouvent dignes d'intérêt parmi ceux, nombreux, que notre reconstruction historique met en lumière. La seconde est d'évaluer le rapport des enseignant·e·s à ce type de document d'accompagnement. Cette évaluation constitue l'objet du dernier chapitre de ce manuscrit.

En dépit de cette proposition moins aboutie qu'une séance complète d'enseignement, nous avons pris une liberté supplémentaire vis-à-vis du cadre originel de la reconstruction didactique en allant cette fois-ci plus loin que ce dernier en ce qui concerne la nature des objectifs visés par notre ressource : en intégrant à notre proposition de nombreux objectifs d'enseignement ne se limitant pas à des contenus disciplinaires, notamment d'ordre épistémologique et culturel, nous situons notre travail en marge de la majorité des travaux visant à fonder une ingénierie didactique sur l'histoire des sciences.

Malgré ces écarts, et bien que ne consistant pas exactement en l'élaboration et l'évaluation d'une séquence d'enseignement « prête à l'emploi » dont les objectifs seraient uniquement conceptuels, nous désignons tout de même par l'appellation « reconstruction didactique » le travail que nous présentons dans ce manuscrit, l'élaboration et l'évaluation d'une ressource pour les enseignants ne trahissant pas, il nous semble, l'esprit dans lequel le cadre a été élaboré au plan méthodologique.

| |
|---|
| En résumé, l'objectif général de ce travail doctoral est de proposer aux enseignant·e·s une ressource fondée sur l'histoire des sciences pour enrichir leur palette d'action en matière d'enseignement des phénomènes liés à la pression. |
|---|

3 Organisation du manuscrit

Ce manuscrit tout comme la recherche dont il rend compte est ainsi composé de deux parties. La seconde contient la reconstruction didactique, à savoir l'élaboration (chapitre 5) et l'évaluation (chapitre 6) d'une ressource fondée sur l'histoire des sciences pour l'enseignement des phénomènes liés à la pression. La première comporte l'ensemble des enquêtes préliminaires

sur lesquelles se fonde cette reconstruction didactique : une analyse conceptuelle de ce qu'est la pression (chapitre 1), un état de l'art à propos des difficultés des élèves et étudiant·e·s en matière de pression (chapitre 2), une reconstruction historique du concept de pression au milieu du XVII^e siècle (chapitre 3), et enfin une enquête supplémentaire menée auprès des enseignant·e·s et évaluant leur propre compréhension de quelques situations liées à la pression (chapitre 4).

Références de l'introduction générale

- Audigier, F., & Fillon, P. (1991). *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques—Une approche pluridisciplinaire*. Institut National de Recherche Pédagogique - INRP , Didactiques des Disciplines.
- Borghi, L., De Ambrosis, A., Falomo, L., & Mascheretti, P. (1993). Environnements multimédias pour l'étude de la physique. *Didaskalia*, 2, 49-59.
- Bosdeveix, R. (2016). *Entre classifications fonctionnelle et phylogénétique : Le groupe des végétaux. Une reconstruction didactique basée sur l'histoire des sciences dans le cadre de la formation des enseignants de sciences de la vie et de la Terre*. [Thèse de doctorat : Paris Diderot]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01372907/document>
- Brunold, C. (1958). Rôle de l'Histoire dans l'enseignement des Sciences physiques. *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, 11(2), 97-107. <https://doi.org/10.3406/rhs.1958.4392>
- Canac, S., & Kermen, I. (2018). *Conception d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège*. IREM de Paris.. <https://hal.science/hal-02111659>
- France. Ministère de l'éducation nationale. BOEN spécial n°1 22 janvier 2019.
- France. Ministère de l'éducation nationale. BOEN spécial n°8 25 janvier 2019.
- France. Ministère de l'éducation nationale. BOEN spécial n°31 30 juillet 2020.
- de Hosson, C. (2011). L'histoire des sciences : Un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique [HDR : Paris Diderot]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00655594/document>
- de Hosson, C., & Caillarec, B. (2009). L'expérience de Blaise Pascal au Puy de Dôme : Analyse des difficultés des étudiants de premier cycle universitaire et confrontation historique. *Didaskalia*, 34, 105-130.
- de Hosson, C., & Décamp, N. (2011). La procédure de la mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Eratosthène » : Un support pour une reconstruction didactique. *Grand*

N, 87, 77-91.

de Hosson, C., & Décamp, N. (2015). Une reconstruction historique du concept macroscopique de pression atmosphérique pour la préparation d'un dossier documentaire utilisable en classe de sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 109(978), 1369-1393.

de Hosson, C., & Schneeberger, P. (2011). Orientations récentes du dialogue entre recherche en didactique et histoire des sciences. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, 9-20.

Guedj, M. (2005). Utiliser des textes historiques dans l'enseignement des sciences physique en classe de seconde des lycée français : Compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, 26, 75-95.

Guedj, M., Laube, S., & Savaton, P. (2007). Vers une didactique de l'histoire des sciences. *Congrès International d'Actualité de la Recherche en Education et en Formation*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01290346>

Hulin, N. (1984). L'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique : Aperçu historique. *Revue française de pédagogie*, 66, 15-28.

Maurines, L., & Beaufils, D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : L'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, 271-305.

Pelé, M. (2023). *Pratiques enseignantes et problématisation de la circulation sanguine via l'histoire des sciences* [Thèse de doctorat : Université de Paris]. En cours de publication.

Première partie

Enquêtes préliminaires

Introduction des enquêtes préliminaires

Dans cette première partie nous exposons les travaux préliminaires qui ont précédé l'élaboration et l'évaluation de la ressource que nous présentons dans la seconde partie. Bien que la reconstruction didactique constitue l'objectif principal de notre recherche, les enquêtes préliminaires sur lesquelles elle s'appuie n'en sont pas moins primordiales. La place que ces dernières occupent dans le manuscrit trahit d'ailleurs la prévalence de ces efforts de synthèse et d'apports inédits vis-à-vis du reste du travail doctoral dont nous rendons compte.

La première enquête est d'ordre conceptuel : elle vise à circonscrire les contenus d'enseignements qui pourraient se référer à la notion de pression. La synthèse que nous proposons dans ce chapitre tente d'organiser dans un ensemble cohérent de nombreux principes et phénomènes communément rattachés à la notion de pression à différentes échelles de description (microscopique, mésoscopique et macroscopique) et dans différents domaines de la physique (hydrodynamique, mécanique des milieux continus, thermodynamique). Nous y montrons différentes acceptations de la pression cohérentes entre elles, dont assez peu d'aspects se rapportent finalement à des contenus visés par les programmes scolaires des niveaux primaires et secondaires.

La seconde enquête pourrait être qualifiée de « psycho-cognitive » : elle consiste en une revue ordonnée des différentes recherches déjà conduites à propos des difficultés rencontrées par les élèves, étudiant·e·s, et parfois enseignant·e·s en matière de compréhension des phénomènes liés à la pression. Les résultats de ces enquêtes empiriques sont nombreux, et avec eux c'est la recherche de solutions pour l'enseignement qui prend tout son sens. La fin du chapitre est d'ailleurs consacrée à une présentation succincte des propositions déjà effectuées en ce sens. La synthèse de notre enquête révèle que de nombreuses difficultés demeurent sans solution, ce qui légitime l'objectif que nous nous sommes fixé en envisageant une reconstruction didactique autour du concept de pression.

La troisième enquête, fondée sur les deux premières, est de nature historique : sur la base des difficultés recensées dans la deuxième enquête à propos de contenus clarifiés lors de la première enquête, nous proposons une reconstruction historique sur laquelle s'appuiera la reconstruction didactique présentée dans la seconde partie de ce manuscrit. L'émergence du concept de « pression » est longue et complexe, à l'image des différents aspects recouverts par la notion, tels qu'exposés dans l'enquête conceptuelle. La porte d'entrée qui nous a semblée naturelle pour entamer cette enquête historique fut le milieu du XVII^e siècle, que l'on peut considérer comme un tournant décisif dans la construction du concept de pression. Pensant initialement parcourir chronologiquement l'évolution des idées sur plus d'un siècle, nous avons finalement préféré explorer plus en profondeur les décennies couvrant le milieu du XVII^e siècle. En effet, cette période est le théâtre d'une controverse majeure autour des questions du vide

et de la pesanteur de l'air, au cours de laquelle s'opposent des arguments et contre-arguments dont l'exploitation promet d'être féconde dans la perspective de la reconstruction didactique à venir.

Enfin, la quatrième et dernière enquête est empirique : il s'agit d'un questionnaire diffusé auprès d'enseignant·e·s et visant à évaluer leur compréhension de deux situations impliquant un liquide au repos. L'une de ces situations est le dispositif de Torricelli, qui est présenté dans l'enquête historique. L'autre situation n'est pas issue directement de l'histoire des sciences, mais l'hypothèse générale qui sous-tend cette recherche l'est : la rétrospective historique mettant en lumière une approche très mécaniste des phénomènes liés aux liquides au repos, nous nous interrogeons à propos de l'éventuelle plus-value d'une telle approche cumulée à la représentation hydrostatique contemporaine¹. Nous mettons en évidence dans cette dernière enquête une corrélation entre compréhension des situations impliquant un liquide au repos, et leur appréhension par deux représentations cumulées. Les conclusions de l'enquête renforcent notre conviction en la pertinence du recours à l'histoire des sciences pour enseigner les phénomènes liés à la pression.

L'ordre de présentation de ces enquêtes préliminaires pourrait laisser penser qu'elles ont été menées successivement et indépendamment. Pourtant, ce n'est qu'*a posteriori* que les différents résultats ont pu être synthétisés indépendamment, chacune des enquêtes ayant été nourrie et inspirée par les avancées des autres.

1. Nous renvoyons au chapitre 4 de ce manuscrit pour une explicitation de ce que nous désignons comme « représentation mécaniste » et « représentation hydrostatique » des phénomènes étudiés en *hydrostatique* (ou *mécanique des fluides*).

Chapitre 1

Analyse de contenu

La pression à différents niveaux de
description

Contents

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 30 |
| 2 | Lois locales à l'échelle mésoscopique | 31 |
| 2.1 | Notion de particule de fluide | 31 |
| 2.1.1 | Définition | 31 |
| 2.1.2 | Propriétés | 31 |
| 2.2 | Champs de grandeurs cinématiques : description eulérienne | 32 |
| 2.2.1 | Champ de vitesse, lignes et tubes de courant | 32 |
| 2.2.2 | Champ d'accélération | 32 |
| 2.2.3 | Champ de taux de transformation | 33 |
| 2.3 | Dynamique d'une particule de fluide : description lagrangienne | 35 |
| 2.3.1 | Accélération lagrangienne d'une particule de fluide | 35 |
| 2.3.2 | Bilan des forces volumiques sur une particule de fluide | 36 |
| 2.3.3 | Bilan des forces surfaciques sur une particule de fluide | 37 |
| 2.3.4 | PFD appliqué à une particule de fluide : loi locale | 39 |
| 2.4 | Équations de bilan | 40 |
| 2.4.1 | Débit d'une grandeur physique | 40 |
| 2.4.2 | Conservation de la masse et équation de continuité | 41 |
| 2.4.3 | Conservation de la quantité de mouvement | 42 |
| 2.4.4 | Conservation de l'énergie | 43 |
| 3 | Lois phénoménologiques macroscopiques | 44 |
| 3.1 | Différents fluides et écoulements | 44 |
| 3.1.1 | Fluide newtonien ; écoulements laminaires et turbulents | 44 |
| 3.1.2 | Fluide et écoulement parfaits | 46 |
| 3.1.3 | Fluide et écoulement incompressibles | 46 |
| 3.1.4 | Écoulement stationnaire (ou permanent) | 47 |
| 3.1.5 | Écoulement homogène | 48 |
| 3.1.6 | Écoulements irrotationnel et potentiel | 48 |
| 3.2 | Conditions aux limites | 48 |
| 3.2.1 | Interface solide / fluide | 48 |
| 3.2.2 | Interface fluide / fluide | 50 |
| 3.3 | Relations de Bernoulli | 52 |
| 3.3.1 | Établissement de la relation générale | 52 |
| 3.3.2 | Simplification en régime stationnaire | 53 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.3 | Interprétation énergétique | 53 |
| 3.3.4 | Exemples d'applications en écoulement stationnaire | 54 |
| 3.4 | Fluides au repos | 57 |
| 3.4.1 | Pression thermodynamique | 58 |
| 3.4.2 | Fluide au repos dans un champ de pesanteur | 58 |
| 4 | Interprétations à l'échelle microscopique | 62 |
| 4.1 | Modèle microscopique des fluides | 62 |
| 4.1.1 | Généralités | 62 |
| 4.1.2 | Transferts de quantité de mouvement | 63 |
| 4.1.3 | Interactions intermoléculaires | 65 |
| 4.1.4 | Bilan : pression d'un fluide | 66 |
| 4.2 | Application aux gaz | 67 |
| 4.2.1 | Hypothèses de la théorie cinétique des gaz parfaits | 67 |
| 4.2.2 | Équation d'état des gaz parfaits | 68 |
| 4.2.3 | Gaz réels : équation d'état de Van der Waals | 69 |
| 4.3 | Application aux liquides | 70 |
| 4.3.1 | Variation de pression dans un champ de pesanteur uniforme . | 71 |
| 4.3.2 | Variation de vitesse et de pression dans un écoulement | 71 |
| 5 | Conclusion | 72 |
| 5.1 | Synthèse | 72 |
| 5.2 | Autres pressions | 72 |
| 5.3 | La pression dans les programmes scolaires | 73 |
| | Références du chapitre 1 | 74 |

1 Introduction

La pression est-elle autre chose que le résultat de la mesure par un manomètre ? Dans le dictionnaire de physique (Taillet & al., 2009), la pression est définie différemment selon le champ considéré. En mécanique, la pression est définie comme une force par unité d'aire s'exerçant normalement sur une surface. En mécanique des fluides, cette même définition est élargie aux surfaces fictives permettant de considérer la pression comme une propriété interne définie en tout point d'un fluide, y compris loin de toute surface matérielle. Sans forme apparente de lien avec la définition précédente, il arrive que dans ce même champ disciplinaire la pression soit définie proportionnellement à la trace du tenseur des contraintes. En thermodynamique et en physique statistique enfin, la pression est la variable d'état conjuguée du volume et est définie relativement à une grandeur d'état : l'énergie interne, l'entropie, l'énergie libre ou encore le grand potentiel selon l'ensemble statistique considéré. Au niveau microscopique la théorie cinétique des gaz interprète la pression thermodynamique en termes de force et de transfert de quantité de mouvement, ce qui semble faire un pont entre la mécanique et la thermodynamique (et donc la physique statistique). Outre ces définitions de la pression en général, ce même dictionnaire liste et définit différentes pressions spécifiques : pression d'arrêt, pression atmosphérique standard, pression de dégénérescence, pression dynamique, pression électrostatique, pression magnétique, pression négative, pression normale, pression osmotique, pression partielle, pression de Poincaré, pression de radiation, pression standard et pression de vapeur saturante.

Le présent chapitre se propose d'organiser dans un ensemble cohérent un maximum de ces approches du concept de pression en ce qui concerne les fluides : quels rapprochements et quelles divergences se cachent derrière cette variabilité de qualificatifs et de définitions ? Pour y répondre nous nous sommes appuyée sur des ouvrages majeurs dans les différents domaines concernés : Petit et al. (2012) et Landau et Lifchitz (1998) en mécanique des fluides, Diu et al. (2007) en thermodynamique, Hermann (2003) et Diu et al. (1996) en physique statique, ainsi que Calecki (2006) en physique des milieux continus. Nous avons par ailleurs enrichi notre approche par la lecture de l'ouvrage généraliste de Feynman (1999) ainsi que du manuel de calcul tensoriel de Hladik (1999).

Le niveau de description que les physiciens qualifient de mésoscopique¹ nous semble fondamental : on peut y donner une définition assez générale de la pression dans les fluides qui s'accorde à la fois avec les mesures et observations macroscopiques mais aussi avec les interprétations microscopiques des théories cinétiques et statistiques. Nous présenterons ainsi cette synthèse en passant d'une échelle de description à l'autre : d'abord mésoscopique, puis macroscopique, et enfin microscopique.

1. Ce niveau est qualifié de macroscopique par les mathématiciens qui travaillent sur ces questions.

2 Lois locales à l'échelle mésoscopique

Ce type d'étude, qui est l'objet exclusivement des ouvrages de mécanique des fluides et des milieux continus, se place à une échelle intermédiaire entre :

- l'échelle microscopique, dans laquelle le milieu est traité comme un ensemble d'atomes ou de molécules,
- l'échelle macroscopique dans laquelle le milieu est cette fois considéré comme étant continu.

Une telle étude n'a donc de sens que si le milieu étudié peut effectivement être considéré comme étant continu lorsqu'il est observé à l'échelle humaine. En pratique, c'est le cas pour les solides, les liquides et les gaz tant que ces derniers sont suffisamment denses.

La notion au cœur de cette description est celle de *particule matérielle*, aussi appelée *particule de fluide* dans le cas où le milieu étudié est un liquide ou un gaz. Étudier le comportement d'un fluide à l'échelle mésoscopique consiste ainsi à définir les grandeurs cinétiques et dynamiques associées aux particules matérielles composant le fluide étudié, et à caractériser leurs variations dans le temps et dans l'espace.

2.1 Notion de particule de fluide

2.1.1 Définition

Supposons que le fluide étudié puisse être décomposé en masses élémentaires dont les dimensions vérifient les caractéristiques suivantes :

- elles sont très petites devant les dimensions du système, de telle sorte à ce que l'on puisse considérer que toutes les molécules composant une même masse élémentaire aient les mêmes propriétés¹ ;
- elles sont très grandes devant le libre parcours moyen des molécules², de telle sorte à ce qu'une masse élémentaire soit constituée d'un nombre très grand et constant de molécules.

Si cette décomposition est possible, ce qui sera le cas pour tous les systèmes que nous considérerons par la suite, nous nommons *particule de fluide* les masses élémentaires ainsi définies, et nous en faisons notre objet d'étude pour cette partie.

2.1.2 Propriétés

Ainsi définie, une *particule de fluide* présente les propriétés suivantes :

1. sa masse dm est constante ;

1. Ce ne serait pas le cas si on considérait des masses élémentaires trop grandes au point que par exemple la densité ou la température n'y soient pas homogènes.

2. Distance moyenne parcourue par une molécule entre deux chocs successifs (voir section 3 de ce chapitre).

2. elle est composée d'un nombre N très grand de molécules et peut ainsi être considérée comme un « système thermodynamique » dans le sens où elle « comporte un nombre N de constituants microscopiques suffisamment grand pour que soient négligeables les effets de leur mouvement aléatoire, y compris les fluctuations qu'il engendre » (Diu & al., 2007, p.4);
3. ses propriétés (en particulier sa masse volumique ρ) y sont homogènes.
4. elle occupe un volume infiniment petit devant les dimensions du système. On notera ce volume $d\Omega$; il est variable.

2.2 Champs de grandeurs cinématiques : description eulérienne

Adopter le point de vue eulérien pour décrire un fluide consiste à se placer en tant qu'observateur extérieur d'un point particulier du système et regarder, à chaque instant, les caractéristiques de la particule de fluide qui s'y trouve. La donnée de base de la description eulérienne est ainsi le champ de vitesse, qui dépend a priori du temps. De la connaissance de ce champ d'autres champs eulériens peuvent être déduits : accélération, quantité de mouvement, énergie cinétique, moment cinétique, taux de déformation etc.

2.2.1 Champ de vitesse, lignes et tubes de courant

À chaque instant t , le *champ de vitesse eulérien* \mathbf{v} donne la vitesse de toutes les particules de fluide qui sont centrées aux différents points \mathbf{r} du système. Ces vitesses dépendent à la fois du temps et de la position, et on note :

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$$

Les *lignes de courant* à l'instant t sont les lignes qui sont, en tout point par où elles passent, tangentes au vecteur vitesse en ces points. *A priori* la forme des lignes de courant évolue donc avec le temps.

Un tube de courant est une surface définie à une date t donnée, générée par l'ensemble des lignes de courant s'appuyant à la date considérée sur une courbe fermée.

2.2.2 Champ d'accélération

Une particule de fluide se trouvant, à l'instant t , à la position \mathbf{r} est donc animée d'une vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ qui la conduira au terme d'une durée infinitésimale δt au point de position $\mathbf{r} + \delta\mathbf{r}$ tel que :

$$\delta\mathbf{r} = \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)\delta t \quad \text{au premier ordre}$$

A l'issue de ce déplacement la particule de fluide a une nouvelle vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{r} + \delta\mathbf{r}, t + \delta t)$. L'accélération de la particule de fluide est donc, selon un développement au premier ordre dans

un repère cartésien :

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}, t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\delta x}{\delta t} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\delta y}{\delta t} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\delta z}{\delta t} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z}$$

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z}$$

Soit, de façon plus générale, la définition du *champ d'accélération eulérien* :

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}) \mathbf{v} \quad (1.1)$$

Remarque : Le champ d'accélération eulérien correspond à la dérivée *en suivant le mouvement* du champ de vitesse eulérien :

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

De façon générale, on définit la *dérivée en suivant le mouvement* ou *dérivée particulaire* d'une grandeur (scalaire ou vectorielle) eulérienne A ainsi :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}) A \quad (1.2)$$

2.2.3 Champ de taux de transformation

Une particule de fluide centrée sur la position \mathbf{r} à l'instant t est entourée, dans son voisinage immédiat, par d'autres particules de fluide susceptibles de se déplacer relativement à elle. Si un *gradient de vitesse* existe à la position \mathbf{r} à l'instant t , la particule de fluide s'y trouvant subit au cours d'une durée infinitésimale δt des transformations dues à son mouvement relatif par rapport aux autres particules de fluide qui l'entourent. Ces transformations s'ajoutent à son déplacement éventuel.

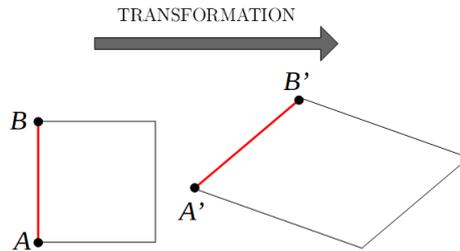


FIGURE 1.1 – Transformation d'une particule de fluide pendant δt

Étudions la transformation de l'arrête \mathbf{AB} d'une particule de fluide centrée sur la position \mathbf{r} à l'instant t , entre les instants t et $t + \delta t$:

$$\mathbf{A'B'} - \mathbf{AB} = \mathbf{BB'} - \mathbf{AA'} = [\mathbf{v}(B) - \mathbf{v}(A)] \delta t = \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} dx + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} dy + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} dz \right] \delta t$$

La transformation $\delta(\mathbf{AB})$ de l'arrête \mathbf{AB} pendant la durée δt s'écrit donc :

$$\delta(\mathbf{AB}) = \overline{\overline{\mathbf{T}}} d\mathbf{r} \delta t \quad (1.3)$$

où $\overline{\overline{\mathbf{T}}}$ est le tenseur *taux de transformation* dont les éléments sont donnés dans un repère cartésien par :

$$T_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (1.4)$$

On peut décomposer le tenseur pour mieux faire apparaître et discuter les effets de chaque partie du gradient de vitesse :

$$T_{ij} = \underbrace{\frac{\text{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij}}_{\text{dilatation}} + \overbrace{\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right]}^{\text{cisaillement}} - \frac{\text{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij} + \underbrace{\left(\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \right)}_{\text{rotation}} \quad (1.5)$$

$$T_{ij} = \underbrace{\left(\frac{\text{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij} \right)}_{\text{dilatation}} + \underbrace{\left(\left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\text{div}(\mathbf{v})}{3} \right] \delta_{ij} \right)}_{\text{élongation}} + \overbrace{\left(\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)}^{\text{cisaillement pur}} + \underbrace{\left(\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \right)}_{\text{rotation}} \quad (1.6)$$

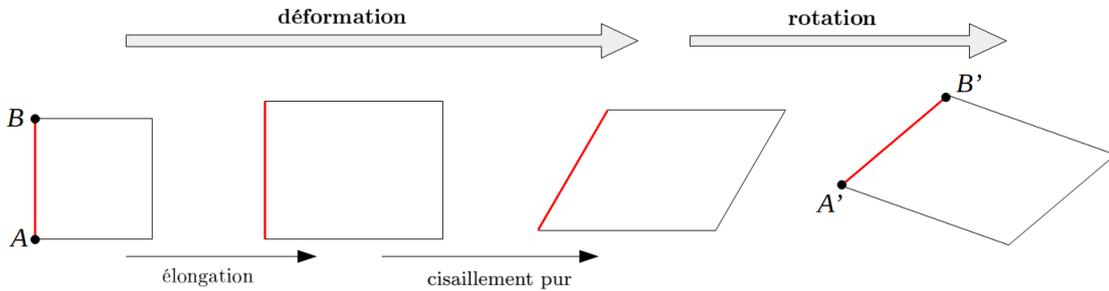


FIGURE 1.2 – Décomposition de la transformation d'une particule de fluide pendant δt

Ainsi, la transformation de la particule de fluide centrée sur la position \mathbf{r} à l'instant t se compose :

- **d'une déformation** caractérisée par les trois premiers termes de la décomposition (1.6). On définit d'ailleurs souvent le tenseur *taux des déformations* $\overline{\overline{\mathbf{D}}}$, qui est symétrique et dont les éléments sont :

$$d_{ij} = \left(\frac{\text{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij} \right) + \left(\left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\text{div}(\mathbf{v})}{3} \right] \delta_{ij} \right) + \left(\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (1.7)$$

- les éléments diagonaux du tenseur des déformations sont associés à l'*élongation* des arrêtes (l'action de cette partie du tenseur sur l'arrête \mathbf{AB} crée une modification

$\delta(\mathbf{AB})$ colinéaire à \mathbf{AB}); par ailleurs la trace du tenseur taux des déformations est égale à la divergence du champ de vitesse $\text{div}(\mathbf{v})$. Or la divergence du champ de vitesse correspond au taux de variation relative de volume de la particule de fluide. En effet :

$$\frac{\delta(d\Omega)}{d\Omega\delta t} = \frac{\delta(dx dy dz)}{d\Omega\delta t} = \sum_i \frac{\delta(dx_i) dx_j dx_k}{d\Omega\delta t} = \sum_i \frac{\delta(dx_i)}{dx_i \delta t} = \sum_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \text{div}(\mathbf{v})$$

Ceci justifie la décomposition de l'élongation en deux termes différents (1.6)

- les éléments non - diagonaux du tenseur des déformations sont associés à une rotation des arêtes avec des angles opposés ce qui entraîne une modification de l'angle entre les arêtes. Cette déformation est appelée *cisaillement*.

- **d'une rotation** caractérisée par le dernier terme de la décomposition (1.6). Le tenseur taux de rotation \bar{r} est anti-symétrique, et n'est associé à aucune modification de l'angle entre les arêtes de la particule de fluide; ses éléments sont :

$$r_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (1.8)$$

Ainsi en description eulérienne, connaissant le champ de vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ on connaît à tout instant t les propriétés d'une particule de fluide centrée sur n'importe quelle position \mathbf{r} du milieu. Il s'agit donc d'une description complète qui ne s'intéresse toutefois qu'aux grandeurs cinématiques, sans les mettre en lien avec les forces à l'origine des champs d'accélération ou des taux de transformation que nous venons de définir. Une étude dynamique du fluide est nécessaire pour établir les équations du mouvement du fluide. Une telle étude nécessite qu'on adopte un point de vue plus classique en mécanique : le point de vue lagrangien.

2.3 Dynamique d'une particule de fluide : description lagrangienne

Adopter le point de vue lagrangien pour décrire un fluide consiste à se placer comme observateur d'une particule de fluide située à la position \mathbf{r}_0 à un instant de référence et regarder, à chaque instant, le déplacement et les transformations de cette particule de fluide. La donnée de base de la description lagrangienne est ainsi l'ensemble des fonctions donnant la position $\mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t)$ de chaque particule de fluide composant le milieu en fonction du temps.

2.3.1 Accélération lagrangienne d'une particule de fluide

Les deux façons de décrire le fluide, à savoir eulérienne et lagrangienne, doivent être cohérentes. Ainsi une particule, située à la position \mathbf{r}_0 à un instant de référence, et occupant la position $\mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t)$ à un instant t est alors animée à cet instant t d'une vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{r}_0, t)$ qui n'est

autre que la valeur du champ de vitesse eulérien au point $\mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t)$ à l'instant t :

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}_0, t) = \mathbf{v}(\mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t), t)$$

Par conséquent l'accélération de la particule de fluide située à la position \mathbf{r}_0 à un instant de référence est, par définition, égale à :

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}_0, t) = \left. \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{r}_0, t)}{\partial t} \right|_{\mathbf{r}_0} = \left. \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t), t)}{\partial t} \right|_{\mathbf{r}_0}$$

Allégeons l'écriture et gardons désormais à l'esprit que la position, la vitesse et l'accélération lagrangiennes dépendent de \mathbf{r}_0 , qui est fixé si on s'intéresse toujours à une seule et même particule. Notons alors sa position $\mathbf{r}_p(t) = (x_p(t); y_p(t); z_p(t))$, sa vitesse $\mathbf{v}_p(t)$ et son accélération $\mathbf{a}_p(t)$ à l'instant t :

$$\mathbf{a}_p(t) = \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{r}_p, t)}{\partial t}$$

Explicitons l'accélération lagrangienne par un développement au premier ordre dans un repère cartésien en notant $\mathbf{v}(\mathbf{r}_p, t) = \mathbf{v}$ pour alléger encore la notation :

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_p(t) &= \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{dx_p}{dt} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{dy_p}{dt} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{dz_p}{dt} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \\ \Rightarrow \mathbf{a}_p(t) &= \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + v_{px} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + v_{py} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + v_{pz} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \\ \Rightarrow \mathbf{a}_p(t) &= \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + v_x(\mathbf{r}_p) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + v_y(\mathbf{r}_p) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + v_z(\mathbf{r}_p) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \end{aligned}$$

Ce que l'on peut généraliser par l'expression suivante, qui égalise l'accélération lagrangienne de la particule de fluide à l'accélération eulérienne à la position \mathbf{r}_p sur laquelle est centrée la particule à l'instant t :

$$\mathbf{a}_p(t) = \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{r}_p, t)}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}) \mathbf{v}(\mathbf{r}_p, t) \quad (1.9)$$

$$\text{soit : } \quad \mathbf{a}_p(t) = \mathbf{a}(\mathbf{r}_p, t) \quad (1.10)$$

Cette relation exprime l'action de l'écoulement (incarné par le champ de vitesse eulérien \mathbf{v}) sur la particule de fluide dont on suit le mouvement et qui participe au-dit écoulement.

2.3.2 Bilan des forces volumiques sur une particule de fluide

Des forces extérieures peuvent s'appliquer sur l'ensemble du fluide et concerner chacune des particules qui le composent. L'exemple le plus récurrent est le cas des fluides placés dans un champ de pesanteur, et dans lequel chaque particule est donc soumise à son propre poids. Si on note \mathbf{f}_v la résultante de ces forces rapportée à une unité de volume, alors la force corres-

pondante qui s'exerce sur la particule de fluide est :

$$\mathbf{F}_v = \mathbf{f}_v \, d\Omega \quad (1.11)$$

2.3.3 Bilan des forces surfaciques sur une particule de fluide

Une particule de fluide étant entourée d'autres particules de fluide, elle subit de la part de cet environnement des forces supplémentaires qui s'exercent au niveau de ses surfaces. L'ensemble des forces surfaciques s'exerçant en un point d'un fluide est regroupé dans un tenseur appelé *tenseur des contraintes surfaciques* ; on notera ce tenseur $\overline{\overline{\sigma}}$ dont les éléments σ_{ij} sont homogènes à des forces par unité de surface (N.m^{-2}).

En notant $\boldsymbol{\sigma}_{x_i}$ la contrainte s'exerçant sur la surface orientée selon \mathbf{e}_i ¹ ($\boldsymbol{\sigma}_{x_i} = \overline{\overline{\sigma}} \mathbf{e}_i$), la résultante des forces s'exerçant sur l'ensemble de la surface enveloppant la particule de fluide s'écrit dans un repère cartésien :

$$\mathbf{F}_s = \sum_i [\boldsymbol{\sigma}_{x_i}(x_i + dx_i) - \boldsymbol{\sigma}_{x_i}(x_i)] \, dx_j dx_k \quad (1.12)$$

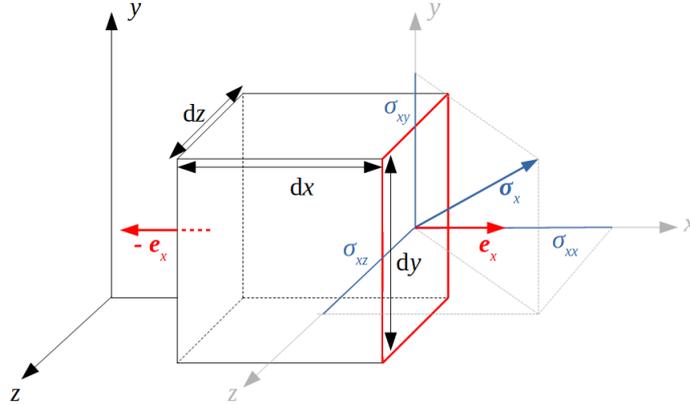


FIGURE 1.3 – Contraintes surfaciques s'exerçant sur la surface orientée selon \mathbf{e}_x

Un développement au premier ordre conduit à :

$$\mathbf{F}_s = \sum_i \left[\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_{x_i}}{\partial x_i} dx_i \right] dx_j dx_k = \sum_i \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_{x_i}}{\partial x_i} d\Omega \quad (1.13)$$

Ce qui peut s'écrire sous la forme condensée et plus générale suivante :

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{div}(\overline{\overline{\sigma}}) \, d\Omega \quad (1.14)$$

L'ensemble des forces s'exerçant sur la surface enveloppant la particule s'écrit comme une force

1. Par convention nous choisissons d'orienter vers l'extérieur les surfaces qui enveloppent la particule de fluide.

globale \mathbf{F}_s s'appliquant au volume $d\Omega$.

Le tenseur des contraintes surfaciques $\overline{\overline{\sigma}}$ correspond à la somme des deux contributions que nous allons maintenant expliciter :

$$\overline{\overline{\sigma}} = \overline{\overline{\sigma'}} + \overline{\overline{P}} \quad (1.15)$$

- une que l'on peut attribuer au mouvement relatif des particules de fluides environnantes par rapport à la particule de fluide étudiée : il s'agit de la composante dynamique $\overline{\overline{\sigma'}}$ du tenseur des contraintes $\overline{\overline{\sigma}}$.
- une indépendante du mouvement relatif des particules de fluide les unes par rapport aux autres et que l'on peut attribuer à la simple présence d'un environnement non vide autour de la particule de fluide étudiée : il s'agit de la composante statique $\overline{\overline{P}}$ du tenseur des contraintes $\overline{\overline{\sigma}}$

2.3.3.1 Composante dynamique : tenseur des contraintes visqueuses

Si l'environnement immédiat d'une particule de fluide est composé d'autres particules de fluide en mouvement par rapport à elle, des forces surfaciques dites *visqueuses* sont à considérer. Ces *contraintes* visqueuses (force par unité de surface) sont à l'origine des transformations (déformation et rotation) évoquées dans la section précédente.

On définit ainsi un *tenseur des contraintes visqueuses* que l'on note $\overline{\overline{\sigma'}}$ et dont l'élément σ'_{ij} représente la force exercée dans la direction \mathbf{e}_i sur l'unité de surface orientée dans la direction \mathbf{e}_j .

Le tenseur des contraintes visqueuses est nécessairement symétrique : $\sigma'_{ij} = \sigma'_{ji}$. En effet, si un couple s'exerce dans la direction \mathbf{e}_x sur les faces horizontales (orientées dans la direction \mathbf{e}_y), nécessairement les faces latérales orientées dans la direction \mathbf{e}_y subissent un couple opposé mais de même norme : la face de gauche est comme tirée vers le haut tandis que la face de droite l'est vers le bas.

2.3.3.2 Composante statique : tenseur des contraintes de pression

Par ailleurs, une particule de fluide est entourée d'autres particules qui, par leur simple présence et indépendamment de leur vitesse, interagissent avec celle que nous étudions ici. En effet, même si tout le fluide est immobile (ou en mouvement d'ensemble rectiligne et uniforme, ce qui revient au même en terme de mouvement relatif), la particule de fluide étudiée n'est par exemple pas comme dans le vide.

Cette interaction « statique » entre une particule de fluide et son environnement immédiat peut s'écrire sous la forme d'un tenseur diagonal $\overline{\overline{P}}$ appelé *tenseur des contraintes de pression* dont tous les termes sont identiques pour un milieu isotrope. Cette contrainte étant définie comme indépendante de la vitesse, elle ne peut induire ni déformation ni rotation de la particule de

fluide puisque ces dernières transformations sont toutes liées à la vitesse, comme nous l'avons montré à la sous-section précédente. Par convention, les éléments de ce tenseur des contraintes de pression s'écrivent :

$$P_{ij} = -p \delta_{ij} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \delta_{ij} = 1 & \text{si } i = j \\ \delta_{ij} = 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (1.16)$$

où p est alors appelé *pression statique* et est définie comme l'opposé du tiers de la trace du tenseur des contraintes de pression :

$$p = -\frac{1}{3} \text{tr}(\overline{\overline{P}}) \quad (1.17)$$

Le signe « - » est utilisé de manière conventionnelle car en général une particule de fluide subit de la part de son entourage immédiat (fluide ou paroi) une contrainte pressante vers l'intérieur ; dans ces nombreux cas la pression statique ainsi définie est positive. Il existe toutefois des situations où elle peut être négative, c'est-à-dire que la contrainte pressante s'exerçant sur la particule de fluide est dirigée vers l'extérieur de cette dernière, se traduisant par une action attractive.

2.3.3.3 Autre description : contraintes normales et tangentielles

Plutôt que de séparer le tenseur des contraintes surfacique $\overline{\overline{\sigma}}$ en une composante dynamique et une composante statique, on peut définir un tenseur de contraintes tangentielles (dont les éléments diagonaux sont nuls) et un tenseur diagonal des contraintes normales, associant la pression statique sus-définie mais aussi les contraintes visqueuses normales.

On introduit de cette façon une nouvelle pression nommée *pression isostatique*, définie comme le tiers de la trace du tenseur des contraintes :

$$p_{\text{iso}} = -\frac{1}{3} \text{tr}(\overline{\overline{\sigma}}) = p - \frac{1}{3} \text{tr}(\overline{\overline{\sigma}}') \quad (1.18)$$

2.3.4 PFD appliqué à une particule de fluide : loi locale

D'après le principe fondamental de la dynamique appliqué à la particule de fluide de masse constante dm :

$$\frac{d[\mathbf{v}_{\mathbf{p}} dm]}{dt} = dm \frac{d\mathbf{v}_{\mathbf{p}}}{dt} = \mathbf{a}_{\mathbf{p}} dm = \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_s \quad (1.19)$$

Développons avec les expressions de l'accélération lagrangienne de la particule (1.9) et des forces volumiques (1.11) et surfaciques (1.14) :

$$dm \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}) \mathbf{v} \right) = \mathbf{f}_v d\Omega + \mathbf{div}(\overline{\overline{\sigma}}) d\Omega \quad (1.20)$$

Soit, en définissant la masse volumique ρ comme le rapport de la masse dm de la particule de fluide par son volume $d\Omega$, et en développant le tenseur des contraintes $\overline{\overline{\sigma}}$ en ses

deux composantes (1.15) :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v} = \mathbf{f}_v + \mathbf{div}(\overline{\overline{\boldsymbol{\sigma}}}') - \mathbf{grad}(p) \quad (1.21)$$

Cette équation vectorielle du mouvement d'une particule de fluide est appelée *loi locale du mouvement d'un fluide*. Il s'agit d'une équation différentielle non linéaire dont les solutions sont des champs vectoriels $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$. Ces solutions lient ainsi la vitesse en tout point du fluide et à tout instant $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ aux propriétés du fluide telles que la masse volumique $\rho(\mathbf{r}, t)$, la pression statique $p(\mathbf{r}, t)$, la viscosité $\eta(\mathbf{r}, t)$ etc. Nous étudierons différentes solutions dans la seconde section.

2.4 Équations de bilan

Dans cette sous-section nous reprenons le point de vue eulérien en nous concentrant sur une région de l'espace. Isolons par la pensée un volume quelconque du fluide. Le volume choisi est fixé et sera noté \mathcal{V} , et il est limité par une surface fermée qui sera notée \mathcal{S} . Au fur et à mesure que le temps s'écoule des particules de fluide, chacune animée d'une vitesse propre \mathbf{v}_p , peuvent traverser la surface \mathcal{S} pour entrer ou sortir du volume. Au cours de ces échanges de particules de fluide entre le volume choisi et l'extérieur, de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique sont transférées, causant des variations globales sur le volume. C'est de ces bilans dont il est question dans cette sous-section.

2.4.1 Débit d'une grandeur physique

De façon générale on appelle débit d'une grandeur physique A la quantité de cette grandeur qui traverse une surface donnée par unité de temps. Comme la quantité dA de la grandeur physique A qui traverse une surface $d\mathbf{S}$ pendant une durée dt est transportée par la matière qui, à l'instant $t - dt$, est contenue dans un volume $\mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} dt$ et est animée d'une vitesse \mathbf{v} orientée vers la surface $d\mathbf{S}$, il vient :

$$dA = A_v \times \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} dt$$

où on a introduit A_v la grandeur volumique associée à A .

Le débit élémentaire de la grandeur physique A à travers une surface élémentaire $d\mathbf{S}$ s'exprime alors par :

$$dD_A = \frac{dA}{dt} = A_v \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} \quad \Longrightarrow \quad D_A = \iint_S A_v \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$$

Le débit de la grandeur physique A à travers une surface S s'écrit ainsi comme le flux d'un vecteur densité surfacique (ou densité de flux) $\mathbf{j} = A_v \mathbf{v}$ à travers cette surface.

2.4.2 Conservation de la masse et équation de continuité

La variation de la masse m contenue dans le volume \mathcal{V} ne peut être due qu'au débit résultant de masse, c'est-à-dire au bilan de la masse qui entre et qui sort du volume. Ce débit s'écrit par définition sous la forme d'un flux de vecteur densité de courant de masse $\mathbf{j}_m = \rho \mathbf{v}$:

$$\phi_m = \iint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS$$

On peut réécrire ce flux total en une intégrale d'un terme volumique de perte de masse par *flux* de particules grâce au théorème de Green - Ostrogradski :

$$\phi_m = \iiint_{\mathcal{V}} \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) dV \quad (1.22)$$

Le débit massique ainsi défini est positif si la perte de masse est effective pour le volume - c'est-à-dire si le flux est globalement dirigé vers l'extérieur du volume - et négatif dans le cas contraire.

Remarque : Il est possible que dans le volume \mathcal{V} il y ait création (resp. disparition) de certaines espèces chimiques au détriment (resp. au profit) d'autres espèces. Cependant la masse totale étant conservée au cours d'une transformation chimique, il n'y a pas besoin de considérer ce phénomène dans la mesure où réactifs et produits demeurent dans le système étudié.

La variation temporelle de la masse système de volume \mathcal{V} s'écrit donc :

$$\frac{d}{dt} \left(\iiint_{\mathcal{V}} \rho dV \right) = - \iiint_{\mathcal{V}} \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) dV \quad (1.23)$$

Par hypothèse le volume \mathcal{V} choisi étant fixe, le terme de gauche est équivalent à une intégrale sur le volume de la variation temporelle de la masse volumique :

$$\iiint_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \iiint_{\mathcal{V}} \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) dV \quad (1.24)$$

En faisant tendre le volume V vers un infiniment petit non nul de l'ordre de la taille d'une particule de fluide (aux propriétés homogènes) on obtient *l'équation de continuité* qui traduit de manière locale la conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1.25)$$

En utilisant la relation $\operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = \rho \operatorname{div}(\mathbf{v}) + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}(\rho)$ et en reconnaissant alors l'expression de la dérivée en suivant le mouvement de la masse volumique, on peut réécrire l'équation de continuité :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0 \quad (1.26)$$

2.4.3 Conservation de la quantité de mouvement

La variation de la quantité de mouvement totale contenue dans le volume \mathcal{V} est due :

- au débit de quantité de mouvement résultant du transfert de particules de fluide, c'est-à-dire au bilan de quantité de mouvement qui entre et qui sort du volume. Ce débit s'écrit par définition sous la forme d'un flux de vecteur densité de courant de quantité de mouvement :

$$\phi_{\mathbf{p}} = \iint_S (\rho \mathbf{v}) (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS$$

On peut réécrire ce flux total en une intégrale d'un terme volumique de perte de quantité de mouvement par *flux* de particules grâce au théorème de Green - Ostrogradski appliqué au flux d'une grandeur vectorielle :

$$\phi_{\mathbf{p}} = \iiint_{\mathcal{V}} [\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v} + \mathbf{v} \operatorname{div}(\rho \mathbf{v})] dV \quad (1.27)$$

Le débit de quantité de mouvement ainsi défini est positif si la perte de quantité de mouvement est effective pour le volume - c'est-à-dire si le flux est globalement dirigé vers l'extérieur du volume - et négatif dans le cas contraire.

- une modification de la quantité de mouvement associée aux forces qui s'exercent sur le fluide contenu dans le volume. La résultante de ces forces sur chaque unité de volume correspond à l'addition des forces extérieures en volume \mathbf{f}_v et des contraintes surfaciques $\operatorname{div}(\bar{\sigma})$.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement traduit le fait que, hormis par l'un des mécanismes sus-cités, la quantité de mouvement totale contenue dans le volume \mathcal{V} choisi ne peut pas varier. La variation temporelle de la quantité de mouvement totale contenue dans le volume s'écrit donc :

$$\iiint_{\mathcal{V}} \frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} dV = \iiint_{\mathcal{V}} \operatorname{div}(\bar{\sigma}) dV + \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{f}_v dV - \iiint_{\mathcal{V}} [\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v} + \mathbf{v} \operatorname{div}(\rho \mathbf{v})] dV \quad (1.28)$$

En faisant tendre le volume \mathcal{V} vers un infiniment petit de l'ordre de la taille d'une particule de fluide on obtient alors une forme locale de ce bilan :

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} = \mathbf{f}_v + \operatorname{div}(\bar{\sigma}') - \mathbf{grad}(p) - \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v} - \mathbf{v} \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) \quad (1.29)$$

2.4.3.1 Conséquences : équation du mouvement du fluide

La combinaison de la formulation locale des deux lois de conservation (1.26) et (1.29) permet de retrouver la loi locale du mouvement du fluide (1.21) :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} &= \mathbf{f}_v + \mathbf{div}(\overline{\boldsymbol{\sigma}}') - \mathbf{grad}(p) - \rho(\mathbf{v}\cdot\mathbf{grad})\mathbf{v} - \mathbf{v}\mathbf{div}(\rho\mathbf{v}) \\
 \Leftrightarrow \rho \frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial\rho}{\partial t} &= \mathbf{f}_v + \mathbf{div}(\overline{\boldsymbol{\sigma}}') - \mathbf{grad}(p) - \rho(\mathbf{v}\cdot\mathbf{grad})\mathbf{v} - \mathbf{v}\mathbf{div}(\rho\mathbf{v}) \\
 \Leftrightarrow \rho \frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} &= \mathbf{f}_v + \mathbf{div}(\overline{\boldsymbol{\sigma}}') - \mathbf{grad}(p) - \rho(\mathbf{v}\cdot\mathbf{grad})\mathbf{v} \\
 \Leftrightarrow \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \mathbf{f}_v + \mathbf{div}(\overline{\boldsymbol{\sigma}}') - \mathbf{grad}(p)
 \end{aligned} \tag{1.30}$$

2.4.4 Conservation de l'énergie

La variation de l'énergie cinétique totale contenue dans le volume \mathcal{V} est due :

- au débit d'énergie cinétique résultant du transfert de particules de fluide, c'est-à-dire au bilan d'énergie cinétique qui entre et qui sort du volume. Ce débit s'écrit par définition sous la forme d'un flux :

$$\phi_c = \iint_S \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) (\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}) dS$$

On peut réécrire ce flux total en une intégrale d'un terme volumique de perte d'énergie cinétique par *flux* de particules grâce au théorème de Green - Ostrogradski :

$$\phi_c = \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{div} \left(\frac{\rho v^2}{2} \mathbf{v} \right) dV \tag{1.31}$$

Le débit d'énergie cinétique ainsi défini est positif si la perte d'énergie cinétique est effective pour le volume - c'est-à-dire si le flux est globalement dirigé vers l'extérieur du volume - et négatif dans le cas contraire.

- une variation de l'énergie cinétique associée au travail des forces qui s'exercent sur le fluide contenu dans le volume. La résultante de ces forces sur chaque unité de volume correspond à l'addition des forces extérieures en volume \mathbf{f}_v et des contraintes surfaciques $\mathbf{div}(\overline{\boldsymbol{\sigma}})$, qui conduisent à différents termes de travail d'après le théorème de l'énergie cinétique :

- Travail des forces volumiques :

$$W_V = \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{f}_v \cdot \mathbf{v} dV$$

Ce terme est défini positif si le travail fourni par les forces volumiques est moteur, c'est-à-dire si \mathbf{v} et \mathbf{f}_v sont dans le même sens.

- Travail des forces surfaciques :

$$W_S = \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{div}(\overline{\boldsymbol{\sigma}}) \cdot \mathbf{v} dV$$

$$W_S = \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{div}(\overline{\sigma}').\mathbf{v}dV - \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{grad}(p).\mathbf{v}dV$$

L'équation de conservation de l'énergie cinétique traduit le fait que, hormis par l'un des mécanismes sus-cités, l'énergie cinétique du volume \mathcal{V} choisi ne peut pas varier. La variation temporelle de l'énergie cinétique totale du volume s'écrit donc :

$$\iiint_{\mathcal{V}} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) dV = - \iiint_{\mathcal{V}} \left[\mathbf{div} \left(\frac{\rho v^2}{2} \mathbf{v} \right) - \mathbf{f}_v.\mathbf{v} - \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{div}(\overline{\sigma}').\mathbf{v} + \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{grad}(p).\mathbf{v} \right] dV \quad (1.32)$$

En faisant tendre le volume V vers un infiniment petit de l'ordre de la taille d'une particule de fluide on obtient alors une forme locale de ce bilan :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) = -\mathbf{div} \left(\frac{\rho v^2}{2} \mathbf{v} \right) + \mathbf{f}_v.\mathbf{v} + \mathbf{div}(\overline{\sigma}').\mathbf{v} - \mathbf{grad}(p).\mathbf{v} \quad (1.33)$$

Dans cette loi locale de conservation de l'énergie cinétique, le terme $\mathbf{div}(\overline{\sigma}').\mathbf{v}$ comporte deux parties :

- une associée aux contraintes visqueuses normales, qui contribue effectivement à modifier l'énergie cinétique de la particule de fluide en l'accélérant ;
- une associée aux contraintes visqueuses tangentielles, qui transforme de façon irréversible l'énergie cinétique en énergie interne.

3 Lois phénoménologiques macroscopiques

La loi locale du mouvement d'un fluide (1.21) est si complexe qu'il n'est pas possible d'en obtenir une expression générale du champ de vitesse eulérien $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ qui s'appliquerait à n'importe quel type de fluide et d'écoulement. La seule chose que nous savons faire c'est obtenir des solutions de cette équation dans certains particuliers. Le but de cette partie n'est pas de faire un bilan exhaustif de tous les cas particuliers pour lesquels on sait résoudre l'équation, mais de lister différentes hypothèses qui peuvent être faites à propos des fluides et des écoulements, et développer dans quelques cas les conséquences, notamment en ce qui concerne la pression.

3.1 Différents fluides et écoulements

3.1.1 Fluide newtonien ; écoulements laminaires et turbulents

Dans le cas où la réponse (transformation) de la particule de fluide aux *contraintes visqueuses* est instantanée et linéaire, on qualifie le fluide de *newtonien*. Les éléments σ'_{ij} du tenseur des contraintes visqueuses dépendent alors linéairement des éléments T_{ij} du tenseur taux de transformation. Plus précisément, comme le tenseur des contraintes visqueuses est symétrique, et que la partie symétrique du tenseur taux de transformation est en fait uniquement

le tenseur taux des déformations $\overline{\overline{D}}$, les éléments σ'_{ij} évoluent finalement linéairement avec chacun des deux termes des éléments T_{ij} correspondant à la déformation, c'est-à-dire les éléments correspondant à la dilatation et ceux correspondant au cisaillement dans la formule (1.5) :

$$\begin{aligned} \sigma'_{ij} &= \lambda' \underbrace{\left[\frac{\operatorname{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij} \right]}_{\text{dilatation}} + \eta' \underbrace{\left[\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] - \frac{\operatorname{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij} \right]}_{\text{cisaillement}} \\ \Rightarrow \quad \sigma'_{ij} &= \frac{\lambda'}{3} \operatorname{div}(\mathbf{v}) \delta_{ij} + \frac{\eta'}{2} \left[\left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] - 2 \frac{\operatorname{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij} \right] \\ \Rightarrow \quad \sigma'_{ij} &= \lambda \operatorname{div}(\mathbf{v}) \delta_{ij} + \eta \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - 2 \frac{\operatorname{div}(\mathbf{v})}{3} \delta_{ij} \right] \end{aligned} \quad (1.34)$$

où on a introduit deux coefficients scalaires λ et η homogènes à des $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$:

- la viscosité dynamique η (ou souvent notée μ) caractérise la réponse linéaire des contraintes visqueuses au cisaillement. La partie du tenseur des contraintes visqueuses associée à cette réponse est alors appelée contrainte de cisaillement ;
- la viscosité de volume λ caractérise la réponse linéaire des contraintes visqueuses à la dilatation ;

On introduit parfois la seconde viscosité μ' définie par rapport aux deux précédentes viscosités par la relation

$$\mu' = \lambda - \frac{2}{3}\eta$$

de telle sorte à ce que l'on puisse encore écrire :

$$\sigma'_{ij} = \mu' \operatorname{div}(\mathbf{v}) \delta_{ij} + \eta \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (1.35)$$

La loi locale du mouvement d'un fluide 1.21 s'exprime alors en fonction des viscosités sus-définies, on appelle généralement cette nouvelle version équation de Navier-Stokes¹ :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}) \mathbf{v} = \mathbf{f}_v + \eta \Delta \mathbf{v} + \left(\lambda + \frac{\eta}{3} \right) \mathbf{grad}(\operatorname{div}(\mathbf{v})) - \mathbf{grad}(p) \quad (1.36)$$

En pratique, on considère souvent qu'il n'y a pas de réponse des contraintes visqueuses à la dilatation, c'est-à-dire que $\lambda = 0$. C'est l'hypothèse de Stokes, raisonnablement valable

1. Vérifions que $\mathbf{div}(\overline{\overline{\sigma'}}) = \eta \Delta \mathbf{v} + (\mu' + \eta) \mathbf{grad}(\operatorname{div}(\mathbf{v}))$:

$$\begin{aligned} \mathbf{div}(\overline{\overline{\sigma'}}) \cdot \mathbf{e}_{x_i} &= \frac{\partial \sigma'_{x_i x_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma'_{x_i x_j}}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma'_{x_i x_k}}{\partial x_k} \\ &= \mu' \frac{\partial \operatorname{div}(\mathbf{v})}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_{x_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial v_{x_i}}{\partial x_i} \right) + \eta \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_{x_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{x_j}}{\partial x_i} \right) + \eta \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial v_{x_i}}{\partial x_k} + \frac{\partial v_{x_k}}{\partial x_i} \right) \\ &= \mu' \frac{\partial \operatorname{div}(\mathbf{v})}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_{x_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial v_{x_j}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{x_k}}{\partial x_k} \right) + \eta \left(\frac{\partial^2 v_{x_i}}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 v_{x_i}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 v_{x_i}}{\partial x_k^2} \right) \\ &= (\mu' + \eta) \frac{\partial \operatorname{div}(\mathbf{v})}{\partial x_i} + \eta \Delta v_{x_i} \\ &= (\mu' + \eta) \mathbf{grad}(\operatorname{div}(\mathbf{v})) \cdot \mathbf{e}_{x_i} + \eta \Delta \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_{x_i} \\ &= [(\mu' + \eta) \mathbf{grad}(\operatorname{div}(\mathbf{v})) + \eta \Delta \mathbf{v}] \cdot \mathbf{e}_{x_i} \quad \forall x_i \end{aligned}$$

pour les fluides « simples » (eau, air, autres gaz).

Par ailleurs, dans la relation de Navier-Stokes il n'est pas rare que le terme inertiel $\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v}$ et le terme visqueux $\eta\Delta\mathbf{v}$ soient d'un ordre de grandeur différent de sorte à ce que l'on puisse en négliger un devant l'autre. Afin de quantifier cette prédominance des effets inertiels sur les effets visqueux on définit un nombre sans dimension, le *nombre de Reynolds*, comme le rapport des deux termes correspondant :

$$Re = \frac{\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v}}{\eta\Delta\mathbf{v}} \quad (1.37)$$

On distingue ainsi deux cas de figure :

- L'écoulement est dominé par l'inertie ($Re \gg 1$) : on dit que l'écoulement est *turbulent* ;
- L'écoulement est dominé par la viscosité ($Re \ll 1$) : on dit que l'écoulement est *laminaire*.

3.1.2 Fluide et écoulement parfaits

Pour un fluide parfait, les viscosités η , λ et μ' sont *strictement* nulles. Lorsque tous les phénomènes de résistance au mouvement du fluide peuvent être négligés, autrement dit lorsque les différentes viscosités η , λ et μ' peuvent être *considérées* comme nulles, on qualifie l'écoulement de parfait. Dans un écoulement parfait il n'y a donc pas de phénomène irréversible de dissipation de l'énergie cinétique en énergie interne. Les écoulements gazeux se prêtent plus à cette approximation que les écoulements liquides.

La loi locale du mouvement d'un fluide 1.21 est alors appelée *équation d'Euler* :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v} = \mathbf{f}_v - \mathbf{grad}(p) \quad (1.38)$$

3.1.3 Fluide et écoulement incompressibles

L'incompressibilité d'un fluide est définie comme la constance de sa masse volumique : $\rho(\mathbf{r}, t) = \rho_0$. Il s'agit d'une propriété intrinsèque d'un fluide, indépendante de l'écoulement. Les fluides incompressibles sont des liquides.

Certains écoulements préservent le volume des particules de fluides non nécessairement incompressibles : il s'agit des écoulements incompressibles, ce qui s'exprime mathématiquement par :

- $\text{div}(\mathbf{v}) = 0$ puisque la divergence du champ de vitesse correspond au taux de variation relative de volume de la particule de fluide. On dit aussi qu'un écoulement incompressible est un écoulement non divergent ;
- $\frac{d\rho}{dt} = 0$ d'après l'équation de continuité 1.26

Remarque :

L'incompressibilité du fluide implique nécessairement celle de l'écoulement, mais la réciproque n'est pas vraie. Un fluide compressible peut très bien s'écouler de façon incompressible selon les caractéristiques structurelles du système siège de l'écoulement.

Conservation du débit volumique :

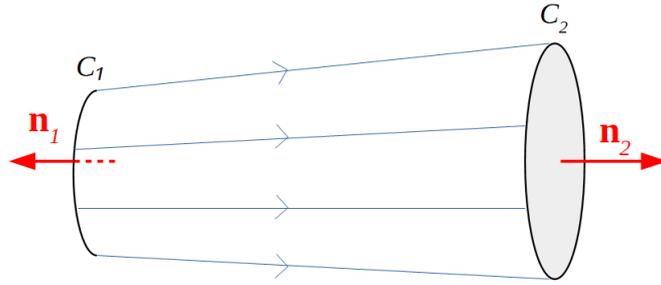


FIGURE 1.4 – Tube de courant s'appuyant sur les contours fermés C_1 et C_2

Considérons un tube de courant \mathcal{T} s'appuyant sur deux contours fermés C_1 et C_2 , d'aires S_1 et S_2 , et orientés vers l'extérieur du tube selon les vecteurs unitaires \mathbf{n}_1 et \mathbf{n}_2 . Le fluide est incompressible donc d'après le théorème de Green-Ostrogradski le champ de vitesse est à flux conservatif :

$$\iiint_{\mathcal{T}} \operatorname{div}(\mathbf{v}) dV = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \iint_{S_1} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_1 dS + \iint_{S_2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_2 dS = 0 \quad (1.39)$$

Ainsi $D_{V,1} = D_{V,2}$: le débit volumique se conserve le long d'un tube de courant.

3.1.4 Écoulement stationnaire (ou permanent)

Au cours d'un écoulement stationnaire le champ de vitesse eulérien et les variables d'état du système sont indépendantes du temps :

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{v}(\mathbf{r}) \quad \text{et} \quad \rho(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r})$$

L'équation de continuité 1.26 se réduit alors à $\operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0$, et l'équation de Navier-Stokes se simplifie ainsi :

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \operatorname{grad})\mathbf{v} = \mathbf{f}_v + \eta \Delta \mathbf{v} - \operatorname{grad}(p) \quad (1.40)$$

Dans un écoulement stationnaire, les trajectoires des particules de fluide sont confondues avec les lignes de courant.

3.1.5 Écoulement homogène

Au cours d'un écoulement homogène le champ de vitesse eulérien et les variables d'état du système sont indépendantes des coordonnées d'espace :

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{v}(t) \quad \text{et} \quad \rho(\mathbf{r}, t) = \rho(t)$$

L'équation de continuité 1.26 se réduit alors à :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

L'équation de Navier-Stokes se simplifie ainsi :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{f}_v \quad (1.41)$$

Le fluide est comparable à un solide : toutes ses parties évoluent comme un seul corps en réponse aux seules actions extérieures.

3.1.6 Écoulements irrotationnel et potentiel

Au cours d'un écoulement irrotationnel les particules de fluides ne subissent aucune rotation pure, ce qui s'exprime mathématiquement par la nullité de tous les termes de rotation du tenseur taux des transformations défini dans l'équation 1.5 :

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] = 0 \quad \forall i, j \quad \implies \quad \mathbf{rot}(\mathbf{v}) = \mathbf{0}$$

Comme $\mathbf{rot}(\mathbf{grad}(A)) = \mathbf{0}$ pour n'importe qu'elle grandeur physique A , un écoulement irrotationnel implique nécessairement que le champ de vitesse \mathbf{v} peut s'écrire comme un gradient d'une grandeur ψ que l'on appelle *potentiel de vitesse*, et réciproquement :

$$\mathbf{rot}(\mathbf{v}) = \mathbf{0} \text{ (écoulement irrotationnel)} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{v} = \mathbf{grad}(\psi) \text{ (écoulement potentiel)} \quad (1.42)$$

3.2 Conditions aux limites

3.2.1 Interface solide / fluide

3.2.1.1 Conditions générales de continuité à l'interface

Si au cours de l'écoulement un fluide se trouve en contact d'un solide (paroi ou objet immergé), en chaque point de l'interface le solide et le fluide exercent mutuellement une force perpendiculaire à l'interface mais de sens opposé et de norme proportionnelle à la pression du fluide au niveau de l'interface : on parle de *condition d'égalité des contraintes*. Notons \mathbf{n} le vecteur unitaire normal à un élément dS de l'interface, orienté du solide vers le fluide. La force

pressante élémentaire exercée par le fluide sur la paroi s'écrit :

$$d\mathbf{F}_p = -p d\mathbf{S} \quad \text{avec} \quad d\mathbf{S} \cdot \mathbf{n} = dS \quad (1.43)$$

À l'instar de la pression p du fluide, la force $d\mathbf{F}_p$ est susceptible de dépendre à la fois de l'espace et du temps. La nature de l'action réciproque du solide sur le fluide dépasse le cadre de cette étude.

Par ailleurs, quelle que soit la nature du fluide qui s'écoule à proximité d'un solide, aucune pénétration du premier dans le second n'est possible, ce qui impose une condition générale de continuité sur les composantes normales à l'interface des vitesses des deux milieux :

$$\mathbf{v}_{\mathbf{n},\text{solide}} = \mathbf{v}_{\mathbf{n},\text{fluide}} \quad (1.44)$$

Autrement dit, il n'y a jamais de mouvement relatif du fluide par rapport au solide dans la direction perpendiculaire à l'interface.

3.2.1.2 Forte viscosité : profil laminaire

Dans le cas d'un fluide visqueux il y a égalité stricte entre la vitesse des particules de fluide et la vitesse du solide au niveau de l'interface :

$$\mathbf{v}_{\text{solide}} = \mathbf{v}_{\text{fluide}} \quad (1.45)$$

Ceci implique qu'il n'y a pas non plus de mouvement relatif du fluide par rapport au solide dans la direction tangente à l'interface.

Cette propriété s'explique d'un point de vue énergétique. En effet, nous avons lié dans la sous-section 2.4.4 les contraintes visqueuses tangentiels à la dissipation irréversible d'énergie cinétique. Or pour un fluide Newtonien ces contraintes sont proportionnelles au taux de déformation, c'est-à-dire aux dérivées spatiales des différentes composantes de la vitesse. Une discontinuité de la vitesse à l'interface impliquerait ainsi un taux de déformation et donc une énergie dissipée infinis, ce qui est impossible. Cette nécessité théorique est relativement bien vérifiée par l'expérience. La vitesse d'un fluide visqueux aux abords d'un solide évolue donc nécessairement de façon continue et de façon d'autant plus progressive que la viscosité est importante. L'évolution de la vitesse et de la pression dans la direction perpendiculaire à l'interface sont régies notamment par l'équation de Navier-Stokes.

3.2.1.3 Faible viscosité : couche limite

Dans le cas des fluides très peu visqueux, on peut globalement faire l'approximation du fluide parfait sauf dans l'environnement immédiat de l'interface solide / fluide. Cette région de l'espace dans laquelle est assurée la continuité de la vitesse entre le solide et l'écoulement fluide

est appelé *couche limite* quand elle est très fine devant les autres dimensions caractéristiques de l'écoulement. Dans ces conditions, deux hypothèses permettent de simplifier l'équation de Navier-Stokes dans la couche limite :

- les dérivées première et seconde de la vitesse par rapport à la direction perpendiculaire à l'interface est très grande devant les autres dérivées spatiales de la vitesse. En prenant $(x_n; x_{t_1}; x_{t_2})$ pour des coordonnées cartésiennes, cette hypothèse s'écrit :

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_n} \gg \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_{t_1}}, \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_{t_2}} \quad ; \quad \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x_n^2} \gg \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x_{t_1}^2}, \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x_{t_2}^2}$$

- la vitesse du fluide dans la direction normale à l'interface est petite dans la vitesse u d'écoulement du fluide :

$$\|\mathbf{v}_n\| \ll u$$

La projection de l'équation de Navier-Stokes dans la direction perpendiculaire à l'interface se réduit alors à :

$$\frac{\partial p}{\partial x_n} = 0 \tag{1.46}$$

Ainsi la pression dans la couche limite n'évolue pas dans la direction perpendiculaire à l'interface ; elle y est donc égale à la pression dans l'écoulement juste en dehors de la couche limite.

3.2.2 Interface fluide / fluide

3.2.2.1 Continuité des vitesses

De la même façon et pour les mêmes raisons que pour les interfaces solide / fluide, il y a nécessairement égalité des vitesses des deux fluides au niveau d'une interface fluide 1 / fluide 2 :

$$\mathbf{v}_{\text{fluide},1} = \mathbf{v}_{\text{fluide},2} \tag{1.47}$$

3.2.2.2 Continuité des contraintes surfaciques

La cohésion de l'interface entre des fluides 1 et 2 est assurée si l'ensemble des forces qui s'exercent dessus se compensent. Considérons un volume infiniment fin englobant l'interface, s'étendant sur des longueur dx et dy dans le plan de l'interface. Outre les contraintes surfaciques dues à chacun des deux fluides, il faut aussi prendre en compte les forces de tension tangentielles exercées par le reste de l'interface sur ce volume. Ces forces de contraintes tangentielles \mathbf{T} sont proportionnelles à la longueur L d'interface sur laquelle elle s'exercent ; le coefficient de proportionnalité est noté γ , il se nomme *coefficient de tension superficielle*. Il dépend de la nature et de l'état des fluides 1 et 2 à l'endroit de l'interface considéré.

Soit $\mathbf{t}(x, y)$ la direction tangente à l'interface en (x, y) et perpendiculaire à la direction \mathbf{e}_y ; soit $\mathbf{t}'(x, y)$ la direction tangente à l'interface en (x, y) et perpendiculaire à la direction \mathbf{e}_x .

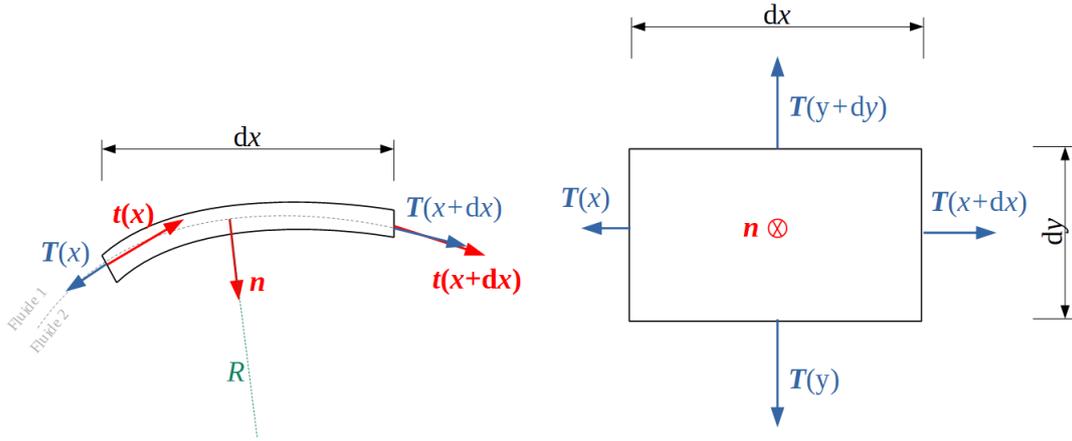


FIGURE 1.5 – Vue en coupe et vue du dessus d'un volume infiniment fin entourant l'interface

Soit enfin $\mathbf{n}(x, y)$ un vecteur unitaire normal à l'interface orienté du fluide 1 vers le fluide 2. Les forces tangentielles de tension surfacique s'écrivent alors :

- $\mathbf{T}(x) = -\gamma(x)dy\mathbf{t}(x)$;
- $\mathbf{T}(y) = -\gamma(y)dx\mathbf{t}'(y)$;
- $\mathbf{T}(x + dx) = +\gamma(x + dx)dy\mathbf{t}(x + dx)$
- $\mathbf{T}(y + dy) = +\gamma(y + dy)dx\mathbf{t}'(y + dy)$

$$\bar{\sigma}_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n} dx dy + \bar{\sigma}_{\text{fluide},2} \cdot (-\mathbf{n}) dx dy + \mathbf{T}(x + dx) + \mathbf{T}(x) + \mathbf{T}(y + dy) + \mathbf{T}(y) = \mathbf{0}$$

$$\Rightarrow \bar{\sigma}_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n} dx dy - \bar{\sigma}_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n} dx dy + \frac{\partial(\gamma\mathbf{t})}{\partial x} dx dy + \frac{\partial(\gamma\mathbf{t}')}{\partial y} dx dy = \mathbf{0}$$

$$\Rightarrow \bar{\sigma}_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n} - \bar{\sigma}_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n} + \frac{\partial\gamma}{\partial x} \mathbf{t} + \gamma \frac{\partial\mathbf{t}}{\partial x} + \frac{\partial\gamma}{\partial y} \mathbf{t}' + \gamma \frac{\partial\mathbf{t}'}{\partial y} = \mathbf{0}$$

$$\Rightarrow \bar{\sigma}_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n} - \bar{\sigma}_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n} + \frac{\partial\gamma}{\partial x} \mathbf{t} + \gamma \frac{\mathbf{n}}{R} + \frac{\partial\gamma}{\partial y} \mathbf{t}' + \gamma \frac{\mathbf{n}}{R'} = \mathbf{0}$$

où on a introduit R et R' les rayons de courbure de l'interface dans les directions x et y .

Cette dernière relation peut être projetée dans la direction normale et dans le plan tangent à l'interface, conduisant à deux relations de continuité :

- continuité des contraintes surfaciques normales à l'interface :

$$\begin{aligned}
 & (\bar{\sigma}_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} - (\bar{\sigma}_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} + \frac{\gamma}{R} + \frac{\gamma}{R'} = 0 \\
 \Rightarrow & (\bar{\sigma}'_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} - p_1 - (\bar{\sigma}'_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} + p_2 + \frac{\gamma}{R} + \frac{\gamma}{R'} = 0 \\
 \Rightarrow & p_1 - p_2 = \frac{\gamma}{R} + \frac{\gamma}{R'} + (\bar{\sigma}'_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} - (\bar{\sigma}'_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}
 \end{aligned}$$

Dans le cas où il n'y a pas de contrainte visqueuse normale (fluides parfaits ou fluides immobiles par exemple) la relation de continuité se simplifie, la différence de pression $p_1 - p_2$ à l'interface est alors appelée *pression capillaire* ou *pression de Laplace* :

$$p_{\text{cap}} = p_1 - p_2 = \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) \quad (1.48)$$

- continuité des contraintes surfaciques tangentielles à l'interface :

$$\begin{cases}
 (\bar{\sigma}_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t} - (\bar{\sigma}_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t} + \frac{\partial \gamma}{\partial x} = 0 \\
 (\bar{\sigma}_{\text{fluide},1} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t}' - (\bar{\sigma}_{\text{fluide},2} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t}' + \frac{\partial \gamma}{\partial y} = 0
 \end{cases}$$

Ainsi si la tension superficielle γ est uniforme les composantes tangentielles des contraintes surfaciques dans les deux fluides sont égales au niveau de l'interface.

3.3 Relations de Bernoulli

Cette section concerne les écoulements parfaits et incompressibles dans le cas où les forces en volume \mathbf{f}_v sont conservatives, c'est-à-dire dérivent d'un potentiel φ :

$$\begin{cases}
 \eta, \mu', \lambda = 0 \\
 \text{div}(\mathbf{v}) = 0 \\
 \mathbf{f}_v = -\mathbf{grad}(\varphi)
 \end{cases}$$

3.3.1 Établissement de la relation générale

L'équation locale d'Euler 1.38 se simplifie donc ainsi :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v} + \mathbf{grad}(p + \varphi) = \mathbf{0}$$

Ce que l'on peut encore transformer grâce aux propriétés d'analyse vectorielle en :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \left(\mathbf{grad} \left(\frac{v^2}{2} \right) - \mathbf{v} \wedge \mathbf{rot}(\mathbf{v}) \right) + \mathbf{grad}(p + \varphi) = \mathbf{0} \quad (1.49)$$

Ceci constitue une forme très générale de la relation de Bernoulli, qu'il est encore possible de simplifier au prix d'hypothèses supplémentaires. Nous nous limiterons ici à l'hypothèse de l'écoulement stationnaire.

3.3.2 Simplification en régime stationnaire

La dérivée temporelle de \mathbf{v} est nulle en régime stationnaire, donc la relation de Bernoulli devient :

$$\rho \left(\mathbf{grad} \left(\frac{v^2}{2} \right) - \mathbf{v} \wedge \mathbf{rot}(\mathbf{v}) \right) + \mathbf{grad}(p + \varphi) = \mathbf{0}$$

En multipliant l'ensemble de la relation par \mathbf{v} il vient :

$$(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}) \left(\frac{\rho v^2}{2} + p + \varphi \right) = 0$$

Or nous avons établi dans la première section de ce chapitre que la dérivée de la grandeur A *en suivant le mouvement* de la particule de fluide est définie par 1.2 :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})A$$

Donc la relation de Bernoulli s'écrit encore, en régime stationnaire :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\rho v^2}{2} + p + \varphi \right) = 0$$

Soit :

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \varphi = \text{constante} \quad \text{le long d'une ligne de courant} \quad (1.50)$$

Ainsi, bien que la pression ait été introduite comme une contrainte surfacique « statique », c'est-à-dire ne trouvant pas son origine dans la vitesse du fluide, l'évolution de sa valeur dans un écoulement est malgré tout liée à l'évolution de la vitesse le long d'une ligne de courant. La relation de Bernoulli établit donc un lien entre les variations de pression au sein d'un écoulement et les variations de vitesse.

3.3.3 Interprétation énergétique

La relation de Bernoulli établie dans le cas général 1.49 multipliée par \mathbf{v} conduit à la relation :

$$\begin{aligned} & \left(\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{grad} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \mathbf{grad}(\varphi + p) \right) \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \Rightarrow & \frac{\rho}{2} \frac{\partial (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})}{\partial t} + \mathbf{grad} \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{grad}(\varphi + p) \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \Rightarrow & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) + \mathbf{div} \left(\frac{\rho v^2}{2} \mathbf{v} \right) - \frac{\rho v^2}{2} \mathbf{div}(\mathbf{v}) + \mathbf{grad}(\varphi + p) \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \Rightarrow & \rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{v^2}{2} \right) = -\mathbf{div} \left(\frac{\rho v^2}{2} \mathbf{v} \right) - \mathbf{grad}(\varphi + p) \cdot \mathbf{v} \end{aligned}$$

On retrouve le bilan local de conservation de l'énergie 1.33 simplifié par les hypothèses énoncées en début de sous-section. Ainsi la relation de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie cinétique au cours de l'écoulement.

Dans le cas où la seule énergie potentielle volumique φ à prendre en compte est l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\varphi = \rho g z \quad \text{avec } z \text{ un axe vertical ascendant}$$

on peut réécrire la relation de Bernoulli en régime stationnaire sous la forme :

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + zg = \text{constante} \quad \text{soit} \quad e_c + e_{p,p} + w_p = \text{constante}$$

où on a introduit les énergies massiques cinétique e_c et potentielle de pesanteur $e_{p,p}$ ainsi que le travail massique des forces pressantes w_p .

Enfin on peut introduire la *charge* $h = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z$, grandeur homogène à une longueur, et dont la relation de Bernoulli assure la conservation au cours d'un écoulement parfait, incompressible et stationnaire dans un champ de pesanteur uniforme. En pratique, aucun écoulement n'est strictement parfait et des effets dissipatifs existent au moins à proximité des parois solides, entraînant des *pertes de charge* dont il faut tenir compte dans les systèmes hydrauliques.

3.3.4 Exemples d'applications en écoulement stationnaire

3.3.4.1 Effet Venturi

Dans les écoulements stationnaires non homogènes la vitesse du fluide peut connaître des variations au fil de l'écoulement. D'après les relations établies précédemment, une modification de l'énergie cinétique d'une particule de fluide se déplaçant à une altitude fixée induit nécessairement une modification du travail des forces de pression s'exerçant sur cette même particule. Le fluide étant supposé incompressible, une variation de travail des forces de pression découle nécessairement d'une variation de la pression elle-même puisque le volume de la particule de fluide est constant. Ainsi, si la vitesse augmente le long d'une ligne de courant d'un écoulement horizontal, parfait et incompressible, la pression diminue ; et réciproquement.

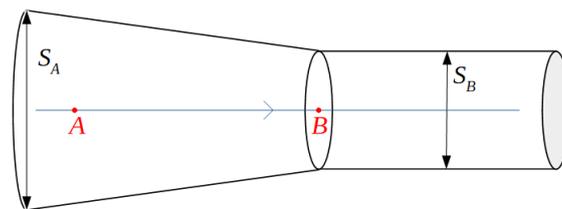


FIGURE 1.6 – Effet Venturi dans une canalisation horizontale

Sur une ligne de courant horizontale passant par les points A et B , la relation de

Bernoulli en régime stationnaire s'écrit :

$$\frac{v_A^2}{2} + p_A = \frac{v_B^2}{2} + p_B$$

De plus, le débit volumique se conserve 1.39 sur un tube de courant puisque l'écoulement est incompressible :

$$v_A S_A = v_B S_B \quad \text{soit} \quad v_B = \frac{S_A}{S_B} v_A > v_A$$

Ainsi $p_B < p_A$: il y a une baisse de pression au niveau du rétrécissement de la canalisation. Cet effet n'est pas observable uniquement pour les écoulements horizontaux, et est d'ailleurs utilisé à la verticale par exemple en chimie dans les système de filtration sous vide : la baisse de pression y est causée par l'augmentation de la vitesse dans le rétrécissement, et est accentuée par la diminution d'énergie potentielle du fluide au cours de son écoulement vers le bas.

3.3.4.2 Effet siphon

L'effet siphon consiste à maintenir le transvasement d'un liquide d'un récipient haut vers un récipient bas *via* un point haut, et ce sans pompe (cette dernière est utilisée pour amorcer le dispositif, ce que nous n'étudions pas ici).

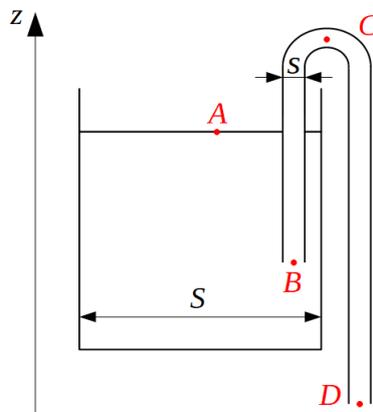


FIGURE 1.7 – Schéma d'un siphon

Afin d'exposer quelques généralités à propos de l'effet siphon, nous faisons des hypothèses simplificatrices :

- les points A et D sont tous les deux à l'interface avec l'air atmosphérique, donc d'après les conditions aux interfaces établies précédemment que $p_A = p_D = p_{\text{atm}}$;
- l'écoulement est supposé incompressible donc le débit volumique se conserve, et ce à différents niveaux :

$$- D_{V,B} = D_{V,C} = D_{V,D} \text{ donc } v_B = v_C = v_D \text{ si le tuyau a une section constante ;}$$

– $D_{V,A} = D_{V,D}$ donc $v_A = \frac{s}{S}v_D \ll v_D$ si $s \ll S$; on pourra considéré que $v_A \simeq 0$;

- le tuyau a une section suffisamment grande pour y négliger les pertes de charge : l'écoulement est considéré comme parfait.

En régime stationnaire on peut appliquer la relation de Bernoulli sur une ligne de courant passant par les points A , B , C et D . D'abord entre les points A et D :

$$\frac{v_A^2}{2} + \frac{p_A}{\rho} + gz_A = \frac{v_D^2}{2} + \frac{p_D}{\rho} + gz_D \quad \Rightarrow \quad v_D = \sqrt{2(z_A - z_D)}$$

Ainsi l'effet siphon ne fonctionne que si la sortie du tuyau se situe en dessous du niveau de liquide dans la cuve source ($z_D < z_A$).

Ensuite entre les points C et D :

$$\frac{v_C^2}{2} + \frac{p_C}{\rho} + gz_C = \frac{v_D^2}{2} + \frac{p_D}{\rho} + gz_D \quad \Rightarrow \quad z_C - z_D = \frac{p_{\text{atm}} - p_C}{\rho g}$$

L'énergie cinétique massique e_c du fluide dans le tuyau est constante par hypothèse. Le liquide peut donc gagner de l'énergie potentielle de pesanteur $e_{p,p}$ au cours de l'écoulement dans le tuyau seulement au prix de voir diminuer le travail des forces pressantes. La dernière relation traduit la limite au-delà de laquelle cette transformation énergétique n'est plus possible : la pression dans le tube ne peut pas diminuer au point de devenir négative sinon le siphon se désamorcerait (la cohésion de la colonne d'eau ne serait plus assurée par les contraintes surfaciques de pression dirigées vers l'extérieur des particules de fluide).

Ainsi l'effet siphon fonctionne tant que :

$$z_C - z_D = \frac{p_{\text{atm}}}{\rho g} \quad \text{et} \quad z_D < z_A \quad (1.51)$$

3.3.4.3 Effet de portance dynamique

Considérons un objet se déplaçant horizontalement et à vitesse constante u dans un fluide : l'écoulement du fluide autour de l'objet est ainsi stationnaire. En supposant le fluide peu visqueux, on peut considérer l'écoulement comme parfait au delà de la couche limite; de plus nous ferons l'hypothèse que l'écoulement est incompressible et que la seule force volumique s'exerçant sur le fluide à prendre en considération est son poids, qui est une force conservative. L'ensemble de ces hypothèses permet d'utiliser la version simplifiée 1.50 de la relation de Bernoulli; cette modélisation permet approcher l'origine de l'effet de portance, c'est-à-dire l'existence d'une force verticale dirigée vers le haut qui s'exerce, par exemple, sur l'aile d'un avion se déplaçant dans l'air.

L'écoulement étant supposé incompressible, toutes les particules de fluides traversant la section S_1 pendant un intervalle de temps dt ressortent en même temps par la section S_2 , quel que soit le chemin emprunté. Or les différentes trajectoires n'ont pas la même longueur : il s'en suit que nécessairement la vitesse des particules de fluides passant par l'extrados est

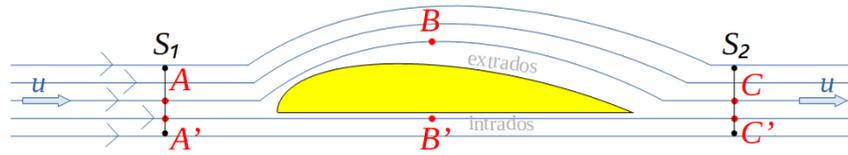


FIGURE 1.8 – Lignes de courant autour d'une aile d'avion se déplaçant horizontalement

supérieure à celle des particules passant par l'intrados :

$$v_B > v_{B'}$$

Les points A et A' étant très proches, on peut les assimiler de sorte à ce que la relation de Bernoulli appliquée d'abord entre A et B , puis entre A' et B' conduise à l'égalité :

$$\frac{v_B^2}{2} + \frac{p_B}{\rho} + gz_B = \frac{v_{B'}^2}{2} + \frac{p_{B'}}{\rho} + gz_{B'}$$

Ainsi, selon la géométrie et l'inclinaison de l'aile la différence de vitesse en B et B' peut ne pas être compensée par la différence d'altitude entre les deux points, causant une surpression sur l'intrados relativement à l'extrados.

Pour le dire autrement, en terme énergétiques : à moins que la différence de longueur des trajets ne soit associée à une importante dénivellation (aile inclinée par exemple), cette différence d'énergie cinétique en B et B' est compensée par une différence de travail des forces de pression :

$$e_{c,B} - e_{c,B'} \simeq w_{p,B'} - w_{p,B} \quad \Rightarrow \quad p_B < p_{B'} \text{ si } e_{c,B} > e_{c,B'} \quad (1.52)$$

En raison de ce différentiel la résultante des forces pressantes s'exerçant sur l'aile a une composante verticale dirigée vers le haut que l'on appelle *portance*. La composante de la résultante dans la direction horizontale est quand à elle appelée *traînée*.

3.4 Fluides au repos

Lorsque le fluide est à l'équilibre mécanique, il n'a pas de vitesse :

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{0}$$

La loi locale se réduit donc drastiquement et exprime l'équilibre des forces s'exerçant sur une particule de fluide :

$$0 = \mathbf{f}_v - \text{grad}(p) \quad (1.53)$$

Quand les forces extérieures volumiques \mathbf{f}_v sont nulles ou négligeables, il n'y a donc pas de gradient de pression dans le fluide : la pression y est homogène.

3.4.1 Pression thermodynamique

Dans le cadre de la thermodynamique, la pression n'est définie que dans les systèmes à l'équilibre thermique et mécanique. Dans les systèmes thermodynamiques la pression est définie comme la variable conjuguée du volume, autrement dit comme l'énergie qu'il faut fournir à un système fermé pour diminuer son volume d'un mètre cube à entropie fixée¹ :

$$p_{\text{thermo}} = - \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{n,S}$$

Cette définition thermodynamique de la pression est compatible avec la pression statique introduite dans le tenseur des contraintes mais pas avec la pression isostatique qui inclut les variations de volume imputables aux contraintes visqueuses, c'est-à-dire aux effets dynamiques dans le fluide. La définition de la pression thermodynamique reposant sur la notion d'énergie interne U (c'est-à-dire d'énergie à l'échelle moléculaire), la démonstration de l'équivalence entre pression thermodynamique et pression statique serait plutôt de l'ordre de l'approche microscopique. Nous nous contentons ici cette égalité :

$$p_{\text{thermo}} = p$$

Cas particulier : équation d'état des gaz parfaits

Dans certains cas les variables d'état pression p , volume V et température T de n moles de gaz sont reliées par l'équation suivante :

$$pV = nRT \tag{1.54}$$

où R est la *constante des gaz parfaits* et vaut environ $8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Les gaz qui vérifient cette équation d'état sont appelés *gaz parfaits* et sont en général des gaz monoatomiques ou diatomiques à basse pression. Nous établirons cette équation par une approche microscopique dans la dernière section de ce chapitre.

3.4.2 Fluide au repos dans un champ de pesanteur

Quand le fluide est au repos dans un champ de pesanteur, la force volumique \mathbf{f}_v à considérer est le poids d'une unité de volume de fluide, à savoir $\mathbf{f}_v = \rho\mathbf{g}$. L'équilibre des forces s'exerçant sur une particule de fluide s'écrit donc :

$$\mathbf{grad}(p) = \rho\mathbf{g} \tag{1.55}$$

Dans un fluide au repos dans un champ de pesanteur règne donc un gradient de pression vertical, de même sens que le champ de pesanteur, c'est-à-dire tel que la pression diminue au fur et à

1. Remarquons qu'ainsi définie la pression thermodynamique a la dimension d'une énergie divisée par un volume, ce qui correspond bien à une force divisée par une surface car $[E] = \text{M}\cdot\text{L}^2\cdot\text{T}^{-2} = [F]\cdot\text{L}$

mesure qu'on s'éloigne du centre de la Terre. Par ailleurs la pression est invariable dans les directions horizontales.

Projetons l'expression de l'équilibre hydrostatique sur un axe vertical ascendant Oz :

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} &= -\rho g \\ \Rightarrow dp &= -\rho g dz \\ \Rightarrow p_B - p_A &= - \int_{z_A}^{z_B} \rho g dz \end{aligned} \quad (1.56)$$

La différence de pression entre deux points A et B d'un fluide correspond donc au poids de la colonne de fluide de base unité et de hauteur correspondant à la différence d'altitude entre A et B . Si ρ ne dépend que de l'altitude, alors la différence de pression entre deux points d'un fluide donné ne dépend elle aussi que de la différence d'altitude entre ces deux points.

Par ailleurs le gradient vertical de pression est d'autant plus intense que le fluide considéré est dense ; les variations de la pression avec l'altitude n'ont donc pas la même allure suivant que l'on considère un liquide ou un gaz. Ces deux cas sont discutés dans les deux paragraphes suivants.

3.4.2.1 Cas particulier d'un liquide : loi fondamentale de l'hydrostatique

Un liquide étant considéré comme un fluide incompressible, une particule de liquide a un volume $d\Omega$ et donc une masse volumique ρ invariables. Si on considère en plus que le champ de pesanteur est homogène, l'expression de l'équilibre devient :

$$\begin{aligned} p_B - p_A &= -\rho g \int_{z_A}^{z_B} dz \\ \Rightarrow p_B - p_A &= \rho g(z_A - z_B) \end{aligned} \quad (1.57)$$

Cette égalité constitue la *loi fondamentale de l'hydrostatique* : la pression dans un liquide décroît linéairement avec l'altitude. Ou de manière plus habituelle : la pression dans un liquide croît linéairement avec la profondeur, et ce d'autant plus vite que le liquide est dense.

Si on note h la profondeur d'un point d'un fluide par rapport à une surface libre plane (interface liquide / gaz), la pression p au point considéré ne dépend que de la profondeur h et s'écrit donc :

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1.58)$$

où p_0 est la pression du gaz au niveau de l'interface, aussi égale à la pression dans le liquide au niveau de l'interface d'après la relation de continuité 1.48 pour une interface plane au repos.

Dans l'eau, la pression augmente d'environ 1 bar tous les 10 mètres de profondeur.

3.4.2.2 Cas particulier de l'air : modèle de l'atmosphère isotherme

Ce modèle se base sur des hypothèses fortes et a par conséquent une portée relativement limitée, mais elle permet d'approcher les variations de la pression avec l'altitude dans l'atmosphère qui nous entoure. Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

1. L'atmosphère est un gaz parfait de masse molaire M .
2. L'atmosphère est à l'équilibre thermodynamique.
3. Le champ de pesanteur est uniforme.

Sous les conditions 1 et 2 chaque particule d'atmosphère centrée en un point d'altitude z vérifie donc l'équation d'état des gaz parfaits (l'axe z est encore choisi vertical ascendant) :

$$\begin{aligned}
 p(z) &= \frac{dnRT(z)}{d\Omega(z)} && \text{avec } dn = \frac{dm}{M} \\
 &= \frac{dmRT(z)}{Md\Omega(z)} \\
 &= \frac{\rho(z)RT(z)}{M}
 \end{aligned} \tag{1.59}$$

L'hypothèse 2 implique que la température est uniforme ($T(z) = T$) et que le système est à l'équilibre mécanique dans le champ de pesanteur lui aussi uniforme ($\mathbf{g}(z) = \mathbf{g}$) d'après l'hypothèse 3, donc l'expression de l'équilibre (1.56) devient :

$$\begin{aligned}
 dp &= -p(z) \frac{Mg}{RT} dz \\
 \Rightarrow \frac{dp}{p} &= -\frac{Mg}{RT} dz \\
 \Rightarrow \ln \left(\frac{p(z)}{p_0} \right) &= -\frac{Mg}{RT} (z - z_0) && \text{avec } p_0 = p(z_0) \\
 \Rightarrow p(z) &= p_0 \exp \left(-\frac{Mg}{RT} (z - z_0) \right)
 \end{aligned} \tag{1.60}$$

Une telle expression n'a très vite plus vraiment de légitimité dans la mesure où, même en admettant que la météo soit clémente (atmosphère localement à l'équilibre thermodynamique), la non uniformité de la température est perceptible sur quelques centaines de mètres d'altitude. Voyons donc ce que prévoit ce modèle sur des variations d'altitude Δz relativement faibles, c'est-à-dire dans le cas où

$$\Delta z \ll \frac{RT}{Mg} \Leftrightarrow \Delta z \ll \frac{10 \times 10}{10^{-2} \times 10} = 10^3 \text{ m}$$

Ainsi :

- Au premier ordre, pour des variations d'altitude ne dépassant pas la dizaine de mètres :

$$p(z) \simeq p_0 \tag{1.61}$$

La pression atmosphérique peut-être considérée comme homogène sur une épaisseur de quelques mètres. Au niveau de la mer la pression atmosphérique moyenne vaut 1 atm, soit 1013 hPa ou 1,013 bar.

- Au second ordre, pour des variations d'altitude ne dépassant pas la centaine de mètres :

$$p(z) \simeq p_0 \left[1 - \frac{Mg}{RT}(z - z_0) \right] \quad (1.62)$$

La pression atmosphérique décroît linéairement avec l'altitude sur quelques dizaines de mètres.

3.4.2.3 Effet de portance statique : principe d'Archimède

Un objet est soumis de la part du (ou des) fluide(s) au repos dans le(s)quel(s) il est immergé à des forces pressantes qui s'exercent sur toutes ses surfaces en contact avec un fluide. Nous allons démontrer que la résultante de ces forces pressantes est toujours une force verticale dirigée vers le haut, et égale en norme au poids de fluide déplacé par l'objet.

Soit un objet de volume \mathcal{V} dont l'enveloppe a une aire totale \mathcal{A} , immergé dans un milieu de masse volumique ρ_{fluide} qui dépend de l'altitude. Chaque élément de surface $d\mathbf{S}^1$ de l'objet est soumis à une force pressante élémentaire définie par 1.43 :

$$d\mathbf{F}_p = -pd\mathbf{S} \quad \text{où } p \text{ est la pression du fluide au niveau de } d\mathbf{S}$$

La résultante des forces de pressions s'exerçant sur l'objet s'écrit donc :

$$\mathbf{F}_p = - \iint_{\mathcal{A}} pd\mathbf{S}$$

Projetons cette relation dans une direction \mathbf{u} fixée et quelconque :

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_p \cdot \mathbf{u} &= - \iint_{\mathcal{A}} pd\mathbf{S} \cdot \mathbf{u} = - \iint_{\mathcal{A}} p \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} \\ \Rightarrow \mathbf{F}_p \cdot \mathbf{u} &= - \iiint_{\mathcal{V}} \text{div}(p \mathbf{u}) dV \quad (\text{Green - Ostrogradski}) \\ \Rightarrow \mathbf{F}_p \cdot \mathbf{u} &= - \iiint_{\mathcal{V}} \left(p \underbrace{\text{div}(\mathbf{u})}_{=0} + \mathbf{grad}(p) \cdot \mathbf{u} \right) dV \\ \Rightarrow \mathbf{F}_p \cdot \mathbf{u} &= - \left(\iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{grad}(p) dV \right) \cdot \mathbf{u} \\ \Rightarrow \mathbf{F}_p &= - \iiint_{\mathcal{V}} \mathbf{grad}(p) dV \end{aligned} \quad (1.63)$$

1. Par convention $d\mathbf{S}$ est orienté vers l'extérieur de l'objet, c'est-à-dire de son enveloppe vers le fluide.

Or d'après la loi locale 1.55 exprimant l'équilibre des fluides, $\mathbf{grad}(p) = \rho_{\text{fluide}} \mathbf{g}$. Il vient donc, en supposant le champ de pesanteur uniforme :

$$\mathbf{F}_p = - \left(\iiint_{\mathcal{V}} \rho_{\text{fluide}} dV \right) \mathbf{g} \quad (1.64)$$

La résultante des forces de pression, communément appelée *poussée d'Archimède*, est bien une force verticale dirigée vers le haut (opposée à \mathbf{g}) égale en norme au poids de fluide déplacé par l'objet.

Ainsi, si la masse volumique de l'objet ρ_{objet} est inférieure à celle du fluide dans lequel il est immergé, son propre poids n'atteint pas (en norme) la poussée d'Archimède et l'objet peut rester en suspension ou prendre de l'altitude dans le fluide.

Remarque : Un objet qui flotte dans l'eau, c'est-à-dire qui est en équilibre à l'interface air / eau, est soumis à une résultante des forces de pression que l'on peut assimiler, en norme, au poids d'eau déplacé (négligeant le poids d'air déplacé). Cette approximation est légitimée par la différence d'ordre de grandeur des masses volumiques de l'air et de l'eau (un facteur 1000 entre les deux). On trouve exactement ce résultat en calculant la résultante des forces de pression en prenant, pour la pression de l'air, l'approximation au premier ordre 1.61 et pour la pression de l'eau, la loi fondamentale de l'hydrostatique 1.58 pour les fluides incompressibles.

4 Interprétations à l'échelle microscopique

4.1 Modèle microscopique des fluides

4.1.1 Généralités

Les modèles microscopiques permettant de rendre compte des effets de viscosité et de pression reposent sur l'hypothèse qu'à l'échelle moléculaire les entités (molécules, atomes) qui composent les fluides sont animées d'un mouvement incessant et désordonné appelé *agitation thermique*. Ainsi, chacune des N molécules qui composent une particule de fluide donnée a une vitesse \mathbf{V}_i qui est la somme de la vitesse \mathbf{v} de la particule de fluide et de la vitesse \mathbf{v}_i^* d'agitation thermique. Localement les directions et sens des vitesses \mathbf{v}_i^* sont distribuées aléatoirement de telle sorte à ce que la moyenne (vectorielle) de toutes ces vitesses soit nulle à l'échelle d'une particule de fluide à l'équilibre thermique :

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{v} + \mathbf{v}_i^* \quad \text{avec} \quad \langle \mathbf{v}_i^* \rangle_N = \mathbf{0} \quad (1.65)$$

Dans les fluides usuels à l'équilibre, on considère que la distribution des vitesses correspond à la distribution de Maxwell : parmi N molécules de masse m qui composent un échantillon de

fluide à la température T , le nombre $dN_{\mathbf{v}^*}$ d'entre elles qui ont la vitesse \mathbf{v}^* est donné par :

$$dN_{\mathbf{v}^*} = N \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m\mathbf{v}^{*2}}{2k_B T} \right) dv_x^* dv_y^* dv_z^* \quad (1.66)$$

où k_B est la constante de Boltzmann. N'importe quelle surface fictive prise au sein d'un fluide est *a priori* traversée de part et d'autres par les molécules en déplacement. Ces flux de molécules sont à l'origine des contraintes surfaciques visqueuses, et en partie responsables des contraintes surfaciques de pression. La deuxième cause des contraintes surfaciques de pression est liée aux interactions à distance entre les molécules localisées au niveau de la surface considérée et celles qui sont dans son environnement proche. Nous explicitons ces deux contributions aux contraintes surfaciques dans les deux sous-sections suivantes.

4.1.2 Transferts de quantité de mouvement

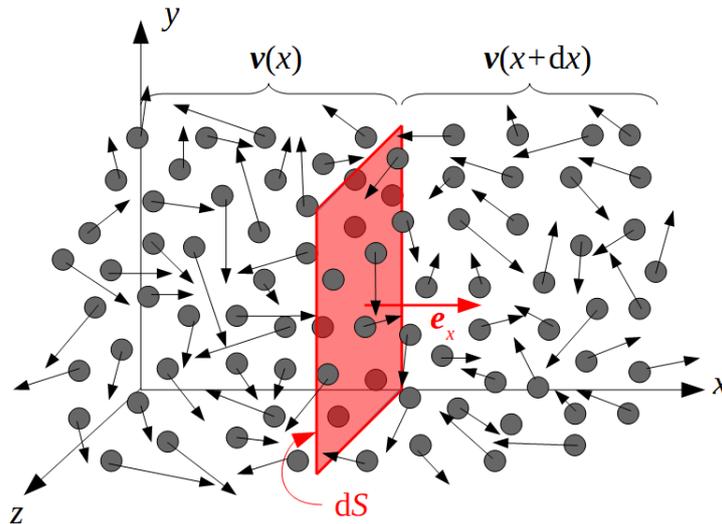


FIGURE 1.9 – Représentation des molécules de part et d'autre d'une surface élémentaire dS

Soit dS une surface de dimensions de l'ordre d'une face de particule de fluide prise à l'intérieur d'un fluide et orientée dans la direction \mathbf{e}_x (figure 1.9).

Pendant un intervalle de temps infinitésimal dt , N' molécules provenant de la région de droite traversent la surface dS vers la région de gauche, chacune transportant une quantité de mouvement $\mathbf{P}_i(x + dx)$ telle que :

$$\mathbf{P}_i(x + dx) = \underbrace{m_i \mathbf{v}(x + dx)}_{\text{composante dynamique}} + \underbrace{m_i \mathbf{v}_i^*}_{\text{composante statique}}$$

Dans le même temps, N'' molécules provenant de la région de gauche traversent la surface dS vers la région de droite, chacune transportant une quantité de mouvement $\mathbf{P}_i(x)$

telle que :

$$\mathbf{P}_i(x) = \underbrace{m_i \mathbf{v}(x)}_{\text{composante dynamique}} + \underbrace{m_i \mathbf{v}_i^*}_{\text{composante statique}}$$

À ces flux de molécules à travers dS est donc associée une variation globale de la quantité de mouvement du fluide de gauche (resp. de droite) pendant dt en raison des échanges avec la région de droite (resp. de gauche). Tout se passe comme si les molécules de la région de droite (resp. de gauche) exerçaient une force au niveau de la surface dS sur les molécules de la région de gauche (resp. de droite), causant ainsi une variation de quantité de mouvement du fluide à gauche (resp. à droite).

Cette force surfacique équivalente possède *a priori* trois composantes dans les direction \mathbf{e}_i , et existe pour des surfaces orientées dans les trois directions de l'espace \mathbf{e}_j . Les composantes dynamique et statique du transfert de quantité de mouvement lié aux flux de molécules participent ainsi au tenseur des contraintes surfaciques défini en début de chapitre (1.15) :

- composante dynamique du transfert de quantité de mouvement, liée au mouvement relatif du fluide de part et d'autre de la surface, c'est-à-dire éléments que nous avons qualifiés de *contraintes visqueuses* (2.3.3.1) et que nous notons σ'_{ij} dans cette synthèse. Ces éléments dépendent de l'orientation \mathbf{e}_j de la surface puisqu'ils sont liés à $\mathbf{v}(x_j + dx_j) - \mathbf{v}(x_j)$;

- composante statique du transfert de quantité de mouvement, indépendante de la vitesse \mathbf{v} du fluide, et liée au mouvement d'agitation thermique.

La composante statique du transfert de quantité de mouvement est orthogonale à la surface dS en raison des propriétés de la distribution des vitesses d'agitation thermique : les autres composantes résultant de la somme des quantités de mouvement des N' et N'' molécules traversant dS s'annulent entre elles.

Par ailleurs, toujours en raison des propriétés de la distribution des vitesses d'agitation thermique, la composante statique du transfert de quantité de mouvement est indépendante de l'orientation de la surface dS considérée, de sorte à ce qu'on puisse associer un scalaire unique qui traduise sous forme de force par unité de surface ce transfert isotrope de quantité de mouvement.

Enfin, en nous référant de nouveau à l'illustration 1.9, on voit par exemple que la variation de quantité de mouvement du fluide à gauche est un vecteur dirigé vers la gauche, autrement dit la force équivalente au transfert de quantité de mouvement est dirigé vers le fluide sur laquelle elle s'exerce. Le scalaire traduisant ce transfert est donc naturellement défini positivement.

On appelle *pression cinétique* cette contribution à la pression statique p définie avec le tenseur des contraintes (2.3.3.2). Elle est toujours positive.

4.1.3 Interactions intermoléculaires

Indépendamment d'un quelconque mouvement des molécules (agitation thermique ou mouvement du fluide), chacune d'entre elle exerce sur ses voisines une force dominée par l'interaction électrostatique. Cette force a une portée très faible mais suffisante pour être à l'origine non seulement de la cohésion des fluides, mais aussi d'autres effets que nous expliciterons dans la partie réservée plus spécifiquement aux liquides.

Le potentiel de Lennard-Jones constitue une modélisation souvent suffisante de l'interaction conservative existant entre deux molécules séparées d'une distance r (figure 1.10). À la partie décroissante est associée une force répulsive entre les deux molécules : cette force existe quand les molécules sont très proches l'une de l'autre. La partie croissante de la courbe correspond à une force attractive entre les molécules. L'intensité de cette force décroît au fur et à mesure que la distance entre les molécules augmente, jusqu'à devenir négligeable et nulle.

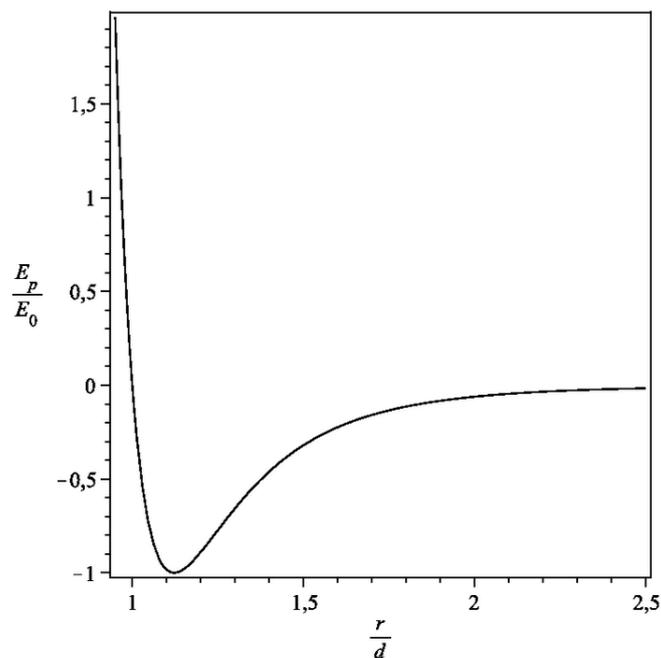


FIGURE 1.10 – Potentiel de Lennard-Jones E_p en fonction de la distance r entre deux molécules

En reprenant le schéma 1.9, les molécules de droite se trouvant au niveau de la surface dS exercent une force à distance sur les molécules se trouvant elles aussi au niveau de la surface mais du côté gauche. La somme de toutes les forces exercées par le fluide de gauche sur celui de droite est perpendiculaire à la surface dS en raison de la symétrie de la distribution des molécules de part et d'autres de la surface. L'intensité de la force résultante rapportée à une unité de surface ne dépend pas de l'orientation de la surface et constitue la deuxième origine des contraintes surfaciques de pression. Si la résultante des forces exercées par le fluide de droite sur le fluide de gauche est dominée par les contributions attractives, c'est-à-dire si la résultante est dirigée vers l'extérieur du fluide qui la subit, la contrainte surfacique associée est définie

négativement ; et réciproquement.

On appelle *pression moléculaire*¹ cette contribution à la pression statique p définie avec le tenseur des contraintes (2.3.3.2). Bien qu'elle puisse *a priori* être positive ou négative, dans la plupart des cas elle est négative car les interactions attractives dominent sur les interactions répulsives dans les fluides usuels.

4.1.4 Bilan : pression d'un fluide

La pression p dans un fluide correspond à la somme des deux contributions sus-citées : la *pression cinétique* p_{cin} (liée au mouvement d'agitation thermique des molécules) et la *pression moléculaire* p_{mol} (liée aux interactions intermoléculaires) :

$$p = p_{\text{cin}} + p_{\text{mol}} \quad (1.67)$$

D'après les interprétations que nous avons faites à propos de ces deux contributions, nous pouvons conclure que la pression d'un fluide :

- augmente quand sa température augmente : en effet la vitesse d'agitation thermique augmente avec la température, entraînant une augmentation du flux de molécules à travers n'importe quelle surface prise dans le fluide. Ainsi la pression cinétique augmente avec la température tandis que la pression dynamique n'est pas affectée ;
- dépend de la densité moléculaire n du fluide (nombre de molécules par unité de volume) : cette dépendance est plus complexe que la précédente :
 - la pression cinétique augmente avec n puisqu'une augmentation de la densité moléculaire entraîne une augmentation du flux de molécules à travers n'importe quelle surface prise dans le fluide ;
 - la pression dynamique augmente (devient de moins en moins négative) à mesure que n augmente : en effet, la distance intermoléculaire diminue quand n augmente, entraînant une augmentation de la partie répulsive du potentiel d'interaction au détriment de la partie attractive. Si n augmente vraiment beaucoup, la pression dynamique peut même devenir positive.

Dans un liquide, la densité moléculaire n est environ 1000 fois plus importante que dans un gaz : la pression cinétique y est donc bien plus grande, mais la pression totale peut être du même ordre de grandeur que dans un gaz (notamment au niveau des surfaces libres) quand la pression dynamique dans les liquides, non négligeable et négative, compense cette supériorité de la pression cinétique.

1. Certains ouvrages utilisent l'appellation « pression dynamique », mais nous préférons ne pas l'utiliser puisque nous définissons la pression comme la partie *statique* du tenseur des contraintes surfaciques par opposition à la partie *dynamique* qui dépend de la vitesse du fluide.

- dépend de la nature des molécules qui composent le fluide : les forces qui existent entre les molécules, et donc la pression dynamique en dépendent.

Dans le cas d'un mélange, chaque espèce chimique qui compose le mélange est l'objet de transferts de quantité de mouvement et d'interactions intermoléculaires à l'échelle microscopique. Les effets associés pour chaque espèce chimique sont rassemblés dans un scalaire appelé *pression partielle*. La pression totale dans un mélange correspond à la juxtaposition des différentes pressions partielles. Si le mélange est idéal, c'est-à-dire si on peut négliger les interactions entre les différentes espèces, la pression du mélange est simplement la somme des pressions partielles associées à chaque espèce chimique qui compose le mélange.

4.2 Application aux gaz

Dans un gaz les interactions intermoléculaires sont très faibles du fait de la distance importante entre les molécules qui composent le gaz. Les effets de pression sont dominés par la contribution que nous avons qualifiée de « cinétique ».

4.2.1 Hypothèses de la théorie cinétique des gaz parfaits

Le modèle du *gaz parfait*, qui décrit les gaz à faible pression, repose sur des hypothèses : certaines sont fondamentales, puisqu'elles définissent les gaz parfaits, tandis que d'autres sont de simples hypothèses de calcul.

Les hypothèses fondamentales sont les suivantes :

1. les interactions intermoléculaires sont négligées en dehors des chocs entre les molécules ;
2. ces derniers sont considérés comme localisés ponctuellement dans l'espace, c'est-à-dire que les molécules ont une extension spatiale négligée.

La pression dynamique est ainsi nulle, ce qui réduit la pression d'un gaz parfait à sa pression cinétique. Dans ce contexte, la pression n'étant liée qu'au transfert de quantité de mouvement par flux de molécules, on peut exprimer la pression d'un gaz parfait au niveau d'une paroi solide en terme de *chocs* des molécules sur la paroi : plus les chocs sont nombreux et intenses (vitesse des molécules importante), plus la pression est grande.

Dans le cadre particulier des gaz parfaits à l'équilibre, on peut lier mathématiquement la pression p , la densité moléculaire n et la température T . Le calcul repose généralement sur les hypothèses simplificatrices :

3. le gaz à l'équilibre est composé d'un seul type de molécules (corps pur) de masse m ;

4. les molécules ne peuvent se déplacer que dans les directions de l'espace $\pm e_x$, $\pm e_y$ et $\pm e_z$; il y a autant de molécules se déplaçant dans chacun de ces six sens¹ ;
5. les molécules ont toute la même vitesse, en norme, qui correspond à la moyenne \bar{v}^* de la distribution de Maxwell des vitesses (1.66) : $\bar{v}^* = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$.

4.2.2 Équation d'état des gaz parfaits

Calculons la pression cinétique d'un gaz parfait, autrement dit exprimons les flux de molécules à travers une surface dS prise au sein d'un gaz parfait. Soit $d\mathbf{S} = dS \mathbf{e}_x$ une surface orientée prise au sein d'un gaz parfait (figure 1.11).

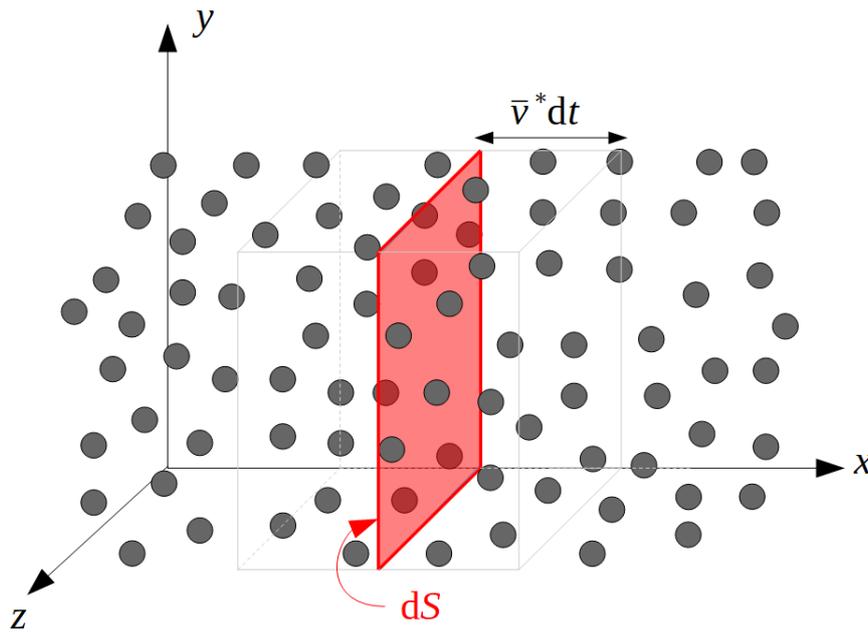


FIGURE 1.11 – Molécules de gaz parfait autour d'une surface dS

Pendant un intervalle de temps dt , N' molécules provenant de la région de droite traversent la surface dS : il s'agit des molécules qui ont une vitesse $-\bar{v}^* \mathbf{e}_x$ et qui se trouvent initialement à une distance maximale $\bar{v}^* dt$ de la surface dS . On a ainsi :

$$N' = \frac{n}{6} \bar{v}^* dt dS$$

De la même façon N'' molécules provenant de la région de gauche traversent la surface dS , avec :

$$N'' = \frac{n}{6} \bar{v}^* dt dS = N'$$

Le gaz de gauche reçoit ainsi N' molécules ayant une quantité de mouvement $-m\bar{v}^* \mathbf{e}_x$

1. Cette hypothèse mathématique découle de l'hypothèse physique de chocs intermoléculaires à l'issue desquels les vitesses des molécules impliquées sont redistribuées aléatoirement dans l'une ou l'autre des directions de l'espace.

tandis qu'il perd N'' molécules ayant une quantité de mouvement $+m\bar{v}^*e_x$.

La variation par unité de temps de la quantité de mouvement du gaz à gauche s'écrit ainsi :

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{n}{6}\bar{v}^* dS \times (-m\bar{v}^*)e_x - \frac{n}{6}\bar{v}^* dS \times m\bar{v}^*e_x = -\frac{n}{3}m(\bar{v}^*)^2 dS e_x$$

Cette variation de quantité de mouvement du gaz de gauche peut s'interpréter comme une contrainte surfacique $\boldsymbol{\sigma}_x = \sigma_{xx}e_x + \sigma_{yx}e_y + \sigma_{zx}e_z$ exercée par le fluide de droite sur le fluide de gauche telle que :

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = (\sigma_{xx}e_x + \sigma_{yx}e_y + \sigma_{zx}e_z)dS \quad \text{avec} \quad \sigma_{xx} = -\frac{n}{3}m(\bar{v}^*)^2 \quad \text{et} \quad \sigma_{yx} = \sigma_{zx} = 0$$

Ainsi, la pression p du gaz parfait, égale à la pression cinétique, est donnée par l'opposé de la contrainte surfacique σ_{xx} , soit $p = -\sigma_{xx}$:

$$p = \frac{n}{3}m(\bar{v}^*)^2 \tag{1.68}$$

En réinjectant l'expression de la vitesse moyenne d'agitation thermique et en explicitant la densité moléculaire n , on obtient l'équation d'état des gaz parfaits¹ :

$$p = \frac{N}{3V}m \frac{3k_B T}{m} \quad \Rightarrow \quad pV = Nk_B T \tag{1.69}$$

Pour un échantillon de gaz parfait de composition et de température fixée, le produit de la pression p par le volume V est ainsi une constante : cette relation constitue la *loi de Mariotte*.

Remarque : dans le cadre du modèle du gaz parfait, l'énergie interne U d'un échantillon composé de N molécules se réduit à la somme des énergies cinétiques :

$$U = N \times \frac{3}{2}k_B T = \frac{3}{2}pV$$

4.2.3 Gaz réels : équation d'état de Van der Waals

Lorsque la pression d'un gaz est trop élevée, c'est-à-dire quand la densité moléculaire est trop importante, le modèle du gaz parfait ne s'applique plus de façon satisfaisante. D'autres modélisations existent pour tenir compte des effets induits par la distance réduite entre les molécules qui composent le gaz. Le modèle le plus immédiat est celui de Van der Waals, qui propose deux aménagements aux hypothèses qui fondent le modèle du gaz parfait :

1. les interactions entre les molécules ne sont pas nulles, donc la pression dynamique non plus. Le terme de pression dynamique induite dans le modèle de Van der Waals est négatif, il correspond à une interaction attractive entre les molécules, et il est pris inversement

1. On introduit parfois la constante des gaz parfaits $R = \mathcal{N}_A k_B$ où \mathcal{N}_A est le nombre d'Avogadro, donnant à l'équation d'état des gaz parfaits la forme $pV = nRT$, où n représente alors la quantité de matière (et non plus la densité moléculaire).

proportionnel au carré du volume molaire. Le coefficient de proportionnalité est noté a et est appelé *terme de cohésion*. La pression p d'un gaz de Van der Waals est donc égale à la pression du gaz parfait équivalent p_{gp} à laquelle on rajoute le terme de pression dynamique :

$$p = p_{\text{gp}} - \frac{an^2}{V^2}$$

- l'extension spatiale des molécules n'est pas nulle, on considère que chaque molécule occupe un volume non nul, et on note b le volume occupé par une mole du gaz (b est appelé *covolume molaire*). Dans une enceinte de volume V , le volume réellement accessible aux molécules dans leurs déplacements est alors égal à $V - nb$ (où n est le nombre de moles de gaz dans l'enceinte).

Ainsi, un gaz de Van der Waals composé de N molécules et contenu dans une enceinte de volume V se comporte comme un gaz parfait à la pression p_{gp} qui occupe un volume $V - nb$. On peut écrire l'équation d'état du gaz parfait pour ces conditions particulières :

$$p_{\text{gp}}(V - nb) = Nk_B T \quad \text{soit} \quad \left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = Nk_B T \quad (1.70)$$

Cette dernière équation constitue l'équation d'état de Van der Waals.

4.3 Application aux liquides

Dans un liquide les interactions intermoléculaires ne sont plus négligeables du fait de la distance réduite entre les molécules composant le liquide. Les effets de pression sont dominés par la contribution que nous avons qualifiée de « moléculaire ».

Un liquide est communément considéré comme un fluide *incompressible*, c'est-à-dire un fluide de masse volumique constante dans le temps et dans l'espace. C'est d'ailleurs sur la base de cette hypothèse que nous avons simplifié et intégré la loi locale (1.21) d'une part pour obtenir la loi fondamentale de l'hydrostatique (1.58) et d'autre part expliquer l'effet Venturi (3.3.4.1).

Or l'hypothèse d'incompressibilité d'un fluide donné, qui se traduit au niveau microscopique par l'homogénéité de sa densité moléculaire n , implique nécessairement l'invariance de la pression (à température fixé) d'après les interprétations que nous venons de présenter. Comment expliquer alors les variations de pression avec la profondeur ou avec la vitesse de l'écoulement dans les liquides ?

Ce paradoxe est résolu si l'on s'intéresse aux limites du modèle du fluide incompressible. En effet, l'hypothèse de l'exacte invariance de la masse volumique des liquides au niveau macroscopique peut aussi bien reposer sur une hypothèse un peu moins radicale au niveau microscopique : la densité moléculaire, et ainsi les distances intermoléculaires dans un liquide

sont presque homogènes. Si les effets de cette modération (« presque ») ne sont pas flagrants à l'échelle macroscopique en ce qui concerne la masse volumique des liquides, les variations de pression associées peuvent en revanche atteindre plusieurs ordres de grandeur car une infime variation des distances intermoléculaires entraîne de grandes variations dans les effets des interactions entre molécules.

4.3.1 Variation de pression dans un champ de pesanteur uniforme

Dans un liquide au repos, les particules de fluides sont très légèrement comprimées à mesure qu'on descend en profondeur en raison du poids du fluide qui le surplombe. Cette compression est si infime qu'elle est à peine détectable au niveau macroscopique. En revanche les molécules s'en trouvent suffisamment rapprochées pour que les effets répulsifs gagnent en intensité au détriment des effets attractifs du potentiel d'interaction intermoléculaire. La pression dynamique augmente donc (devient de moins en moins négative), tandis que la pression cinétique n'est pas sensiblement affectée par cette infime variation de densité moléculaire. Ces effets entraînent les variations de pression que nous avons évoquées précédemment (1.58).

4.3.2 Variation de vitesse et de pression dans un écoulement

Au cours d'un écoulement incompressible, la vitesse du fluide augmente à l'occasion d'un rétrécissement d'une conduite et réciproquement (3.3.4.1). Ces variations de vitesse sont directement liées à l'incompressibilité : sans ces accélérations et rétrécissement le fluide connaîtrait des effets « d'embouteillage », et donc verrait sa masse volumique augmenter en amont des rétrécissements, et diminuer en aval.

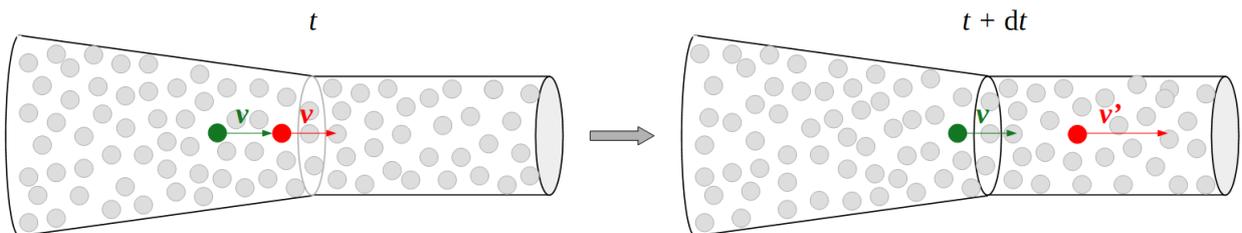


FIGURE 1.12 – Passage de molécules dans le rétrécissement d'une conduite

Malgré cette nécessaire hypothèse d'incompressibilité pour rendre compte de tels effets observables au niveau macroscopique, il faut admettre qu'au niveau microscopique une accélération du fluide entraîne une augmentation de l'écartement des molécules : les plus en avant se mettent à aller plus vite tandis que les plus en arrière poursuivent à la même vitesse, accentuant légèrement l'écartement intermoléculaire (figure 1.12). À cet augmentation de la distance entre les molécules est alors associé un accroissement des effets attractifs du potentiel d'interaction, c'est-à-dire une diminution de la pression dynamique (elle devient de plus en plus négative). La pression cinétique n'étant pas affectée par cette infime variation de densité moléculaire, la

pression totale diminue quand la vitesse du fluide augmente. Réciproquement, si la vitesse du fluide diminue les molécules en avant ralentissent tandis que celles en arrière poursuivent encore à la même allure, se rapprochant ainsi légèrement des premières. Les effets répulsifs gagnent en intensité, faisant augmenter la pression dynamique et avec elle la pression totale.

5 Conclusion

5.1 Synthèse

La pression d'un fluide est une grandeur physique qui traduit l'effet des propriétés statiques (indépendantes de la vitesse du fluide) d'un fluide sur lui-même, et par extension d'un fluide sur n'importe quelle paroi solide qui y est immergée. À l'échelle mésoscopique, ces effets sont modélisés en chaque point d'un fluide par un tenseur diagonal $\overline{\overline{P}}$ appelé tenseur des contraintes pressantes et dont la pression p , aussi appelée pression statique, est l'opposé du tiers de la trace. La résultante \mathbf{F}_p des forces de pression s'exerçant sur toute l'enveloppe d'une particule de fluide de volume $d\Omega$ est directement reliée à ce tenseur. Les lois de la dynamique classique permettent d'établir de façon très générale la loi locale de comportement des fluides, autrement dit l'équation différentielle vérifiée par la vitesse \mathbf{v} de toute particule de fluide. Cette équation différentielle, appelée loi locale du mouvement d'un fluide, se résout facilement dans quelques cas spécifiques, conduisant à des lois macroscopiques à propos notamment de la vitesse et de la pression dans les fluides. Pour citer les deux cas que nous avons traités dans cette synthèse, on obtient d'une part les lois de Bernoulli pour les écoulements parfaits et incompressibles soumis à des forces extérieures conservatives, et d'autre part la loi fondamentale de l'hydrostatique pour les fluides incompressible en équilibre dans un champ de pesanteur uniforme. Les contraintes de pression formalisées au niveau mésoscopique ainsi que les lois macroscopiques explicitant les variations de pression en différents points d'un fluide (en mouvement ou non) s'interprètent au niveau microscopique comme la superposition de deux contributions : une pression cinétique p_{cin} liée au transfert de quantité de mouvement associé au mouvement d'agitation thermique et une pression moléculaire p_{mol} liée aux forces d'interaction intermoléculaires d'autre part. Les effets macroscopiques de pression sont dominés par la pression cinétique dans les gaz, et s'y réduisent même dans le cadre du modèle du gaz parfait ; tandis que dans les liquides la pression moléculaire participe souvent de façon non négligeable aux effets de pression observables à l'échelle macroscopique.

5.2 Autres pressions

Dans cette synthèse nous n'avons pas établi l'équivalence entre la pression thermodynamique p_{thermo} et la pression statique p dans la limite thermodynamique. Nous n'avons pas non plus traité les passages de la définition thermodynamique aux définitions de la pression dans les différents ensembles (micro-canonique, canonique, grand-canonique) de la physique statique. Ces équivalences sont avérées mais compliquées à démontrer, ce qui dépasse le cadre de ce

travail doctoral. Remarquons simplement que la définition de la pression thermodynamique est définie positivement s'il faut effectivement fournir de l'énergie pour diminuer le volume d'un système, ce qui est cohérent avec les définitions mécaniques traitées dans cette synthèse.

Par ailleurs certains adjectifs sont associés au nom de pression pour désigner la pression statique d'un liquide ou d'un gaz dans certaines circonstances ou lieux spécifiques : pression atmosphérique standard ou pression normale (valeur de pression $p = 1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$), pression standard (valeur de pression $p = 1 \text{ bar}$), pression d'arrêt (pression en un point d'un écoulement où le fluide est à l'arrêt), pression de vapeur saturante (pression d'un gaz en équilibre avec le liquide associé), pression osmotique (différence de pression à l'interface entre deux solutions de concentrations différentes séparées par une membrane imperméable au soluté mais perméable au solvant) etc.

Enfin, le terme pression peut être utilisé de façon générique pour désigner une grandeur homogène à une force par unité de surface qui ne s'interprète toutefois pas aux niveaux mésoscopique et microscopique, de la même façon que pour les fluides. Il en va ainsi de la pression magnétique et de la pression électrostatique, désignées ainsi car consistant en des forces surfaciques s'exerçant normalement à une paroi solide (solénoïde ou conducteur). Ou encore de la pression de dégénérescence, désignée ainsi car représentant l'énergie qu'il faut fournir pour diminuer le volume d'un ensemble de fermions (dont le comportement diffère toutefois de celui des molécules qui composent les fluides que nous avons considérés).

5.3 La pression dans les programmes scolaires

Si le terme « pression » n'arrive que très tardivement dans les programmes du cursus général, l'approche proposée en cycle 2 à propos de la matérialité de l'air semble mettre les élèves en situation d'éprouver la pression de l'air lorsque celui-ci est comprimé ou détendu. Les effets pressants ne sont pas nommés, mais constituent la preuve de l'existence de « quelque chose » là où on ne voit rien.

Les programmes de première et terminale du lycée générale abordent la pression par le biais de lois phénoménologiques à l'échelle macroscopique, majoritairement à l'équilibre (force exercée sur une paroi solide, loi de Mariotte, équation d'état des gaz parfaits, loi fondamentale de la statique des fluides, poussée d'Archimède), et un peu hors équilibre (relation de Bernoulli dans le cas stationnaire). L'approche microscopique prévue dans les programmes de terminale est clairement restreinte aux gaz parfaits à l'équilibre ; celle prévue dans les programmes de première n'a en revanche pas de limite explicite. Enfin l'approche mésoscopique, porte d'entrée de notre synthèse, n'est pas prévue dans les programmes.

Références du chapitre 1

- Calecki, D. (2006). *Physique des milieux continus : Tome 1, Mécanique et thermodynamique*. Éditions Hermann.
- Diu, B., Guthmann, C., Lederer, D., & Roulet, B. (2007). *Thermodynamique*. Éditions Hermann.
- Diu, B., Guthmann, C., Lederer, D., & Roulet, B. (1996). *Physique statistique*. Éditions Hermann.
- Feynman, R. (1999). *Le cours de physique de Feynman, électromagnétisme 2*. Dunod.
- Hermann, C. (2003). *Physique statistique et illustrations en physique du solide*. École polytechnique.
- Hladik, J. (1999). *Le calcul tensoriel en physique - Cours et exercices corrigés (3e édition)*. Dunod.
- Landau, L., & Lifchitz, E. (1998). *Physique Théorique : Mécanique des Fluides (3e édition)*. Ellipses Marketing.
- Petit, L., Hulin, J.-P., & Guyon, É. (2012). *Hydrodynamique physique*. EDP Sciences.
- Taillet, R., Villain, L., & Febvre, P. (2009). *Dictionnaire de physique (2e édition)*. de Boeck.

Chapitre 2

Première enquête empirique

État de l'art

Contents

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 78 |
| 2 | Idées pouvant faire obstacle à la compréhension | 78 |
| 2.1 | Propriétés supposées de la pression au niveau macroscopique | 79 |
| 2.1.1 | La pression n'existe que dans les situations exceptionnelles | 79 |
| 2.1.2 | La pression est une force pressante | 79 |
| 2.1.3 | La pression est égale au poids <i>du fluide</i> | 81 |
| 2.1.4 | Les forces de pression ne se propagent pas de façon isotrope | 81 |
| 2.1.5 | La pression varie horizontalement dans un fluide | 82 |
| 2.1.6 | La pression dans un liquide dépend des caractéristiques du contenant | 82 |
| 2.1.7 | La pression augmente avec l'altitude | 84 |
| 2.1.8 | La poussée d'Archimède n'a rien à voir avec la pression | 84 |
| 2.1.9 | Le vide n'existe pas | 85 |
| 2.1.10 | La pression est une propriété intrinsèque du fluide | 85 |
| 2.2 | Interprétations de la pression au niveau microscopique | 85 |
| 2.2.1 | Difficultés d'assimilation du modèle particulaire | 85 |
| 2.2.2 | La pression n'est reliée qu'à la densité particulaire | 86 |
| 2.2.3 | Seuls les aspects cinétiques peuvent changer dans un liquide | 86 |
| 3 | Raisonnements mis en œuvre | 87 |
| 3.1 | Raisonnement animiste | 87 |
| 3.2 | Raisonnement finaliste | 87 |
| 3.3 | Raisonnement causal | 88 |
| 3.3.1 | Raisonnement linéaire causal | 88 |
| 3.3.2 | Caractéristiques des explications causales | 88 |
| 3.4 | Raisonnement local | 90 |
| 3.4.1 | Concentration sur une sous-partie du système au détriment de son ensemble | 90 |
| 3.4.2 | Concentration sur le système au détriment de l'extérieur | 90 |
| 3.5 | Raisonnement mécanique | 91 |
| 3.5.1 | Adhérence force / vitesse | 91 |
| 3.5.2 | Attribution d'une force aux objets | 91 |
| 3.5.3 | Focalisation sur les mouvements | 92 |
| 3.6 | Raisonnement mathématique | 92 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Propositions didactiques | 92 |
| 4.1 | Pour l'enseignement d'un modèle particulière des gaz | 93 |
| 4.1.1 | Une séquence d'enseignement inspirée de l'histoire des sciences | 93 |
| 4.1.2 | Une séance d'élaboration d'un modèle par les élèves | 93 |
| 4.2 | Pour l'enseignement des propriétés thermoélastiques des gaz | 94 |
| 4.2.1 | Une approche microscopique basée sur la théorie cinétique des gaz | 94 |
| 4.2.2 | Une approche macroscopique basée sur l'histoire des sciences | 95 |
| 4.2.3 | Former les enseignant-e-s par le changement conceptuel | 95 |
| 4.3 | Pour l'enseignement de l'hydrostatique | 96 |
| 4.3.1 | Un modèle particulière pour définir la pression dans un liquide | 96 |
| 4.3.2 | Un modèle à l'échelle mésoscopique pour comprendre la pres- sion en présence de gravité | 96 |
| 5 | Conclusion | 97 |
| | Références du chapitre 2 | 98 |

1 Introduction

Comme nous l'avons exposé dans l'analyse de contenu (chapitre 1), la pression dans les fluides est définie aux échelles mésoscopique et macroscopique, au repos comme hors équilibre, et s'interprète comme le résultat moyen des propriétés des particules qui constituent la matière à l'échelle microscopique. Autant d'angles d'approche d'un même concept qui pourraient faire l'objet d'une séquence d'enseignement, et donc d'une reconstruction didactique. Afin de rendre le plus utile et pertinent possible ce recours didactique à l'histoire des sciences, il convient de circonscrire les objectifs visés autour de contenus conceptuels potentiellement problématiques. Dans cette perspective nous avons recensé dans la littérature les difficultés rencontrées par les élèves et étudiant·e·s à propos de la pression dans les fluides.

Sur ce thème large les recherche en didactique sont déjà assez nombreuses. Il se trouve toutefois que l'écrasante majorité des études qui ont été menées jusqu'à présent, d'une part à propos des difficultés que les élèves et étudiant·e·s rencontrent dans la compréhension des phénomènes liés à la pression, et d'autre part à propos des raisonnements qu'ils mettent en œuvre dans ces contextes, concernent la description *macroscopique* de systèmes *au repos* ainsi que les grandeurs physiques associées. Par ailleurs ces études sont relativement anciennes (une vingtaine d'années en moyenne). Dans les deux premières parties de cet état de l'art nous faisons le bilan de ce qui peut se présenter comme des difficultés pour les élèves et les étudiant·e·s dans la compréhension des phénomènes liés à la pression. Ce passage en revue, quoi que non absolument exhaustif, s'efforce de recenser très largement ces difficultés, tant du point de vue des savoirs qu'elles concernent que du public qui s'y heurte. Dans cet état de l'art nous rapportons ainsi les résultats de la recherche en didactique sur les questions du vide, de l'air atmosphérique, de la pression dans les liquides, ou encore de l'immersion ou de la flottaison. De façon plus marginale mais qui mérite toutefois d'être relevée nous avons rencontré quelques études qui portent sur les interprétations microscopiques de la pression dans les liquides et dans les gaz.

En réponse aux difficultés pointées dans ces différentes études dont nous faisons la revue, quelques travaux s'attachent à proposer des modèles, des stratégies et des scénari pédagogiques à destination des enseignant·e·s. Dans la dernière partie de ce chapitre nous faisons un recensement de toutes ces propositions. Certaines d'entre elles s'appuient sur l'histoire des sciences, mettant en scène de façon plus ou moins explicitement les savants et idées qui ont marqué l'histoire.

2 Idées pouvant faire obstacle à la compréhension

Voici un état des lieux des idées des élèves et étudiant·e·s qui ont été recensées jusqu'alors, dans la description macroscopique des systèmes pour commencer, puis dans l'interprétation microscopique de certains faits.

2.1 Propriétés supposées de la pression au niveau macroscopique

2.1.1 La pression n'existe que dans les situations exceptionnelles

Avant même l'enseignement, et dès le plus jeune âge, les élèves ont une idée de ce qu'est la pression qui n'est probablement pas étrangère à l'usage courant que l'on fait de ce terme : « être sous pression », « avoir la pression », « faire pression », « subir des pressions » etc. On notera la connotation souvent négative dans l'usage du mot, ainsi que l'intensité exceptionnelle des situations auxquelles il est associé.

Appliqué naïvement au domaine scientifique, le terme pression ferait ainsi référence à un état de compression anormal de la matière, et tout particulièrement de la matière gazeuse. C'est ce qui ressort de l'étude de Séré (1986) qui s'intéresse aux conceptions qu'ont les élèves de 6^e à propos de l'état gazeux avant tout enseignement sur le sujet. Dans une étude précédente menée auprès d'élèves français·e·s de 11 à 13 ans Séré (1982a) note déjà l'usage spontané de l'expression « l'air a une pression » dans le cas où ce dernier est comprimé, et donc doté d'une « puissance » particulière. Bien que l'usage du mot *pression* n'y soit pas discuté, une étude menée auprès d'instituteurs et d'institutrices swazi ¹, montre la persistance de cette association préférentielle compression de l'air / pouvoir pressant (« pulling power ») (Rollnick & Rutherford, 1990).

L'idée de pression est ainsi très tôt associée, à juste titre, à l'idée de force. Toutefois chez les plus jeunes élèves l'existence d'une force de poussée n'est pas concevable autrement que comme cause ou conséquence d'un mouvement. Il en résulte que les enfants de 11 - 13 ans admettent rarement que l'air atmosphérique exerce une force, à moins qu'il soit en mouvement, ce qui est rarement le cas dans les expériences présentées aux élèves (Séré, 1986). L'air atmosphérique est souvent considéré comme "normal" tant qu'il n'est pas en mouvement, cet état de normalité impliquant l'absence de pression et de force (Séré, 1986). Avant même qu'il soit question de force c'est l'existence même de l'air atmosphérique dont doutent les plus petits, faute de perception (Borghini & al., 1988). La suspicion quant à l'existence de la pression atmosphérique persiste jusqu'à un âge avancé, comme en témoigne cette étude menée auprès d'étudiant·e·s français·e·s de L3 :

« le fait que plus des trois-quarts des étudiant·e·s interrogés ne prennent pas explicitement en compte l'action de l'air extérieur pour expliquer la suspension de la colonne de mercure puis sa diminution semble indiquer que ceux-ci peinent à admettre l'existence même de la pression atmosphérique. » (de Hosson & Caillarec, 2009, p.126)

2.1.2 La pression est une force pressante

De nombreux auteurs et autrices s'accordent à dire que les élèves et étudiant·e·s confondent voire identifient la pression en un point du fluide à la force pressante que subirait n'importe quelle surface solide plongée dans le fluide en cet endroit (Séré, 1985 ; Giese, 1987 ; Mayer, 1987 ;

1. Le Swaziland est une petite monarchie du sud de l'Afrique, appelé Eswatini depuis 2018.

Kariotoglou & Psillos, 1993a ; Besson & al., 2001 ; Besson, 2004a). Comme le concèdent avec bienveillance Kariotoglou et Psillos (1993a), l'utilisation de ce modèle appelé « modèle de la force pressante » est assez naturelle :

« Une telle confusion entre force et pression est caractéristique du "modèle de la force de pression" et peut être due à une influence de l'environnement ou à l'enseignement. Autrement dit, les effets de la pression ne sont pas directement perceptibles ou mesurables comme le sont les effets de la force de pression correspondante, par exemple la poussée d'Archimède, la déformation des membranes, etc. En fait, la pression n'est mise en évidence qu'à travers les effets de la force de pression. Le point de vue selon lequel "une grande quantité d'eau impose une pression plus forte" est fort répandu chez les non scientifiques. Un autre facteur qui influence la popularité de ce modèle pourrait bien être l'utilisation fréquente dans les manuels scolaires et dans l'enseignement ordinaire d'éléments tels que des flèches pour indiquer la pression ou des expressions telles que "la pression s'exerce" ou "accepte la pression" qui relèvent d'un modèle de la pression intégrant la contrainte. » (Kariotoglou & al., 1993a, p.171)

Il n'en demeure pas moins qu'attribuer des propriétés vectorielles à la pression, en particulier une direction, conduit à des conclusions bien souvent erronées. Selon l'âge des élèves et le contexte dans lequel ils et elles sont interrogé-e-s, le caractère vectoriel supposé de la pression se traduit par différentes croyances que nous allons maintenant expliciter.

2.1.2.1 *La pression est une force dans la direction du mouvement du fluide :*

Tout d'abord, pour de jeunes élèves français-e-s de 13 - 14 ans et avant enseignement, la pression est plus fréquemment associée spontanément à des situations mettant en jeu un fluide en mouvement (chutes d'eau, etc.) qu'à des situations statiques (Giese, 1987). Par ailleurs, l'étude de Séré (1982a) met en évidence que pour les élèves de 11 - 13 ans les gaz qui exercent une action en raison de leur mouvement ne le font que dans une direction qui correspond à celle de leur mouvement.

2.1.2.2 *La pression est une force de réaction opposée à la force qui la crée :*

La même étude de Séré (1982a) ayant pointé que pour certains élèves de 11 - 13 ans la pression est associée à un état de compression anormal de la matière précise aussi que la pression (considérée comme force de réaction) et la force qui crée l'état anormal ont pour ces élèves la même direction mais un sens opposé.

2.1.2.3 *La pression est une force verticale dirigée vers le bas :*

Selon Mayer (1987), bien que connaissant la définition $p = F/S$, beaucoup de lycéen-ne-s français-e-s répondent à des questions plus spécifiques comme si la pression était une force diri-

gée uniquement vers le bas, et qui s'exerçait sur une surface horizontale. De façon plus modérée mais quand même erronée, nombre d'élèves enquêté·e·s par Engel Clough et Driver (1985a) expliquent que « la pression dans la direction verticale descendante est plus grande que vers les côtés ». On peut supposer que ces croyances sont à mettre en lien avec la confusion voire l'identification fréquente de la pression au poids *du fluide*.

2.1.3 La pression est égale au poids *du fluide*

Pour les élèves grecs et grecques de 13 - 14 ans la pression en un point d'un liquide est parfois assimilée au poids, et par voie de conséquence à la quantité de liquide dans le récipient (Kariotoglou & Psillos, 1993a). Selon ce modèle la pression dépend donc de la direction. S'il est relativement acceptable pour les élèves que la *pression verticale* augmente proportionnellement avec la profondeur, leurs interprétations de la *pression horizontale*¹ sont bien moins fructueuses (Giese, 1987).

Après plusieurs années d'enseignement, cette assimilation naïve de la pression « au poids » évolue vers une forme *a priori* plus en accord avec le savoir de référence, mais dont les traductions hâtives ou abusives conduisent encore à des conclusions erronées :

- Pour certain·e·s lycéen·ne·s et étudiant·e·s de première année universitaire la pression en un point d'un liquide serait égale au poids « du fluide au dessus », dans le sens *tout* le fluide se trouvant au dessus de l'horizontale au point considéré, tant que ce fluide a une interface libre avec l'atmosphère (Besson & al., 2001 ; Besson, 2004b).
- Un nombre non négligeable de lycéens et d'étudiant·e·s estiment que la pression en un point d'un liquide ne dépend *que* de la hauteur de fluide surplombant le point considéré faisant ainsi fi de l'éventuelle influence de la pression atmosphérique sur la pression dans les liquides, et réduisant abusivement la pression à un seul effet de gravité (Besson & al., 2001 ; Besson, 2004b).

Cette focalisation sur le liquide surplombant un point donné exclu ainsi tout raisonnement impliquant une interaction horizontale qui rende compte du principe de Pascal.

2.1.4 Les forces de pression ne se propagent pas de façon isotrope

Le concept de liquide comme transmetteur de pression est absent, ou défaillant chez les élèves grecs et grecques de 13 - 14 ans (Kariotoglou & al., 1990). Lorsque ce concept est défaillant les élèves conçoivent la transmission de la pression uniquement dans une direction privilégiée, qui est le plus souvent la direction verticale.

Ce constat est partagé par les auteurs ayant proposé des modèles pour aider les élèves et étudiant·e·s à comprendre cette propriété des fluides : il est difficile d'interpréter, voire même d'accepter qu'une action extérieure sur un fluide (ou l'action du poids du fluide sur lui même)

1. Traduction des expressions « horizontal pressure » et « verticale pressure » utilisées par l'autrice, mais dont on ne sait pas exactement à quoi elle renvoient.

entraîne une distribution de forces dans le fluide dans des directions indépendantes de la force appliquée (Besson & al., 2001 ; Besson, 2004b ; Borghi & al., 1996).

Potentiellement sous-jacent à cette difficulté certain·e·s étudiant·e·s comprennent parfois le terme « incompressible » comme « dont la pression ne peut pas varier »¹ (Besson, 2001).

2.1.5 La pression varie horizontalement dans un fluide

Après enseignement de la différence entre force et pression, de nombreux élèves français·e·s de 14 ans développent une conception erronée à propos des variations horizontales de la pression dans un fluide : la pression en un point d'un objet immergé dans un fluide serait directement proportionnelle à la distance entre ce point et la paroi du contenant la plus proche (Giese, 1987). Cette idée s'apparente à une extrapolation du principe de variation de la pression proportionnellement à la profondeur, autrement-dit à la distance à la surface libre du fluide.

Cette généralisation abusive n'est pas présentée en temps que résultat mais on en retrouve des traces dans une transcription d'un entretien mené par Engel Clough et Driver (1985) auprès d'élèves anglais·e·s de 12 à 16 ans :

« pressure on his nose would be greater because of the greater amount of water, the greater volume of water to him than above him. [She then drew arrows to show that the distance from the fish's nose to the tank side was greater than the distance from his back to the water surface.] » (Engel Clough & Driver, 1985, p.139)

A l'inverse, des étudiant·e·s de Pennsylvanie pensent que la pression dans liquide est plus faible au cœur d'un récipient qu'en un point de même profondeur mais plus près des parois (Goszewski, 2013).

2.1.6 La pression dans un liquide dépend des caractéristiques du contenant

2.1.6.1 La pression est plus grande dans un contenant étroit :

Les études de Kariotoglou et Psillos (1993a) montrent que lorsqu'ils ou elles doivent interpréter des situations impliquant des liquides à l'équilibre, beaucoup d'élèves grecs et grecques de 13 - 14 ans utilisent un modèle qualifié d' « anthropomorphique » par les auteurs (« modèle de la foule »). Selon ce modèle la pression du liquide dans un récipient rempli jusqu'à une certaine hauteur est d'autant plus grande que le récipient est étroit. Les auteurs voient dans ce modèle un raisonnement inspiré de l'expérience quotidienne : la foule traversant un passage étroit est plus compressée que lorsqu'elle est dispersée dans un espace plus grand. Au-delà du raisonnement animiste traduisant *le ressenti* ou *l'impression* des individus coincés dans la foule, les élèves utilisant ce modèle semblent considérer que la densité est réellement plus grande dans un récipient plus étroit. Ainsi dans un récipient plus grand le liquide voire même la pression sont « dilués ».

1. Nous avons discuté de cette subtilité au chapitre 1 : l'incompressibilité, si elle peut être comprise comme absolue à l'échelle macroscopique, et à modérer à l'échelle microscopique de sorte à rendre compte des variations de pression existant bel et bien dans les fluides « incompressibles ».

Les études de Besson et al. (2001) et Besson (2004a), réalisées auprès de lycéen·ne·s italien·ne·s et français·e·, ainsi que d'étudiant·e·s belges en première année universitaire, confirment le résultat précédent, en précisant toutefois que ce modèle naïf est de moins en moins employé avec l'âge.

Par ailleurs les auteurs rendent compte du rôle des parois évoqué par les élèves et les étudiant·e·s : dans un récipient plus étroit les parois poussent ou pressent plus le liquide donc la pression est plus grande.

2.1.6.2 *La pression est plus grande dans un contenant large :*

A l'inverse, d'autres élèves grecs et grecques de 13 - 14 ans, moins nombreux et nombreuses que les précédent·e·s, pensent que la pression du liquide dans un récipient rempli jusqu'à une certaine hauteur est d'autant plus grande que le récipient est large (Kariotoglou & Psillos, 1993b). En effet, les élèves en question utilisent ce que les auteurs appellent le « modèle de la force pressante », modèle le plus souvent utilisé par les élèves selon lequel la pression est assimilée à la force exercée par le liquide, c'est-à-dire à son poids. Or dans le grand récipient il y a plus de liquide, donc une plus grande pression.

2.1.6.3 *La pression est plus grande dans un récipient fermé :*

D'après les études de Besson et al., (2001) et Besson (2004b), une large partie des lycéen·ne·s français·e· et italien·ne·s pensent que la pression est plus grande dans un récipient fermé, et tout particulièrement quand le fluide considéré est un gaz. Les fluides enfermés disposant de moins d'espace, de moins de liberté, la pression y est ainsi plus grande. Cette idée ne se retrouve presque plus chez les étudiant·e·s belges de première année universitaire (Besson, 2004b), mais reste fortement mobilisée par les étudiant·e·s américain·e·s dans le cadre de l'enquête menée par Goszewski et al. (2013).

2.1.6.4 *La pression est plus grande au fond d'un récipient évasé :*

En conséquence de l'assimilation de la pression en un point d'un fluide au poids *du fluide situé au dessus* beaucoup de lycéen·ne·s et d'étudiant·e·s pensent que la force exercée par le fluide est plus grande sur le fond d'un récipient évasé que sur celui d'un récipient droit de même fond et rempli jusqu'au même niveau (figure 2.1) (Besson & al., 2001 ; Besson, 2004b).

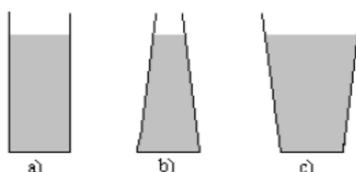


FIGURE 2.1 – Extrait du questionnaire diffusé par Besson et al., 2001

2.1.7 La pression augmente avec l'altitude

En dépit de cette association assez consensuelle entre la pression en un point d'un fluide à l'équilibre et le poids du fluide surplombant le point considéré, une étude menée aux États-Unis sur un large panel d'étudiant·e·s (du secondaire, du supérieur et même des apprentis enseignant·e·s) montre que pour beaucoup la pression ne diminue pas avec l'altitude, au contraire. Le nombre d'étudiant·e·s concerné·e·s par cette croyance varie du tiers aux trois quarts selon le niveau de formation ; globalement le taux de bonne réponse augmente avec le niveau d'étude, sauf pour les futur·e·s enseignant·e·s au niveau élémentaire qui présentent un taux de mauvaises réponses comparable à celui des plus jeunes élèves sondé·e·s (Aron & al., 1994).

De la même manière l'étude française de Hosson et Caillarec (2009) révèle que pour un quart des étudiant·e·s de L3 interrogé·e·s la pression augmente avec l'altitude. Dans cette étude les étudiant·e·s doivent proposer une explication à la baisse du niveau de mercure dans le tube de Torricelli quand celui-ci est porté en altitude. Bien que la question du lien entre pression et altitude ne leur soit pas posée de manière explicite, le fait qu'ils et elles soient si nombreux et nombreuses à appuyer leur réponse sur ce que les autrices qualifient de « pseudo-hypothèse » montre que pour ces étudiant·e·s l'hypothèse de la pesanteur de l'air n'est pas opérationnelle.

2.1.8 La poussée d'Archimède n'a rien à voir avec la pression

Des études ont été menées auprès de jeunes élèves à propos de leur compréhension des circonstances dans lesquelles certains objets flottent tandis que d'autres coulent. Le pouvoir de flottaison est parfois attribué au liquide, qui pousse les objets vers le haut (Dentici & al., 1984), et parfois à l'objet lui-même (Biddulph & Osborne, 1984; Dentici & al., 1984). Dans le premier cas, certain·e·s élèves pensent que l'objet flotte d'autant plus haut qu'il y a une grande profondeur de liquide sous lui pour le retenir (Biddulph & Osborne, 1984). Dans le second cas, différents paramètres concentrent l'attention des élèves, mais rarement plusieurs en même temps. Tout d'abord la masse de l'objet : un objet flotte parce qu'il est léger, au même titre qu'un objet coule parce qu'il est lourd. Ensuite la nature même du matériaux le destine à couler ou à flotter : « parce que les choses faites de fer, de métal, de plomb coulent tandis que celles faites de bois, qu'elles soient lourdes ou légères, flottent » (Dentici & al., 1984). Enfin, une interprétation *hybride* considère que les objets flottent à un niveau d'autant plus bas qu'ils sont gros en proportion de leur masse, jusqu'à couler au lieu de flotter quand leur taille leur confère une masse trop importante (Biddulph & Osborne, 1984).

Interrogés à propos des forces subies par un objet immergé dans un fluide, les étudiant·e·s de première année universitaire qui ont répondu à Besson et al. (2001) se trompent majoritairement. Leurs erreurs sont multiples : différences d'intensité entre forces horizontales et forces verticales, même intensité pour les forces verticales en haut et en bas de l'objet etc. Ces résultats montrent que les étudiant·e·s comprennent mal l'action d'un fluide sur un objet qui y est immergé, et en particulier que la majorité ne fait pas de lien entre pression et poussée d'Archimède. Les forces de pression ont des propriétés variables selon les étudiant·e·s, tandis

que la poussée d'Archimède est, pour certain·e·s, une force supplémentaire. Ce dernier point est plus récurrent dans le cas où le fluide considéré est l'air. Pour finir, la poussée d'Archimède ainsi considérée ne concernerait que le bas des objets qui sont immergés.

2.1.9 Le vide n'existe pas

La littérature montre que l'idée selon laquelle la nature aurait horreur du vide est très ancrée dans l'esprit des élèves et même de certain·e·s étudiant·e·s pourtant averti·e·s. Pour les plus jeunes, possiblement avant même qu'ils et elles n'aient jamais entendu la fameuse assertion aristotélicienne, admettre l'existence du vide n'est ni spontané ni aisé (Brehelin & Guedj, 2007). Le mot vide est parfois utilisé dans un sens courant, synonyme de « rempli d'air ». Étant donné que pour beaucoup d'élèves l'air décompressé ou raréfié (par exemple dans une paille) est doté de propriétés mécaniques telles que la capacité de tirer ou d'aspirer (Engel Clough & Driver, 1985 ; de Berg, 1992 ; Séré, 1982b ; Tytler, 1992), on comprend que l'existence du vide leur soit difficile à concevoir.

Bien qu'ayant reçu un enseignement important devant en principe leur permettre de dépasser cette croyance, un nombre important d'étudiant·e·s français·e·s de L3 hésitent encore à admettre que le haut du tube dans le dispositif de Torricelli soit vide ou presque, invoquant même parfois de façon explicite le dogme aristotélicien (de Hosson & Caillarec, 2009). Les étudiant·e·s universitaires israélien·ne·s étudié·e·s par Novick et Nussbaum (1981) présentent aussi des signes de réticence à l'acceptation de l'existence du vide.

2.1.10 La pression est une propriété intrinsèque du fluide

Selon la classification élaborée par Kariotoglou et Psillos (1993b), un troisième modèle est utilisé par les élèves grecs et grecques de 13 - 14 ans dans l'interprétation de situations impliquant des liquides à l'équilibre : le « modèle de la liquidité ». Il semblerait que ce modèle soit considéré par les auteurs de ces études comme le plus en accord avec le savoir enseigné aux élèves, mais aussi celui que ces dernier·e·s utilisent le moins. La pression y est considérée comme une propriété intrinsèque du fluide, qui connaît des variations selon les situations. L'utilisation de ce modèle par les élèves se traduit par l'usage d'expressions du type « le liquide a une pression ».

L'usage d'un tel modèle ne conduit certainement pas à des conclusions erronées mais se montre peu opérationnel s'il n'est pas assorti d'une interprétation microscopique complète et valide.

Quelques études, peu nombreuses, se sont justement penchées sur les difficultés rencontrées par les étudiant·e·s dans l'interprétation microscopique des phénomènes liés à la pression.

2.2 Interprétations de la pression au niveau microscopique

2.2.1 Difficultés d'assimilation du modèle particulaire

Communément admise à partir d'un certain stade de formation, l'approche particulaire de la matière n'est ni spontanée, ni sans difficulté pour les plus jeunes élèves (Brehelin &

Guedj, 2007 ; Mitchell & Kellington, 1982). Bien qu'acceptant assez rapidement que la matière est composée de particules, c'est avec plus de difficultés qu'ils et elles appréhendent la nature de l'espace entre ces particules (à savoir du vide). C'est ce qui ressort de l'étude menée par Novick et Nussbaum (1978) auprès de collégien·e·s israélien·e·s, mais aussi d'une seconde étude menée par les mêmes auteurs cette fois sur un public plus large allant jusqu'aux étudiant·e·s universitaires (Novick & Nussbaum, 1981). Par ailleurs ces particules sont souvent considérées par les élèves comme des fractionnements de la matière possédant individuellement les mêmes propriétés que le tout macroscopique auquel elles participent, et connaissant les mêmes variations (en particulier dans le cas des changements d'état) (Novick & Nussbaum, 1978).

Cette difficile assimilation du modèle particulaire conditionne pourtant l'interprétation fructueuse de la pression et des phénomènes associés au niveau microscopique. Heureusement l'étude de Novick et Nussbaum (1981), qui questionne l'évolution de l'acceptation du modèle particulaire au fur et à mesure que les étudiant·e·s reçoivent des enseignements supplémentaires, montre que plus les étudiant·e·s sont à un stade d'étude avancée, plus ils et elles assimilent les différents aspects du modèle : distribution particulaire uniforme dans un gaz, mouvement d'agitation perpétuel des particules, évolution de ce dernier en cas de variation de température, variation de la distance entre les particules lors d'une liquéfaction. Ce constat est partagé par Ayas et al. (2010) dont l'étude montre que l'adéquation entre les explications proposées par les élèves et celles scientifiquement acceptables relevant du modèle particulaire augmentent globalement entre le début du lycée et la formation supérieure.

2.2.2 La pression n'est reliée qu'à la densité particulaire

Dans les explorations préalables menées dans le cadre de sa thèse à propos de la thermodynamique des gaz, Rozier (1988) montre que les étudiant·e·s en première année post-bac ont une « vision géométrique », c'est-à-dire une tendance à accorder une importance déterminante aux paramètres spatiaux (concentrations) au détriment des paramètres cinétiques (vitesses). De plus ces étudiant·e·s font des associations préférentielles entre grandeurs macroscopiques et microscopiques : la pression étant volontiers reliée aux chocs, elle est associée préférentiellement à la densité particulaire. Cette association, bien que valide, est incomplète.

2.2.3 Seuls les aspects cinétiques peuvent changer dans un liquide

Dans une recherche sur le thème de l'osmose, visant à analyser les liens entre la compréhension conceptuelle et le développement d'une attitude critique par des apprentis enseignant·e·s, Viennot et Décamp (2016) ont remarqué que si quelques étudiant·e·s évoquent spontanément l'existence d'interactions attractives dans l'eau et entre le solvant et le soluté, cette connaissance est très rarement opérationnelle au point d'aider les étudiant·e·s concerné·e·s à analyser les situations qui leurs sont présentées. Il semble que les *changements* de pression dans un liquide ne peuvent être reliés qu'aux aspects cinétiques (notamment à l'agitation thermique). Interpréter la diminution de pression dans un verre d'eau porté au sommet du Mont

Blanc s'avère ainsi difficile.

Sans nul doute une telle difficulté à concevoir des modifications des interactions dans les liquides tient en partie de ce que Besson (2001) appelle « l'assertion apodictique » selon laquelle « les liquides sont incompressibles » (contrairement aux gaz).

3 Raisonnements mis en œuvre

Nous venons de passer en revue les idées, justes ou erronées, que les élèves et étudiant·e·s partagent à propos de la pression, du vide, de l'air ou encore des liquides. Certaines études s'intéressent à leurs causes, c'est-à-dire aux raisonnements qui participent à générer ces idées. Dans cette seconde partie de l'état de l'art nous recensons les raisonnements identifiés dans la littérature comme étant mis en œuvre par les élèves, étudiant·e·s et enseignant·e·s face aux situations impliquant la notion de pression. Ces raisonnements, souvent identifiés par ailleurs dans d'autres champs de la physique, constituent parfois des obstacles à une compréhension opérationnelle des phénomènes liés à la pression.

3.1 Raisonnement animiste

Ce type de raisonnement concerne principalement les plus jeunes élèves ; dans le cas de l'étude des fluides il se traduit par des expressions du type « l'air veut sortir, il ne se sent pas à l'aise » (Séré, 1982b).

3.2 Raisonnement finaliste

On décèle parfois dans les réponses des élèves, étudiant·e·s ou enseignant·e·s la marque d'un raisonnement finaliste, c'est-à-dire une tendance à expliquer les phénomènes par le résultat observé. Cette tendance est assez répandue et se retrouve dans beaucoup d'autres contextes n'impliquant pas la pression. Au delà d'un simple mode ponctuel d'explication ce type de raisonnement est, selon la théorie finaliste, le fondement de la connaissance du monde : la régularité des phénomènes naturels observables traduit l'ordre du monde, et les expressions de ces récurrences sont les lois de la nature. Un exemple qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de notre travail : faisant le constat persistant que dans toutes les circonstances où un vide est susceptible de se former, la matière évolue (se déforme, se déplace ou au contraire reste immobile) de sorte que ce vide n'apparaisse finalement pas, Aristote tire une conclusion que l'on résume désormais par l'aphorisme si connu « la nature a horreur du vide ». Ce constat tient lieu de loi, et permet d'expliquer un nombre de phénomènes de manière cohérente. Cette persistance peut même donner l'illusion d'un pouvoir prévisionnel, ce qui est évidemment un leurre.

Bien que l'on ait peu de raisons de présumer d'une réelle adhésion des sondé·e·s à la théorie finaliste dans son ensemble, on relève régulièrement dans leurs réponses des explications de nature finaliste. Ceci se traduit par exemple par des expressions du type « pour revenir à un

état normal » (Séré, 1982b) : au delà de la supposée existence d'un état *normal*, qui est en soit discutable, c'est l'aboutissement au-dit état *normal* qui sert d'explication pour les élèves au processus qui conduit à ce résultat. On trouve chez les enseignant·e·s africain·e·s de première année d'école primaire ce même type de raisonnement téléologique : « something must fill the vacuum » (Rollnick & Rutherford, 1990).

3.3 Raisonnement causal

3.3.1 Raisonnement linéaire causal

Les travaux de thèse de Rozier (1988) ont mis au jour un raisonnement mis en œuvre par les étudiant·e·s dans le cadre de la thermodynamique élémentaire : le raisonnement linéaire causal. Le qualificatif est double. D'abord la notion de linéarité qui est expliquée ainsi par Viennot et al. (1996) :

« le raisonnement commun adopte volontiers la structure d'une chaîne linéaire d'implications dont chaque maillon mentionne un seul phénomène (ϕ) portant sur l'évolution d'une seule grandeur :

$$\phi_1 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_3 \rightarrow \dots \phi_n \rightarrow \phi_{n+1} \rightarrow$$

Cette linéarité du raisonnement est un phénomène massif. (...) On y retrouve la tendance naturelle du raisonnement à simplifier l'analyse en diminuant le nombre de facteurs considérés » (Viennot & al., 1996, p.120)

D'autre part la notion de causalité : de façon plus ou moins implicite une temporalité est souvent associée à ce type de raisonnement. Le phénomène ϕ_n est alors considéré comme antérieur au phénomène ϕ_{n+1} : « une flèche, alors, ne signifie pas seulement "donc" mais aussi "ensuite" » (Rozier & Viennot, 1991).

Cette séquentialisation opérée dans le raisonnement constitue un risque d'occultation de certains aspects du problème à cause d'une simplification à outrance. De nombreuses situations en thermodynamique impliquent beaucoup de variables et des explications très complexes qui ne peuvent pas être raisonnablement réduites à une succession chronologique de phénomènes simples.

Ce type de raisonnement assez spontané a été identifié par la suite dans d'autres domaines que la thermodynamique élémentaire (Maurines, 1986).

3.3.2 Caractéristiques des explications causales

Une partie des travaux de Besson (2004a) vise à caractériser les explications causales mises en œuvre par les étudiant·e·s en mécanique, et en particulier en mécanique des fluides. Trois aspects du raisonnement causal se manifestent dans les réponses aux questions à propos de la mécanique des fluides, et mettent en péril son caractère valide et opérationnel.

3.3.2.1 *Déplacement des causes*

Certains étudiant·e·s considèrent des forces ou des actions entre parties du système qui ne sont pourtant pas directement reliées. Bien que toutes les parties du système aient une dépendance indirecte les unes aux autres, considérer de réelles forces entre elles est abusif, et parfois même redondant.

C'est le cas par exemple pour la pression au fond d'un récipient : certains étudiant·e·s considèrent, en plus de la force exercée par le fluide, une supposée action de l'air atmosphérique sur le fond du récipient. S'il est vrai qu'indirectement l'état de l'air atmosphérique conditionne la pression dans le fluide et donc au fond du récipient, compter deux forces (celle de l'air et celle du fluide) est erroné à double titre : c'est compter deux fois la même contribution (l'effet de l'air atmosphérique impacte la pression du fluide et donc son action sur le fond du récipient) et le fond du récipient n'étant pas au contact de l'air, ce dernier n'exerce en réalité aucune force au fond.

L'auteur explique ce type de raisonnement de deux façons : premièrement comme une mauvaise interprétation de la forme mathématique des équilibres en question, comme nous le développerons plus loin, et deuxièmement comme une confusion entre *causes contingentes* et *causes efficientes*.

3.3.2.2 *Causes contingentes et causes efficientes*

L'auteur distingue en effet deux types de causes :

- *les causes contingentes* sont les conditions qui permettent la production d'un phénomène ou d'un évènement.
- *les causes efficientes* sont ce qui agit concrètement pour produire un phénomène ou un évènement.

Dans le cas particulier d'un récipient rempli de liquide puis porté en altitude (pas au point que le champ de pesanteur ne soit affecté), la diminution de la pression au fond du récipient a pour *cause contingente* la diminution de la pression atmosphérique, et pour *cause efficiente* la variation des interactions entre les molécules composant le liquide.

« Le sens commun tend à se concentrer sur les *causes contingentes*, et à les assimiler à des *causes efficientes* » (Besson, 2004a, p.119), ce qui peut conduire à formuler des explications insatisfaisantes ou erronées, ou à généraliser abusivement ce qui devrait rester un raccourci ponctuel de la pensée (pression = poids).

3.3.2.3 *Explications locales et globales*

Dans certaines circonstances les étudiant·e·s se contentent d'une vue d'ensemble du système et des phénomènes, sans entrer dans une analyse plus localisée et détaillée. C'est ce

que Besson (2004a) note dans le cas de la poussée d'Archimède, qui est souvent considérée indépendamment de la variation de pression avec la profondeur dans un fluide.

3.4 Raisonnement local

Face à de nombreuses situations physiques les élèves et étudiant·e·s ne raisonnent pas de manière systémique mais concentrent leur réflexion sur une partie du problème. On qualifie un tel raisonnement de *local*. Voici deux manifestations du raisonnement qui se retrouvent fréquemment dans les explications de phénomènes liés à la pression.

3.4.1 Concentration sur une sous-partie du système au détriment de son ensemble

Cette modalité d'explication, qualifiée de « commune » par Viennot (2011), se résume à limiter l'analyse d'un système en interaction à l'endroit où il se passe quelque chose. De façon concomitante selon ce mode de pensée les actions locales sur le système n'ont d'effet qu'à l'endroit du système où elles s'exercent. Des traces de ce raisonnement ont été mises à jour dans plusieurs domaines de la physique, et en particulier en hydrodynamique : pour certains étudiant·e·s de L1 le débit en un point d'un circuit hydraulique est lié de façon univoque à la pression en ce point.

3.4.2 Concentration sur le système au détriment de l'extérieur

Dans le cas des phénomènes liés à la pression bien des situations, parfois contre-intuitives, ne peuvent s'expliquer de façon satisfaisante sans considérer l'action de l'air atmosphérique : paille bouchée, verre retourné etc. Or les élèves et étudiant·e·s n'ont que peu de considération pour l'atmosphère lorsque celle-ci n'est pas explicitement l'objet d'étude (Séré, 1982b ; Séré, 1992 ; Tytler, 1992). Si cette omission semble naturelle chez les plus jeunes, on peut s'étonner de la trouver encore très répandue chez les étudiant·e·s, qui ne sont pas en nombre négligeable à tenter d'expliquer l'équilibre d'une colonne de mercure dans le dispositif de Torricelli en se concentrant exclusivement sur des sous-parties du système (de Hosson & Caillarec, 2009).

Dans les deux cas la conséquence principale est que les élèves et étudiant·e·s ne raisonnent pas ou peu en terme de *différence de pression*. Or ce sont bien les comparaisons de pression qui expliquent les équilibres de fluide et les débits. Ce manque de vue systémique conduit à attribuer des propriétés supposées au fluide, dont une particulièrement prégnante que l'expérience vient difficilement contredire et qui renforce l'idée discutée dans la section précédente selon laquelle le vide n'existe pas : la force de succion du vide et des gaz dont la pression a été réduite (Engel Clough & Driver, 1985 ; Rollnick & Rutherford, 1993 ; Séré, 1982a ; Tytler, 1998).

3.5 Raisonement mécanique

Beaucoup de situations physiques nécessitent une réflexion particulière pour être appréhendées et correctement comprises. C'est le cas, par exemple, des situations contre-intuitives, dont regorgent les phénomènes en lien avec la pression et les fluides. Dans ces contextes, la simple application des lois et formules n'est pas forcément suffisante pour appréhender et comprendre les phénomènes de manière convenable, et les élèves et étudiant·e·s développent une pensée particulière :

« Le besoin qu'ont les étudiant·e·s de comprendre est souvent relié à leur capacité à former des modèles mentaux de la situation physique qui leur permettent d'imaginer une connexion causale, un *mécanisme* qui pourrait expliquer la concaténation des évènements » (Besson, 2010, p.243).

Les situations impliquant la pression étant intimement reliées aux concepts de mécanique que sont force et vitesse, les modèles mentaux développés par les élèves s'appuient largement sur ces concepts de mécanique. C'est ce recours spontané à un mode de raisonnement intégrant des éléments de mécanique que nous appelons « raisonnement mécanique. Inévitablement, les résultats établis par la recherche en didactique à propos des raisonnements mis en œuvre par les élèves et les étudiant·e·s dans cette branche de la physique font écho à certains éléments relevés dans les études à propos de la pression.

3.5.1 Adhérence force / vitesse

Dans le contexte de la mécanique classique (du point ou du solide), Viennot (1996) a montré que les étudiant·e·s associent abusivement force et vitesse : ainsi l'un n'irait jamais sans l'autre. L'autrice a dénommé cette forme de raisonnement « l'adhérence force / vitesse ». Des traces de ce type de raisonnement ont été décelées chez les élèves les plus jeunes dans le contexte particulier de l'étude des fluides, et ce sous deux formes (Séré, 1982b) :

- Dans les situations d'équilibre dans un premier temps, les élèves peinent à considérer l'existence de force au sein d'un fluide faute d'une vitesse. Pourtant la pression, homogène à une *force* par unité de surface, existe et est non nulle même dans les situations d'équilibre. Quand l'existence d'une force est incontestable, les élèves tentent d'inventer des mouvements pour en rendre compte.
- le mouvement d'un fluide traduit pour certains élèves l'existence de forces *dans le sens du mouvement* ; cette force peut à l'occasion être désignée par le terme de « pression » par les élèves.

3.5.2 Attribution d'une force aux objets

Au même titre qu'il n'est pas rare que certains élèves et étudiant·e·s attribuent une « force » aux objets (la force d'attraction *de la Terre*, ou *de l'aimant* par exemple), les fluides

peuvent eux aussi se voir attribuer une force. Ainsi pour les jeunes élèves la « la force de l'air » désigne la capacité de l'air à exercer une force sur les objets (particulièrement quand il est en mouvement, comme nous l'avons évoqué précédemment) ; c'est un pouvoir intrinsèque, une propriété inhérente à l'air (Séré, 1982b).

3.5.3 Focalisation sur les mouvements

Enfin face aux situations auxquelles ils et elles sont soumis·e·s les élèves se focalisent régulièrement sur les étapes impliquant un mouvement, et non sur les processus intermédiaires qui font le lien causal entre un premier mouvement cause (par exemple le mouvement d'un piston) et un second mouvement effet (par exemple la montée de l'eau dans la seringue) (Séré, 1982b). L'analyse de ces élèves peut ainsi consister à établir une relation plus ou moins directe entre les mouvements.

3.6 Raisonnement mathématique

Comme dans d'autres domaines de la physique où des lois sont exprimées simplement de façon mathématique, dans les situations impliquant les fluides les étudiant·e·s ont volontiers recours aux formules pour interpréter ou justifier certains faits expérimentaux, voire pour les *expliquer*. Ce mode de raisonnement, s'il peut conduire à des conclusions fructueuses à moindre effort, présente quand même des limites. En effet l'interprétation que les étudiant·e·s peuvent faire des formules peut se présenter comme un obstacle à la compréhension :

- soit, on peut le supposer, quand certaines dépendances entre grandeurs n'apparaissent pas explicitement, et qu'elles peuvent donc rester ignorées des étudiant·e·s ;
- soit parce que la relation mathématique est assimilée par les étudiant·e·s à une relation causale, ce qui peut conduire à identifier des causes là où il n'y a en fait que corrélation (Besson, 2004a). Ainsi par exemple la loi fondamentale de l'hydrostatique est interprétée abusivement par certains étudiant·e·s comme traduisant une action directe de l'air atmosphérique sur le fond d'un récipient plein d'un autre fluide ; c'est le « déplacement des causes » que nous avons évoqué dans une sous-section précédente.

Suivant les situations auxquelles on soumet leur réflexion, les sondé·e·s mobilisent des aspects tantôt de l'un, tantôt de l'autre de ces raisonnements, et parfois d'aucun d'eux ou de plusieurs à la fois. Ces occurrences dépendent aussi de l'âge et du niveau de formation des sondé·e·s et ne sont pas systématiquement problématiques.

4 Propositions didactiques

Afin d'éviter les biais de compréhension ou de raisonnement que nous venons d'énumérer des chercheurs et des chercheuses se sont attelé·e·s à proposer des solutions didactiques et pédagogiques. Ces différentes propositions visent chacune des objectifs propres en terme de

niveau d'enseignement, de sujet abordé, de difficulté à surmonter, et prennent des formes variées. L'objet de cette partie est de faire un tour d'horizon de ces propositions didactiques existantes.

4.1 Pour l'enseignement d'un modèle particulière des gaz

4.1.1 Une séquence d'enseignement inspirée de l'histoire des sciences

Après une étude détaillée de l'ordre d'introduction dans les programmes scolaires français de 1977 à 2006 des différents concepts et modèles relatifs à l'interface micro - macro en chimie, Brehelin et Guedj (2007) ont élaboré une séquence d'enseignement qui s'appuie sur des éléments d'histoire des sciences et qui vise à contourner l'obstacle que peut représenter pour les élèves la confusion entre modèle particulière et modèle moléculaire. La séquence proposée introduit ainsi au niveau 4e le modèle particulière de la matière actuellement reconnu ; l'ambition d'un tel programme est d'asseoir de façon pérenne les bases nécessaires à la construction future des autres concepts associés à l'interface micro - macro (molécule, espèce chimique, etc.).

La séquence proposée est divisée en trois séances ayant chacune fait l'objet d'une expérimentation en classe :

- une séance introductive pour aborder la notion de modèle ;
- une séance inspirée de l'histoire des sciences pour présenter les deux conceptions de la matière (continue et discontinue) qui se sont opposées au cours des siècles précédents ;
- une séance laissant place au débat entre élèves et visant l'appropriation par les élèves du modèle de la matière enseigné au collège ainsi que des concepts associés.

Le scénario pédagogique proposé par les autrices présente ainsi l'avantage de mettre les élèves en situation de se questionner et d'appréhender la science comme le fruit de réflexions et de processus non immédiats. L'appropriation du modèle particulière de la matière en est alors facilitée *a priori* ; tout cela grâce au concours de l'histoire des sciences qui permet de contextualiser les savoirs sous la forme de texte écrits par les autrices, et retranscrivant les grandes lignes des théories sur la continuité et la discontinuité de la matière dans la Grèce antique.

4.1.2 Une séance d'élaboration d'un modèle par les élèves

Chomat et al. (1988) ont élaboré une séquence d'enseignement pour le collège, au niveau 4e (13-14 ans), consistant à faire élaborer par les élèves un modèle particulière. L'objectif est de faire établir aux élèves les relations entre particules dont les propriétés ainsi que l'invariance de ces dernières sont imposées comme base du modèle. Les autrices et l'auteur entendent ainsi permettre aux élèves de construire un modèle particulière de la matière qui soit plus proche du modèle admis que ceux qu'ils et elles ont tendance à construire spontanément au cours d'activités individuelles et qui confèrent abusivement aux particules les propriétés de la matière à l'échelle macroscopique.

Les activités des élèves lors de la construction du modèle ont fait l'objet d'analyses auprès de onze classes différentes ; ces activités participent à l'un ou à l'autre des objectifs de la séquence :

- la construction par les élèves des variables possibles (distance entre les particules, agitation etc.) permettant de rendre compte de la diversité des propriétés de la matière ;
- l'interprétation de phénomènes familiers (compression d'un gaz, diffusion gazeuse etc.) visant à faire construire aux élèves des conjectures à propos des variables définies précédemment (par exemple établir un lien entre état physique et distance inter-particulaire).

Les concepts thermodynamiques étant exclus de la séquence le modèle ainsi construit par les élèves n'est pas très prédictif, et n'a pas non plus un très grand pouvoir explicatif ; il s'agit plutôt d'un bon modèle descriptif qui permet aux élèves d'accepter les axiomes d'invariance des particules. Ceci constitue un premier succès au vue des intentions des autrices et de l'auteur. L'étude a toutefois montré que l'activité de modélisation est très difficile pour les élèves, et serait certainement facilitée si les activités s'appuyaient sur des outils permettant de favoriser la « concrétisation » des aspects théoriques à modéliser (Méheut et Chomat, 1990). C'est dans cette perspective que Méheut (1996 ; 1997) a élaboré un nouveau scénario pédagogique s'appuyant sur une simulation informatique ; nous la présentons dans la section suivante.

4.2 Pour l'enseignement des propriétés thermoélastiques des gaz

4.2.1 Une approche microscopique basée sur la théorie cinétique des gaz

Cette nouvelle séquence proposée par Méheut (1996 ; 1997) vise toujours l'enseignement d'un modèle particulaire des gaz au niveau 4e mais inclut cette fois les aspects dynamiques et cinétiques, l'interprétation des propriétés thermoélastiques des gaz étant l'objectif de la séquence. Cette dernière repose sur l'utilisation d'une simulation informatique permettant aux élèves de visualiser au mieux les variables microscopiques dont l'appropriation est visée (agitation et densité particulières, fréquence des chocs etc.). La simulation, mise au point dans le cadre de la recherche que nous résumons ici, s'appuie sur la théorie cinétique des gaz parfaits, dont les élèves doivent s'approprier des éléments.

Au cours de l'expérimentation réalisée dans seize classes les élèves sont invités à faire des prévisions à propos de situations variées, observer le résultat grâce à la simulation, et enfin proposer des explications. Deux objectifs sous-tendent le scénario pédagogique élaboré :

- la construction par les élèves de correspondances entre éléments de la modélisation (surface des cases, nombre de particules etc.) et grandeurs physiques macroscopiques (volume, densité, pression etc.) ;
- le développement de relations « pré-quantitatives » entre les variables dans différentes situations (compression ou chauffage du gaz par exemple).

Les analyses qui ont accompagné cette recherche montrent une certaine efficacité de la séquence dans la mesure où les élèves l'ayant suivi sont alors capable de faire des prévisions fructueuses dans des situations impliquant les propriétés thermoélastiques des gaz. Cette efficacité est toutefois toute relative : tout d'abord elle reste limitée, les situations impliquant des changement

de température étant souvent mal interprétées par les élèves, et les raisonnements impliquant *fréquence* et *force* des chocs restant rarement mis en œuvre ; par ailleurs un questionnaire passé deux ans après auprès d'élèves ayant bénéficié ou non de cette séquence ne montre aucune différence sensible dans les capacités des élèves à interpréter correctement différents phénomènes mettant en jeu les propriétés thermoélastiques des gaz.

4.2.2 Une approche macroscopique basée sur l'histoire des sciences

Dans une approche toute différente, et pour un public plus âgé (première année universitaire) Borghi et al. (1993) ont aussi élaboré une séquence pour enseigner les propriétés thermoélastiques des gaz. Si la simulation informatique occupe encore une place importante du scénario, c'est pour reproduire des expériences historiques ; il n'est pas question ici d'interprétation microscopique.

L'expérimentation réalisée auprès de 57 étudiant·e·s repose ainsi sur la simulation informatique de deux expériences de Boyle sur l'élasticité de l'air. Celles-ci sont explicitées dans une source primaire à laquelle les auteurs font référence ; elle sont retranscrites « fidèlement » d'abord sous forme d'illustrations produites par les auteurs, et ensuite *via* la stimulation. Les étudiant·e·s sont mis·e·s en situation de reproduire tous les aspects des expériences historiques en faisant varier à leur guise différents paramètres ; ils et elles doivent alors reparcourir un cheminement de chercheur pour aboutir à une relation du type $pV = \text{cste}$. Ce processus, imposant aux étudiant·e·s de réfléchir sur les concepts pourtant simples *a priori*, n'est pas sans difficulté ; ainsi pour les aider dans leur cheminement tout en leur laissant toute l'autonomie nécessaire au développement de leur pensée, un hypertexte est développé par les auteurs pour enrichir l'environnement didactique basé sur les simulations. En particulier un modèle rendant compte de l'action d'un liquide sur les parois d'un récipient est développé par les auteurs et inclus dans cet hypertexte ; nous le présenterons dans la section suivante.

4.2.3 Former les enseignant·e·s par le changement conceptuel

L'étude conduite par Rollnick et Rutherford (1993) fait suite à l'investigation qu'elles ont menée auprès d'enseignant·e·s du primaire (Rollnick & Rutherford, 1990) à propos de leur compréhension de l'air et de sa pression. L'expérimentation vise à évaluer l'impact sur les apprentissages d'une séquence utilisant, entre autres, un modèle de changement conceptuel. Un matériau de formation « classique », appelé matériau de contrôle, a été modifié à la lumière de la théorie du changement conceptuel pour être soumis aux étudiant·e·s testé·e·s. Les changements consistent d'une part en une mise en contexte des activités sous forme d'une question faisant le lien entre les idées *a priori* des étudiant·e·s et les concepts à acquérir ; d'autre part les conceptions alternatives des étudiant·e·s ont été intégrées au matériau. La séquence, expérimentée auprès de 145 apprentis-enseignant·e·s d'Afrique du Sud, vise ainsi deux objectifs :

- aider les étudiant·e·s dans l'apprentissage de nouveaux concepts scientifiques associés à l'air et à sa pression ;

- remédier aux conceptions alternatives développées par les étudiant·e·s sur ces sujets.

Afin d'éprouver l'efficacité de leur stratégie les autrices utilisent une méthodologie basée sur des pré-tests / posts-tests, et sur des comparaisons entre groupes témoins (qui reçoivent le matériau « classique ») et groupes testés (qui reçoivent le matériau modifié). Par ailleurs le profil particulier des étudiant·e·s sondés a poussé les autrices à enrichir leur stratégie en tentant de remédier aussi aux difficultés spécifiques qui relèvent de la langue : ainsi le matériau a été produit non seulement en anglais, mais aussi dans une version mêlant anglais et langue maternelle des étudiant·e·s.

Les conclusions des autrices sont favorables à leur stratégie, le matériau modifié produisant des résultats *a minima* équivalents au matériau « classique ».

4.3 Pour l'enseignement de l'hydrostatique

4.3.1 Un modèle particulière pour définir la pression dans un liquide

Afin de rendre compte des propriétés fondamentales d'un liquide (action sur les parois, transmission isotrope des forces qui s'exercent sur lui, principe de Pascal), Borghi et al. (1996) ont développé un modèle qu'ils ont intégré à l'hypertexte de l'environnement didactique présenté dans la section précédente. Partant initialement de particules macroscopiques rigides (palets) dont le comportement est analysé pour appréhender la façon dont les forces se distribuent de proche en proche, le modèle est affiné par réduction progressive de la taille des particules, jusqu'à permettre la définition de la pression dans un liquide.

4.3.2 Un modèle à l'échelle mésoscopique pour comprendre la pression en présence de gravité

Besson (2001) a consacré son travail de thèse à l'élaboration et à la mise à l'épreuve d'un modèle mésoscopique pour enseigner la statique des fluides. Cet outil, à destination d'étudiant·e·s de première année universitaire, matérialise les particules de fluides bien connues en mécanique des fluides en les représentant comme des balles en mousse quasiment incompressibles, mais pas au point d'être considérées comme totalement rigides. A travers le comportement de ces particules regardées comme des objets de la vie courante, le modèle permet ainsi de rendre compte des propriétés de liquides en présence de gravité, en particulier l'augmentation de la pression avec la profondeur et la propagation isotrope des forces qui s'exercent dessus. En permettant aux étudiant·e·s d'ébaucher des explications à l'établissement de situations d'équilibre impliquant un liquide en présence de gravité, l'auteur entend ainsi aider les étudiant·e·s à surmonter les difficultés qu'il a mises au jour au préalable (assimilation de la pression au poids *du fluide*, variation de la pression avec la forme du contenant etc.).

S'il permet une articulation fructueuse entre deux échelles disjointes, le modèle proposé présente tout de même des limites dont l'auteur est conscient : la notion de désordre y est occultée, la consistance des balles (mousse) rend peu crédible l'hypothèse d'absence d'interaction tangentielle entre elles et l'assimilation du liquide à un milieu granulaire est abusive.

5 Conclusion

Voici résumées dans le tableau ci-dessous les propositions didactiques qui ont été élaborées pour aider les élèves et étudiant·e·s à surmonter les difficultés recensées dans la littérature quand il est question de près ou de loin de « pression ». Ces séquences et modèles, déjà peu nombreux, sont encore plus rares à se fonder sur l'histoire des sciences. Le champ des possibles est donc très vaste dans notre perspective d'une reconstruction didactique dans le domaine des phénomènes liés à la pression.

| | macroscopique | | | | | | | | | | micro | | | raisonnements | | | | | |
|----------------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-------|---|---|---------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Besson, 2001 | | | X | | X | | X | | | | | | | | | X | | X | X |
| Borghgi & al., 1993 | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | X |
| Borghgi & al., 1996 | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| Bréhelin & al., 2007 | | | | | | | | | X | | X | | | | | | | | |
| Méheut, 1996 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | | X | |
| Rollnick & al., 1993 | | | | | | | | | X | | X | | | | X | | X | | |
| Chomat & al., 1988 | | | | | | | | | | | X | | X | | | | | | |

 Basé sur l'histoire des sciences

FIGURE 2.2 – Difficultés ciblées par les différentes propositions didactiques

Idées reçues au niveau macroscopique

1. La pression n'existe que dans les situations exceptionnelles
2. La pression est une force pressante
3. La pression est égale au poids *du fluide*
4. Les forces de pression ne se propagent pas de façon isotrope
5. La pression varie horizontalement dans un fluide
6. La pression dans un liquide dépend des caractéristiques du contenant
7. La pression augmente avec l'altitude
8. La poussée d'Archimède n'a rien à voir avec la pression
9. Le vide n'existe pas
10. La pression est une propriété intrinsèque du fluide

Interprétations au niveau microscopique

1. Difficultés d'assimilation du modèle particulière
2. La pression n'est reliée qu'à la densité particulière
3. Seuls les aspects cinétiques peuvent changer dans un liquide

Raisonnements mis en oeuvre

1. Raisonnement animiste
2. Raisonnement finaliste
3. Raisonnement causal
4. Raisonnement local
5. Raisonnement mécanique
6. Raisonnement mathématique

Références du chapitre 2

- Aron, R. H., Francek, M. A., Nelson, B. D., & Bisard, W. J. (1994). Atmospheric Misconceptions. *The Science Teacher ; Washington*, 61(1), 30-33.
- Ayas, A., Özmen, H., & Çalik, M. (2010). Students' conceptions of the particulate nature of matter at secondary and tertiary level. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8(1), 165-184. <https://doi.org/10.1007/s10763-009-9167-x>
- Besson, U. (2001). *Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides : Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement*. [Thèse de doctorat : Paris 7]. <http://www.theses.fr/2001PA070033>
- Besson, U. (2004a). Some features of causal reasoning : Common sense and physics teaching. *Research in Science & Technological Education*, 22(1), 113-124. <https://doi.org/10.1080/0263514042000187575>
- Besson, U. (2004b). Students' conceptions of fluids. *International Journal of Science Education*, 26(14), 1683-1714. <https://doi.org/10.1080/0950069042000243745>
- Besson, U. (2010). Calculating and Understanding : Formal Models and Causal Explanations in Science, Common Reasoning and Physics Teaching. *Science & Education*, 19(3), 225-257. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9203-9>
- Besson, U., Viennot, L., & Lega, J. (2001). Pression et statique des fluides. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 95, 825-840.
- Biddulph, F., & Osborne, R. (1984). Pupils' ideas about floating and sinking. *Research in Science Education*, 14(1), 114-124.
- Borghi, L., Ambrosis, A. D., Massara, C. I., Grossi, M. G., & Zoppi, D. (1988). Knowledge of air : A study of children aged between 6 and 8 years. *International Journal of Science Education*, 10(2), 179-188. <https://doi.org/10.1080/0950069880100206>
- Borghi, L., De Ambrosis, A., Falomo, L., & Mascheretti, P. (1993). Environnements multimédias pour l'étude de la physique. *Didaskalia*, 2, 49-59.

- Borghi, L., De Ambrosis, A., Invernizzi, C., & Mascheretti, P. (1996). Un modèle pour la compréhension des propriétés des liquides. *Didaskalia*, 8, 139-153. <https://doi.org/10.4267/2042/23780>
- Brehelin, D., & Guedj, M. (2007). Le modèle particulaire au collège : Fluctuations des programmes et apports de l'histoire des sciences. *Didaskalia*, 31, 129-165.
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1988). Modèle particulaire et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, 143-184.
- de Berg, K. C. (1992). Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air : The semi-quantitative context. *International Journal of Science Education*, 14(3), 295-303. <https://doi.org/10.1080/0950069920140306>
- de Hosson, C., & Caillarec, B. (2009). L'expérience de Blaise Pascal au Puy de Dôme : Analyse des difficultés des étudiants de premier cycle universitaire et confrontation historique. *Didaskalia*, 34, 105-130.
- Dentici, O. A., Grossi, M. G., Borghi, L., Ambrosis, A. D., & Massara, C. I. (1984). Understanding floating : A study of children aged between six and eight years. *European Journal of Science Education*, 6(3), 235-243. <https://doi.org/10.1080/0140528840060305>
- Engel Clough, E. E., & Driver, R. (1985). What do Children Understand about Pressure in Fluids? *Research in Science & Technological Education*, 3(2), 133-144. <https://doi.org/10.1080/0263514850030106a>
- Giese, P. A. (1987). Misconceptions about water pressure. *Proceedings of the 2nd International Seminar*, 2, 143-147.
- Goszewski, M., Moyer, A., Bazan, Z., & Wagner, D. J. (2013). Exploring student difficulties with pressure in a fluid. *AIP Conference Proceedings*, 1513(1), 154-157. <https://doi.org/10.1063/1.4789675>
- Kariotoglou, P., & Psillos, D. (1993a). Les modèles des élèves sur la pression et leurs implications pour l'enseignement. *Aster*, 19. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/8618>
- Kariotoglou, P., & Psillos, D. (1993b). Pupils' Pressure Models and their Implications for Instruction. *Research in Science & Technological Education*, 11(1), 95-108.

<https://doi.org/10.1080/0263514930110109>

Kariotoglou, P., Psillos, D., & Vallasiades, O. (1990). Understanding pressure : Didactical transpositions and pupils' conceptions. *Physics Education*, 25(2), 92.

Maurines, L. (1986). *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : Étude des difficultés des étudiants* [These de doctorat, Paris 7]. <https://www.theses.fr/1986PA077101>

Mayer, M. (1987). Common sense knowledge versus scientific knowledge : The case of pressure, weight and gravity. *Proceedings of the 2nd International Seminar*, 1, 299-310.

Méheut, M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège : Questionnement et simulation. *Didaskalia*, 8, 7-32.

Méheut, M. (1997). Designing a learning sequence about a pre-quantitative kinetic model of gases : The parts played by questions and by a computer-simulation. *International Journal of Science Education*, 19(6), 647-660. <https://doi.org/10.1080/0950069970190603>

Méheut, M., & Chomat, A. (1990). Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle particulière par des élèves de collège. *European Journal of Psychology of Education*, 5(4), 417-437. <https://doi.org/10.1007/BF03173130>

Mitchell, A. C., & Kellington, S. H. (1982). Learning difficulties associated with the particulate theory of matter in the Scottish Integrated Science course. *European Journal of Science Education*, 4(4), 429-440. <https://doi.org/10.1080/0140528820040409>

Novick, S., & Nussbaum, J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter : An interview study. *Science Education*, 62(3), 273-281. <https://doi.org/10.1002/sce.3730620303>

Novick, S., & Nussbaum, J. (1981). Pupils' understanding of the particulate nature of matter : A cross-age study. *Science Education*, 65(2), 187-196. <https://doi.org/10.1002/sce.3730650209>

Rollnick, M., & Rutherford, M. (1990). African primary school teachers-what ideas do they hold on air and air pressure? *International Journal of Science Education*, 12(1), 101-113. <https://doi.org/10.1080/0950069900120109>

Rollnick, M., & Rutherford, M. (1993). The use of a conceptual change model and mixed language strategy for remediating misconceptions on air pressure. *International Journal of*

Science Education, 15(4), 363-381. <https://doi.org/10.1080/0950069930150402>

Rozier, S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire* [Thèse de doctorat, Paris 7]. <http://www.theses.fr/1988PA077225>

Rozier, S., & Viennot, L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 13(2), 159-170. <https://doi.org/10.1080/0950069910130203>

Séré, M.-G. (1982a). A propos de quelques expériences sur les gaz : Étude de schèmes mécaniques mis en oeuvre par des enfants de 11 à 13 ans. *Revue française de pédagogie*, 60(1), 43-49. <https://doi.org/10.3406/rfp.1982.1751>

Séré, M.-G. (1982b). A study of some frameworks used by pupils aged 11 to 13 years in the interpretation of air pressure. *European Journal of Science Education*, 4(3), 299-309. <https://doi.org/10.1080/0140528820040309>

Séré, M.-G. (1985). *Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'ont les enfants de 11 à 13 ans, en liaison avec la notion de pression, et propositions de stratégies pédagogiques pour en faciliter l'évolution*. <http://www.inrp.fr/Didactique/These/PhysChim/Sere.htm>

Séré, M.-G. (1986). Children's conceptions of the gaseous state, prior to teaching. *European Journal of Science Education*, 8(4), 413-425. <https://doi.org/10.1080/0140528860080408>

Séré, M.-G. (1992). Guider le raisonnement d'élèves de collège avec des modèles particuliers de la matière. *Aster*, 14, 77-102.

Tytler, R. (1992). Children's explanations of air pressure generated by small group activities. *Research in Science Education*, 22(1), 393-402. <https://doi.org/10.1007/BF02356920>

Tytler, R. (1998). Children's conceptions of air pressure : Exploring the nature of conceptual change. *International Journal of Science Education*, 20(8), 929-958. <https://doi.org/10.1080/0950069980200803>

Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique. La Part du sens commun*. De Boeck.

Viennot, L. (2011). *En physique, pour comprendre*. EDP SCIENCES.

Viennot, L., & Décamp, N. (2016). Conceptual and critical development in student teachers : First steps towards an integrated comprehension of osmosis. *International Journal of Science Education*, 38(14), 2197-2219. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1230793>

Chapitre 3

Reconstruction historique

La crise autour du vide et de la pesanteur
de l'air au XVIIe siècle

Contents

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introduction | 106 |
| 2 | Paradigme scientifique dans l'Europe de 1630 | 107 |
| 2.1 | Contexte idéologique et institutionnel | 107 |
| 2.2 | Contexte scientifique à propos des fluides | 107 |
| 2.2.1 | Le vide et le plein | 107 |
| 2.2.2 | La pesanteur de l'air | 108 |
| 2.2.3 | Hydrostatique | 109 |
| 2.3 | Contexte technique : systèmes de pompage et de siphonnage | 110 |
| 3 | Naissance et vie de la querelle | 111 |
| 3.1 | D'un problème technique vers un problème scientifique | 111 |
| 3.1.1 | Limite d'aspiration des pompes et siphons | 111 |
| 3.1.2 | Généralisation de la limite | 112 |
| 3.2 | Mise à l'épreuve de l'hypothèse du vide | 114 |
| 3.2.1 | Négation <i>versus</i> affirmation du vide | 114 |
| 3.2.2 | Négation des propriétés du vide (apparent ou réel) | 117 |
| 3.3 | Mise à l'épreuve de l'hypothèse de la pesanteur de l'air | 120 |
| 3.3.1 | Argumentations à propos de l'hypothèse | 120 |
| 3.3.2 | Première confirmation expérimentale : l'expérience du Puy de Dôme | 123 |
| 3.3.3 | Seconde confirmation expérimentale : l'expérience du vide dans le vide | 124 |
| 4 | Au-delà de la crise | 126 |
| 4.1 | Exploitations du dispositif de Torricelli | 126 |
| 4.1.1 | Au profit de la science : à propos de la nature de l'air | 126 |
| 4.1.2 | Au profit de la technique : développement des baromètres | 127 |
| 4.2 | Généralisation du concept de « pression » | 128 |
| 4.2.1 | Du phénomène à la grandeur physique | 128 |
| 4.2.2 | Unification des fluides | 128 |
| 4.2.3 | Fluides en écoulement : hydrodynamique | 129 |
| 4.2.4 | Interprétations microscopiques | 129 |
| 5 | Conclusion | 129 |
| 5.1 | Synthèse | 129 |
| 5.2 | Mise en relation avec les enquêtes précédentes | 130 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.3 | Perspectives | 131 |
| 5.3.1 | Vers une reconstruction didactique | 131 |
| 5.3.2 | Vers une enquête empirique supplémentaire | 131 |
| | Références du chapitre 3 | 132 |

1 Introduction

Le cœur de notre enquête historique cible une période d'une trentaine d'années entre 1630 et 1660, et concerne principalement les développements scientifiques en Italie, France et Royaume-Uni autour des questions du vide et de la pesanteur de l'air. Cette période couvre la naissance et la vie d'une crise majeure en physique à l'issue de laquelle le concept de pression atmosphérique s'imposera dans le même temps que le précepte aristotélicien de l'*horror vacui* perdra son autorité. Nous avons orienté notre lecture de l'histoire vers les arguments et contre-arguments potentiellement féconds dans la perspective d'une reconstruction didactique ; en cela la rétrospective que nous proposons est nécessairement subjective, bien que nous ayons œuvré pour une préservation maximale de l'authenticité historique. Les idées et savants ainsi mis en lumière dans cette étude ne le sont pas parce qu'ils seraient plus importants d'un point de vue historique, mais parce qu'ils participent à la cohérence de notre récit ou qu'ils sont associés à des éléments que nous supposons exploitables pour l'élaboration d'une séquence en classe.

Pour le traitement de la crise elle-même, nous avons fondé nos lectures principalement sur les sources primaires en y incluant largement les correspondances entre savants, que nous avons même traitées comme des sources privilégiées dans cette enquête visant à rassembler des arguments et contre-arguments intéressants du point de vue didactique. En ce qui concerne les éléments historiques précédant et suivant la crise nous avons en revanche préféré nous en remettre le plus possible à l'expertise des historien-ne-s en synthétisant à partir de sources secondaires des éléments permettant de contextualiser le récit de la crise qui a retenu notre intérêt. Tout le récit de cette crise ainsi que des éléments qui l'ont précédée et suivie est focalisé sur les idées et concepts scientifiques, puisque nos préoccupations sont principalement didactiques. Il n'en demeure pas moins qu'en arrière plan nous avons porté attention à des éléments d'ordre épistémologique dont l'exploitation pourrait, elle aussi, être intégrée à la reconstruction didactique à venir.

Le bouleversement dont il est question dans cette reconstruction historique remettant en question les principes de la philosophie scolastique alors dominante en Europe, la période concernée est parfois désignée comme « révolution scientifique » dans la mesure où il s'agit d'un épisode extraordinaire au cours duquel se modifient les convictions des spécialistes (Khun, 1962/1983). Cette désignation ne faisant toutefois pas consensus chez les historien-ne-s (Mazauric, 1999), nous nous cantonnerons prudemment aux appellations moins connotées de « crise », « querelle » ou encore « controverse » pour nous référer à cet épisode. Nous situerons tout d'abord le début de la crise dans le contexte institutionnel, scientifique et technique du début du XVIIe siècle, puis nous proposerons un récit de la crise, de son émergence à ce que nous estimons être sa fin trente années plus tard. Nous terminerons enfin par les développements techniques et scientifiques ultérieurs en lien avec le concept de pression.

2 Paradigme scientifique dans l'Europe de 1630

2.1 Contexte idéologique et institutionnel

Au début du XVII^e siècle l'Europe se trouve depuis plusieurs dizaines d'années au cœur de la Contre-Réforme, un mouvement religieux offensif visant à rétablir le catholicisme dans les régions acquises par la Réforme protestante un siècle plus tôt. Dans ce contexte, l'Église est autorisée à contrôler et réprimer de façon très stricte les populations catholiques, et l'Inquisition exerce son pouvoir jusque dans les sphères savantes. Au début de la crise dont nous allons rendre compte dans ce chapitre à propos du vide et de la pesanteur de l'air, l'Église catholique déclare hérétiques les théories et philosophies qui contredisent les Écritures. Les savants qui prennent le parti de défendre ces théories s'exposent alors à un procès, à l'instar de Galilée qui fut jugé et condamné à la résidence surveillée pour les dernières années de sa vie pour avoir réfuté le géocentrisme et étayé la thèse de l'héliocentrisme. Ce procès est la plus connue des conséquences de l'offensive de la Contre-Réforme sur le monde savant au début du XVII^e siècle ; de façon plus insidieuse d'autres savants comme Descartes se sont auto-censurés en choisissant de ne pas publier leurs réflexions si celles-ci n'adoptaient pas un point de vue conforme aux doctrines bibliques.

Concrètement, puisque spécialement développée au Moyen-Âge pour ménager la théologie catholique, la philosophie scolastique dominait très largement les débats au début du XVII^e siècle. Cette philosophie se nourrissant copieusement de l'apport philosophique d'Aristote et des péripatéticiens, « les institutions d'enseignement, les universités et les collèges, le plus souvent des collèges de Jésuites, diffusaient exclusivement la leçon de l'aristotélisme, ce qui renforçait du même coup cette domination » (Mazauric, 1999)

2.2 Contexte scientifique à propos des fluides

Loin d'intégrer le concept de *fluide* les théories en vigueur en 1630 à propos du vide, de l'air et de l'eau étaient indépendantes les unes des autres.

2.2.1 Le vide et le plein

Sur la question du vide, le principe qui fait autorité au début du XVII^e siècle est l'*horror vacui*. Ce principe énoncé par Aristote au IV^e siècle avant notre ère affirme que la nature a horreur du vide, ce qui a pour conséquence logique pour Aristote que le vide n'existe pas. Il est parfois interprété de façon plus modérée, en considérant que l'horreur de la nature pour le vide pousse « cette dernière » à le combler dès qu'il apparaît, admettant ainsi l'existence du vide comme possible même si ça ne peut être que l'espace d'un court instant. Cette version moins absolue de l'*horror vacui*, défendue en particulier par Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle), ne trahit pas l'esprit du principe qui rend compte efficacement de la façon dont les systèmes évoluent et s'aménagent pour lutter contre l'apparition du vide :

Il est donc possible de dire de manière générale que tout corps est composé de corpuscules aux parties subtiles, entre lesquels sont répartis des vides plus petits que ces particules ; et c'est pourquoi nous sommes autorisés à dire qu'il n'y a pas de vide compact sans l'intervention de quelque force, et que tout est rempli d'air, de liquide ou d'une autre substance ; qu'au fur et à mesure qu'une certaine quantité de cette substance s'en va, elle est remplacée par une autre qui vient remplir l'espace qui se vide ; qu'il n'existe pas dans la nature de vide compact sans l'intervention de quelque force ; et qu'inversement le vide n'existe jamais de lui-même, mais qu'il est produit contre nature. (Traduction des *pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie, Argoud & Guillaumin (1997), p.38)

Si ce principe peut effectivement être considéré comme la théorie dominante en 1630, cela ne veut pas dire qu'aucune idée contraire n'a jamais été suggérée par aucun savant pendant tous les siècles qui séparent son expression de la période que nous étudierons dans ce chapitre. Et pour cause, alors qu'Aristote énonçait le grand principe de l'horreur du vide, certains de ses contemporains tels Epicure et Lucrèce s'inscrivaient dans la directe lignée de leurs maîtres Démocrite et Leucipe en défendant non seulement l'existence du vide mais aussi sa nécessité pour rendre compte du mouvement (Mazauric, 1999). Cette vision du monde, qui s'inscrit dans une théorie atomiste précoce, n'a toutefois pas su séduire et restera très minoritaire, jusqu'à même être rejetée quasiment explicitement au début du XVIIe siècle, lors de l'offensive de la Contre-Réforme qui rejette l'héritage épicurien.

Dans le contexte du début du XVIIe siècle donc, il est communément admis que le vide ne peut pas exister, et cette assertion permettant à elle seule de rendre compte d'une grande classe d'observations, c'est la seule chose enseignée. De plus les théories anti-vaccuistes (aristotélienne ou dérivées) ne sont pas facilement falsifiables dans la mesure où des espaces vides en apparence et soupçonnés de ne pas contenir d'air ou d'autre matière on dit qu'ils contiennent de la matière subtile indétectable (appelée éther, vent, air raréfié etc.). La non existence du vide réel tient ainsi plus de la conviction métaphysique que de l'observation concrète, mais constitue la pierre d'angle de certaines théories élaborées sur la façon dont procède la nature. On citera notamment la théorie cartésienne du mouvement circulaire dans le plein :

Tous les mouvements qui se font au monde sont en quelque façon circulaires, c'est-à-dire que, quand un corps quitte sa place, il rentre toujours en celle d'un autre, et celui-ci en celle d'un autre, et ainsi de suite jusqu'au dernier, qui occupe au même instant le lieu délaissé par le premier : en sorte qu'il ne se trouve pas davantage du vide parmi eux, lorsqu'ils se remuent que lorsqu'ils sont arrêtés. (Descartes, 1664, cité par Rougier, 2010b, p.75)

2.2.2 La pesanteur de l'air

Dans la théorie aristotélo-scolastique encore en vigueur au début du XVIIe siècle, on attribue aux corps eux-mêmes les qualités perceptibles telles que la gravité, la légèreté, le

chaud, le froid etc. L'air y est considéré comme un corps *relativement léger* dans la mesure où il est moins léger que l'élément de légèreté absolue, à savoir le feu. Cette qualité de légèreté, même relative, attribuée à l'air implique que ce dernier est dépourvu de toute pesanteur. Les tentatives expérimentales d'établir le caractère pesant de l'air n'ayant pas été probantes, les péripatéticiens et leurs héritiers se rangent définitivement à ce précepte de la légèreté de l'air.

Malgré la domination de la philosophie scolastique au début du XVII^e siècle certains savants osent malgré tout s'affirmer convaincus de la gravité de l'air ; aux commencements de la crise dont ce chapitre rend compte les voix s'élèvent en faveur de cette hypothèse qu'aucune expérience ne permet encore de corroborer. Il faut néanmoins distinguer deux types d'adhésion à l'hypothèse de la gravité de l'air (Rougier, 2010a) :

- l'adhésion « pleine » allant jusqu'à affirmer que l'air grave pèse y compris « dans lui-même », c'est-à-dire que les effets de cette gravité pourraient être perceptibles y compris dans l'air. Ces savants tels que Rey, Beeckman ou Baliani se placent ainsi comme précurseurs de la crise que nous allons relater dans ce chapitre.
- l'adhésion réservée, consentant à attribuer à l'air une certaine gravité mais refusant l'idée que l'air puisse peser « dans lui-même ». Dans sa théorie du mouvement circulaire dans le plein, Descartes accepte la gravité de l'air tout en ne lui attribuant aucun effet pesant dans lui-même (Rougier, 2010b).

2.2.3 Hydrostatique

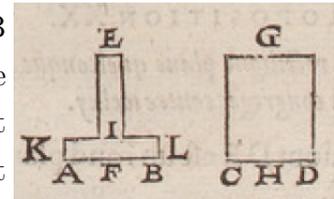
On s'intéresse ici non pas aux théories à propos des liquides en eux-mêmes mais plus spécialement aux problèmes d'équilibre de ces derniers.

Le premier problème d'hydrostatique majeur a été abordé par Aristote, puis prétendument résolu par Archimède au III^e siècle avant J.C. (Thurot, 1869) : il s'agit de celui relatif aux corps flottants. Dans son traité sur le sujet, Archimède énonce le principe d'hydrostatique : « si un corps est plus léger que le liquide où on l'abandonne, il y aura entre son poids et le poids d'un volume de liquide égal à celui de ce corps le même rapport qu'entre la partie immergée et le corps tout entier » (Legrand, 1891, p.455). Ce principe repose sur l'hypothèse fondamentale formulée ainsi : « Supposons que tout liquide soit de telle nature que, si l'on considère les parties de même niveau et continues, la moins poussée cède à celle qui l'est plus. Disons encore que chacune des parties est poussée par le liquide qui est au-dessus d'elle suivant la verticale [et cela, lorsque le liquide descend dans quelque chose et supporte quelque autre chose]. » (*ibid.*, p.443). Dans ce postulat on voit poindre l'idée de pression, même si celle-ci n'est pas formalisée. La focalisation sur les parties de même niveau, c'est-à-dire d'une même couche horizontale, ouvre la voie à l'émergence du principe de Pascal plus d'un millénaire après.

Au XVI^e siècle Stevin a traité à son tour le problème des corps dans l'eau, de façon plus qualitative que son prédécesseur grec, puis a abordé un problème nouveau de façon absolument

indépendante : celui touchant « la force du pressement de l'eau contre les fonds » (Stévin, 1586). Il énonce une proposition fondamentale de l'hydrostatique : « Sur le fond de l'eau, parallèle à l'horizon, repose un poids, égal à la pesanteur de l'eau, qui est égal à la colonne, dont la base est le fond susdit ; et la hauteur, la perpendiculaire sur l'horizon entre le fond et la fleur de l'eau » (théorème VIII. proposition X). Cette proposition dont Stévin reconnaît qu'elle pourrait être estimée « contre nature » est illustrée par un exemple évocateur qui mettrait probablement en difficulté les étudiant·e·s contemporain·e·s :

Soit le fond AB, pareil à CD, et les hauteurs EF, GH égales et que l'eau de EIF soit moindre qu'en GCD, tellement que EAB soit 1 \mathfrak{H} et GCD 10 \mathfrak{H} , la figure aussi de GCD soit une colonne ronde, ainsi GCD contiendra 10 fois plus d'eau, et sera d'autant plus pesante que EAB, ce nonobstant, l'eau EAB presse autant le fond AB, que l'eau GCD fait le fond CD (*ibid.*, p.498)



De notre point de vue contemporain on pourrait penser que la crise dont nous proposerons un récit dans ce chapitre n'avait rien à apporter sur les questions de l'hydrostatique puisque les principes fondamentaux semblent déjà énoncés depuis le XVI^e siècle. Pourtant ces principes ne s'appliquant qu'aux liquides, les propriétés pressantes méritent d'être étendues par analogie au cas de l'air, des gaz de façon plus générale. De plus, même pour ce qui est des liquides la conceptualisation est incomplète : « toutes ces vérités qui doivent constituer l'hydrostatique ont donc été découvertes, mais elles gisent pêle-mêle et sans rapport entre elles, attendant celui qui les ordonnera, qui les reliera les unes aux autres, qui, de ces matériaux épars, construira une doctrine logique et harmonieuse. » (Duhem, 1905, p.609).

2.3 Contexte technique : systèmes de pompage et de siphonnage

Pour terminer cette projection paradigmatique au début de XVII^e, arrêtons nous quelques instants sur les développements techniques en matière de pompage et de siphonnage, technologies jouant un rôle majeur dans la naissance de la crise dont nous ferons le récit dans la partie suivante.

D'après la rétrospective proposée par de Hosson et Décamp (2015), les premières pompes aspirantes ont vu le jour au premier siècle de notre ère. Leur fonctionnement reposait sur un système de bras de levier et de pistons, et s'expliquait alors par « la force du vide ». Ces premières conceptions permettaient un pompage dont on avait déjà constaté qu'il se limitait inexorablement à une hauteur d'une dizaine de mètres. Quelques améliorations techniques furent recherchées, la plus fructueuse d'entre elles ayant été obtenue un millénaire plus tard grâce au premier système bielle-manivelle par el-Jazari. Ce système de pompage par paliers intermédiaires fut ensuite généralisé en Europe dès la Renaissance, permettant alors un pompage effectif bien au delà d'une dizaine de mètres.

En ce qui concerne le principe du siphonnage, il est lui aussi connu depuis au moins le premier

siècle de notre ère, et Héron d'Alexandrie y a consacré une partie de son œuvre. Selon le savant égyptien, le secret du mouvement « contre nature » des liquides dans les siphons réside encore dans l'impossibilité (supposée) qu'un espace soit parfaitement vide.

3 Naissance et vie de la querelle

3.1 D'un problème technique vers un problème scientifique

3.1.1 Limite d'aspiration des pompes et siphons

La remarque de Khun (1962/1983) selon laquelle « l'artisanat constituant une source facilement accessible de faits qui n'auraient pas pu être découverts accidentellement, la technologie a souvent joué un rôle vital dans l'émergence de nouvelles sciences » (Kuhn, 1962/1983, p.36) se trouve parfaitement illustrée par les événements que nous nous apprêtons à relater. Alors que les pompes devaient s'accommoder de la limite inexorable de la dizaine de mètres, Galilée se saisit de ce problème dans son ultime entreprise de fonder deux sciences sur la technique. La première de ces sciences a trait à la résistance des matériaux à la rupture, et aborde en particulier la limite d'aspiration des pompes en proposant une cause nouvelle : l'horreur *limitée* de la nature pour le vide. Galilée fait part de son raisonnement à Baliani dans une lettre rédigée le 6 août 1630 :

On peut faire monter l'eau à travers un tube ou un siphon par attraction ou par impulsion. [...] En la soulevant par attraction, il y a une certaine hauteur et longueur du tube, au-delà desquelles il est impossible de faire monter l'eau d'un doigt, ou même d'un cheveu ; et cette hauteur me semble être d'environ 40 pieds (12 m), et je crois même moins. La cause de cet effet m'a beaucoup troublé avant que je ne l'étudie, mais j'ai finalement compris qu'elle n'aurait pas dû m'être si cachée, et qu'elle était même tout à fait manifeste ; Il en va ainsi des vraies causes après qu'on les a trouvées [...]. Si les cordes de chanvre et d'acier se cassent quand elles doivent supporter plus de poids, quel doute devons-nous avoir sur le fait qu'on ne puisse également déchirer une corde d'eau ? Au contraire, elle se déchirera d'autant plus facilement que les parties de l'eau qui se séparent l'une de l'autre n'ont pas d'autre résistance à surmonter que celle du vide qui succède à la division. (Traduit par nos soins, issu de Galilei, 1872, p.55) :

La réponse de Baliani le 26 octobre 1630 développant un argumentaire innovant (nous l'exposerons dans la suite) ne convainc certainement pas suffisamment Galilée qui publie huit ans plus tard son hypothèse dans son discours concernant deux sciences nouvelles. Ce dernier *opus* de son œuvre ose contrevenir aux dogmes scolastiques, mais de façon toutefois modérée : l'horreur du vide n'y est pas totalement remise en question mais seulement ajustée. Cette modification même mineure de la théorie admise ne laissera pas indifférents les plus fidèles aux théories aristotélo-scolastiques, tentant dans un premier temps de réfuter la généralisation

galiléenne selon laquelle l'eau ne pourrait pas soutenir son propre poids au-delà d'une certaine hauteur.

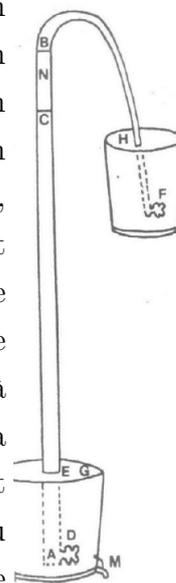
3.1.2 Généralisation de la limite

Berti fit une expérience décisive en ce sens qui avait pour objectif de démontrer que Galilée se trompait non pas quant à son interprétation de la limite observée, mais quant à la généralisation de l'observation elle-même. L'expérience fut l'objet de plusieurs compte-rendus dont aucun ne mentionne précisément la date à laquelle elle a été exécutée. L'un de ces rapports est écrit plusieurs années après par Magiotti, savant italien ayant assisté à l'expérience de Berti, dans une missive à Mersenne. Selon cette lettre, l'expérience de Berti remonte à 1640-1641, avant la mort de Galilée.

Si Berti est sans conteste l'exécuteur de l'expérience, sa réalisation est le fruit d'un engouement collectif autour de la question de la hauteur à laquelle l'eau devait se stabiliser : « le but préliminaire de Berti était de vérifier la valeur donnée par la montée de l'eau, que les partisans de la crainte du vide croyaient infinie, et que Baliani, qui admettait la pression uniforme de l'air, avait cru, aussi, plus grande » (de Waard, 1936, p.103)

Le dispositif utilisé par Berti est décrit de mémoire par Magiotti dans sa lettre écrite à Mersenne en 1648 :

Plus tard, Mr Gaspard Berti, ici à Rome, a construit un siphon en plomb d'environ 22 brasses qui reliait la cour [de sa maison] aux chambres, et qu'on remplissait en haut de la façon suivante. D'abord les deux robinets, D en bas et F en haut, étant ouverts, on remplissait d'eau le vase AG. Puis, on fermait le robinet D, et on versait l'eau du vase AGPM, l'eau dans le siphon se trouvant à la hauteur AE. Puis, en gardant toujours plein le vase HF, on laissait couler l'eau AE grâce au robinet D, ce qui (le robinet F étant déjà ouvert et plongé dans l'eau) aspirait vers le haut et remplissait tout le siphon BA et le vase AG. Enfin, gardant plein le vase HF et fermé F, et de même plein le vase AG (M ayant été fermé) et ouvert D, l'eau commençait à descendre dans le siphon ; elle descendait jusqu'à N, le tube se vidant sur la longueur BF, et elle s'arrêtait. Et chaque fois, en refaisant l'essai, on obtenait la même position d'équilibre et on pouvait très bien observer, car le morceau BC de siphon était en verre spécial et parfaitement collé et soudé, ainsi que le siphon entier. (Mersenne, 1932, Tome 16, p.168)



Berti espérait ainsi, par déversement, construire une colonne d'eau de plus d'une dizaine de mètres qui ne se déchire pas, mettant alors directement en échec l'hypothèse de Galilée selon laquelle l'eau ne serait pas capable de supporter son propre poids au delà de cette limite. À la fin de la lettre Magiotti précise en effet que « par cette expérience, Mr Berti pensait convaincre Mr Galilée, en affirmant que de N à A il y avait plus de 18 brasses » (*ibid*). Si Berti pensait

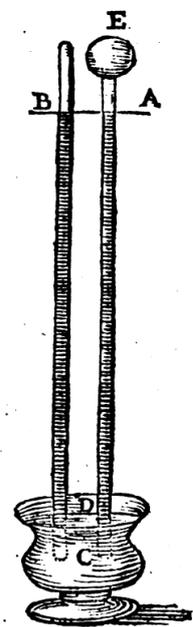
que son expérience était concluante, c'était à cause d'une erreur : il comptait, dans la hauteur de la colonne, la partie du siphon qui plongeait dans l'eau (AE sur le schéma). Or la hauteur de 18 brasses dont Galilée parle est à prendre entre le niveau d'eau dans la cuve et le haut de la colonne ; d'après le compte rendu de Magiotti « la longueur EN était exactement de 18 brasses », ce qui ne faisait que confirmer le constat de Galilée.

Bien malgré lui Berti démontre ainsi que même par déversement, il n'est pas possible d'obtenir une colonne d'eau de plus d'une dizaine de mètres de haut, généralisant le problème soulevé par Galilée. Nous avons qualifié l'expérience de décisive pour l'originalité de son procédé : envisager la construction d'une colonne d'eau par déversement plutôt que par aspiration ouvrit la voie à de futures expériences non moins cruciales, cette fois pour le caractère probant de leurs résultats. La commodité technique de l'obtention d'une colonne de liquide par déversement plutôt que par aspiration fut encore augmentée par l'idée de remplacer l'eau par un liquide plus dense, dont l'équilibre conduirait à des colonnes plus petites. Magiotti affirme avoir mené Torricelli sur cette piste : « j'ai fait part de cette expérience à Mr Torricelli, pensant que si l'on avait employé de l'eau de mer, donc plus lourde, elle ne se serait pas arrêtée en N, mais plus bas ; ils firent les expériences, avec l'eau puis avec le mercure, s'en tenant toujours aux opinions de Mr Galilée et selon les nouvelles spéculations et expériences de Mr Torricelli. » (*ibid.*)

Le phénomène d'équilibre de la colonne d'eau dans la pompe aspirante est ainsi généralisé aux colonnes de n'importe quel liquide obtenues par n'importe quel procédé. Les spécialistes italiens se rassemblent en nombre autour de ce problème alors devenu une question scientifique, et dont le traitement expérimental se fera désormais grâce au dispositif de Torricelli : une colonne de *mercure* obtenue par *déversement*. Ce dispositif qui est de nos jours désigné par l'appellation anachronique « baromètre de Torricelli » est décrit par son inventeur lui-même dans une lettre qu'il adresse à son ami Ricci en 1644 :

Nous avons fabriqué beaucoup de vases en verre et aussi de gros tuyaux comme les suivants désignés A et B ou munis d'un goulot long de deux brasses. Ceux-ci furent remplis de vif – argent, puis si l'on bouchait l'orifice avec un doigt et qu'on les renversait dans un vase où il y avait le vif – argent C, on les voyait se vider et rien ne se manifestait dans le vase qui se vidait ; le col AD pourtant restait toujours plein à la hauteur d'une brasse 1/4 de doigt. (Mersenne, 1932, Tome 13, p.181)

Deux types d'hypothèses seront alors mises à l'épreuve en Italie puis en France dans les années qui suivirent pour expliquer la suspension du mercure dans le tube : celle qui postule l'existence du vide, lui attribuant ou non certaines vertus ; et celle qui postule la pesanteur de l'air, attribuant ou non à l'atmosphère des effets directement liés aux équilibres observés.



3.2 Mise à l'épreuve de l'hypothèse du vide

3.2.1 Négation *versus* affirmation du vide

Admettre l'existence d'un vide réel dans les pompes ou les siphons arrivés à leur limite d'efficacité était une idée rebutante voire absurde pour de nombreux savants, et bien que l'espace surplombant la colonne de liquide ait l'air parfaitement vide, il pouvait encore être interprété comme un vide apparent et non réel. S'il n'y a pas de vide réel, les savants doivent faire des conjectures à propos de ce qui remplit l'espace surplombant la colonne de liquide. La fermeture du tube ou du siphon en haut empêchant manifestement l'air « normal » de rentrer, l'explication la plus plausible était alors que l'espace vide en apparence contienne une matière qu'il fallait donc nommer. Dans l'introduction de son traité *Expérience nouvelles touchant le vide*, Pascal résume non sans ironie les différentes conjectures à propos de cette matière :

je crus que cette expérience d'Italie était capable de convaincre ceux-là mêmes qui sont les plus préoccupés de l'impossibilité du vide.

Néanmoins la force de la prévention fit encore trouver des objections qui lui ôtèrent la croyance qu'elle méritait. Les uns dirent que le haut de la sarbacane était plein des esprits du mercure ; d'autre d'un grain d'air imperceptible raréfié ; d'autres d'une matière qui ne subsistait que dans leur imagination ; et tous, conspirant à bannir le vide, exercèrent à l'envi cette puissance de l'esprit, qu'on nomme Subtilité dans les écoles, et qui, pour solution des difficultés véritables, ne donne que des vaines paroles sans fondement. (Pascal, 1941, p.136)

Quant à la façon dont cette matière serait arrivée en haut du tube, les hypothèses diffèrent selon la nature supposée de la-dite matière : elle pourrait être extraite des pores de l'air et pénétrer dans le tube par celles du verre, ou encore provenir directement du mercure. L'observation de bulles par Magiotti au cours de l'expérience réalisée par Berti est certainement un exemple de problématique qui n'a pas aidé les plus fervents opposants au vide à se laisser convaincre par sa prétendue mise en évidence :

Je ne puis cependant pas taire une chose qui m'a donné à réfléchir : c'est que pendant que l'eau du siphon descendait et la partie BF se vidait, on voyait à travers le verre BC monter dans l'eau une infinité de petites bulles (*seu pustulae*) comme celles des verres et des cristaux, qui étaient sans doute de la matière et allaient emplir les endroits sans air. Je ne puis me résoudre à croire que c'était de l'air, car dans l'eau du vase AG il ne pouvait y avoir autant d'air (outre que le volume NBF se remplirait même en l'agrandissant) ; l'air ne pouvait pénétrer par les pores et les soudures du siphon et s'il en était entré, il aurait fini par faire descendre l'eau qui restait suspendue. En fait, ces bulles me sont restées toujours présentes à l'esprit et je ne saurais dire en peu de mots tout ce que j'en pense. (Mersenne, 1932, Tome 16, p.168)

Un autre exemple de fait expérimental semblant contredire la thèse du vide est celle retranscrite par le savant et religieux Emmanuel Maignan ayant aussi assisté à l'expérience de Berti autour de 1640. Dans son récit de l'expérience de Berti (Maignan, 1653) on trouve relatée une expérience supplémentaire : en installant une petite clochette en haut du siphon, Berti entendait en effet démontrer la nature matérielle de l'espace laissé vide en apparence. Cette clochette pouvait être agitée depuis l'extérieur grâce à un système aimanté ; si l'espace au dessus de la colonne d'eau était parfaitement vide, alors aucun son n'aurait pu être produit ni donc entendu à l'extérieur du dispositif. Ce dispositif ingénieux conforta Berti dans sa croyance qu'aucun vide réel ne pouvait exister puisque du son était effectivement perceptible. Ces efforts expérimentaux, s'ils avaient vocation à nier la possibilité du vide et s'ils étaient interprétés comme tels, n'étaient manifestement pas vains. Et pour cause, l'espace surplombant la colonne étant effectivement rempli de vapeur de liquide à la pression de vapeur saturante, les observations retranscrites ici allaient bien dans le sens d'un vide uniquement apparent.

A l'opposé, d'autres savants à l'instar de Torricelli étaient fermement convaincus que l'espace laissé vide au dessus de la colonne de liquide était bien immatériel. Pour le prouver Torricelli (ou son disciple Viviani) eu l'idée brillante d'utiliser de l'eau, non miscible avec le mercure et beaucoup moins dense. Reposant sur les propriétés comparées des deux liquides, l'expérience consiste à passer de l'équilibre d'une colonne de mercure à celui d'une colonne d'eau, l'espace initialement vide au moins en apparence se remplissant précipitamment d'eau, ce qui prouve selon le savant italien qu'il était effectivement vide de toute matière (sinon l'eau n'aurait pas pu prendre la place) :

Pour montrer ensuite que le vase était complètement vide, on remplissait d'eau jusqu'en D la cuvette placée au dessous et *en montant le vase petit à petit*¹, on voyait, quand *l'orifice du vase arrivait à l'eau*², descendre le vif – argent du col qui se remplissait avec une terrible violence d'eau exactement jusqu'à la marque E. (Mersenne, 1932, Tome 13, p.181)

Nous savons que cette expérience n'a pas suffi à clore définitivement le débat autour de la question du vide, loin s'en faut ; nous n'avons toutefois pas rencontré, au cours de nos lectures, de réponse spécifique à son propos.

Les lettres écrites à Ricci par Torricelli ont été transmises en France par l'intermédiaire de Du Verdus, savant français résident à Rome à la période de ces expériences. Du Verdus était la pierre d'angle de l'interaction entre savants italiens et français ; il était régulièrement chargé de faire parvenir en France les découvertes récentes comme en témoigne cet extrait de lettre écrite par Du Verdus à Torricelli le 21 mai 1644 :

1. c'est nous qui traduisons de l'italien « *alzando il vaso a poco a poco* », nous écartant volontairement de la traduction proposée dans le recueil d'où la lettre est issue (Mersenne, 1932, Tome 13, p.180-181) : « l'eau montant peu à peu dans le vase ».

2. c'est à nouveau nous qui proposons cette traduction de « *quando la bocca del vaso arrivava all'acqua* » au lieu de « quand l'eau arrivait à l'orifice du vase ».

J'ai reçu ce matin la lettre extrêmement aimable de V.S. par l'intermédiaire de mon très bienveillant maître et Seigneur le Sr Michelange Ricci... Je n'oublierai pas ma dette de lui faire part de vos si belles démonstrations du centre de gravité du segment sphérique, et de même je les enverrai aux RR.PP. Mersenne et Nicéron et à d'autres de mes amis parisiens, puisque vous m'en autorisez, ce dont je vous suis très obligé. En ce qui concerne vos autres lettres, j'espère pouvoir les expédier demain et les faire parvenir entre les mains des dits Pères à travers la voie que m'a procurée à Lyon le R.P. Nicéron. (Mersenne, 1932, Tome 13, p.139)

Le Père Mersenne se trouva ainsi doublement informé de l'expérience de Torricelli puisqu'il fut destinataire de copies des échanges ayant eu cours entre Ricci et Torricelli, et qu'il assista en sus directement à l'expérience de Torricelli lors d'un voyage en Italie en 1644. Par sa voie celle qui allait désormais être appelée « l'expérience d'Italie » suscita l'intérêt du monde savant français, en particulier par l'Académie du Père Mersenne dont Etienne Pascal fut un des membres fondateurs (Mazauric, 1999). Bien que ne résidant plus à Paris au moment de la diffusion de l'expérience de Torricelli en France, Etienne et Blaise Pascal en reçurent tout de même le récit de la part de Petit, un autre académicien désireux de la reproduire avec leur aide. C'est ce qu'ils firent, suscitant l'intérêt du jeune fils Pascal, Blaise, qui entreprit de la reproduire plusieurs fois en particulier de façon publique à Rouen fin 1646, début 1647. Il diversifia et multiplia les expériences et en publia un recueil à l'automne qui suivit : *expériences nouvelles touchant le vide*. L'une des expériences réalisées repose sur la même logique que celle employée par Torricelli, à savoir reemplir le haut du tube une fois celui-ci vidé au moins en apparence, et montrer que rien ne s'y oppose ou ne se manifeste au cours de cette procédure. Pour ce faire, Pascal remplit un tube de vin, réalise l'expérience du tube retourné à la perpendiculaire dans une cuve remplie d'eau, puis incline le tube pour le reemplir :

Et si on incline le tuyau, comme alors la hauteur du vin du tuyau devient moindre par cette inclination, le vin remonte jusqu'à ce qu'il vienne à la hauteur de trente-deux pieds ; et enfin si on l'incline jusqu'à la hauteur de trente-deux pieds, il se remplit entièrement, en ressuçant ainsi autant d'eau qu'il avait rejeté de vin : si bien qu'on le voit plein de vin depuis le haut jusqu'à treize pieds près du bas, et rempli d'eau teinte insensiblement dans les treize pieds inférieurs qui restent. (Pascal, 1941, p.139)

En plus de cette expérience visant à montrer qu'il n'y a aucune matière à remplacer en haut du tube, Pascal s'attaque à la matérialité de ce qui occupe l'espace laissé vide en apparence en mesurant directement son poids. Il démontre que ce qui occupe l'espace vide en apparence n'a pas de masse, ou du moins pas de masse sensible, ce qui corrobore son hypothèse qu'il n'y a en fait absolument rien de matériel à cet endroit. Cette expérience n'a toutefois rien de décisif dans la mesure où la matière imaginée par les opposants au vide pourrait très bien ne pas avoir de masse sensible tant elle est conceptualisée comme une substance subtile qui échappe aux sens. Même sans masse, l'espace laissé vide en apparence pourrait encore contenir « quelque

chose » donc ; une chose dont la masse n'est pas détectable.

Au Père Noël lui ayant fait part de ses objections à propos des conclusions tirées dans le *traité du vide*, Pascal répond par une diatribe magistrale dans laquelle il précise, en particulier, son sentiment vis-à-vis des observations faites au cours de l'expérience sus-décrite :

Enfin, mon Père, considérez je vous prie, que tous les hommes ensemble ne sauraient démontrer qu'aucun corps succède à celui qui quitte l'espace vide en apparence, et qu'il n'est pas possible encore à tous les hommes de montrer que, quand l'eau y remonte, quelque corps en soit sorti. Cela ne suffirait-il pas, suivant vos maximes, pour assurer que cet espace est vide ? (*ibid.*, p.148)

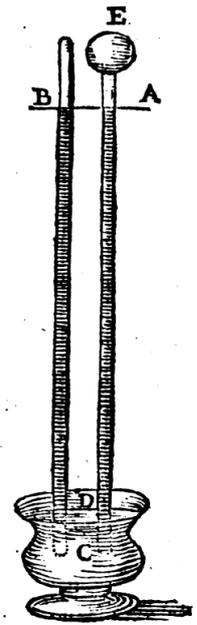
On perçoit bien à travers le récit de toutes ces tentatives de nier ou d'affirmer le vide que la démonstration n'est pas aisée dans un sens ni dans l'autre. Cette difficulté à démontrer que quelque chose d'imperceptible est ou n'est pas est certainement en partie responsable du déplacement progressif que le débat va connaître au milieu des années 1640 : plutôt que de définir la nature de l'espace vide, les savants italiens et français partisans du vide vont d'une part tenter d'en nier les propriétés, et d'autre part orienter le débat vers une hypothèse alternative : celle de la pesanteur de l'air.

3.2.2 Négation des propriétés du vide (apparent ou réel)

Se heurtant inexorablement à la difficulté de démontrer qu'il n'y a rien là où de nombreux savants imaginent une matière dont la présence échappe aux sens, les savants partisans du vide persévèrent en réfutant directement les propriétés prétendues de ce qui remplit l'espace vide en apparence : en montrant que cet espace n'est doué d'aucun pouvoir, il deviendrait stérile de s'obstiner à défendre la présence d'une quelconque matière à cet endroit.

Arrêtons nous sur une expérience ingénieuse de Torricelli, relatée à Ricci par correspondance. L'idée de Torricelli (ou de son assistant Viviani) est, une fois encore, brillante : utiliser des tubes de volume clairement différents pour faire apparaître des espaces vides plus ou moins grands et montrer que si ces espaces sont responsables des équilibres observés, ils ne conduisent à rien de différent qu'ils soient grands ou petits :

Ce raisonnement se confirmait par l'expérience faite au même temps avec le vase A et avec le tuyau B dans lesquels le vif argent s'arrêtait toujours au même niveau AB signe presque certain que la vertu n'était pas à l'intérieur ; car le vase AE aurait eu plus de force, ce vase où il y avait plus de substance raréfiée et attirante et beaucoup plus forte pour la raréfaction plus grande que celle du petit espace B. (Mersenne, 1932, Tome 13, p.181)



Par cette expérience qui passe presque inaperçue puisqu'elle est discrètement rapportée en peu de lignes à la suite du récit de l'expérience que la postérité aura retenue, Torricelli entendait sans ambiguïté démontrer que l'espace laissé vide en apparence n'était doué d'aucune vertu, et ne pouvait donc en aucun cas être responsable de l'équilibre observé.

Cette réfutation d'une propriété largement attribuée à une matière subtile ou même au vide lui-même est d'autant plus convaincante qu'elle est accompagnée d'une hypothèse alternative dispensant de croire à une quelconque vertu interne au dispositif : celle de la pesanteur de l'air. Cette nouvelle hypothèse est effectivement avancée par Torricelli comme un remplacement de l'hypothèse qu'il cherche à discréditer :

Le vif – argent se maintenait malgré son poids dans le col AC ; cette force qui régite ce vif – argent contre sa nature qu'il a de descendre, on a cru jusqu'à présent qu'elle était intérieure au vase AE ou qu'elle venait du vide ou de quelque substance extrêmement raréfiée. Mais je prétends qu'elle est externe et que la force vient de l'extérieur. Sur la superficie du liquide qui est dans la cuvette l'air pèse d'une hauteur de cinquante milles. (*ibid.*)

Nous qualifions cette hypothèse de nouvelle dans le sens où c'est avec Torricelli qu'elle a suscité les premières réactions dont nous avons trouvé des traces dans les littératures primaire et secondaire ; toutefois avant même le commencement de la crise dont nous faisons le récit elle avait été exprimée d'une façon analogue par Baliani dans sa réponse à Galilée le 26 novembre 1630 :

Je ne suis plus de l'opinion vulgaire, suivant laquelle il n'y a pas de vide. . . et, pour tout dire, j'ai commencé de croire que le vide était naturellement possible dans le temps même que j'ai reconnu à l'air un poids sensible. . . Il n'est pas vrai que le vide répugne à la nature ; il est seulement vrai qu'il ne peut se produire sans une grande violence, et l'on peut déterminer quelle est cette violence requise pour obtenir le vide. D'ailleurs, si l'air est pesant, il n'y a entre l'eau et l'air qu'une différence de plus ou de moins. . . J'estime que, plus l'air se trouve élevé au-dessus du sol, plus il est léger ; toutefois, je crois son immensité si grande qu'en dépit de la faiblesse de

son poids spécifique, si l'on sentait la charge de tout l'air qu'on porte au-dessus de soi, on éprouverait un très grand poids ; il ne serait cependant pas infini ; il aurait une valeur déterminée, en sorte qu'au moyen d'une force proportionnée à ce poids, on pourrait le surmonter et produire le vide. . . Je juge que cette valeur est telle que l'on pourrait produire le vide avec une violence égale à celle que peut produire l'eau dans un canal dont la longueur ne dépasse pas 60 pieds. (Extrait rapporté par Rougier, 2010b, p.70)

On remarque que cet extrait de lettre, bien qu'il n'ait pas su convaincre Galilée au point de lui faire renoncer à ses hypothèses, contient toutes les idées qui allaient finalement s'imposer progressivement dans les décennies à suivre : les variations de pesanteur de l'air avec l'altitude, les similitudes entre l'air et l'eau, les effets sensibles de la pesanteur de l'air, leurs conséquences observables, et leurs limites. Nous ignorons cependant de quelle façon ces idées préexistantes à la controverse ont circulé dans le monde savant italien dans les années 1630 et 1640.

L'expérience dite « d'Italie » rapportée en France conduira Blaise Pascal à poursuivre d'autres expériences pour « faire admettre le vide ». L'une d'entre elles a attiré notre attention dans la mesure où elle consiste à montrer plus simplement que Torricelli ne l'a fait « que cette horreur ou cette répugnance qu'ont tous les corps, n'est pas plus grande pour admettre un grand vide apparent qu'un petit, c'est-à-dire à s'éloigner d'un grand intervalle que d'un petit ». À la place du dispositif volumineux et fragile sur lequel repose l'expérience de Torricelli, Pascal n'utilise qu'une simple seringue plongée dans l'eau :

Une seringue de verre avec un piston bien juste, plongée entièrement dans l'eau, et dont on bouche l'ouverture avec le doigt, en sorte qu'il touche au bas du piston, mettant pour cet effet la main et le bras dans l'eau ; on n'a besoin que d'une force médiocre pour le retirer, et faire qu'il se désunisse du doigt, sans que l'eau y entre en aucune façon (ce que les philosophes ont cru ne se pouvoir faire avec aucune force finie) ; et ainsi le doigt se sent fortement attiré et avec douleur ; et le piston laisse un espace vide en apparence, et où il ne paraît qu'aucun corps n'ait pu succéder, puisqu'il est tout entouré d'eau qui n'a pu y avoir accès, l'ouverture en étant bouchée, et si on tire le piston davantage, l'espace vide en apparence devient plus grand ; mais le doigt ne sent pas plus d'attraction. (Pascal, 1941, p.138)

Alors que Pascal réalisait, en France, ses expériences pour faire admettre le vide, l'hypothèse de la pesanteur de l'air avait déjà supplanté la question du vide dans les débats en Italie, et ce depuis l'expression par Torricelli de cette hypothèse dans sa lettre à Ricci. Nous allons donc poursuivre notre récit de la querelle en relatant les faits marquants dans la mise à l'épreuve de cette nouvelle hypothèse, en retournant en Italie, en 1644.

3.3 Mise à l'épreuve de l'hypothèse de la pesanteur de l'air

3.3.1 Argumentations à propos de l'hypothèse

Ricci, le destinataire du récit de Torricelli, ne se laissa pas convaincre si aisément de la thèse de la pesanteur de l'air comme explication de la suspension du mercure dans le tube. Bien que séduit par l'idée, il exprime clairement ses réticences par retour de lettre à Torricelli juste une semaine après réception du récit. Alors que la lettre de Torricelli répondant encore plus tard à ces objections soit régulièrement citée dans les sources secondaires (Rougier, 2010b ; Middleton, 1963), nous avons eu la surprise de constater que les objections en question, formulées par Ricci, ne bénéficiaient pas de la même publicité. Du point de vue de la didactique les contre-arguments avancés par Ricci sont pourtant d'un grand intérêt selon nous. C'est pour cette raison que nous avons traduit par nos soins cette lettre que nous avons dû chercher, et que nous avons trouvée non sans quelque peine et uniquement en italien. Elle est retranscrite dans un ouvrage scientifique contemporain à la crise dont nous faisons le récit, et qui se fait témoin de la contribution toscane dans la compréhension de l'expérience dite « du vide » (Dati, 1663). Dans cet ouvrage on trouve la lettre de Ricci, précédée et suivie des deux lettres de Torricelli ; seules celles du notable Torricelli ont été apportées en France à l'été 1644 par l'intermédiaire de Du Verdus et Mersenne, ce qui montre que dès le début les idées de Ricci n'ont pas bénéficié de la même mise en lumière que celles de Torricelli. Voici la traduction que nous proposons pour la lettre de Ricci à Torricelli du 18 juin 1644 :

La façon dont Votre Seigneurie explique les expériences faites comme preuve du vide, c'est-à-dire de l'ascension des choses pesantes contre leur tendance naturelle, je la juge d'autant meilleure que nous nous conformons par là à la simplicité de la nature dans ses œuvres ; laquelle, ne pouvant sauver l'union des corps qu'avec le mouvement descendant, aurait en vain greffé sur eux une nouvelle tendance naturelle à obéir à la cause universelle modératrice du monde, comme on dit. Et j'admire la noble bravoure de Votre Seigneurie d'avoir pris en considération quelque chose, qui n'a été vu par personne jusqu'alors et qui est tellement probable qu'hormis deux ou trois objections, que je m'appête à vous dire et que je prie Votre Seigneurie de bien vouloir résoudre, puisque je sais que vous pourrez le faire facilement, je considère que c'est ce qu'il y a de plus vrai et de plus raisonnable que l'on puisse dire dans une telle affaire. Il me semble tout d'abord que nous pouvons exclure l'action de l'air pesant sur la surface extérieure du vif-argent qui se trouve dans le vase, en plaçant un couvercle avec un seul trou, à travers lequel passerait le tube de verre, et en bouchant ensuite complètement toutes les parties, de sorte que l'air au-dessus du vase ne communiquerait plus avec lui ; l'air pèserait alors non plus sur la surface du vif argent, mais sur le couvercle, et le vif-argent se maintenant suspendu dans l'air comme auparavant, on ne peut plus attribuer l'effet au poids de l'air, qui le soutenait presque en équilibre. Deuxièmement, qu'on prenne une seringue, très utilisée dans ce domaine, et que son piston y soit entièrement enfoncé, de sorte qu'il chasse tous

les autres corps par son volume, puis bouchons le trou à l'extrémité, et retirons de force le piston, on ressent une grande résistance, et cela ne se produit pas seulement en tenant la seringue vers le bas, et le piston en haut, sur la poignée duquel l'air pèse, mais cela se produit dans toutes les directions ; Et pourtant, il ne semble pas qu'on puisse facilement comprendre dans ces cas en quoi le poids de l'air y est pour quelque chose. Enfin, un corps immergé dans l'eau ne s'oppose pas à toute l'eau qui le recouvre, mais seulement à l'eau qui bouge lors du mouvement du corps immergé, laquelle n'est pas plus grande que ce corps ; voilà pourquoi je pense que la même doctrine devrait être appliquée à la libération du vif-argent, il devrait s'opposer à un volume d'air égal au sien ; Comment l'air pourrait-il jamais prédominer ? C'est ce que ma folie m'a administré en opposition au bon sens de Votre Seigneurie, qui devra excuser le désir que j'ai de comprendre parfaitement la solution des objections que j'oppose, afin d'en être ensuite un défenseur absolu, puisque je suis un admirateur sincère de celle-ci et de toutes les autres de vos inventions, qui me sont toutes très agréables. (Traduit par nos soins, issu de Dati, 1663, p.31-32)

Dans un premier temps Ricci propose ainsi une idée pour tester l'hypothèse de la pesanteur de l'air comme explication de la suspension de la colonne de liquide. Sans présumer explicitement de l'observation à laquelle cela conduirait, Ricci suggère à Torricelli de placer un couvercle sur le dispositif et d'observer si la suspension de la colonne de liquide persiste. Si tel était le cas, il faudrait renoncer à l'hypothèse de la pesanteur de l'air puisque, selon Ricci, l'air n'agirait plus sur le mercure de la cuve faute de contact direct avec celui-ci. Incrédule, Ricci commande ainsi une expérience supplémentaire permettant possiblement de rejeter l'hypothèse de Torricelli ; on suppose, vues les réticences qu'il exprime par la suite, que Ricci se figure un résultat décevant pour Torricelli.

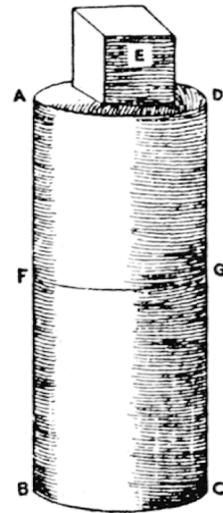
C'est ainsi que dans un second temps Ricci expose les raisons pour lesquelles il peine à croire en l'hypothèse de la pesanteur de l'air comme explication à la suspension du mercure. La première de ses raisons est que s'il fallait admettre cette cause pour la suspension du mercure, il faudrait l'admettre aussi pour d'autres phénomènes que l'on attribuait au vide, par conformité « avec la simplicité de la nature dans ses œuvres ». Or il vient à Ricci un autre exemple expérimental qui semble ne pas pouvoir s'expliquer par cette cause puisqu'il est observé quelque soit la direction (verticale ou horizontale) dans laquelle l'expérience est réalisée : il s'agit de la résistance ressentie lorsque l'on tire le piston d'une seringue dont l'extrémité est bouchée. Ricci associant la pesanteur de l'air à des effets nécessairement verticaux se croit donc obligé d'envisager une autre cause aux phénomènes qui semblent également contraints par une résistance horizontale. Cette assimilation directe du poids aux effets pressants, et la verticalité parfois associée au concept de pression, ne sont pas sans rappeler les difficultés pointées chez les élèves dans l'état de l'art.

La deuxième raison fait, elle aussi, écho à une difficulté d'élève, celle de parvenir à envisager un fluide et ses effet comme un tout : selon Ricci, si l'air atmosphérique pourrait bien être res-

ponsable de la résistance du mercure à sortir du tube retourné, seul l'air effectivement chassé par le mercure devrait s'opposer à son mouvement. Or un volume d'air ne pourrait jamais être plus pesant ni donc résistant à un même volume de mercure.

La pertinence et la crédibilité des objections de Ricci est telle que Torricelli aurait pu être déstabilisé ; mais sa conviction en son hypothèse le conduira à répondre avec assurance dix jours plus tard. À la suggestion faite par Ricci de couper le dispositif d'une partie de l'air atmosphérique en le plaçant sous un couvercle, Torricelli n'envisage pas de mise à l'épreuve expérimentale mais fonde sa réponse dans une analogie entre l'air et la laine. Cette analogie illustrant de façon très évocatrice la nature élastique de l'air, elle permet dans le même temps de répondre aux deux objections de Ricci à propos de la prétendue verticalité de l'action pressante de l'air et du caractère local de la résistance opposée par l'air :

Quant à la première objection, je réponds ceci : Quand elle introduit la plaque soudée qui couvre la superficie de la cuvette, V.S. l'introduit de manière qu'elle touche le vif – argent de la cuvette ; je dis que ce vif – argent monté dans le col du vase restera élevé comme auparavant non par le poids de la sphère constituée par l'air, mais parce que celui de la cuvette ne lui laissera pas de place. Si ensuite V.S. suppose qu'elle prend encore de l'air à l'intérieur, je demande si V.S. veut que cet air renfermé à l'intérieur possède le même degré de condensation que l'air extérieur et en ce cas, le vif – argent se maintiendra comme auparavant (par l'exemple que je donnerai maintenant avec de la laine) ; mais si l'air que V.S.



suppose est plus raréfié qu'à l'extérieur, aussitôt le métal soulevé descendra un peu ; si ensuite il était infiniment raréfié, c'est – à – dire vide, le métal aussitôt descendrait tout entier à condition que l'espace renfermé puisse le recevoir. Le vase ABCD est un cylindre plein de laine ou de toute autre matière compressible (disons de l'air) et ce vase possède deux fonds : BC stable et AD mobile et s'adaptant ; et soit AD chargé sur le dessus du plomb E qui pèse $m / 10\ 000\ 000$ livres. Je crois que V.S. comprendra de quelle force il faudrait se servir pour atteindre le fond BC. Maintenant, si nous enfonceons de force un plan coupant, FG, qui puisse entrer et couper la laine comprimée, je dis que si la laine FBCG était comprimée comme précédemment, quoique le fond BC ne sente plus rien du poids imposé par le plomb E, de toute façon il supportera le même poids qu'il supportait auparavant. (Mersenne, 1932, Tome 13, p.182)

Avec cette réponse il n'est plus simplement question de pesanteur de l'air, ni donc d'action verticale et isolée de l'air, mais d'élasticité, ou de ressort de l'air : l'air atmosphérique est ainsi considéré comme un tout dont les propriétés locales sont intimement liées aux propriétés de l'ensemble. Cette brillante argumentation nous semble d'un grand intérêt didactique.

Malgré tout, l'adhésion à l'hypothèse de la pesanteur de l'air ne garantit pas que les savants convaincus y voient une quelconque affirmation du vide. A l'instar de Descartes, certains savants réussissent à expliquer l'équilibre de la colonne de mercure en composant habilement avec la pesanteur de l'air et en même temps la nécessaire matérialité de l'espace laissé vide en apparence. L'argumentation repose sur le mouvement circulaire dans le plein que nous avons évoqué dans la sous-section 2.2 de ce chapitre, la peine à faire descendre plus en bas le mercure du tube venant du fait qu'il faut, dans le même temps, faire monter l'air atmosphérique qui doit venir remplacer l'éther, issu du ciel, s'infiltrant par les pores du verre du tube pour remplir l'espace laissé vide en apparence (Rougier, 2010b).

L'hypothèse de la pesanteur de l'air comme explication (suffisante ou partielle) de la suspension de la colonne de mercure s'impose progressivement à partir de ces échanges entre Ricci et Torricelli, et est considérée en France tout aussi sérieusement peu de temps après. En 1647 Pascal pris la suite de son confrère italien et choisi de défendre l'hypothèse alternative de la pesanteur de l'air, renforçant du même coup la discréditation la thèse de l'horreur du vide.

3.3.2 Première confirmation expérimentale : l'expérience du Puy de Dôme

C'est bien dans cette volonté de se « départir de la maxime de l'horreur du vide » que Pascal envisage la démonstration expérimentale que nous allons rapporter dans cette sous-section. En effet, envisageant une expérience qu'il ne lui était matériellement pas possible de réaliser lui-même, Pascal en commande l'exécution à beau-frère Périer en se justifiant ainsi dans une lettre écrite le 15 novembre 1647 :

Mais parce que tous les effets de cette dernière expérience des deux tuyaux, qui s'expliquent si naturellement par la pression et pesanteur de l'air, peuvent encore être expliqués assez probablement par l'horreur du vide, je me tiens dans cette ancienne maxime, résolu néanmoins de chercher l'éclaircissement entier de cette difficulté par une expérience décisive. J'en ai imaginé une qui pourra seule suffire pour nous donner la lumière que nous cherchons, si elle peut être exécutée avec justesse. (Pascal, 1641, p.168)

Notons l'apparition, pour la première fois de notre récit, de l'expression « pression de l'air », utilisée pour désigner une propriété de l'air liée à sa pesanteur mais différente de celle-ci. Le mot pression désigne avec Pascal l'action pressante de l'air, propriété qui a déjà été pensée auparavant mais qui se trouve désormais désignée par un mot, obtenant de cette façon un statut de notion scientifique au même titre que la pesanteur.

On reconnaît par ailleurs dans ces quelques lignes la méthode propre à Pascal : « Pour lui, seules ont autorité, en physique, les expériences. » (Sadoun Goupil, 1663, p.26). Jusqu'alors l'expérience n'avait pas acquis la légitimité scientifique qu'on lui reconnaît désormais ; Pascal est un des pionniers de cette méthode qui n'a pas aussitôt fait l'unanimité, la métaphysique prévalant encore souvent sur la physique.

La « grande expérience de l'équilibre des liqueurs » imaginée par Pascal pour mettre à l'épreuve l'hypothèse de la pesanteur de l'air consistait à faire varier ce paramètre extérieur, l'air, dans l'expérience de Torricelli pour mesurer son effet sur la suspension observée. Les variations de l'air pouvant être obtenues en s'élevant en des lieux plus élevés, le protocole de l'expérience s'exprimait en ces termes :

C'est de faire l'expérience ordinaire du vide plusieurs fois en même jour, dans un même tuyau, avec le même vif-argent, tantôt en bas et tantôt au sommet d'une montagne, élevée pour le moins de cinq ou six cents toises, pour éprouver si la hauteur du vif-argent suspendu dans le tuyau, se trouve pareille ou différente dans ces deux situations. Vous voyez sans déjà sans doute, que cette expérience est décisive de la question, et que, s'il arrive que la hauteur du vif-argent soit moindre au haut qu'au bas de la montagne (comme j'ai beaucoup de raisons pour le croire, quoique tous ceux ont médité sur cette matière soient contraires à ce sentiment), il s'ensuivra nécessairement que la pesanteur et pression de l'air est la seule cause de cette suspension du vif-argent, et non pas l'horreur du vide, puisqu'il est bien certain qu'il y a beaucoup plus d'air qui pèse sur le pied de la montagne, que non pas sur son sommet ; au lieu qu'on ne saurait pas dire que la nature abhorre le vide au pied de la montagne plus que sur son sommet. (Pascal, 1641, p.169)

Il faudra attendre presque un an pour que l'expérience soit effectivement réalisée par le beau-frère de Pascal et le compte-rendu transmis à Pascal, encore une fois par lettre :

je fus, avec tous ces Messieurs, faire les mêmes expériences, au haut du Puy-de-Dôme, élevé au dessus des Minimes environ de 500 toises, où il se trouva qu'il ne resta plus dans ce tuyau que la hauteur de vingt-trois pouces deux lignes de vif-argent, au lieu qu'il s'en était trouvé aux Minimes, dans ce même tuyau, la hauteur, la hauteur de 26 pouces 3 lignes et demie, et ainsi, entre les hauteurs du vif-argent de ces deux expériences, il y eut trois pouces une ligne et demie de différence. (*ibid.*, p.170-172)

Le résultat ravit Pascal puisqu'il corrobore les hypothèses en lesquelles il croyait : c'est bien la pesanteur et pression de l'air qui sont la cause de la suspension du mercure dans le tube, et donc il n'y a pas lieu de croire que la nature a horreur du vide. De ce succès il publiera les traités sur l'équilibre des liqueurs et la pesanteur de la masse de l'air. Pascal y affirmera, entre autres choses, que « la pesanteur de la masse de l'air produit tous les effets qu'on a attribués à l'horreur du vide » (*ibid.*, p.212) et pose les jalons de la météorologie, comme nous l'explicitons dans la sous-section 4.1 de ce chapitre.

3.3.3 Seconde confirmation expérimentale : l'expérience du vide dans le vide

Plus d'une décennie plus tard, depuis l'archipel britannique, le savant irlandais Robert Boyle pousse encore plus loin la preuve expérimentale que les causes de l'équilibre dans le dispositif de Torricelli sont bien extérieures en effectuant l'expérience « en dehors de l'atmosphère ».

Ce « vide dans le vide » fut rendu possible par le développement des pompes à air depuis 1650 par Otto Von Guericke puis Boyle et Hooke. Robert Boyle rend compte de son expérience à son neveu dans une lettre publiée dans les *New experiments Physico-Mechanical touching the spring of the air* (Boyle, 1660) dans laquelle il remarque, entre autres choses, que le fait de placer le dispositif dans une enceinte fermée (la cloche à vide) n'affecte pas l'équilibre de la colonne de mercure, confrontation expérimentale tardive pour l'idée du couvercle évoquée par Ricci en 1644 :

Dans l'expérience du vide, le mercure dans le tube a l'habitude de rester élevé, au-dessus de la surface au-dessus de laquelle il s'appuie, à environ 27 pouces. J'ai pensé que si l'expérience pouvait être tentée en dehors de l'atmosphère, le mercure dans le tube retomberait au niveau de celui dans le vaisseau. Ainsi l'expérience fut réalisée : le tube étant bouché par un doigt et renversé fut ouvert, comme dans l'expérience à l'intérieur du vaisseau. Le vaisseau et le tube furent précautionneusement insérés dans le réceptacle au moyen de ficelles : et le couvercle fut glissé et soigneusement fermé. A la suite de cette fermeture il semblerait qu'il n'y ait pas de changement dans la hauteur du cylindre de mercure qui apparaît élevé au-dessus de la surface plutôt en vertu de son ressort que de son poids. Toute chose étant ainsi prête, l'aspiration fut déclenchée : et, immédiatement après l'évacuation d'un cylindre d'air en dehors du réceptacle le mercure dans le tube s'abaisse, conformément aux attentes. Nous tournons maintenant la clé et laissons entrer de l'air ; sur ce le mercure commence immédiatement à monter (ou plutôt à être poussé vers le haut) dans le tube. (Traduit par nos soins, issu de Boyle, 1660, p.22)

On remarque que Boyle oriente son interprétation davantage vers les qualités élastiques de l'air que vers son caractère pesant (bien que les deux soient liés) ; l'élasticité de l'air sera d'ailleurs un des sujets de recherches pour lequel le savant britannique est célèbre.

Cette dernière expérience, rapportée en tant qu'expérience XVII dans *New experiments physico-mechanical*, ainsi que celle de Pascal au Puy-de-Dôme participent indubitablement à cette conclusion de Mazauric (1999) à propos du rôle des expériences :

Cette querelle a aussi signifié la modification du sens de l'expérience. Jusqu'alors relevant plutôt de la catégorie des simples faits d'observation, l'expérience se rapproche alors sensiblement de ce qui sera ultérieurement désigné comme l'expérimentation scientifique, c'est-à-dire comme un dispositif artificiel conçu et projeté dans le but de vérifier ou d'invalider une hypothèse. (Mazauric, 1999, p.25)

Cette modification ne fut pas sans réticence, et Boyle se trouva victime de détracteurs dans ses entreprises expérimentales. Hobbes en particulier trouvait insuffisantes les preuves expérimentales obtenues avec le dispositif à vide, pour cause, fondée, que ce dernier présentait des défauts. Boyle « reconnaissait que la pompe fuyait effectivement, même s'il excluait dans ses *new experiments*, que cela puisse sérieusement nuire à l'évidence de ses résultats. » (Schaffer &

Shapin, 1993, p.173)

Ainsi, presque trente ans après le début de la crise que nous avons relatée la communauté savante reste divisée, d'abord sur la question du vide, ensuite sur le rapport de force entre physique et métaphysique. Il n'en demeure pas moins qu'à l'issue de ces trente années la science a avancé, et que des progrès scientifiques et techniques ont été permis encore après, en particulier grâce au dispositif pensé par Torricelli.

4 Au-delà de la crise

Le dispositif de Torricelli continua à être exploité à la suite des démonstrations de Pascal, et ce à deux fins : en connaître encore plus sur la nature de l'air d'une part, et perfectionner un outil pour mesurer les différents états de l'air avec le temps ou l'altitude d'autre part. C'est ce que nous développons dans la première sous-section. Ensuite nous retracerons brièvement les développements ultérieurs à la crise dont nous venons de faire le récit, en particulier la formalisation du concept de pression en temps que grandeur physique, puis les premières interprétations microscopiques qui en furent proposées.

4.1 Exploitations du dispositif de Torricelli

4.1.1 Au profit de la science : à propos de la nature de l'air

La pesanteur de l'air admise et ses effets reconnus, Mariotte discourt ensuite sur une deuxième propriété que nous avons déjà évoquée avec Torricelli puis Boyle : « seconde propriété de l'air, qui est de pouvoir être condensé et dilaté et d'avoir la vertu de ressort. » (Mariotte, 1676, p.4). Arguant que l'air se condense à mesure qu'il est pressé, par exemple par les couches supérieures de l'atmosphère, Mariotte cherche à vérifier expérimentalement que cette condensation se fait selon une loi précise : « sa condensation se fait selon la proportion des poids dont il est chargé » (*ibid.*, 5). Le protocole repose sur une modification de l'expérience de Torricelli : plutôt que de remplir le tuyau entièrement de mercure avant de le retourner dans la cuve, Mariotte y laisse un peu d'air qui, une fois le tube retourné, se trouve dilaté par rapport à quand il était encore libre. L'équilibre atteint ressemble à celui obtenu dans l'expérience originelle, à la différence que la hauteur de suspension du mercure dans le tube diffère selon la proportion d'air et de mercure qu'il y avait dans le tube initialement. Mariotte explique le résultat en ces termes : si dans l'expérience du vide la colonne de mercure devait équilibrer le poids de tout l'atmosphère, dans cette nouvelle version de l'expérience le poids de la même colonne d'atmosphère est équilibré non seulement par le poids de la colonne de mercure mais aussi par l'air resté enfermé dans le tube qui agit en vertu de son élasticité :

l'air qui y est enfermé avant l'expérience fait équilibre par son ressort au poids de toute l'atmosphère (...), et par conséquent le mercure qui est dans le tuyau ne trouvant rien qui lui fasse équilibre, il descendra ; mais il ne descendra pas entièrement

car lorsqu'il descend, l'air enfermé dans le tuyau se dilate et par conséquent son ressort n'est plus suffisant pour faire équilibre avec tout le poids de l'air supérieur. Il faut donc qu'une partie du mercure demeure dans le tuyau à une hauteur telle que l'air qui est enfermé étant dans une condensation qui lui donne une force de ressort capable de soutenir seulement une partie du poids de l'atmosphère, le mercure qui demeure dans le tuyau fasse équilibre avec le reste. (*ibid.*, p.6)

Les résultats expérimentaux sont concluants dans la mesure où Mariotte parvient à établir la relation de proportionnalité qu'il avait supposée. Pour se faire, il prend comme référence les 28 pouces obtenus avec l'expérience du vide : c'est la hauteur de mercure nécessaire à équilibrer, seule, tout le poids de l'atmosphère. Et il mesure de combien est dilaté l'air enfermé lorsqu'il équilibre différentes proportions de l'atmosphère. Les mesures sont sans équivoque : l'air est bien dilaté en proportion inverse du poids d'atmosphère qu'il a à équilibrer :

je ne fus point trompé dans mon attente, car le bout du tuyau renversé étant plongé dans le mercure du vaisseau, celui du tuyau descendit et, après quelques balancements, il s'arrêta à 14 pouces de hauteur ; et par conséquent l'air enfermé qui occupait alors 25 pouces était dilaté au double de celui qu'on y avait enfermé, qui n'occupait que douze pouces et demi. (*ibid.*, p.7)

Dans son discours Edme Mariotte suggère d'améliorer la précision de ses mesures en utilisant un dispositif différent : celui-ci consiste finalement en un tube recourbé tout comme Boyle le décrit dans ses expériences sur le même sujet quelques années auparavant.

4.1.2 Au profit de la technique : développement des baromètres

Comme un juste retour des choses, un outil a vu le jour grâce à cette crise qu'un problème technique avait déclenchée : il s'agit du baromètre. Au cours de la fin du XVIIe siècle des recherches étaient portées dans la perspectives de perfectionner ces outils capables de déceler les variations des propriétés de l'air atmosphérique (Boyle, 1675 ; Hooke, 1686). Les instruments originels de mesure de « pression atmosphérique » consistaient en fait en un tube rempli de mercure retourné dans une cuve pleine du même liquide, c'est-à-dire ni plus ni moins que le dispositif de Torricelli. Ce sont d'ailleurs les acteurs de la crise eux-même qui ont, les premiers, pensé aux applications techniques des progrès scientifiques qu'ils étaient en train de faire ; à commencer par Torricelli lui-même qui annonce, au début de sa lettre à Ricci le 11 juin 1644 (Middleton, 1963), avoir essayé de confectionner un instrument capable de montrer les changements de l'air qui peut être parfois plus ou moins lourd. Au delà de la simple démonstration (« montrer »), la question de la mesure de ces changements est suggérée par Pascal :

L'instrument le plus propre pour observer toutes ces variations est un tuyau de verre bouché par en haut, recourbé par en bas, de trois ou quatre pieds de haut, auquel on colle une bande de papier, divisé par pouces et lignes ; car, si on le remplit de

vif-argent, on verra qu'il tombera en partie, et qu'il demeurera suspendu en partie et on pourra remarquer exactement le degré auquel il sera suspendu ; et il sera facile d'observer ces variations qui y arriveront de la part des charges de l'air, par les changements de temps, et celles qui y arriveront en portant en un lieu plus élevé ; car en le laissant en un même lieu, on verra que, à mesure que le temps changera, il haussera et baissera ; et on remarquera qu'il sera plus haut en un temps qu'en un autre (...). (Pascal, 1641, p.227)

La paternité du baromètre est ainsi couramment attribuée à Torricelli, son dispositif étant souvent désigné sous l'appellation « baromètre de Torricelli », tandis qu'à Pascal reviendrait le mérite d'avoir « découvert » ou « inventé » la pression atmosphérique. Les noms des deux savants sont d'ailleurs utilisés en tant qu'unité de mesure de la pression : le torr représente un millimètre de mercure (mmHg) dans le dispositif de *Torricelli*, tandis que le Pascal (Pa) est de l'ordre de dix millièmes de la pression atmosphérique. Le récit que nous avons fait de la crise ne cache pourtant pas que l'émergence du concept de pression atmosphérique est loin d'être étrangère à l'intervention d'autres savants que Torricelli et Pascal.

4.2 Généralisation du concept de « pression »

4.2.1 Du phénomène à la grandeur physique

Telle qu'introduite par Pascal, la pression de l'air est un « phénomène de pesanteur » dans le sens où les interprétations des effets pressants de l'air sont systématiquement expliqués, par Pascal, en terme de poids. Sur la fin de la crise dont nous avons fait le récit, Gassendi qui proposait ses propres interprétations reléguait la pesanteur au rang de cause secondaire, les propriétés pressantes de l'air étant avant tout liées à son état de compression et à son élasticité (Massignat, 2000). Cette interprétation fut confortée et quantifiée indépendamment par Boyle (1660) et Mariotte (1676) entre 1650 et 1680, leurs expériences élevant la pression de l'air au rang de grandeur physique mesurable dépendant de sa compression, autrement dit du volume qu'il occupe. Plus d'un siècle plus tard la pression des gaz sera ensuite reliée à la température grâce aux travaux de Gay-Lussac en 1802 (Massignat, 2000).

4.2.2 Unification des fluides

L'émergence du concept de pression atmosphérique repose en partie sur une analogie entre l'air et l'eau, comme l'exprimait Torricelli dans sa lettre à Ricci du 11 juin 1644 (Mersenne, 1932) : « nous vivons submergés au fond d'un océan d'air ». Cette analogie pose la base de l'unification des fluides, bien que non encore formalisée comme telle par les savants du milieu du XVII^e siècle. Ainsi le rapprochement entre les milieux liquides et gazeux fut d'abord admis en actes, les expériences visant à faire admettre la pesanteur de l'air comme cause des effets jusqu'ici attribués au vide ayant été reproduites, pour certaines, en immersion dans l'eau. Le comportement semblable de l'air et de l'eau était ainsi démontré par l'observation d'effets

comparables mais d'ampleur inégale lorsqu'ils apparaissaient dans l'air ou dans l'eau. La formalisation de ce rapprochement au travers du terme *fluide* survint beaucoup plus tard, lorsqu'une description cohérente de l'ensemble des milieux continus liquides et gazeux aura été rendue possible à l'échelle mésoscopique grâce au calcul différentiel.

4.2.3 Fluides en écoulement : hydrodynamique

L'hydrodynamique, ou science des écoulements, se développa au XVIII^e siècle au cours d'une crise dont Guilbaut (2008) fait le récit. Celle-ci débute en 1738 avec la mise en équation, par Daniel Bernoulli, du mouvement d'un fluide. Il s'agit d'une approche rudimentaire dans laquelle le fluide est découpé en tranches infiniment fines, réduisant l'étude à un problème unidirectionnel. Cette « approche du parallélisme des tranches » fut ensuite reprise par Jean Bernoulli (père de Daniel) puis par d'Alembert ; dans ces différentes versions de la même approche la pression n'est toujours associée qu'aux efforts exercés sur les parois.

Face à la contradiction entre les résultats obtenus dans le modèle des tranches et les effets observés expérimentalement, d'Alembert propose en 1745 de conduire l'étude en découpant le fluide non pas en tranches mais en volumes infinitésimaux (des particules) dont chacun a une vitesse qui dépend du temps et de l'espace. Cette « approche analytique » conduisit aux premières équations aux dérivées partielles, enrichies ensuite par Euler qui complète la théorie en 1751 en introduisant le concept de « pression interne ». C'est Euler lui-même qui proposa la version actuelle des relations établies par Bernoulli dans le cas des écoulements parfaits et incompressibles.

4.2.4 Interprétations microscopiques

Les premières interprétations microscopiques de la pression apparaissent dans les travaux de Daniel Bernoulli au début du XVIII^e siècle et concernent les gaz. C'est au cours de ce même siècle que la « théorie cinétique des gaz » verra le jour et sera affinée ; cette théorie repose sur l'hypothèse que les gaz sont composés de particules microscopiques dont les propriétés d'ensemble seraient directement la cause des effets observés à l'échelle macroscopique, y compris la pression.

5 Conclusion

5.1 Synthèse

L'émergence du concept de pression s'inscrit ainsi dans un processus long de plusieurs décennies au cours desquelles se développe en premier lieu le concept de pression atmosphérique. Ce développement repose sur l'acceptation de deux idées majeures rarement plébiscitées au début du XVII^e siècle, et encore moins mises en relation l'une avec l'autre : l'air est pesant et le vide peut exister sans difficulté. Les confirmations expérimentales de chacune de ces deux

hypothèses ainsi que les argumentations physiques et métaphysiques à leur sujet permirent progressivement de faire admettre une nouvelle propriété de l'air : sa pression. Cette propriété, à la fois liée à sa pesanteur et à son élasticité, commence à être un objet d'étude à part entière au milieu du XVIIe siècle, et devient l'objet de mesures quantitatives notamment grâce au dispositif de Torricelli. C'est ainsi que l'émergence du concept de pression atmosphérique est indissociable de la création du premier outil permettant de la mesurer : le baromètre de Torricelli.

L'acceptation de la pression atmosphérique reposant notamment sur une analogie entre l'air et l'eau (l'atmosphère se comporte comme un océan), cette propriété propre à l'air fut ensuite rapidement mise en relation avec la pression de l'eau dont on trouve les prémisses au XVIe siècle. Au XVIIIe siècle la science unifiant les fluides (milieux continus gazeux ou liquides) fut élaborée, notamment grâce au développement du calcul différentiel. La pression y est définie comme une propriété interne au fluide dont les premières interprétations microscopiques datent du même siècle.

5.2 Mise en relation avec les enquêtes précédentes

Cette reconstruction historique montre que les lois phénoménologiques macroscopiques de la statique des fluides sont nettement antérieures aux lois locales mésoscopiques que notre analyse de contenu présentait pourtant comme plus fondamentales. L'ordre d'exposition choisi dans le premier chapitre de cette thèse se justifie d'abord par la portée plus générale des lois locales mésoscopiques, ensuite d'un point de vue mathématique, puisqu'on peut, sous certaines conditions, intégrer les lois locales mésoscopiques pour obtenir des lois globales macroscopiques, ce qui est une opération difficilement réversible. Il apparaît donc de nos jours une forme de prévalence de l'approche mésoscopique sur l'approche macroscopique, ne serait-ce que dans notre capacité à traiter mathématiquement le passage de l'une à l'autre. Pour autant il est doublement logique que ce « nouvel ordre » ne corresponde pas à l'ordre chronologique dans lequel la lumière a été faite sur les questions de pression à différents niveaux de description. D'abord parce que l'approche mésoscopique repose sur des mathématiques qui n'ont vu le jour que bien longtemps après la crise dont nous avons fait le récit. Ensuite parce que l'approche scientifique au XVIIe siècle est fondée sur les phénomènes observables, ce qui fait de l'échelle macroscopique la porte d'entrée nécessaire aux développements scientifiques à propos des fluides.

Par ailleurs à bien des égards cette rétrospective historique résonne avec l'état de l'art que nous avons réalisé dans le chapitre précédent. En effet, un certain nombre de difficultés rencontrées par les savants du XVIIe siècle font écho à des idées recensées dans la littérature comme pouvant faire obstacle à la compréhension qu'ont élèves et étudiant·e·s des phénomènes liés à la pression. Premièrement, l'exemple le plus évident est la difficulté que partagent les savants du XVIIe siècle et les élèves contemporains à concevoir l'existence du vide (2.1.9, chapitre 2), bien que les raisons de cette réticence ne soient pas toutes comparables dans les deux groupes. Deuxièmement l'objection de Ricci à propos de la direction de l'action de l'air

sur le piston d'une seringue n'est pas sans rappeler que certains élèves et étudiants peinent à concevoir la propagation isotrope des forces de pression (2.1.4, chapitre 2). Troisièmement, l'idée répandue chez certains élèves et étudiants que la pression se réduit à la pesanteur (2.1.3, chapitre 2) se retrouve d'une certaine façon dans la première objection de Ricci et l'expérience du couvercle. Quatrièmement et dernièrement, le raisonnement local est mis en œuvre aussi bien par les savants du XVIIe siècle que par les élèves contemporains (2.2.4, chapitre 2). Ces quatre rapprochements confirment que l'ontogénèse, si elle ne peut pas être confondue avec la phylogénèse, n'y est toutefois pas totalement étrangère.

5.3 Perspectives

5.3.1 Vers une reconstruction didactique

Les choix que nous avons faits pour la reconstruction historique que nous venons de présenter ont été motivés notamment par des questions d'ordre didactique. Nous avons en particulier été sensible aux idées qui n'ont pas forcément marqué l'histoire, mais qui promettent pourtant, de notre point de vue, d'être très fécondes dans la perspective d'une reconstruction didactique. Nous avons mis en avant des difficultés et contre-arguments que nous percevons comme étant autant d'éléments à mettre en scène de façon fructueuse dans un enseignement des phénomènes liés à la pression. Il en va ainsi des aménagements pensés autour du dispositif de Torricelli pour valider ou invalider l'hypothèse de la pesanteur de l'air, ou encore des objections de Ricci que nous avons mis au jour à travers la traduction de sa lettre à Torricelli. Remarquons qu'un grand nombre de ces idées sont exprimées dans des lettres, ce qui donne à ce mode de communication un statut très spécial que nous comptons honorer dans la reconstruction didactique à venir. Il nous semble d'ailleurs qu'une grande partie des dimensions de la NoS peuvent être mises en avant à partir de cette enquête historique qui révèle une construction des savoirs lente, collaborative et non linéaire. Par ailleurs beaucoup d'expériences y sont évoquées, dont certaines (notamment celles avec des seringues et de l'eau) pourraient être reproduites en classe.

5.3.2 Vers une enquête empirique supplémentaire

Avant de nous employer à tirer profit de ce matériau historique pour élaborer une ressource pour l'enseignement, la représentation mécaniste de la nature validée au cours de la crise dont nous avons fait le récit (Mazauric, 1999) nous pousse à nous interroger sur la portée que pourrait avoir une telle représentation dans l'enseignement contemporain. En effet, tels que formulé dans le B.O. les phénomènes liés à la pression ne sont *a priori* pas tant abordés sous l'angle de l'équilibre mécanique que comme des relations entre propriétés locales et internes au fluide. Ces deux façons d'aborder les situations impliquant un liquide au repos, l'une, plus historique, que nous qualifions de « mécanique », et l'autre, plus contemporaine, que nous qualifions d' « hydrostatique » n'ont probablement pas la même portée. C'est ce que nous étudierons dans une ultime enquête préliminaire au chapitre suivant.

Références du chapitre 3

- Argoud, G. & Guillaumin, J.-Y. (1997). *Les Pneumatiques d'Héron d'Alexandrie*. Université de Saint-Etienne.
- Boyle, R. (1660). New experiments physico-mechanical touching the spring of air. Dans *Works of the honorable Robert Boyle*. A. Millar.
- Boyle, R. (1675). A New Essay-Instrument Invented and Described by the Honourable Robert Boyle, Together with the Uses Thereof. *Philosophical Transactions*, 10(112-122), 329-348. <https://doi.org/10.1098/rstl.1675.0022>
- Dati, C. R. (1663). *Lettera a Filaleti di Timauro Antiata della vera storia della cicloide, e della famosissima esperienza dell'argento viuo*. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8626202g/f11.item>
- de Hosson, C., & Décamp, N. (2015). Une reconstruction historique du concept macroscopique de pression atmosphérique pour la préparation d'un dossier documentaire utilisable en classe de sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 109(978), 1369-1393.
- Duhem, P. (1905). Le principe de Pascal : Essai historique. *Revue générale de sciences pures et appliquées*, XVI, 599-610.
- Galilei, G. (1872). *Epistolario di Galileo Galilei (Vol. 2)*. (1872). Coi tipi di F. Vigo, Editore.
- Guilbaud, A. (2008). La "république des hydrodynamiciens" de 1738 jusqu'à la fin du 18e siècle. *Dix-huitième siècle*, 40(1), 173-191. <https://doi.org/10.3917/dhs.040.0173>
- Hooke, R. (1686). A Description of An Invention, Whereby the Divisions of the Barometer May be Enlarged in Any Given Proportions; Produced before the Royall Society By Mr. Robert Hook R. S. Soc. And Profess. Geom. Gresham. *Philosophical Transactions*, 16(179-191), 241-244. <https://doi.org/10.1098/rstl.1686.0043>
- Kuhn, T. (1962/1983). *La structure des révolutions scientifiques* (traduit par L. Meyer). Flammarion.
- Legrand, A. (1891). Le traité des corps flottants d'Archimède. Traduction nouvelle. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 10(1), 437-457. <https://doi.org/10.1051>

/jphystap :0189100100043700

- Maignan, E. (1653). *Cursus philosophicus concinnatus ex notissimis cuique principiis* (Vol. 4). Raym. Bosc.
- Mariotte, E. (1676). *Discours de la nature de l'air, de la végétation des plantes. Nouvelle découverte touchant la vue. Par Edme Mariotte*. Gauthier-Villars.
- Massignat, C. (2000). Gassendi et l'élasticité de l'air : Une étape entre Pascal et la loi de Boyle-Mariotte. *Revue d'histoire des sciences*, 53(2), 179-203.
- MAZAURIC, S. (1999). Crise de la physique au XVIIe siècle et la querelle du vide. *Raison présente*, 131(1), 13-30. <https://doi.org/10.3406/raipr.1999.3552>
- Mersenne, M. (1932). *Correspondance du P. Marin Mersenne minime et religieux*. (C. de Waard, A. Beaulieu, M. P. Tannery, B. Rochot, & Centre national de la recherche scientifique, Éd. ; Vol. 1-18). Éd. du Centre national de la recherche scientifique
- Middleton, W. E. K. (1963). The Place of Torricelli in the History of the Barometer. *Isis*, 54(1), 11-28.
- Pascal, B. (1941). *L'œuvre de Pascal* (établi et annoté par J. Chevalier). Pléiade.
- Rougier, L. (2010a). Chapitre I – L'Expérience de Torricelli et la Scolastique. Dans *De Torricelli à Pascal* (Kimé, p. 52-62). <https://philosophiascientiae.revues.org/177>
- Rougier, L. (2010b). Chapitre III – Précurseurs et émules de Torricelli. Dans *De Torricelli à Pascal* (Kimé, p. 69-79). <https://philosophiascientiae.revues.org/179>
- Sadoun Goupil, M. (1963). L'œuvre de Pascal et la Physique moderne. *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, 16(1), 23-52. <https://doi.org/10.3406/rhs.1963.4439>
- Schaffer, S., & Shapin, S. (1993). *Léviathan et la pompe à air. Hobbes et Boyle entre science et politique*. La Découverte.
- Stevin, S. (1586). Cinquième livre de la statique. Dans *Les œuvres mathématiques de Simon Stevin de Bruges* revues, corrigées et augmentées par A. Girard. <http://archive.org/details/ned-kbn-all-00011058-003>

Thurot, C. (1869). Recherches historiques sur le principe d'Archimède. *Revue Archéologique*, 19, 284-299.

Waard, C. de. (1936). *L'Expérience barométrique, ses antécédents et ses explications, étude historique par C. de Waard*. Impr. nouvelle.

Chapitre 4

Deuxième enquête empirique

Liquides au repos : compréhension des
enseignant·e·s

Contents

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introduction | 138 |
| 2 | Problématique | 139 |
| 2.1 | Conceptualisation des fluides au repos | 139 |
| 2.1.1 | Définitions générales | 139 |
| 2.1.2 | Cas des situations impliquant un liquide au repos | 140 |
| 2.2 | Hypothèses | 142 |
| 2.2.1 | Cadre de rationalité et type de situation impliquant un liquide au repos | 142 |
| 2.2.2 | Compréhension des situations impliquant un liquide au repos | 143 |
| 3 | Méthodologie | 144 |
| 3.1 | Situations soumises aux participant·e·s | 144 |
| 3.1.1 | Situation A (objet suspendu) | 145 |
| 3.1.2 | Situation B (tube retourné) | 145 |
| 3.2 | Questions posées à propos des deux situations | 148 |
| 3.2.1 | Expliquer la situation décrite et schématisée | 148 |
| 3.2.2 | Prévoir l'évolution du paramètre m ou h | 148 |
| 3.3 | Justifications proposées | 152 |
| 3.3.1 | Points généraux de vigilance | 152 |
| 3.3.2 | Sets de propositions pour chaque situation | 153 |
| 3.3.3 | Analyse des justifications proposées | 153 |
| 4 | Résultats | 157 |
| 4.1 | A propos des répondant·e·s | 157 |
| 4.1.1 | Profil des enseignant·e·s sollicité·e·s | 157 |
| 4.1.2 | Effectifs répondants | 158 |
| 4.2 | Résultats bruts | 159 |
| 4.2.1 | Réponses aux questions d' <i>explication</i> | 159 |
| 4.2.2 | Réponses aux questions de <i>prévision</i> | 162 |
| 4.3 | Facteurs de performance | 165 |
| 4.3.1 | Type de justification et performance | 165 |
| 4.3.2 | Nombre de cadres mobilisés et performance | 165 |
| 5 | Discussion | 168 |
| 5.1 | Retour sur les hypothèses | 168 |
| 5.1.1 | Pertinence des deux cadres de rationalité définis | 168 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.1.2 | Différences de conceptualisation entre les deux situations . . . | 168 |
| 5.2 | Compréhension des situations par les enseignant·e·s | 168 |
| 5.2.1 | Bilan général | 168 |
| 5.2.2 | Corrélations la compréhension et cadre(s) mobilisé(s) | 169 |
| 5.3 | Perspectives | 170 |
| 5.3.1 | Élargir l'étude | 170 |
| 5.3.2 | Former les enseignant·e·s | 170 |
| 6 | Synthèse | 172 |
| | Références du chapitre 4 | 173 |

1 Introduction

L'enquête historique réalisée dans le chapitre précédent (chapitre 3) montre que les situations dont on pourrait dire qu'elles relèvent du domaine de l'hydrostatique ont d'abord été comprises comme des problèmes de mécanique au XVII^e siècle. Autrement dit, et pour citer quelques exemples, des dispositifs tels que le baromètre de Torricelli, le crève tonneau de Pascal ou encore la presse hydraulique, s'ils peuvent désormais être décrits par la relation fondamentale de l'hydrostatique obtenue par intégration de lois locales mésoscopiques dans le cas des fluides incompressibles au repos (chapitre 1), ont d'abord été pensés dans le cadre d'une représentation mécanique macroscopique des liquides et des gaz. Évidemment, il faut entendre le terme « mécanique » en ayant en tête que l'époque dont nous parlons ici, le XVII^e siècle, est antérieure à celle qui a vu le développement des outils de mécanique classique qui composent l'arsenal des physicien·ne·s de notre temps (lois de Newton, formalisme vectoriel etc.). Ce qu'il y avait de mécanique dans le traitement fait des situations que nous reconnaissons aujourd'hui comme appartenant au champ de l'hydrostatique, c'est qu'il y était question d'expliquer des situations d'immobilité impliquant des fluides en terme d'actions ou de « forces » qui s'« équilibrent » (les guillemets rappellent que le sens recouvert par ces termes au XVII^e siècle diffère de l'acceptation moderne). Il n'en demeure pas moins que deux conceptualisations des liquides au repos est possible, l'une que l'on qualifiera d'hydrostatique, l'autre de mécanique. C'est à propos de la portée et des limites de chacune de ces conceptualisations que l'on s'interroge dans ce chapitre.

Ainsi, après avoir explicité ce que l'on entend par conceptualisation dans le cadre de la mécanique ou de l'hydrostatique, nous montrerons que chacune de ces deux possibilités n'a pas le même statut d'abord dans les programmes scolaires, ensuite, et c'est l'hypothèse qui fonde cette recherche, dans les usages spontanés des enseignant·e·s de sciences physiques. Or, la manière dont les enseignant·e·s abordent et comprennent les situations impliquant un liquide au repos étant certainement déterminante dans la façon dont les élèves approcheront à leur tour ces situations, une acculturation à cette double conceptualisation *via* l'histoire des sciences pourrait être une plus-value pour l'enseignement de ces phénomènes dont l'état de l'art a mis au jour de nombreuses difficultés (chapitre 2).

Dans ce dernier chapitre d'enquêtes préliminaires nous présentons donc les résultats d'un questionnaire diffusé auprès d'une centaine d'enseignant·e·s en formation, et visant à établir une éventuelle corrélation entre cadre de conceptualisation mobilisé et compréhension de deux situations impliquant un liquide au repos. Leur compréhension sera évaluée à travers deux tâches : premièrement *expliquer* les situations, c'est-à-dire *donner des causes, exposer des origines* ; deuxièmement *prévoir*, c'est-à-dire *dire à l'avance* leur évolution si un paramètre en est modifié.

2 Problématique

2.1 Conceptualisation des fluides au repos

Nous nous intéressons dans cette sous-section au processus de formation des concepts dans le contexte des situations impliquant un fluide au repos.

2.1.1 Définitions générales

Pour analyser les processus de conceptualisation en mathématiques (Lerouge, 1992) puis en physique, (Malafosse & al., 2000, p.91) définissent un cadre de rationalité comme « un ensemble cohérent de fonctionnement de la pensée caractérisé par quatre composantes : les objets du cadre, le type de processus de conceptualisation mis en œuvre, les règles de rationalité et enfin les registres sémiotiques support de conceptualisation et de communication. »

Explicitons ce que recouvre chacune de ces quatre composantes :

- les objets du cadre sont les éléments sur lesquels porte la conceptualisation. Ils sont issus de la pensée, contrairement aux objets « matériels » (existant réellement hors de la pensée individuelle ou collective) en référence desquels ils peuvent en revanche être construits. On distingue deux types d'objets du cadre :
 - les objets « mentaux » : issus du psychisme, c'est-à-dire pensés individuellement. Il peut s'agir par exemple de conceptions chez les sujets.
 - les objets « conceptuels » : produits par la culture, c'est-à-dire pensés collectivement. Il s'agit de quantités et de concepts abstraits, par exemple de grandeurs physiques dans le cadre général de la physique ;
- le type de processus de conceptualisation mis en œuvre peut être de deux natures au sens de Vygotski (1985) :
 - familier, c'est-à-dire lié au développement des concepts enfantins ou spontanés ;
 - scientifique, c'est-à-dire lié à l'apprentissage scolaire des concepts scientifiques ou non-spontanés.

Ces deux processus étroitement liés exercent une influence mutuelle constante :

Lorsque nous parlons du développement des concepts spontanés ou scientifiques, il s'agit du développement d'un processus unique de formation des concepts, qui, tout en s'effectuant dans des conditions internes et externes différentes, n'en a pas moins une nature unique et ne consiste pas en une lutte, un conflit et un antagonisme entre deux formes de pensée qui dès le début s'exclueraient mutuellement. (Vygotski, 1985, p.222)

- les règles de rationalité sont les règles de raisonnements et les règles de validation mises en œuvre dans les processus de conceptualisation. Il s’agit aussi bien de règles très générales (validation ou raisonnement par induction, déduction ou analogie, réfutabilité, homogénéité etc.) que de lois, théories ou propriétés contextuelles (conservation de l’énergie par exemple) ;
- les registres sémiotiques sont, au sens de Duval(1995) , chacun constitués :
 - d’un ensemble de signes (système sémiotique) permettant la production d’une représentation identifiable (signifiant) d’un objet conceptuel (signifié) ;
 - d’un ensemble de règles de combinaison de ces signes permettant le traitement d’une représentation dans le registre où elle a été formée et la conversion d’une représentation en une représentation d’un autre registre.

Un cadre de rationalité peut compter plusieurs registres sémiotiques de conceptualisation et de communication à propos d’un même objet (plusieurs signifiants pour un même signifié). Ces registres peuvent être de nature discursive (langue naturelle, écriture symbolique de type analytique ou algébrique etc.) ou non-discursive (figures, tableaux etc.)

Selon les objets du cadre, les règles de rationalité et le type de processus de conceptualisation mis en œuvre, un cadre de rationalité peut être qualifié de personnel (ou familial) ou de scientifique. Dans ce dernier cas, les objets du cadre sont des concepts scientifiques et les règles de rationalité sont reconnues par la communauté scientifique. A partir de cadres « culturels » scientifiques sont construits des cadres « didactiques » servant à opérer la transposition des savoirs entre une communauté scientifique et l’élève en situation d’apprentissage (Malafosse & al. 2001).

2.1.2 Cas des situations impliquant un liquide au repos

Nous considérons qu’une situation impliquant un **liquide au repos** peut être appréhendée **au niveau macroscopique** selon deux cadres de rationalité distincts :

- **le cadre de la mécanique**, dans lequel un liquide est considéré comme un *milieu déformable* ;
- **le cadre de l’hydrostatique**, dans lequel un liquide est considéré comme un *fluide incompressible*.

Ces deux cadres de rationalité participent à l’interprétation théorique du même objet matériel, un « liquide », ce qui établit une première continuité entre les deux cadres. En revanche les objets conceptuels dont la construction émerge de l’objet réel « liquide » sont différents dans les deux cadres, ce qui fonde la rupture principale entre le cadre mécanique et le cadre hydrostatique. Nous résumons les ruptures et continuités identifiables entre les deux cadres dans le tableau 4.1.

| | Cadre culturel de l'hydrostatique | Cadre culturel de la mécanique |
|--|---|--|
| Objets conceptuels du cadre | fluide incompressible masse volumique champ de pesanteur équilibre (hydrostatique) pression (propriété du liquide) surface hauteur / profondeur | milieu déformable équilibre (mécanique) pression (norme d'une force surfacique) surface orientée force pressante |
| Processus de conceptualisation | scientifique | |
| Règles de rationalité générales | homogénéité des formules raisonnements par induction ou déduction etc. | |
| | relations scalaires | relations vectorielles |
| spécifiques | pression <i>en un point</i> principe de Pascal loi fondamentale | force <i>entre deux corps</i> principe d'inertie loi des actions réciproques |
| Registres sémiotiques | langue naturelle | |
| | écriture symbolique | |
| | $p, S, z, \Delta p = \rho g H$ | $F = pS, S, F_S, P$ |
| | graphique | figures |
| | | |

TABLE 4.1 – Ruptures et continuités entre les cadres culturels hydrostatique et mécanique

Ainsi les deux cadres ne sont pas incohérents entre eux et sont même liés, outre par leur objet matériel de référence (le liquide), par la relation algébrique $\mathbf{F} = p \times \mathbf{S}$. En effet la connaissance d'une propriété locale du liquide (sa pression p) renseigne sur l'action de ce liquide sur une surface (la force surfacique \mathbf{F}_S) et réciproquement.

2.2 Hypothèses

2.2.1 Cadre de rationalité et type de situation impliquant un liquide au repos

Selon que le liquide au repos est (ou non) le système explicitement étudié, la situation nous semble plus spontanément appréhendée par l'enseignant·e plutôt dans l'un ou l'autre des cadres de rationalité présentés dans la sous-section 2.1.2. C'est ce que nous développons dans ce paragraphe.

2.2.1.1 Situation type A :

Le système comporte un objet plongé dans un liquide au repos

Ce premier type de situation, étudié en contexte scolaire, se focalise essentiellement sur l'objet en immersion et non sur le liquide et mobilise automatiquement le concept de poussée d'Archimède, c'est-à-dire de force. Ce type de situation comportant un objet en immersion est donc *a priori* plus spontanément appréhendé dans le cadre culturel de la mécanique.

L'approche scolaire contemporaine de ce genre de situation se réduit d'ailleurs classiquement à une activité dans le cadre de la mécanique : s'assurer de l'adéquation entre une observation (l'objet flotte ou coule) et un bilan quantitatif des forces en jeu.

Dans ce type de situation, les rares occasions où le cadre culturel de l'hydrostatique est mobilisé correspondent à l'interprétation de la poussée d'Archimède comme résultante des forces de pression exercées par le liquide sur l'objet. Ce genre d'explication nécessite *a minima* d'évoquer le lien entre pression et profondeur, voire dans le cas d'une démonstration plus quantitative de mobiliser la loi fondamentale de l'hydrostatique.

2.2.1.2 Situation type B :

Le liquide au repos est le système étudié

Ce second type de situation n'implique qu'un liquide dans son contenant ; le liquide et ses propriétés y sont donc *a priori* le centre d'intérêt explicite. Ainsi, nous supposons qu'un·e enseignant·e confronté·e à une telle situation l'appréhendera de façon plus spontanée dans le cadre de l'hydrostatique, cadre s'intéressant en premier lieu aux propriétés du liquide lui même, et non à son interaction avec un système extérieur.

Cette hypothèse est confortée par le constat que l'approche scolaire contemporaine se décline majoritairement en deux activités principales qui relèvent toutes deux du cadre culturel de l'hydrostatique :

- s'assurer de l'adéquation entre une situation d'équilibre et la loi fondamentale de l'hydrostatique ;
- exploiter la loi fondamentale de l'hydrostatique pour décrire de façon quantitative une situation d'équilibre (calcul de pressions et de hauteurs).

Nous supposons donc que la mobilisation du cadre culturel de la mécanique est nettement plus rare dans ce genre de situation, et qu'elle est réservée à l'interprétation de la loi fondamentale de l'hydrostatique comme l'expression d'un équilibre mécanique. Ce genre d'explication nécessite *a minima* d'évoquer le lien entre le poids d'une colonne de liquide et la force pressante à une profondeur donnée, voire dans le cas d'une démonstration plus quantitative de mobiliser le principe d'inertie.

Ces hypothèses peuvent être résumées de la façon suivante :

Hyp.1 les situations impliquant un liquide au repos peuvent être conceptualisées au niveau macroscopique selon deux cadres de rationalité distincts : le cadre culturel de la mécanique et le cadre culturel de l'hydrostatique ;

Hyp.2 les situations impliquant un objet en immersion dans un liquide au repos sont plus spontanément appréhendées par les enseignant·e-s dans le cadre culturel de la mécanique, que ce soit pour expliquer ou décrire ces situations ;

Hyp.3 les situations dans lesquelles le liquide au repos est explicitement le système étudié sont plus spontanément appréhendées dans le cadre culturel de l'hydrostatique, que ce soit pour expliquer ou décrire ces situations ;

2.2.2 Compréhension des situations impliquant un liquide au repos

La notion de « compréhension » étant vaste et complexe, l'objectif de ces quelques lignes n'est pas de discuter de tout ce que peut recouvrir le terme « comprendre », mais plutôt de préciser les spécificités de la compréhension qui ont été déterminantes dans les choix méthodologiques de notre étude.

Le dictionnaire donne pour le terme « comprendre » les deux définitions brèves suivantes : « **1.** concevoir ; saisir le sens de. *Comprendre la pensée de quelqu'un.* **2.** Admettre avec plus ou moins d'indulgence les raisons de quelque chose. » (les autres définitions n'ont rien à voir avec notre propos). Le verbe « concevoir » est, lui, défini par « se représenter par la pensée ».

La question de la compréhension est ainsi corrélée à celle du « sens à saisir », qui semble par nature dépendre très fortement des circonstances (contexte, personnes, etc.). A propos du caractère personnel et relatif de la compréhension, White et Gunstone concluent :

En somme, la compréhension d'un concept ou d'une discipline est une fonction continue du savoir d'une personne, n'est pas une dichotomie, et n'est pas non plus

linéaire. Dire si une personne comprend est un jugement subjectif qui varie avec le statut de la personne qui est jugée. La pertinence des connaissances en jeu pour comprendre varie, mais cette pertinence est aussi un jugement subjectif. (White et Gunstone, 2014, p.7)

Pour Piaget (1974), "Réussir, c'est comprendre en action une situation donnée à un degré suffisant pour atteindre les buts proposés ; comprendre, c'est réussir à dominer en pensée les mêmes situations, jusqu'à pouvoir résoudre les problèmes qu'elles posent quant au pourquoi et au comment des liaisons constatées et par ailleurs utilisées dans les actions » (p. 237). Duval ayant pour référence notamment cette figure de la psychologie, et s'interrogeant sur le problème de l'apprentissage au niveau du fonctionnement cognitif du sujet en termes de « conditions de compréhension », a conclu que « la compréhension (intégrative) d'un contenu conceptuel repose sur la coordination d'au moins deux registres de représentation, et cette coordination se manifeste par la rapidité et la spontanéité de l'activité de conversion. » (Duval, 1993)

Dans cette recherche nous souhaitons éprouver l'hypothèse analogue qui consiste à affirmer que la compréhension d'une situation est corrélée à la mobilisation coordonnée d'au moins deux cadres de rationalité différents, si tant est que les objets matériels dont il est question dans la situation puissent effectivement être projetés dans deux cadres de rationalité distincts.

L'hypothèse principale qui sous-tend cette étude est ainsi la suivante :

Hyp.4 la capacité à appréhender de façon coordonnée une même situation impliquant un liquide au repos dans les deux cadres de rationalité (hydrostatique et mécanique) est un facteur de meilleure compréhension.

3 Méthodologie

Pour mettre à l'épreuve nos hypothèses (sous-section 2.2), nous avons réalisé un questionnaire, mis en forme et diffusé *via* la plateforme Limesurvey. Ce questionnaire est à destination d'enseignant·e·s de physique-chimie du secondaire, et se présente quasi intégralement sous la forme de questions à choix multiple (QCM). Les participant·e·s y sont interrogé·e·s à propos de deux situations impliquant toutes deux un liquide au repos, mais relevant chacune d'un des deux types présentés dans le paragraphe 2.2.1 (type A ou type B).

Nous présentons dans cette partie les deux situations traitées ainsi que les douze questions posées.

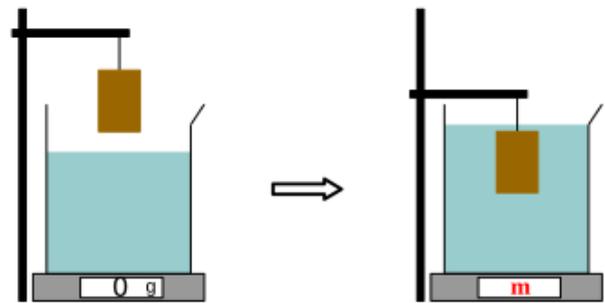
3.1 Situations soumises aux participant·e·s

Nous avons choisi deux situations différentes qui peuvent paraître contre-intuitives au premier abord : dans la première le liquide au repos n'est pas explicitement le centre d'attention, et le système comporte un objet suspendu plongé dans le liquide ; dans la seconde le liquide au repos est explicitement le système étudié.

3.1.1 Situation A (objet suspendu)

3.1.1.1 Énoncé de la situation

Un bécher contenant un liquide est placé sur une balance, et la tare est effectuée. Un objet suspendu à un fil est ensuite entièrement immergé dans le liquide. La force exercée sur la balance augmente alors et la balance affiche une masse équivalente à l'augmentation de la force, strictement positive, que l'on notera **m**.



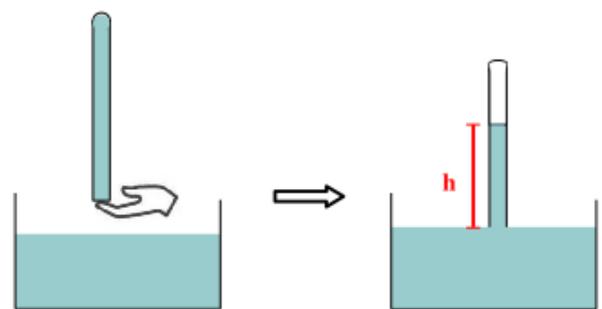
3.1.1.2 Explication de l'équilibre observé

Nous présumons que cette situation dans laquelle le liquide au repos n'est pas explicitement l'objet d'étude, sera appréhendée par les enseignant·e·s dans le cadre culturel de la mécanique. En effet, nous supposons que la présence du solide en immersion agira comme un distracteur pour le raisonnement hydrostatique, bien que l'apparition d'une masse non nulle sur l'affichage de la balance puisse s'expliquer aussi bien dans un cadre que dans l'autre : c'est ce que montre le tableau 4.2. Pour les précisions quantitatives, on note V le volume de l'objet, ρ_l la masse volumique du liquide, et \mathbf{g} le champ de pesanteur (de norme g).

3.1.2 Situation B (tube retourné)

3.1.2.1 Énoncé de la situation

On remplit un tube d'un liquide, on obture son extrémité, puis on le retourne dans une cuve remplie du même liquide. Une fois le tube en place, son ouverture plongée dans le liquide de la cuve, on retire ce qui l'obture et on constate que la hauteur de liquide diminue dans le tube pour se stabiliser à une hauteur que l'on notera **h**.



3.1.2.2 Explication de l'équilibre observé

Nous présumons cette fois - ci que cette situation dans laquelle le liquide au repos est explicitement l'objet d'étude, sera appréhendée par les enseignant·e·s dans le cadre culturel de l'hydrostatique. Il est toutefois possible d'expliquer cette situation en tant qu'équilibre mécanique sans recourir au concept de pression ni à la loi fondamentale de l'hydrostatique : c'est ce que montre le tableau 4.3. Pour les précisions quantitatives, on note S l'aire de la section du tube, ρ_l la masse volumique du liquide, $\rho_0(z)$ la masse volumique de l'air atmosphérique à l'altitude z , p_0 la pression atmosphérique à l'altitude z_0 où l'expérience est réalisée et \mathbf{g} le champ de pesanteur (de norme g).

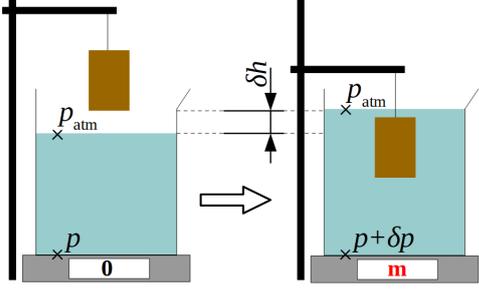
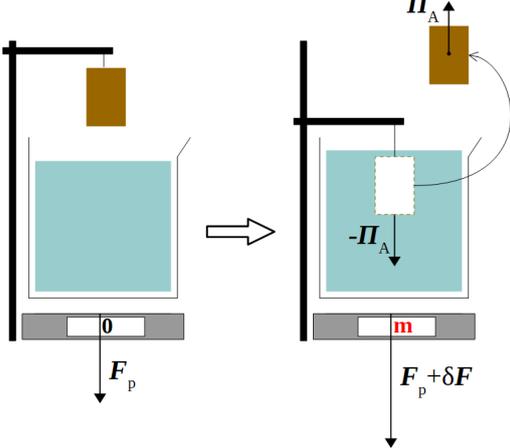
| Cadre culturel de l'hydrostatique | Cadre culturel de la mécanique |
|--|--|
|  |  |
| <p>EAH1 L'immersion de l'objet provoque une augmentation du niveau de liquide d'une hauteur δh.</p> | <p>EAM1 Lorsque l'objet est immergé, le liquide exerce sur lui une force verticale vers le haut : la poussée d'Archimède. Cette force a pour expression : $\Pi_A = -\rho_l \times V \times g$</p> |
| <p>EAH2 D'après la loi fondamentale de l'hydrostatique, la pression du liquide au fond du bécber a donc augmenté d'une valeur $\delta p = \rho_l \times g \times \delta h$.</p> | <p>EAM2 D'après le principe des actions réciproques, l'objet exerce une force verticale sur le liquide de même norme mais de sens opposé à la poussée d'Archimède.</p> |
| <p>EAH3 Ainsi la force pressante exercée par le liquide sur la surface S du fond du bécber augmente avec l'immersion de l'objet d'une valeur $\delta F = \delta p \times S$.</p> | <p>EAM3 Cette force se répercute sur le fond du bécber sur lequel s'exerce ainsi un surplus de force pressante tel que $\delta F = -\Pi_A$</p> |
| <p>EAH4 Ce surplus de force pressante se répercute sur le plateau de la balance, ce qui se traduit par l'affichage d'une masse m égale à :</p> $\mathbf{m} = \frac{\delta F}{g} = \rho_l \times \delta h \times S$ <p>où $\delta h \times S$ correspond au volume de liquide déplacé, c'est-à-dire au volume V de l'objet. Ainsi :</p> $\mathbf{m} = \rho_l \times V$ | <p>EAM4 Ce surplus de force pressante se répercute sur le plateau de la balance, ce qui se traduit par l'affichage d'une masse m égale à :</p> $\mathbf{m} = \frac{\delta F}{g} = \frac{\Pi_A}{g}$ <p>soit :</p> $\mathbf{m} = \rho_l \times V$ |

TABLE 4.2 – Explications de la situation A dans les cadres hydrostatique et mécanique

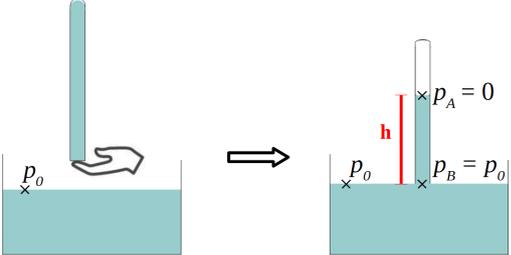
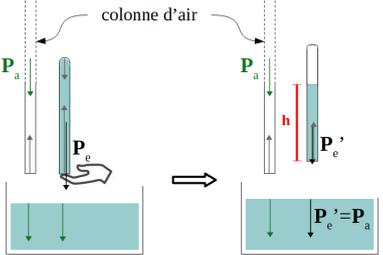
| Cadre culturel de l'hydrostatique | Cadre culturel de la mécanique |
|---|--|
|  |  |
| <p>EBH1 L'espace en haut du tube est vide donc la pression du liquide en haut du tube est nulle : $p_A = 0$</p> | <p>EBM1 L'espace en haut du tube étant vide, aucune force ne s'exerce sur l'interface supérieure de la colonne de liquide dans le tube.</p> |
| <p>EBH2 D'après la loi fondamentale de l'hydrostatique la pression du liquide en tout point de la ligne horizontale marquant l'interface entre le liquide de la cuve et l'air est la même. La pression du liquide en chacun de ces points est égale à la pression atmosphérique, en particulier $p_B = p_0$</p> | <p>EBM2 Chaque colonne (d'air ou de liquide) s'élevant au dessus du liquide de la cuve n'est soumise dans la direction verticale qu'à deux forces : son poids (P_a ou P_e) et une force de réaction exercée par le liquide de la cuve. D'après le principe d'inertie ces deux forces se compensent.</p> |
| <p>EBH3 D'après la loi fondamentale de l'hydrostatique, la différence de pression du liquide entre le haut (B) et le bas (A) de la colonne contenue dans le tube correspond à une différence de profondeur telle que :</p> | <p>EBM3 D'après le principe des actions réciproques chaque colonne s'élevant au dessus du liquide de la cuve exerce sur ce dernier une force vers le bas égale en norme à son poids P_a ou P_e.</p> |
| $p_B - p_A = \rho_l \cdot g \cdot (z_B - z_A)$ $p_0 = \rho_l \cdot g \cdot \mathbf{h}$ $\mathbf{h} = \frac{p_0}{\rho_l \cdot g}$ | <p>EBM4 Le liquide de la cuve est à l'équilibre quand chaque portion d'air S de son interface supérieure est également pressée, c'est-à-dire quand le poids de la colonne de liquide dans le tube est égal au poids d'une colonne d'atmosphère de section d'aire S. Soit :</p> $\rho_l \cdot \mathbf{h} \cdot S \cdot \mathbf{g} = \int_{z_0}^{\infty} \rho_0(z) dz \cdot S \cdot \mathbf{g}$ $\mathbf{h} = \frac{\int_{z_0}^{\infty} \rho_0(z) dz}{\rho_l}$ |

TABLE 4.3 – Explications de la situation B dans les cadres hydrostatique et mécanique

3.2 Questions posées à propos des deux situations

Après avoir posé des questions préliminaires (QP) d'ordre très général à propos du profil des répondant·e·s (statut actuel et nombre d'années d'ancienneté dans l'enseignement le cas échéant), nous avons posé des questions de physique à propos des deux situations présentées précédemment.

Bien que les deux situations soient différentes, les types de questions de physique posées sont globalement similaires et ont les mêmes visées générales. Supposant que la situation B avait une plus grande probabilité que la situation A d'être appréhendée par les enseignant·e·s dans le cadre de rationalité de l'hydrostatique (voir paragraphe 2.2), nous avons choisi de poser toutes les questions relatives à cette situation en fin de questionnaire afin de ne pas influencer les enseignant·e·s en leur donnant l'idée de se placer dans le cadre culturel de l'hydrostatique à nouveau pour appréhender la situation A.

Pour chaque situation, les enseignant·e·s sont amené·e·s à *expliquer* et à *prévoir*.

3.2.1 Expliquer la situation décrite et schématisée

Après l'énoncé de chaque situation, la première question posée dans les deux cas est ouverte : une demande d'*explication* de l'observation décrite :

| Situation A | Situation B |
|--|---|
| <p>AQ0. Proposez une explication au fait qu'une masse m non nulle apparaisse sur l'affichage de la balance suite à l'immersion de l'objet.</p> | <p>BQ0. Proposez une explication au fait que le liquide du tube reste suspendu à une hauteur h.</p> |

Outre obtenir une première appréciation de la compréhension que les enseignant·e·s ont de chaque situation, l'objectif est de voir quel(s) cadre(s) de rationalité et quel(s) registre(s) sémiotiques les enseignant·e·s privilégient en premier lieu et spontanément face à la situation qui leur est soumise, lorsqu'ils et elles doivent *l'expliquer*. Les réponses à ces questions seront mises en regard avec les questions suivantes posées pour chacune des situations.

3.2.2 Prévoir l'évolution du paramètre **m** ou **h**

L'objectif de la suite des questions est de mettre plus finement à l'épreuve la compréhension que les enseignant·e·s ont de chacune de ces deux situations.

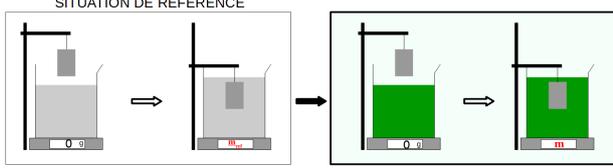
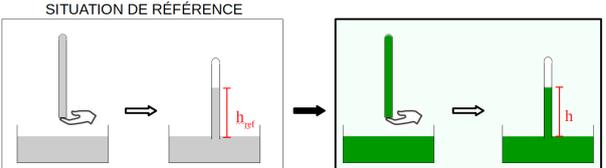
La compréhension étant un processus mental, elle ne peut *a priori* qu'être présumée acquise par un individu en attendant confrontation à des situations mettant en évidence le contraire. Or, cette « preuve du contraire » peut ne jamais arriver au cours du développement d'un individu sans toutefois que nous soyons assuré·e·s que sa compréhension est infaillible, simplement parce que les occasions de se manifester ne se sont pas présentées. L'enjeu de notre étude est donc de mettre en œuvre une méthodologie permettant de révéler des failles dans la compréhension

que les enseignant·e·s ont des situations impliquant un liquide au repos, et ce en confrontant les enseignant·e·s à des situations et des activités inhabituelles.

Dans cette perspective la *prévision* se présente comme l'activité idéale, tant relativement aux deux autres (description et explication) que pour elle-même, pour révéler des défauts de compréhension. En effet, l'activité de *prévoir* étant beaucoup moins répandue que d'*expliquer* ou de *décrire* dans le contexte scolaire, elle nous prémunit des réponses « réflexe » ne révélant finalement pas grand chose sur la compréhension. Par ailleurs, en raison de leur caractère binaire (correcte ou non), les prévisions réalisées par les enseignant·e·s sont un indicateur assez fiable de la qualité d'une théorie ou d'un modèle de compréhension : si un individu prévoit avec succès, ça ne dit pas nécessairement qu'il a bien compris ; en revanche s'il se trompe, cela met au jour sans équivoque un défaut de compréhension.

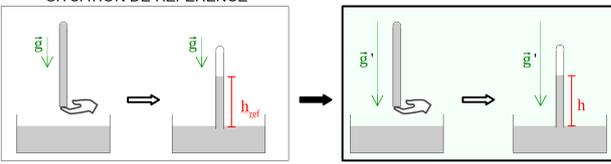
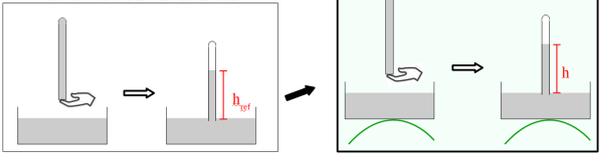
En demandant aux enseignant·e·s de faire des prévisions précises à propos de l'évolution du paramètre étudié dans chaque situation (**m** pour la situation A ou **h** pour la situation B), nous nous offrons la possibilité de dévoiler les signes de mauvaise compréhension par les enseignant·e·s des situations impliquant un liquide au repos. Voici les différentes circonstances au cours desquelles les enseignant·e·s doivent prévoir l'évolution du paramètre **m** ou **h**.

3.2.2.1 Variation de la densité du liquide

| Situation A | Situation B |
|---|---|
|  <p>SITUATION DE RÉFÉRENCE</p> |  <p>SITUATION DE RÉFÉRENCE</p> |
| <p>AQ4. Si on reproduit l'expérience avec un liquide plus dense (la tare est effectuée au préalable avec ce nouveau liquide), la masse équivalente m affichée sur la balance sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> | <p>BQ4. Si on reproduit l'expérience en utilisant un liquide plus dense, la hauteur h à laquelle se stabilise le liquide sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> |

Avec cette question il est demandé explicitement de s'intéresser au liquide, même dans la situation A où, à ce stade, il n'a pas forcément encore été reconnu par les enseignant·e·s comme déterminant dans l'apparition d'une masse **m** non nulle sur l'écran de la balance.

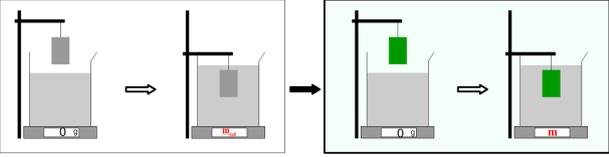
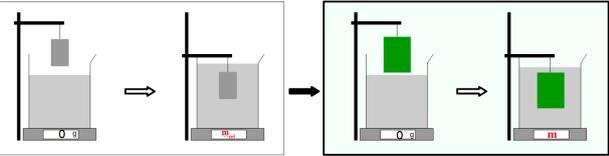
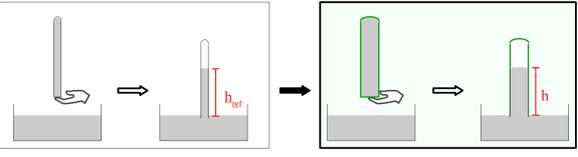
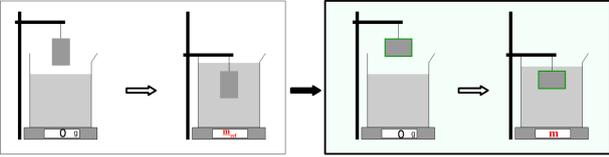
3.2.2.2 Variation d'un élément extérieur au dispositif

| Situation A | Situation B |
|-----------------------------|---|
| <p>- Pas d'équivalent -</p> |  <p>BQ1. Si on reproduit l'expérience dans un champ de pesanteur plus grand, la hauteur h à laquelle se stabilise le liquide sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> |
| <p>- Pas d'équivalent -</p> |  <p>BQ5. Si on reproduit l'expérience en altitude (mais pas au point que le champ de pesanteur n'en soit significativement affecté) la hauteur h à laquelle se stabilise le liquide sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> |

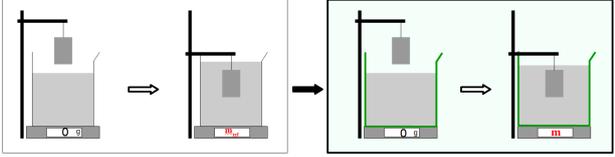
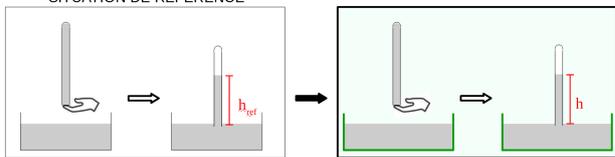
La question **BQ1** risque de conduire à des prédictions erronées si les enseignant·e·s s'en tiennent à l'application stricte de la loi fondamentale de l'hydrostatique (dans laquelle la dépendance de la pression atmosphérique au champ de pesanteur n'est pas explicite). On vise ainsi précisément à révéler une des limites de l'appréhension de la situation dans le cadre stricte de l'hydrostatique.

La question **BQ5**, volontairement placée loin de la question à propos du champ de pesanteur dans le déroulé du questionnaire, est inspirée de l'étude de de Hosson et Caillarec (2009) dans laquelle les étudiant·e·s sondé·e·s doivent *expliquer* la baisse de la hauteur de suspension du mercure dans le dispositif de Torricelli. Cette étude a révélé une petite portion de réponses erronées, laissant supposer que la pression atmosphérique est mal comprises pour certain·e·s. En demandant aux enseignant·e·s de *prévoir* le sens d'évolution de la hauteur **h** puis de justifier leur prévision, nous espérons obtenir des précisions quant aux raisonnements mis en œuvre dans cette situation.

3.2.2.3 Modification de l'élément du dispositif sur lequel l'attention est attiré

| Situation A | Situation B |
|--|---|
| <p data-bbox="225 546 416 562">SITUATION DE RÉFÉRENCE</p>  <p data-bbox="172 741 783 965">AQ1. Si on reproduit l'expérience avec un objet plus dense (mais de même volume), la masse équivalente m affichée sur la balance sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> | <p data-bbox="986 741 1251 775">- Pas d'équivalent -</p> |
| <p data-bbox="225 1012 416 1028">SITUATION DE RÉFÉRENCE</p>  <p data-bbox="172 1207 783 1476">AQ2. Si on reproduit l'expérience en utilisant un objet plus volumineux (mais de même masse), la masse équivalente m affichée sur la balance sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> | <p data-bbox="863 1023 1054 1039">SITUATION DE RÉFÉRENCE</p>  <p data-bbox="815 1218 1426 1442">BQ2. Si on reproduit l'expérience en utilisant un tube plus large, la hauteur h à laquelle se stabilise le liquide sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> |
| <p data-bbox="225 1512 416 1527">SITUATION DE RÉFÉRENCE</p>  <p data-bbox="172 1706 783 1930">AQ5. Si on reproduit l'expérience avec le même objet mais accroché dans l'autre sens, la masse équivalente m affichée sur la balance sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> | <p data-bbox="986 1706 1251 1740">- Pas d'équivalent -</p> |

3.2.2.4 Variation de la largeur du dispositif

| Situation A | Situation B |
|--|---|
| <div style="text-align: center; margin-bottom: 10px;">SITUATION DE RÉFÉRENCE</div>  <p>AQ3. Si on reproduit l'expérience avec un bécher plus large (la tare est effectuée au préalable avec ce nouveau bécher), la masse équivalente m affichée sur la balance sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> | <div style="text-align: center; margin-bottom: 10px;">SITUATION DE RÉFÉRENCE</div>  <p>BQ3. Si on reproduit l'expérience en utilisant une cuve plus large, la hauteur h à laquelle se stabilise le liquide sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence.</p> |

3.3 Justifications proposées

Afin d'établir d'éventuelles corrélations entre la compréhension que les enseignant·e·s ont des deux situations et le cadre de rationalité dans lequel ils et elles se placent pour les appréhender, nous avons demandé aux enseignant·e·s de justifier chacune de leurs prévisions.

3.3.1 Points généraux de vigilance

Ayant testé un questionnaire similaire sur un petit échantillon d'étudiant·e·s de master MEEF en 2018-2019, nous avons pu constater que laisser un champ libre pour la justification conduit à beaucoup de réponses non exploitables car imprécises. Par exemple, comment catégoriser une justification du type « parce que P augmente quand g augmente » quand rien n'indique si P fait référence au poids de quelque chose ou à la pression quelque part ? Nous avons donc choisi de faire un double QCM à la manière de Coppens et Munier (2005) en imposant aux sondés de choisir leur(s) justification(s) parmi un set de propositions formulées par nos soins. En espérant biaiser le moins possible les raisonnements spontanés des enseignant·e·s, nous avons apporté une vigilance toute particulière aux points suivants :

- proposer pour chaque situation des justifications s'inscrivant dans chacun des deux cadres de rationalité hydrostatique et mécanique ;
- proposer, quand cela est possible, une justification issue d'un cadre de rationalité et son pendant de l'autre cadre ;
- proposer des justifications erronées quand celles-ci nous semblaient correspondre à ce que les enseignant·e·s pourraient rechercher. Ces propositions ont été élaborées à la lumière des difficultés recensées dans la littérature (chapitre 2), dans l'objectif non pas d'induire volontairement les enseignant·e·s en erreur en leur proposant des distracteurs séduisants,

mais de ne pas les forcer à réfléchir autrement faute de proposition faisant écho à leur pensée spontanée ;

- faire apparaître les différentes propositions dans un ordre aléatoire pour lisser les effets de lassitude que nous pourrions soupçonner en plaçant toujours les mêmes types de propositions à la fin ;
- proposer toujours le même set de justifications pour les mêmes réponses d'une même situation (**h** ou **m** sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence), en excluant toutefois les propositions absurdes dans chaque cas particulier, afin de se laisser la possibilité d'étudier la variabilité des choix que les enseignant·e·s effectuent parmi ces propositions au fil des questions ;
- proposer systématiquement l'alternative ouverte « autre » pour ne pas contraindre les enseignant·e·s à sélectionner par défaut une proposition qui ne correspondrait pas à leur pensée.

Pour chaque situation et chaque question, le questionnaire en ligne est réalisé avec un conditionnement de telle sorte à ce que le set de propositions justificatives qui s'affiche corresponde à la réponse (**h** ou **m** sera plus grande / plus petite / égale à celle de la situation de référence) choisie par l'enseignant·e.

3.3.2 Sets de propositions pour chaque situation

Toutes les justifications proposées pour chaque réponse possible aux prévisions à propos de chacune des situations sont rassemblées dans les tableaux 4.4 et 4.5. Les codes utilisés pour référencer les justifications sont notés en rouge quand ils correspondent à des raisonnements nécessairement invalides.

3.3.3 Analyse des justifications proposées

Certaines des justifications proposées dans un cadre de rationalité ont un équivalent dans l'autre cadre. Ces correspondances sont explicitées dans les tableaux 4.6 et 4.8.

Par ailleurs, bien que n'étant pas nécessairement invalide par nature, une même justification n'aura pas la même valeur d'une question à l'autre :

- soit elle peut se trouver inappropriée, car sans rapport voire en contradiction avec la situation traitée ou la réponse choisie par l'enseignant·e, auquel cas nous avons décidé de la retirer du set de justifications proposé pour la (ou les) question(s) concernée(s) ;
- soit elle peut se trouver invalide car correspondant à un raisonnement erroné, auquel cas nous l'avons laissée dans le set de justifications proposé pour la (ou les) question(s) concernée(s) puisqu'elle peut correspondre au raisonnement de certain·e·s enseignant·e·s.

| | m sera plus grande... | m sera plus petite... | m sera égale... | Code |
|---------------|--|---|--|-------|
| Mécanique | car le poids de l'objet augmente. | | car le poids de l'objet ne varie pas. | JAM1a |
| | | car la poussée d'Archimède augmente. | | JAM1b |
| | car la poussée d'Archimède augmente. | | car la poussée d'Archimède ne varie pas. | JAM2 |
| | | | car les variations de toutes les forces se compensent. | JAM3 |
| Hydrostatique | car la pression finale au fond du béccher augmente plus que dans la situation de référence. | car la pression finale au fond du béccher augmente moins que dans la situation de référence. | car la pression finale au fond du béccher augmente autant que dans la situation de référence. | JAH1 |
| | car l'élévation du liquide suite à l'immersion de l'objet est plus grande que dans la situation de référence. [ou <i>identique à celle de la situation de référence mais ce liquide surélevé pèse plus lourd pour AQ4</i>]. | car l'élévation du liquide suite à l'immersion de l'objet est plus petite que dans la situation de référence. | car l'élévation du liquide suite à l'immersion de l'objet est identique à celle de la situation de référence. | JAH2 |
| | | | car la pression finale au fond du béccher augmente moins que dans la situation de référence, mais elle s'exerce sur une plus grande surface. | JAH3 |
| | d'après la loi de l'hydrostatique. | | | JAH4 |

TABLE 4.4 – Justifications proposées pour la situation A (objet suspendu)

| | h sera plus grande... | h sera plus petite... | h sera égale... | Code |
|---------------|--|---|--|-------|
| Mécanique | car la force pressante surfacique exercée par l'air sur le liquide de la cuve, et donc indirectement sur la colonne de liquide augmente. | car la force pressante surfacique exercée par l'air sur le liquide de la cuve, et donc indirectement sur la colonne de liquide diminue. | car la force pressante surfacique exercée par l'air sur le liquide de la cuve, et donc indirectement sur la colonne de liquide est inchangée. | JB M1 |
| | car le poids de la colonne de liquide diminue. | car le poids de la colonne de liquide augmente. | car le poids de la colonne de liquide est inchangé. | JB M2 |
| | | | car les variations de toutes les forces se compensent. | JB M3 |
| Hydrostatique | car la différence de pression entre le haut du tube et l'interface air / liquide de la cuve augmente. | car la différence de pression entre le haut du tube et l'interface air / liquide de la cuve diminue. | car la différence de pression entre le haut du tube et l'interface air / liquide de la cuve est inchangée. | JB H1 |
| | car la hauteur de liquide correspondant à une différence de pression donnée augmente. | car la hauteur de liquide correspondant à une différence de pression donnée diminue. | car la hauteur de liquide correspondant à une différence de pression donnée est inchangée. | JB H2 |
| | | | car les différences de pression sont modifiées en proportion inverse de la hauteur de liquide correspondant à une différence de pression donnée. | JB H3 |
| | d'après la loi de l'hydrostatique. | | | JB H4 |

TABLE 4.5 – Justifications proposées pour la situation B (tube retourné)

Les tableaux 4.7 et 4.9 résument, pour les deux situations A et B, les justifications proposées pour chacune des modalités de réponses (plus grande / plus petite / égale à) de chaque question. La prévision attendue pour chaque question apparaît dans une cellule verte dans le tableau. Par ailleurs, les justifications proposées peuvent être valides (« V »), uniquement dans le cas où la prévision est bonne, ou non valides (« F »), y compris si la prévision est bonne.

| | | |
|-------|--|------|
| JAM1a | Raisonnement non valide : L'objet, en raison de sa masse et donc de son poids, est considéré comme directement responsable de l'apparition d'une masse m non nulle sur l'écran de la balance. Le fluide ne joue pas de rôle particulier dans cette approche... | - |
| JAM1b | ... où éventuellement en cela qu'il agit pour compenser un petit peu le poids de l'objet et donc limiter l'augmentation de la masse m affichée sur la balance. | - |
| - | Pas d'équivalent dans le cadre culturel de la mécanique | JAH1 |
| JAM2 | C'est le poids du fluide déplacé par l'objet (définition de la norme de la poussée d'Archimède) qui est considéré comme responsable de l'apparition de la masse m non nulle sur l'écran de la balance. | JAH2 |
| - | Pas d'équivalent dans le cadre culturel de la mécanique pour cette proposition qui fait référence à la diminution de la pression proportionnellement à l'augmentation de la surface sur laquelle elle s'exerce. Cette proposition n'est valide que pour la question AQ3 . | JAH3 |
| JAM3 | Pas d'équivalent dans le cadre culturel de l'hydrostatique. | - |
| - | Pas d'équivalent dans le cadre culturel de la mécanique d'une formule « toute faite » que l'on pourrait appliquer dans n'importe quelle situation d'équilibre. | JAH4 |

TABLE 4.6 – Analyse des justifications proposées pour la situation A

| A | m sera plus grande... | | | | | m sera plus petite... | | | | | m sera égale... | | | | |
|-------|------------------------------|----|----|----|----|------------------------------|----|----|----|----|------------------------|----|----|----|----|
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 |
| JAM1a | F | | | | | | | | | | | F | F | F | F |
| JAM1b | | | | | | | F | F | F | F | | | | | |
| JAM2 | | V | F | V | F | | | | | | V | | V | | V |
| JAM3 | | | | | | | | | | | V | F | | | |
| JAH1 | F | V | F | V | F | F | F | F | F | F | V | F | F | F | V |
| JAH2 | | V | | V | | | | F | | F | V | | | F | V |
| JAH3 | | | | | | | | | | | | | V | | |
| JAH4 | | V | | V | | F | | F | | | V | F | V | | V |

TABLE 4.7 – Validité des justifications proposées à la situation A

| | | |
|------|--|------|
| JBM1 | Concentration sur les raisons qui limitent l'écoulement du liquide dans le tube. Soit les raisons sont cherchées dans les qualités du fluide de la cuve juste au pied de la colonne de liquide en équilibre, soit au niveau de l'interface air / liquide de la cuve. | JBH1 |
| JBM2 | Concentration sur les causes qui entraînent le liquide du tube vers le bas. | JBH2 |
| JBM3 | Prise en compte simultanée des causes qui entraînent le liquide du tube vers le bas, et de celles qui favorisent sa suspension. | JBH3 |
| - | Pas d'équivalent dans le cadre culturel de la mécanique d'une formule « toute faite » que l'on pourrait appliquer dans n'importe quelle situation d'équilibre. | JBH4 |

TABLE 4.8 – Analyse des justifications proposées pour la situation B

| B | h sera plus grande... | | | | | h sera plus petite... | | | | | h sera égale... | | | | |
|------|-----------------------|----|----|----|----|-----------------------|----|----|----|----|-----------------|----|----|----|----|
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 |
| JBM1 | F | F | F | F | F | | | F | | V | F | V | V | F | F |
| JBM2 | | | | | | F | F | | V | | | | V | | F |
| JBM3 | | | | | | | | | | | V | V | | F | |
| JBH1 | F | F | F | F | F | | | F | | V | F | V | V | F | F |
| JBH2 | | | | | F | F | F | | V | F | | V | V | | F |
| JBH3 | | | | | | | | | | | V | | | | |
| JBH4 | F | | | F | F | F | | | V | V | V | V | V | | F |

TABLE 4.9 – Validité des justifications proposées à la situation B

4 Résultats

Nous avons obtenu des données que nous avons d'abord triées à plat, puis triées de façon croisée pour éprouver les différentes hypothèses formulées dans la sous-section 2.2. Les différents résultats obtenus sont présentés dans cette section.

4.1 A propos des répondant·e·s

4.1.1 Profil des enseignant·e·s sollicité·e·s

Nous avons lancé un appel à contribution auprès des responsables des masters Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation (MEEF), parcours Physique Chimie, dans toute la France, et au cours de deux années universitaires successives (2020-2021 et 2021-2022) afin qu'ils et elles sollicitent leurs étudiant·e·s de deuxième année (M2 MEEF). Tous les résultats

présentés dans cette section concernent donc ce public particulier que nous avons ciblé pour différentes raisons :

- en tant qu'enseignant·e·s stagiaires, ils et elles occupent déjà les fonctions d'enseignant·e·s et correspondent à ce titre au public ciblé par notre projet doctoral ;
- on suppose que sortant tout juste du concours et *a priori* peu expérimenté·e·s dans les activités d'enseignement, ils et elles appréhendent les situations et phénomènes physiques dans des cadres plus culturels que didactiques ;
- le travail doctoral dans lequel s'inscrit cette recherche consiste, entre autres, en l'organisation d'une formation à destination de ce public qu'il était donc intéressant de sonder en amont ;
- le choix de ce public exclusif assure l'homogénéité du panel de répondant·e·s, et permet ainsi d'obtenir des données que l'on peut traiter statistiquement toutes ensembles.

4.1.2 Effectifs répondants

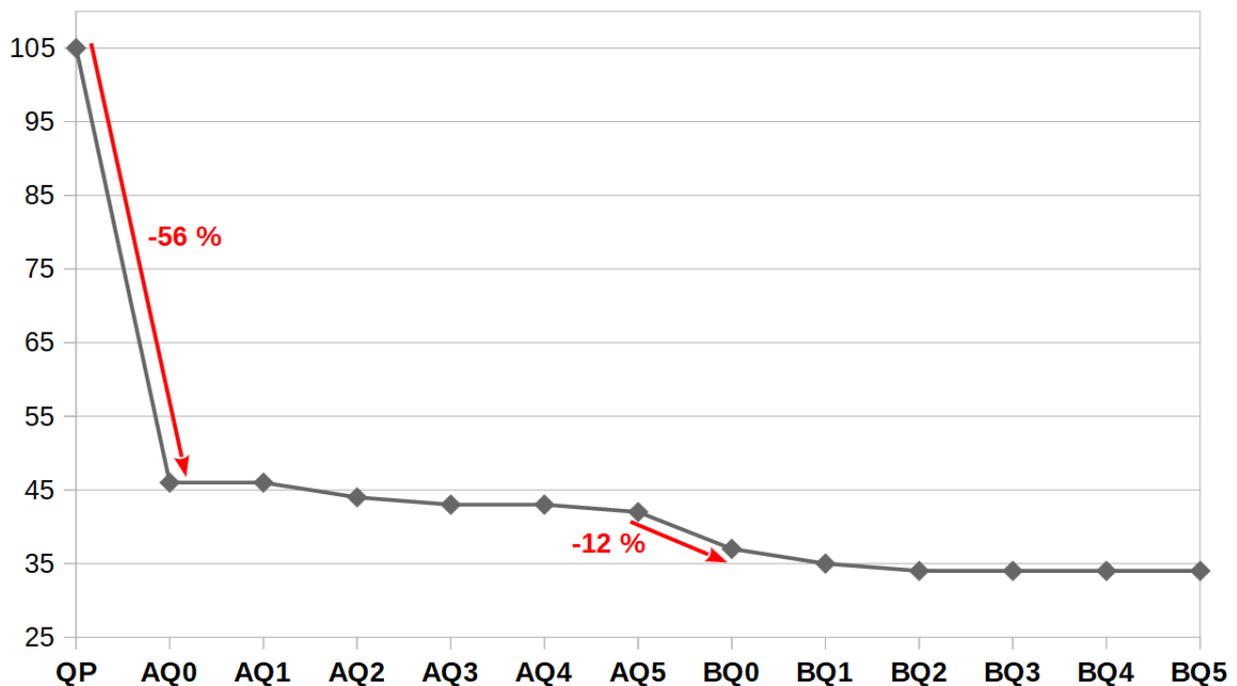


FIGURE 4.1 – Effectif répondant pour chacune des questions

L'appel à contribution a conduit 105 enseignant·e·s stagiaires de M2 MEEF à répondre aux questions préliminaires (QP) qui précèdent les questions de physique. La figure 4.1 montre un premier résultat frappant : la déperdition de 56 % de l'effectif à la première question de physique (AQ0) où il est demandé d'expliquer la situation A. A l'abord de la deuxième question d'explication (BQ0) du questionnaire, on constate que de nouveau plus de 10 % des répondant·e·s abandonnent. On observe enfin un léger essoufflement au fil des questions de

prévision. Au final seuls 34 enseignant·e·s répondent aux dernières questions de prévision (BQ2 à BQ5), ce qui constitue un effectif très réduit et donc des données dont la représentativité statistique est limitée.

4.2 Résultats bruts

4.2.1 Réponses aux questions d'explication

4.2.1.1 Constats généraux

Dans les deux situations les explications formulées par les enseignant·e·s présentent des caractéristiques récurrentes communes.

Tout d'abord, elles sont très massivement incomplètes au regard des différents éléments explicatifs que nous avons identifiés dans les tableaux 4.2 et 4.3. Nous détaillons ce point dans les deux paragraphes suivants. Ce caractère incomplet est parfois poussé à l'extrême, au point qu'on ne puisse pas considérer qu'il s'agisse réellement d'explications :

- simple référence à un cadre : « c'est l'hydrostatique » (que nous retrouvons pour les deux situations) ;
- simple référence à une grandeur physique : « c'est la poussée d'Archimède » (situation A) ou « c'est la pression » (situation B) ;
- réponses tautologiques : « l'équilibre est atteint » (situation B uniquement).

Ensuite, beaucoup d'imprécisions jalonnent les explications formulées : évocation de la pression sans préciser à quel niveau du liquide, usage inadapté des termes « force » et « pression » d'une part, et « poids » et « masse » d'autre part, absence de connecteurs logiques explicitant les liens de causalité qui structurent le raisonnement. Dans ces cas là il est difficile de qualifier objectivement l'explication de valide ou d'invalides ; nous la considérons au mieux comme insatisfaisante. Par ailleurs, on compte un nombre non négligeable d'explications clairement erronées (totalement ou partiellement). Dans les deux paragraphes suivants nous développons pour chaque situation les éléments de raisonnements invalides identifiés.

Enfin le registre employé est très majoritairement le langage naturel : seul·e·s deux étudiant·e·s utilisent le registre mathématique pour répondre aux deux questions d'explication. Ceci n'est sans doute pas indépendant du logiciel dont les limites ont été exprimées par un·e des étudiant·e·s écrivant quelques expressions mathématiques : « je ne peux pas mettre les vecteurs sur les forces avec ce traitement de texte ».

4.2.1.2 Explications de la situation A

Parmi les 46 explications recueillies, 7 ne sont pas satisfaisantes car beaucoup trop superficielles : l'apparition de la masse m y est ainsi liée de façon évasive à la poussée d'Archimède, à la masse d'eau déplacée ou plus rarement à la loi fondamentale de l'hydrostatique.

D'autres réponses plus nombreuses encore (19) sont partiellement ou totalement invalides dans la mesure où elles comportent des éléments erronés. Le plus répandu de ces éléments consiste à postuler une causalité directe entre l'immersion de l'objet et l'apparition de la masse **m** sur la balance, justifiée par l'ajout (12) ou le déplacement (2) de matière. Enfin, si c'est le cadre de rationalité de la mécanique qui a été employé par la moitié des enseignant·e·s pour répondre à la question, on remarque que la force invoquée pour justifier l'apparition d'une masse **m** sur la balance n'est pas toujours bien comprise : il peut s'agir du poids de l'objet immergé (5), ou encore d'une force censée « compenser » voire « résister à » la poussée d'Archimède (2). Si des forces sont nommées, les systèmes sur lesquels ils s'exercent ne sont toutefois pas toujours explicités ; la confusion de certaines réponses laisse penser que cette omission traduit un réel malaise dans la conceptualisation de la situation.

Les éléments de réponses valides sont issus soit uniquement du cadre de rationalité de la mécanique (22), soit uniquement de celui de l'hydrostatique (4), soit des deux (1). En moyenne les enseignant·e·s mobilisent entre un et deux éléments parmi ceux que nous avons identifiés ; seul·e un·e enseignant·e propose une réponse parfaitement complète (comportant quatre éléments de réponse convenablement articulés), et encore un·e autre structure sa réponse autour de trois éléments. Parmi les éléments d'explication que nous avons exposés pour chacun des deux cadres de rationalité (tableau 4.2), la figure 4.2 représente le nombre total d'apparitions. La prédominance du cadre de rationalité de la mécanique sur celui de l'hydrostatique est manifeste, ce qui corrobore l'hypothèse 2 formulée dans la section 2.2 selon laquelle les situations impliquant un objet en immersion dans un liquide au repos sont plus spontanément appréhendées par les enseignant·e·s dans le cadre culturel de la mécanique. Notons que le troisième élément de l'explication mécanique est moins mobilisé que les autres : l'interaction entre le liquide et l'objet est alors directement confondue avec l'interaction entre le béccher et le plateau de la balance. En revanche beaucoup d'enseignant·e·s ont pris soin d'explicitier comment l'existence d'une force se traduit par l'apparition d'un affichage sur l'écran sur la balance, ce qui n'était pas spécialement l'objet de notre recherche.

4.2.1.3 Explications de la situation B

Contrairement à la situation précédente, très peu de propositions véritablement erronées sont à signaler sur les 37 explications formulées. Ces dernières se révèlent légèrement plus complètes en moyenne que pour la situation A, car trois explications peuvent être considérées comme précises puisque reposant sur la totalité des éléments que nous avons identifiés dans le cadre hydrostatique (tableau 4.3) et trois autres reposent sur trois des quatre éléments identifiés dans le cadre mécanique. En revanche, toujours en moyenne les réponses souffrent d'un manque accru de précision par rapport à la situation de l'objet suspendu. En effet, si le cadre de rationalité de l'hydrostatique a été massivement employé pour répondre à la question, les endroits en lesquels les enseignant·e·s évoquent la pression ne sont pas toujours précisés : on parle de pression « dans le tube » (5) comme si elle y était uniforme, d' « équilibre des pres-

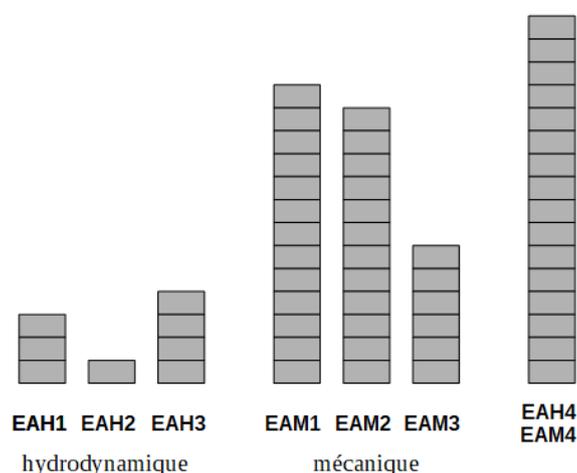


FIGURE 4.2 – Répartition des éléments explicatifs mobilisés pour la situation A

sions » sans dire entre quels endroits ou de « pression de l'air » sans expliciter la façon dont cette grandeur physique est liée à l'équilibre observé. Le paroxysme de ce manque de précision réside dans les réponses attribuant simplement à « l'hydrostatique » la cause de l'effet observé (4).

A propos des réponses franchement invalides, on recense des explications (2) qui reposent sur l'horreur du vide, bien que non formulées en ces termes : « le liquide se voit remplacer par du gaz : sans gaz le liquide ne peut pas se déverser complètement » ou « la hauteur ne devrait pas varier car le liquide laisserait place à du vide ». Enfin, de façon marginale, certaines explications sont tout simplement incompréhensibles, ou remettent directement en question la crédibilité du phénomène à expliquer (2) : « j'aurais dit que le liquide ne descendait pas du tout ».

Parmi les éléments d'explication que nous avons exposés pour chacun des deux cadres de rationalité (tableau 4.3), la figure 4.3 représente le nombre total d'apparitions. La prédominance du cadre de rationalité de l'hydrostatique sur celui de la mécanique est là encore manifeste, ce qui corrobore l'hypothèse 3 formulée dans la section 2.2 selon laquelle les situations dans lesquelles le liquide au repos est explicitement le système étudié sont plus spontanément appréhendées dans le cadre culturel de l'hydrostatique. Notons que la loi fondamentale de l'hydrostatique apparaissant dans l'élément EBH3 (tableau 4.3) est largement mobilisée par les enseignant·e·s tandis que ces dernier·e·s jugent rarement utile de justifier la valeur de la pression du liquide en bas du tube (élément EBH2 du tableau 4.3). Rappelons pourtant que l'égalité de la pression en tout point d'une horizontale dans un liquide n'est pas une évidence, comme il l'a été signalé dans l'état de l'art (chapitre 2).

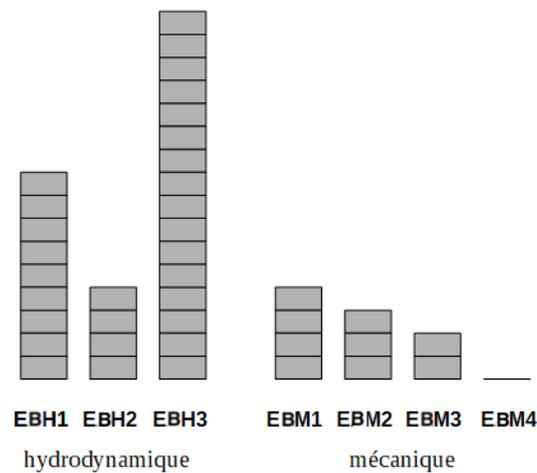


FIGURE 4.3 – Répartition des éléments explicatifs mobilisés pour la situation B

4.2.2 Réponses aux questions de *prévision*

4.2.2.1 Signification et significativité des résultats présentés

A propos de la qualité des prévisions : nous qualifions une prévision de « bien justifiée » dans le cas où toutes les justifications cochées par l'enseignant sont valides (cf. tableaux 4.7 et 4.9) : le choix d'au moins une justification invalide catégorise donc la prévision comme « mal justifiée ». Les pourcentages exprimés pour les prévisions sont relatifs au nombre total d'enseignant·e·s qui font une prévision pour la question posée, c'est-à-dire relatifs au nombre de répondant·e·s (N) auquel nous avons soustrait le nombre d'enseignant·e·s qui cochent « je ne sais pas » (nsp). Lorsque les pourcentages obtenus traduisent à une nette majorité (plus que 60%) ils apparaissent en vert, dans le cas où ils traduisent une nette minorité (moins de 40%) ils apparaissent en rouge, et quand ils correspondent sensiblement à la moitié du panel (entre 40 et 60%) ils apparaissent en orange.

Chaque « p-value » (p_v) exprimée correspond à la probabilité d'obtenir la même distribution de prévisions (« correcte »/ « incorrecte » d'une part, et « correcte et bien justifiée »/ « incorrecte ou mal justifiée » d'autre part) que celle observée si les cases avaient été cochées au hasard par les enseignant·e·s ; elle est obtenue avec un test binomial (les tests réalisés pour obtenir ces « p-value » sont détaillés en annexe C1).

A propos des justifications choisies : l'ensemble des enseignant·e·s qui justifient leur prévision en choisissant au moins une proposition relevant du cadre de la mécanique, et l'ensemble de celles et ceux qui choisissent au moins une justification relevant du cadre de l'hydrostatique ont presque toujours une intersection non vide puisque souvent au moins un·e enseignant·e sélectionne plusieurs justifications relevant des deux cadres. Ainsi la somme des effectifs du premier ensemble (méca.) et du deuxième (hydro.) dépasse le nombre de répondant·e·s à chaque question. Les pourcentages exprimés sont relatifs à l'ensemble des répondant·e·s qui font une prévision, c'est-à-dire relatifs à la totalité des répondant·e·s (N) sauf celles et ceux qui répondent « je ne sais

pas » (nsp). Les effectifs et pourcentages associés au cadre (mécanique ou hydrostatique) choisi par le plus d'enseignant·e·s apparaissent en gras dans le tableau.

Chaque « p-value » (p_v) exprimée correspond à la probabilité d'obtenir les mêmes pourcentages (justifications mécaniques et justifications hydrostatiques) que ceux observés si les enseignant·e·s ne privilégiaient pas un cadre plutôt que l'autre ; elle est obtenue avec un test de Mac Nemar (les tests réalisés pour obtenir ces « p-value » sont détaillés en annexe C2).

4.2.2.2 *Prévisions à propos de la situation A*

Comme le montre le tableau 4.10, les prévisions faites par les enseignant·e·s sont majoritairement réussies, hormis pour la question **AQ4** où l'augmentation de la densité du liquide n'est pas perçue par les deux tiers des enseignant·e·s comme un facteur d'augmentation de la masse **m** affichée sur la balance. En revanche, les prévisions sont loin d'être toujours bien justifiées ; beaucoup de réponses intègrent notamment le poids de l'objet (JAM1a) pour expliquer la variation (ou non) de la masse **m** affichée sur la balance (voir annexe C). Ceci nous conduit à relativiser l'apparente bonne compréhension que les enseignant·e·s ont de cette situation. Par ailleurs, on soupçonne une assimilation abusive de la pression au fond du bécher à la force pressante exercée sur le plateau de la balance, ce qui conduit certains enseignant·e·s à sélectionner à tort la justification JAH1 au lieu de la justification JAH3 pour la question **AQ3**. Sur l'ensemble des questions les enseignant·e·s sélectionnant au moins une justification dans le cadre culturel de la mécanique sont significativement plus nombreux et nombreuses que celles et ceux choisissant au moins une justification dans le cadre culturel de l'hydrostatique, comme nous l'avions supposé (voir sous-section 2.2).

4.2.2.3 *Prévisions à propos de la situation B*

Le tableau 4.11 montre que les prévisions sont bien moins réussies pour cette situation : au mieux à peine les deux tiers des enseignant·e·s qui proposent une réponse (autre que « je ne sais pas ») font une prévision correcte justifiée convenablement.

Comme nous l'avions supposé dans la sous-section 2.2, à toutes les questions les enseignant·e·s choisissant au moins une justification dans le cadre culturel de l'hydrostatique sont plus nombreux et nombreuses que celles et ceux sélectionnant au moins une justification dans le cadre culturel de la mécanique.

| | N | nsp | prévisions correctes... | ...bien justifiées | Type de justification : | | |
|-----|----|-----|----------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|----------|
| | | | | | méca. | hydro. | les deux |
| AQ1 | 46 | 0 | 32 (70%) | | 36 (78%) | 24 (52%) | 16 |
| | | | $p_v = 6,7 \cdot 10^{-7}$ | | $p_v = 0,038$ | | |
| AQ2 | 44 | 1 | 29 (66%) | | 33 (77%) | 21 (49%) | 12 |
| | | | $p_v = 4,8 \cdot 10^{-6}$ | | $p_v = 0,83$ | | |
| AQ3 | 43 | 1 | 31 (72%) | 17 (39%) | 29 (69%) | 19 (45%) | 6 |
| | | | $p_v = 1,3 \cdot 10^{-7}$ | $p_v = 1,2 \cdot 10^{-2}$ | $p_v = 0,14$ | | |
| AQ4 | 43 | 4 | 17 (39%) | | 25 (64%) | 20 (51%) | 6 |
| | | | $p_v = 0,18$ | | $p_v = 0,49$ | | |
| AQ5 | 42 | 1 | 40 (95%) | 24 (57%) | 33 (80%) | 25 (61%) | 18 |
| | | | $p_v = 2,2 \cdot 10^{-16}$ | $p_v = 1,5 \cdot 10^{-3}$ | $p_v = 0,14$ | | |

TABLE 4.10 – Réponses et types de justifications pour la situation A

| | N | nsp | prévisions correctes... | ...bien justifiées | Type de justification : | | |
|-----|----|-----|---------------------------|----------------------------|-------------------------|----------|----------|
| | | | | | méca. | hydro. | les deux |
| BQ1 | 35 | 3 | 4 (11%) | 2 (6%) | 16 (50%) | 21 (66%) | 5 |
| | | | $p_v = 0,014$ | $p_v = 2,2 \cdot 10^{-10}$ | $p_v = 0,45$ | | |
| BQ2 | 34 | 3 | 15 (44%) | | 9 (29%) | 23 (74%) | 2 |
| | | | $p_v = 0,085$ | | $p_v = 0,015$ | | |
| BQ3 | 34 | 3 | 21 (62%) | | 16 (52%) | 21 (68%) | 6 |
| | | | $p_v = 1,5 \cdot 10^{-4}$ | | $p_v = 0,43$ | | |
| BQ4 | 34 | 3 | 19 (56%) | | 15 (48%) | 22 (71%) | 6 |
| | | | $p_v = 0,0017$ | | $p_v = 0,24$ | | |
| BQ5 | 34 | 3 | 20 (59%) | 17 (50%) | 14 (45%) | 25 (81%) | 8 |
| | | | $p_v = 3,9 \cdot 10^{-4}$ | $p_v = 2,0 \cdot 10^{-2}$ | $p_v = 0,038$ | | |

TABLE 4.11 – Réponses et types de justifications pour la situation B

4.3 Facteurs de performance

Les résultats qui suivent comparent la nature et la quantité des justifications choisies par les enseignant·e·s selon que leurs réponses sont catégorisées comme « valides » ou « non valides ». Pour ce faire nous désignons une réponse comme « valide » si la prévision est correcte et correctement justifiée (avec uniquement des propositions considérées comme valides d'après les tableaux 4.7 et 4.9). Par défaut, toutes les autres réponses sont invalides, qu'elles correspondent à une prévision incorrecte ou à une prévision correcte mal justifiée.

4.3.1 Type de justification et performance

Le tableau 4.12 décline, selon que la réponse est catégorisée comme valide ou non, les résultats bruts présentés dans la section précédente à propos du type de justifications choisies (tableaux 4.10 et 4.11). Les pourcentages exprimés sont relatifs à l'ensemble des réponses soit valides (N_v), soit non valides ($N_{n.v}$).

Nous constatons que les distributions entre justifications du type mécanique et justifications du type hydrostatique gardent globalement le même ordre que celui observé dans le cas général : le cadre culturel de la mécanique est plus mobilisé pour la situation A, celui de l'hydrostatique pour la situation B. Les quelques écarts observés ne sont pas suffisamment significatifs pour que l'on puisse établir une corrélation entre la performance au niveau de la prévision et le cadre mobilisé pour justifier.

4.3.2 Nombre de cadres mobilisés et performance

Les tableaux 4.13 et 4.14 comptabilisent, selon la validité de la réponse, le nombre d'enseignant·e·s qui sélectionnent des justifications dans un seul cadre, et celles et ceux qui en choisissent dans les deux. Les pourcentages exprimés sont relatifs à l'ensemble de l'effectif soit valide, soit non valide.

Dans les cas où les enseignant·e·s mobilisent deux cadres, les données et pourcentages du groupe de réponses (valide ou invalide) le plus concerné en proportion apparaissent en gras.

Chaque « p-value » (p_v) exprimée correspond à la probabilité d'obtenir la même distribution (un ou deux cadres choisis selon la validité de la réponse) que celle observée s'il n'y avait pas de corrélation entre validité de la réponse et nombre de cadres utilisés ; elle est obtenue avec un test de Fisher exact (les détails sont précisés dans l'annexe C3).

Une autre façon d'apprécier la différence entre les deux groupes d'enseignant·e·s (celles et ceux qui font une réponse valide et celles et ceux qui font une réponse invalide) est de calculer la moyenne arithmétique du nombre de cadres mobilisés (tableau 4.15). La moyenne la plus élevée pour chaque question apparaît en gras dans le tableau.

Les résultats de la situation A présentent une certaine régularité : la proportion d'enseignant·e·s qui mobilisent deux cadres plutôt qu'un seul est presque toujours significativement plus élevée

| | Réponses valides | | | Réponses non valides | | |
|-----|------------------|---------------------------|------------------|----------------------|---------------------------|-----------------|
| | N_v | Mécanique | Hydrostatique | $N_{n.v}$ | Mécanique | Hydrostatique |
| AQ1 | 32 | 25 (78%) | 21 (66%) | 14 | 11 (79%) | 3 (21%) |
| | | $p_v = 4,8 \cdot 10^{-1}$ | | | $p_v = 2,2 \cdot 10^{-2}$ | |
| AQ2 | 29 | 20 (69%) | 20 (69%) | 14 | 13 (93%) | 1 (7%) |
| | | $p_v = 1$ | | | $p_v = 4,9 \cdot 10^{-4}$ | |
| AQ3 | 17 | 16 (94%) | 4 (24%) | 25 | 13 (52%) | 15 (60%) |
| | | $p_v = 1,9 \cdot 10^{-3}$ | | | $p_v = 8,4 \cdot 10^{-1}$ | |
| AQ4 | 17 | 12 (71%) | 9 (53%) | 22 | 13 (59%) | 11 (50%) |
| | | $p_v = 5,9 \cdot 10^{-1}$ | | | $p_v = 8,3 \cdot 10^{-1}$ | |
| AQ5 | 24 | 16 (67%) | 17 (71%) | 17 | 17 (100%) | 8 (47%) |
| | | $p_v = 1$ | | | $p_v = 3,9 \cdot 10^{-3}$ | |
| BQ1 | 2 | 2 (100%) | 0 (0%) | 30 | 14 (47%) | 21 (70%) |
| | | $p_v = 0,5$ | | | $p_v = 2,3 \cdot 10^{-1}$ | |
| BQ2 | 15 | 1 (7%) | 15 (100%) | 16 | 8 (50%) | 8 (50%) |
| | | $p_v = 1,3 \cdot 10^{-4}$ | | | $p_v = 1$ | |
| BQ3 | 21 | 8 (38%) | 18 (86%) | 10 | 8 (80%) | 3 (30%) |
| | | $p_v = 2,3 \cdot 10^{-2}$ | | | $p_v = 1,8 \cdot 10^{-1}$ | |
| BQ4 | 19 | 11 (58%) | 12 (63%) | 12 | 4 (33%) | 10 (83%) |
| | | $p_v = 1$ | | | $p_v = 1,1 \cdot 10^{-1}$ | |
| BQ5 | 17 | 9 (53%) | 12 (71%) | 14 | 5 (36%) | 13 (93%) |
| | | $p_v = 5,9 \cdot 10^{-1}$ | | | $p_v = 2,2 \cdot 10^{-2}$ | |

TABLE 4.12 – Cadre(s) choisi(s) pour justifier selon la validité de la réponse

chez celles et ceux qui répondent de façon valide que chez les autres. Il pourrait donc y avoir une corrélation entre le nombre de cadres dans lesquels les enseignant·e·s appréhendent une situation et le succès avec lequel ils et elles font des prévisions quant à son évolution, au moins pour les situations de même nature que la situation A (où le liquide n'est pas l'objet d'étude explicite). Les résultats pour la situation B semblent traduire une tendance inverse, mais la taille de l'effectif rend ce résultat apparent peu significatif.

| Question | AQ1 | | AQ2 | | AQ3 | | AQ4 | | AQ5 | |
|-----------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|-------------|-------------------|
| | valide | non valide | valide | non valide |
| <i>Effectif</i> | 32 | 14 | 29 | 14 | 27 | 15 | 17 | 22 | 24 | 17 |
| 1 cadre | 18 | 12 | 18 | 13 | 14 | 22 | 13 | 20 | 13 | 9 |
| 2 cadres | 14 (44%) | 2 (14%) | 11 (38%) | 1 (7%) | 3 (18%) | 3 (12%) | 4 (24%) | 2 (9%) | 10 (42%) | 8 (48%) |
| | $p_v = 9,2 \cdot 10^{-2}$ | | $p_v = 6,7 \cdot 10^{-2}$ | | $p_v = 6,8 \cdot 10^{-1}$ | | $p_v = 3,8 \cdot 10^{-1}$ | | $p_v = 1$ | |

TABLE 4.13 – Nombre de cadres mobilisés selon la validité de la réponse (situation A)

| Question | BQ1 | | BQ2 | | BQ3 | | BQ4 | | BQ5 | |
|-----------------|-----------|-------------------|------------------|------------|---------------------------|------------|-------------------|------------|------------|-------------------|
| | valide | non valide | valide | non valide | valide | non valide | valide | non valide | valide | non valide |
| <i>Effectif</i> | 2 | 30 | 15 | 16 | 21 | 10 | 19 | 12 | 17 | 14 |
| 1 cadre | 2 | 25 | 14 | 15 | 16 | 9 | 15 | 10 | 13 | 10 |
| 2 cadres | 0 (0%) | 5 (17%) | 1 (7%) | 1 (6%) | 5 (24%) | 1 (10%) | 4 (21%) | 2 (17%) | 4 (24%) | 4 (29%) |
| | $p_v = 1$ | | $p_v = 1$ | | $p_v = 6,4 \cdot 10^{-1}$ | | $p_v = 1$ | | $p_v = 1$ | |

TABLE 4.14 – Nombre de cadres mobilisés selon la validité de la réponse (situation B)

| | AQ1 | AQ2 | AQ3 | AQ4 | AQ5 | BQ1 | BQ2 | BQ3 | BQ4 | BQ5 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Réponse valide | 1,44 | 1,38 | 1,18 | 1,24 | 1,38 | 1 | 1,07 | 1,24 | 1,21 | 1,24 |
| Non valide | 1,20 | 1,00 | 1,12 | 1,09 | 1,00 | 1,17 | 1,00 | 1,10 | 1,17 | 1,29 |

TABLE 4.15 – Nombre moyen de cadres mobilisés selon la validité de la réponse

5 Discussion

5.1 Retour sur les hypothèses

5.1.1 Pertinence des deux cadres de rationalité définis

Notre étude repose sur l'hypothèse générale **Hyp.0** qu'une situation impliquant un liquide au repos peut être appréhendée au niveau macroscopique dans deux cadres de rationalité distincts : le cadre culturel de la mécanique et le cadre culturel de l'hydrostatique. Les questions que nous avons élaborées et les justifications que nous avons proposées aux enseignant·e·s vont même plus loin : elles postulent l'exclusivité de ces deux cadres pour appréhender convenablement une situation impliquant un liquide au repos. Les libertés laissées aux enseignant·e·s pour exprimer une conceptualisation distincte de celles que nous avons envisagées sont de deux types : des questions ouvertes pour expliquer la situation d'une part (**AQ0** et **BQ0**), et des propositions « autre » pour justifier les prévisions d'autre part. En ce qui concerne les explications formulées par les enseignant·e·s, nous avons montré que toutes les réponses acceptables reposaient sur des éléments des deux cadres que nous avons identifiés. Les explications que nous ne pouvons pas associer à l'un ou l'autre de ces deux cadres sont en fait erronées. A propos des justifications des prévisions, on remarque que l'usage de l'option « autre » est très marginal, ce qui semble indiquer que les enseignant·e·s ont bien trouvé leur compte dans les propositions que nous leur avons soumises dans les deux cadres. Les quelques fois où des justifications ont été exprimées par les enseignant·e·s, il s'agit soit de reformulations des justifications que nous leur avons soumises, soit de propositions fausses traduisant un raisonnement erroné. Ainsi les réponses au questionnaire corroborent notre hypothèse fondamentale puisqu'aucune explication ou justification valable ne traduit une conceptualisation hors des cadres culturels de la mécanique et de l'hydrostatique.

5.1.2 Différences de conceptualisation entre les deux situations

Conformément aux hypothèses **Hyp.1** et **Hyp.2**, les deux situations que nous avons choisies ne sont pas conceptualisées de la même façon par les enseignant·e·s : la situation A est plus fréquemment appréhendée dans le cadre culturel de la mécanique tandis que la situation B mobilise plus spontanément le cadre culturel de l'hydrostatique. Ainsi notre étude visant à étudier la compréhension que les enseignant·e·s ont des situations impliquant un liquide au repos *en général* couvre deux cas de figure bien distincts et complémentaires.

5.2 Compréhension des situations par les enseignant·e·s

5.2.1 Bilan général

Bien que certains pourcentages de réponses valides observés puissent laisser penser qu'au moins la situation A est globalement comprise (tableau 4.10), le taux d'abandon dès la première question d'explication (**AQ0**) entache inévitablement le bilan. Les deux situations

étudiées ont été choisies pour leur originalité, parce que nous avons supposé qu'elles obligeraient les enseignant·e·s à développer leurs raisonnements; nous ne soupçonnions pas qu'elles les mettraient à ce point en difficulté.

En ce qui concerne les enseignant·e·s qui ont pris le temps de répondre au-delà des questions d'explication, on note que la situation B conduit à des résultats globalement moins bons (tableau 4.11). Peut-être cette situation est-elle moins bien comprise par les enseignant·e·s; probablement aussi arrive-t-elle trop tard, à un stade où les enseignant·e·s sont lassé·e·s et répondent plus à la hâte. En tout état de cause les effectifs allant décroissants, les résultats obtenus pour la situation B sont globalement statistiquement moins représentatifs et donc plus difficiles à interpréter. Notre étude ne permet pas d'affirmer que les enseignant·e·s comprennent bien les deux situations qui leur ont été soumises, plutôt même au contraire.

5.2.2 Corrélations la compréhension et cadre(s) mobilisé(s)

Tout d'abord précisons que nous ne confondons pas abusivement validité de la réponse et compréhension de la situation. En effet, une réponse catégorisée comme valide n'exclut pas que l'enseignant·e puisse adhérer même partiellement à un raisonnement invalide, soit que nous n'ayons pas eu l'idée de le faire apparaître dans les propositions soumises pour justifier les prévisions, soit qu'il n'ait tout simplement pas retenu l'attention de l'enseignant·e au moment de faire un choix. La distinction que nous faisons entre réponse valide et réponse non valide renvoie plus à une différence de position sur une échelle continue de compréhension qu'à une opposition binaire « compris / pas compris ». Par conséquent nous considérons que les enseignant·e·s qui répondent de façon « valide » comprennent *mieux* la situation que celles et ceux qui répondent de façon « invalide ».

Comparaison des deux cadres de rationalité :

les résultats ne montrent pas de corrélation significative entre la validité de la réponse à une question et le type de justification (mécanique et/ou hydrostatique) choisie. Aucun des deux cadres ne semble donc plus performant que l'autre pour aborder avec succès les questions relatives aux situations impliquant un liquide au repos.

Nombre de cadres de rationalité mobilisés :

nous observons une assez très nette différence entre les enseignant·e·s qui répondent de façon valide ou non : à la majorité des questions les premier·e·s sélectionnent en moyenne plus de cadres pour justifier leurs réponses que les second·e·s (1,24 contre 1,11 sur l'ensemble des questions). Ce constat n'est visiblement pas un effet lié au nombre de justifications moyen choisies par les enseignant·e·s puisque nous montrons dans l'annexe B2 qu'il n'y a pas de tendance générale d'un groupe d'enseignant·e·s à choisir plus de justifications que l'autre. Nos effectifs sont trop petits pour étudier plus spécifiquement, selon la validité de la réponse, les distributions dans chaque cadre des justifications choisies par les enseignant·e·s qui en sélectionne

plus qu'une. Ainsi nous ne pouvons pas établir si c'est la conceptualisation spontanée dans les deux cadres différents qui améliore la compréhension (ce qui se traduit par de meilleurs taux de réussite aux prévisions), ou si c'est la bonne compréhension des situations par les enseignant·e·s qui favorise l'identification et donc la sélection par ces derniers des propositions équivalentes. Nous concluons donc avec prudence qu'il semble y avoir une corrélation (et non nécessairement causalité) entre le nombre de cadre mobilisés et le degré de compréhension.

5.3 Perspectives

5.3.1 Élargir l'étude

Plusieurs résultats souffrant d'un manque de significativité, il serait intéressant d'élargir encore le panel de répondants pour confirmer ou infirmer définitivement les tendances observées. Il faudrait toutefois augmenter les effectifs d'un facteur au moins dix pour pouvoir étudier quantitativement les distributions dans chaque cadre des justifications choisies par les enseignant·e·s qui en sélectionnent plus qu'une. En effet, le nombre d'enseignant·e·s qui font une réponse non valide et qui justifient leur prévision en cochant au moins deux propositions est très faible. Ceci remet en cause la faisabilité d'une telle étude avec notre questionnaire, notre outil méthodologique ayant été élaboré pour établir d'éventuelles corrélations entre conceptualisation et compréhension, non des liens de causalité.

Par ailleurs, il pourrait être intéressant de dupliquer l'étude auprès de tous les autres enseignant·e·s qui n'ont pas le statut particulier d'enseignant·e·s-stagiaires. Les résultats obtenus seraient susceptibles de différer de ceux observés avec notre panel. En effet, avec les années d'ancienneté les enseignant·e·s s'éloignent potentiellement d'une conceptualisation dans des cadres culturels pour se rapprocher d'une conceptualisation dans des cadres scolaires, c'est-à-dire empreints de toutes les stratégies inhérentes à la transposition didactique qu'ils et elles opèrent dans leur enseignement.

5.3.2 Former les enseignant·e·s

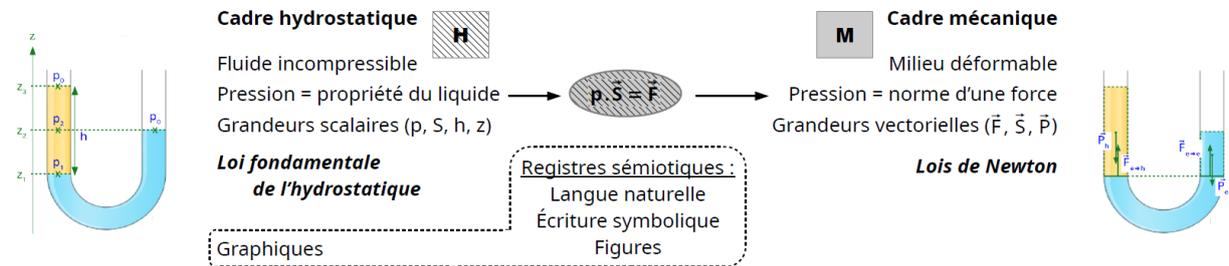
L'étude dont ce chapitre rend compte constitue une enquête préliminaire dans notre travail doctoral d'élaboration et d'évaluation d'une ressource. Les situations auxquelles nous avons confronté les enseignant·e·s n'étant manifestement pas parfaitement comprises, il ne fait aucun doute qu'une formation sur le thème « description d'un fluide au repos » du programme de spécialité en première n'est pas dénuée d'intérêt : l'évaluation de la ressource produite dans ce travail doctoral (chapitre 5) aura ainsi tout intérêt à être réalisée au cours d'une formation (chapitre 6). L'approche historique que nous avons choisi de valoriser dans cette thèse se révèle en outre particulièrement profitable au regard des résultats que nous venons de présenter. En effet, sur la période cernée par la ressource élaborée (le milieu du XVII^e siècle), les objets conceptuels et les processus de conceptualisation se référant aux liquides au repos se distinguent de ceux qui constituent les cadres culturels de la mécanique et de l'hydrostatique, tout en leur ressemblant fortement. Amener les enseignant·e·s à appréhender les situations

impliquant un liquide au repos dans un cadre historique hybride, c'est-à-dire mêlant ce que nous identifions comme les prémisses d'éléments relevant des cadres culturels mécanique et hydrostatique, pourrait les aider à conscientiser la double conceptualisation possible de ces situations.

6 Synthèse¹

PROBLÉMATIQUE

Situations impliquant un liquide au repos : deux cadres de rationalité⁽¹⁾



Questions de recherche

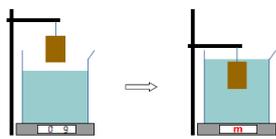
- Quel cadre de rationalité les enseignant.e.s mobilisent-elles/ils selon que le liquide au repos est, ou non, explicitement étudié ?
- Quelles corrélations entre compréhension des situations et cadre(s) de rationalité mobilisé(s) ?

MÉTHODOLOGIE

Nous avons élaboré un double-QCM⁽²⁾ (question / justification) à propos de deux situations, l'une que nous supposons appréhendée spontanément par les enseignant.e.s dans le cadre mécanique (situation A), l'autre dans le cadre hydrostatique (situation B) :

SITUATION A : le liquide n'est pas explicitement étudié

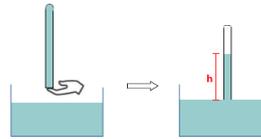
Prévoir en justifiant comment varie **m** quand :



- AQ1 : ρ_{objet} ↗ ; V_{objet} cst
- AQ2 : V_{objet} ↗ ; m_{objet} cst
- AQ3 : largeur bécber ↗
- AQ4 : ρ_{liquide} ↗
- AQ5 : l'objet est tourné

SITUATION B : le liquide est le système étudié

Prévoir en justifiant comment varie **h** quand :

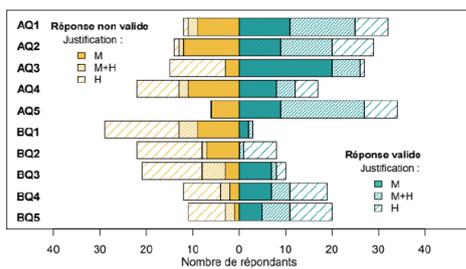


- BQ1 : $\|\vec{g}\|$ ↗
- BQ2 : largeur tube ↗
- BQ3 : largeur cuve ↗
- BQ4 : ρ_{liquide} ↗
- BQ5 : altitude ↗

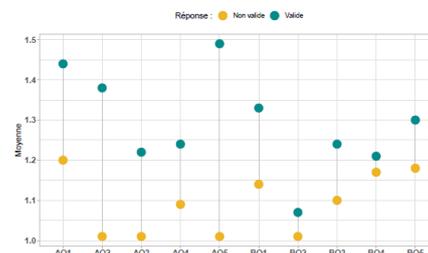
RÉSULTATS

Résultats obtenus auprès d'enseignant.e.s stagiaires (M2 MEEF) :

Validité des réponses et cadre(s) choisis(s) pour justifier



Nombre moyen de cadres utilisés dans les justifications



- La situation A est globalement mieux comprise que la B.
- La situation A est majoritairement traitée dans le cadre mécanique ; la situation B dans le cadre hydrostatique.
- Pour les deux situations : il n'y a pas de corrélation entre le cadre de rationalité choisi et le succès de la prévision.

• Les réponses valides sont plus souvent justifiées dans les deux cadres de rationalité plutôt que dans un seul des deux.

Références :

- (1) Malafosse, D., Lerouge, A. & Dusseau, J-M. (2000). Notions de registre et de cadre de rationalité en inter-didactique des mathématiques et de la physique. *Trema*, 18, 49-60.
- (2) Coppens, N. & Munier, V. (2005). Évaluation d'un outil méthodologique, le "double QCM", pour le recueil de conceptions et l'analyse de raisonnements en physique. *Didaskalia*, 27, 41-62.

1. Extraits du poster présenté au colloque « Rendez-vous en didactique, Recherches, dialogues et plus si affinité... » (2022).

Références du chapitre 4

- Coppens, N., & Munier, V. (2005). Evaluation d'un outil méthodologique, le « double QCM », pour le recueil de conceptions et l'analyse de raisonnements en physique. *Didaskalia*, 27, 41-62.
- de Hosson, C., & Caillarec, B. (2009). L'expérience de Blaise Pascal au Puy de Dôme : Analyse des difficultés des étudiants de premier cycle universitaire et confrontation historique. *Didaskalia*, 34, 105-130.
- Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de didactique et de Sciences Cognitives*, 5, 37-65.
- Duval, R. (1995). Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques ? *Recherches en didactique des mathématiques*, 16(3), 349-382.
- Lerouge, A. (1992). La notion de cadre de rationalité. A propos de la droite au collège. *Recherches en didactique des mathématiques*, 20(2). <https://revue-rdm.com/2000/la-notion-de-cadre-de-rationalite/>
- Malafosse, D., Lerouge, A., & Dusseau, J.-M. (2000). Notions de registre et de cadre de rationalité en inter-didactique des mathématiques et de la physique. *Tréma*, 18, Article 18. <https://doi.org/10.4000/trema.1629>
- Malafosse, D., Lerouge, A., & Dusseau, J.-M. (2001). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : Changement de cadre de rationalité. *Didaskalia*, 18. <https://doi.org/10.4267/2042/23903>
- Piaget, J. (1992). *Réussir et Comprendre*. Presses Universitaires de France - PUF.
- Vygotski, L. (1985). *Pensée et langage*. Messidor.
- White, R., & Gunstone, R. (2014). *Probing Understanding*. Routledge.

Conclusion des enquêtes préliminaires

Les contenus des programmes scolaires de première et terminale générale (spécialité physique-chimie) introduisent la notion de pression *via* différentes lois phénoménologiques macroscopiques qui concernent, pour la plus grande part, les fluides à l'équilibre (chapitre 1) : loi de Mariotte, équation d'état des gaz parfaits, loi fondamentale de la statique des fluides, force exercée sur une paroi, poussée d'Archimède. À propos des fluides en mouvement, seuls les écoulements stationnaires de fluides incompressibles sont désormais abordés, et ce en terminale depuis la publication des derniers programmes en 2020. En ce qui concerne les interprétations microscopiques, elles sont prévues dans les programmes mais dans une mesure difficile à déterminer : clairement limitées à la pression cinétique des gaz en terminale, nous ne savons pas si la pression dynamique constitue aussi un objectif d'apprentissage selon les concepteurs et conceptrices des programmes.

L'état de l'art (chapitre 2) a mis au jour de nombreuses difficultés que les élèves de première et terminale ont tous les risques de rencontrer au cours de leur acculturation aux phénomènes liés à la pression : assimilation de la pression à une force verticale dirigée vers le bas, variations supposées de la pression avec la forme du récipient (pour une hauteur de liquide donnée) ou sur une horizontale malgré la loi fondamentale de l'hydrostatique, explications causales ou finalistes basées notamment sur l'horreur de la nature pour le vide, interprétations microscopiques qui ne reposent que sur les densité et vitesse moléculaires et qui n'incluent pas les interactions intermoléculaires, occultation de l'extérieur (par exemple de la pression aux interfaces), ou encore bilans de forces comptant deux fois l'action du fluide sur un objet immergé (« résultante des forces de pression » et « poussée d'Archimède »). La formulation des items du programme (« exploiter », « tester », « utiliser ») autorise par ailleurs une approche très mathématique de la pression par le biais des différentes relations dans lesquelles elle intervient, et n'impose pas d'avoir à y mettre du sens.

Quelques propositions promettent de traiter sporadiquement l'une ou l'autre de ces difficultés, mais rarement beaucoup à la fois. Nous nous fixons comme objectif de proposer à notre tour une ressource offrant de nombreux leviers pour s'attaquer au plus de difficultés possible.

La période historique que nous avons parcourue offre cette opportunité, comme nous l'avons exposé dans la reconstruction historique (chapitre 3). La controverse autour des questions du vide et de la pesanteur de l'air qui a animé la communauté savante européenne entre 1630 et 1660 regorge d'arguments et de contre-arguments que nous pourrions faire valoir dans la reconstruction didactique à venir : autour du dispositif de Torricelli les propriétés supposées du vide sont rejetées au profit d'une approche plus globale faisant la part belle à « l'extérieur » (l'air atmosphérique) et des analogies sont proposées pour justifier les propriétés pressantes de l'air (isotropie de la pression, lien et différences avec la pesanteur). L'absence de toute formule garantit aussi une approche qui privilégie le sens physique plutôt que la dextérité mathéma-

tique. Dans la reconstruction historique que nous avons faite, la pression est en effet discutée en tant que phénomène et non en tant que grandeur physique ; pour cette raison l'histoire des sciences apparaît comme un vecteur privilégié de sens, dont l'introduction pourrait précéder avantageusement l'enseignement des phénomènes réduits à leur expression mathématique.

Cette dernière idée a été éprouvée dans une ultime enquête préliminaire conduite auprès d'enseignant·e·s du secondaire. Les résultats de cette recherche menée auprès d'un effectif répondant assez restreint montre si ce n'est une causalité, au moins une corrélation entre la compréhension qu'ont les enseignant·e·s de deux situations impliquant un liquide au repos et leur appréhension à la fois à la lumière des lois hydrostatiques contemporaines et de l'approche mécanique inspirée de l'histoire des sciences. Nous voyons dans ces conclusions un encouragement supplémentaire dans cette quête de faire de l'histoire des sciences un levier pour les enseignant·e·s afin qu'ils et elles aident les élèves à surmonter leurs difficultés.

Les objectifs conceptuels que l'on peut se fixer à partir de la reconstruction historique que nous avons faite sont certes assez nombreux, mais ils ne couvrent pas toutes les difficultés que l'état de l'art a mis au jour, loin s'en faut. L'originalité de notre projet de reconstruction didactique repose plutôt sur la diversité des objectifs qu'elle se fixe : conceptuels, certes, mais aussi épistémologiques, culturels, et motivationnels. Ces trois dernières catégories d'objectifs sont plus rarement mis en avant dans les projets de reconstruction didactique, bien qu'ils puissent se cumuler aux objectifs conceptuels et qu'ils nous semblent d'une importance sinon égale, au moins comparable à ces derniers. Nous étayons cette prise de position théorique dans l'introduction de la partie suivante. Les correspondances historiques que nous avons mis au premier plan de notre reconstruction historique constituent la matière première dans ce projet dont nous défendons la pertinence au début du chapitre 5.

La dernière enquête que nous avons menée mettant par ailleurs en évidence une compréhension globalement insatisfaisante des situations soumises aux enseignant·e·s, nous avons décidé de proposer une formation à ces derniers, en réponse à deux objectifs : évaluer l'usage que les enseignant·e·s font de la ressource issue de notre reconstruction didactique, et former ces dernier·e·s en matière d'usage de l'histoire des sciences (en général, mais aussi spécifiquement pour l'enseignement des phénomènes liés à la pression).

Deuxième partie

Reconstruction didactique

Introduction de la reconstruction didactique

Cette seconde partie constitue l'enjeu véritable de cette recherche doctorale : élaborer et évaluer une ressource à destination des enseignant-e-s afin d'enrichir leur palette d'action en matière d'enseignement des phénomènes liés à la pression. Nous exposons régulièrement dans cette partie comment les enquêtes préliminaires sont déterminantes dans la forme stabilisée adoptée pour la ressource que nous présentons dans un premier chapitre (chapitre 5), et dont l'évaluation est rapportée dans le sixième et dernier chapitre de ce manuscrit.

Pour justifier notre choix de nous tourner vers l'histoire des sciences nous avons évoqué succinctement dans l'introduction générale les avantages que recouvraient une telle démarche. Audigier et Fillon (1991) ont d'abord défendu les apports *culturels* et l'intérêt *didactique* ; Guedj (2005) complète ces arguments en développant l'intérêt *motivationnel*. Une revue des différents argumentaires publiés dans la littérature nous conduit à adopter cette catégorisation en déclinant toutefois l'intérêt *didactique* en deux sous-catégories bel et bien prises en compte par les auteurs, mais que nous estimons suffisamment importantes prises individuellement et imperméables l'une à l'autre pour être considérées indépendamment : l'intérêt *conceptuel* et l'intérêt *épistémologique*. Nous retenons finalement les quatre types d'arguments suivants en faveur d'un recours à l'histoire des sciences dans l'enseignement :

- *épistémologique* : lié aux propriétés de la science et de l'activité scientifique qui transcendent le temps et l'espace. Il s'agit des arguments portés notamment par le courant NoS et qui ont trait à la sensibilisation des élèves à la nature de la science selon toutes les dimensions explicitées par Maurines et al. (2013) ;
- *conceptuel* : lié au contenu scientifique. Ces arguments mettent en avant les éclairages et leviers offerts par l'histoire des sciences à propos des difficultés des élèves relativement au contenu scientifique en jeu ;
- *culturel* : concerne les faits et connaissances, scientifiques ou non, qui sont contextualisés dans le temps et/ou dans l'espace. Cette catégorie inclue notamment les repères chronologiques ;
- *motivationnel* : lié à l'adhésion des élèves pour la discipline, ou plus modestement pour la séance envisagée. Cette catégorie d'arguments n'est pas nécessairement tout à fait indépendante des trois autres, la sensibilisation à la nature de la science et de l'activité scientifique pouvant notamment être une source de motivation en soi, la prise en compte des difficultés des élèves aussi, etc.

De chaque type d'argument peuvent *a priori* découler différents objectifs d'enseignement, ce qui suffit à justifier une démarche d'élaboration d'une ressource pour l'enseignement fondée sur l'histoire des sciences. Les précédents travaux publiés en ce sens envisagent des buts d'apprentissage majoritairement conceptuels (Maurines & Myrargue, 2007 ; de Hosson & Décamp, 2011 ;

Bosdeveix, 2016 ; Canac & Kermen, 2018 ; Bächtold & Munier, 2019 ; Pelé, 2023), c'est-à-dire des reconstructions didactiques au sens stricte prévu par de Hosson (2011) (à ceci près qu'il ne s'agit pas que de contenus conceptuels relevant de la physique) ; d'autres plus rares affichent des ambitions liées à la dimension que nous qualifions d'épistémologique (Slaïma & Maurines, 2017). De notre point de vue le recours à l'histoire des sciences doit permettre la prise en charge simultanée d'éléments relevant des quatre catégories que nous avons explicitées ci-dessus, permettant de cumuler les objectifs d'enseignements.

Nous avons envisagé notre reconstruction didactique avec ce parti pris, prenant une liberté assumée vis-à-vis du cadre théorique originel, puisque nous considérons des buts d'apprentissages qui ne se limitent pas à un contenu conceptuel (concept ou loi physique). Cette posture théorique nous a dans un premier temps guidée dans l'élaboration d'une ressource pour l'enseignement : nous avons ainsi cherché à rassembler des éléments historiques permettant de servir des intérêts à la fois motivationnels, épistémologiques, conceptuels et culturels. Elle nous a ensuite servi de cadre pour évaluer la ressource que nous avons créée : à travers l'analyse de productions d'enseignant·e·s basées sur notre ressource, nous cherchons notamment à évaluer la pertinence d'un tel projet de « super » reconstruction didactique.

Le premier chapitre (chapitre 5) de cette partie est consacré à la présentation de la ressource élaborée, précédée d'un étayage des différents choix opérés lors de ce processus de reconstruction didactique. Nous commençons ce chapitre par expliquer comment les correspondances historiques, c'est-à-dire les lettres échangées entre savant·e·s, constituent un matériau privilégié à tous les égards pour notre projet de « super » reconstruction didactique. La ressource que nous proposons consiste ainsi en un *corpus* composé uniquement de correspondances historiques, ce qui le rend unique en son genre. Nous terminons ce chapitre en listant les objectifs d'apprentissages qui peuvent être définis *a priori* sur la base de notre *corpus* : ils sont nombreux, et non limités à des contenus conceptuels, conformément à la posture théorique que nous avons choisi d'adopter.

Le second et dernier chapitre (chapitre 6) de cette partie vise l'évaluation de la ressource ainsi que l'étude des interactions entre cette dernière et les enseignant·e·s. Nous y présentons comment, à l'occasion d'une formation que nous avons organisée, nous évaluons l'appropriation et les transformations du *corpus* par les enseignant·e·s formé·e·s. Nous concluons de cette investigation que sans accompagnement ou formation, les enseignant·e·s ne tirent que très peu profit de la dimension historique des ressources de type *corpus*.

Références de l'introduction de la reconstruction didactique

- Audigier, F., & Fillon, P. (1991). *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques—Une approche pluridisciplinaire*. Institut National de Recherche Pédagogique - INRP , Didactiques des Disciplines.
- Bächtold, M., & Munier, V. (2019). History and Philosophy of Science : A Lever to Teach Energy at High School (p. 19-33).
- Bosdeveix, R. (2016). *Entre classifications fonctionnelle et phylogénétique : Le groupe des végétaux. Une reconstruction didactique basée sur l'histoire des sciences dans le cadre de la formation des enseignants de sciences de la vie et de la Terre*. [Thèse de doctorat : Paris Diderot]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01372907/document>
- Canac, S., & Kermen, I. (2018). *Conception d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège*. IREM de Paris. <https://hal.science/hal-02111659>
- de Hosson, C. (2011). L'histoire des sciences : Un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique [HDR : Paris Diderot]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00655594/document>
- de Hosson, C., & Décamp, N. (2011). La procédure de la mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Eratosthène » : Un support pour une reconstruction didactique. *Grand N*, 87, 77-91.
- Guedj, M. (2005). Utiliser des textes historiques dans l'enseignement des sciences physique en classe de seconde des lycée français : Compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, 26, 75-95.
- Maurines, L., & Myrargue, A. (2007). Utiliser l'histoire de l'optique dans l'enseignement : Pourquoi? Comment? *Le congrès national des professeurs de physique et de chimie*, Paris.
- Maurines, L., Gallezot, M., Ramage, M.-J., & Beaufiles, D. (2013). La nature des sciences dans les programmes de seconde de physique-chimie et de sciences de la vie et de la Terre. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 7. <https://doi.org/10.4000/rdst.674>
- Pelé, M. (2023). *Pratiques enseignantes et problématisation de la circulation sanguine via l'histoire des sciences* [Thèse de doctorat : Université de Paris]. En cours de publication.

Släima, M., & Maurines, L. (2017). La diversité des pratiques scientifiques au travers de l'histoire de la dioptrique : Expérimentation d'une innovation pédagogique en classe de seconde en Tunisie. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 15. <https://doi.org/10.4000/rdst.1507>

Chapitre 5

Élaboration d'une ressource

Corpus de correspondances sur les
questions du vide et de la pesanteur de
l'air

1 Introduction

Beaufils et al. (2010) ont publié dans le BUP le compte-rendu d'une enquête menée auprès d'enseignant·e·s de physique-chimie à propos de l'utilisation de l'histoire des sciences dans l'enseignement. Majoritairement favorables à l'introduction d'éléments d'histoire des sciences dans leurs cours, les enseignant·e·s sondé·e·s confessent attendre de l'aide pour ce faire, principalement sous la forme de « mise à disposition de documents préparés » (77 %). Le support que nous proposons et présentons ici prétend répondre à cette attente dans la mesure où il consiste non pas en l'élaboration d'une séquence pédagogique complète, mais simplement en un *corpus* de sources primaires que les enseignant·e·s pourront s'approprier comme ils et elles le souhaitent.

Cette reconstruction didactique que nous proposons vise naturellement à contribuer à faciliter l'enseignement des phénomènes liés à la pression compte-tenu des difficultés conceptuelles qui s'y opposent et que l'état de l'art a mis au jour (chapitre 2). Mais bien au-delà de ces préoccupations purement didactiques, nous entendons tirer profit du caractère « fondamentalement épistolocentré » des mondes savants de l'Europe moderne (Chapron & Boutier, 2013). La prolifération des savants au XVII^e siècle fournit un matériau de très grande ampleur, d'une nature bien différente des discours publiés dans les traités, et que Torrini (1999) rapproche du discours scientifique dialogué :

Dialogo et epistola font référence tous les deux à un nouveau concept de vérité qui n'est plus limité à l'acquisition d'une contemplation solitaire et dogmatique, mais qui procède à une confrontation et à un échange. Ce sont les récits d'une expérience et d'un itinéraire, la transcription et le miroir d'un débat, d'une recherche qui ne connaît ni distinctions ni frontières. C'est un discours et une manière de parler et de penser. (Torrini, 1999, p.141)

Au même titre que des recherches précédentes ont pu mettre en avant les potentialités didactiques et pédagogiques du discours scientifique dialogué (de Hosson, 2004 & 2011), nous trouvons aux correspondances de nombreux intérêts que nous développons dans la première partie de ce chapitre. Nous détaillons ensuite les choix qui se sont opérés dans la réduction du circuit épistolaire autour des questions du vide et de la pesanteur de l'air au XVII^e siècle au *corpus* que nous retenons. Après avoir présenté le *corpus* que nous avons élaboré, nous explicitons les éléments d'ordre motivationnels qui pourraient être retenus par les enseignant·e·s au cours de l'appropriation et de la transformation de notre ressource, ainsi que les différents objectifs d'apprentissages (épistémologiques, conceptuels et culturels) qui nous semblent pouvoir être définis sur la base de cette dernière.

2 Les correspondances : un atout pédagogique et didactique

A l'époque moderne « la lettre a acquis un statut spécifique, qui la différencie des autres types de textes que produit le monde savant » (Chapron & Boutier, 2013). De cette spécificité naissent des intérêts particuliers qui s'ajoutent ou renforcent les arguments généraux que nous avons déjà avancés dans l'introduction générale en faveur d'un recours à l'histoire des sciences dans l'enseignement. Cette partie se donne pour objectif d'explicitier les opportunités spécifiques qu'offre, selon nous, une reconstruction didactique fondée sur les correspondances entre savants au XVIII^e siècle.

2.1 Intérêt motivationnel

Les correspondances donnent à voir une science vivante et pleine d'humanité. Plusieurs caractéristiques de ces correspondances peuvent selon nous susciter l'intérêt des élèves et favoriser leur motivation :

- la multiplicité des acteurs mis en relation par ce biais en fait une histoire riche et vivante, comportant beaucoup de personnages dont certains, par leur style ou leurs prises de positions, peuvent s'attirer la sympathie du lecteur ;
- la nature fréquemment polémique des échanges en fait des récits captivants ; outre les idées et arguments scientifiques invoqués, dont l'ingéniosité et la qualité sont en soi une source d'intérêt, la rhétorique employée ne manque parfois pas de piquant, ce qui renforce le caractère passionnant de ces récits ;
- l'humanisation de certains grands noms, connus de tous et parfois supposés infaillibles sur le plan scientifique voire déifiés en raison de leur notoriété ; l'usage des correspondances offre l'occasion de présenter des circonstances au cours desquels les idées des fameux « génies » sont discutées, remises en question, et parfois rejetées à juste titre par d'autres noms que la postérité n'aura pas servis. Dans les correspondances, l'ensemble des savants d'une époque se trouvent sur un pied d'égalité :

Les correspondances éclairent sans distinction les grands savants et les petits personnages, les œuvres qui ont dessiné le parcours du savoir scientifique et celles qui n'ont jamais vu le jour. (Torrini, 1999, p.154)

- TEST A défaut peut-être d'être une source de motivation en soi, cet aspect prévient le risque de découragement des élèves face à une histoire des génies (Maurines & Beaufls, 2011)
- la remarquable éloquence de tous les acteurs et toutes les actrices, et le caractère très révérencieux des échanges font des correspondances des écrits assez intrigants mais agréables à lire, qui tiennent plus du théâtre ou du roman que de l'essai scientifique.

2.2 Intérêt épistémologique

2.2.1 Éclairer les interactions entre scientifiques

De toute évidence les correspondances éclairent une des activités intemporelles des scientifiques : celle qui consiste à rendre compte de ses recherches auprès des membres de la communauté savante. L'existence même des correspondances rend compte de la construction collective du savoir scientifique, de la multiplicité des acteurs et actrices travaillant sur un même sujet, ainsi que de l'étendue temporelle et géographique de leurs interactions. Les lettres échangées entre savant·e·s se font ainsi témoins du caractère dynamique et humaniste de la science :

[Les correspondances] permettent de suivre l'élaboration et la mise en circulation des informations et des propositions, l'émergence et la propagation des débats et des polémiques, de situer les savants dans leur parcours biographique, leurs univers relationnels et les ensembles d'échanges et d'interactions au sein desquels se conduit le travail intellectuel. (Chapron & Boutier, 2013, p.12)

L'usage des correspondances doit ainsi permettre d'éviter un des biais qui apparaît régulièrement lorsque l'histoire des sciences est introduite dans l'enseignement, celui de présenter une histoire réductionniste dans laquelle « les découvertes semblent instantanées, fixées à une date précise et surgies d'un esprit hors norme ayant eu une intuition géniale, provenir d'une idée indiscutable ou d'une expérience cruciale. » (Beaufils & al., 2010, p.582). Les correspondances mettent aussi bien en lumière les contributions successives conduisant à l'élaboration de théories et modèles, que les difficultés que représente souvent l'acceptation de ces derniers.

2.2.2 Éclairer les enjeux, les démarches, les méthodes scientifiques

Les correspondances fournissent des indications capitales à propos des réflexions et errements des savant·e·s durant les périodes séparant la publication de discours et traités :

La correspondance entre les savants est toujours d'un puissant intérêt, et l'histoire de la Science trouve un avantage de premier ordre à ce qu'elle soit recueillie et conservée avec soin, publiée même si cela devient nécessaire, car elle fait partie de leur œuvre et du patrimoine scientifique qu'ils nous ont légué. Non seulement nous devons rendre ce pieux hommage à la mémoire des Savants, mais nous devons estimer avec raison que leur correspondance complète ce patrimoine en y ajoutant une note intime qui nous aide à mieux comprendre le sens et l'orientation de leurs Travaux et quelquefois même en révèle la raison d'être. (Barbarin, 1926, p.50)

Ainsi la lecture des correspondances donne l'occasion de « renforcer le passage d'une histoire de savoirs constitués - des produits finis accessibles à travers des œuvres publiées -, à celle de leur genèse » (Chapron & Boutier, 2013, p.12). En d'autres termes, ce sont les enjeux, les démarches et les méthodes scientifiques qui sont éclairés de façon unique par ces échanges

épistolaires ; en ce sens une confrontation à ces écrits doit favoriser la construction d'une image plus juste de la nature de la science par les élèves et les enseignant·e·s, et ce pour deux raisons :

- la diversité des types d'inférences et de raisonnements explicités dans ces écrits montre qu'il n'y a pas « une » méthode unique en science ; ces différentes démarches et méthodes sont aussi mises à l'œuvre dans les discours et traités publiés, mais de façon sans doute moins riche que dans les échanges épistolaires au cours desquels les savants-auteurs et savantes-autrices répondant aux interrogations, réserves et objections de leurs correspondant·e, redoublent d'arguments et d'explicitations pour légitimer leurs conclusions et convaincre ;
- la mise à mal *relativement* décomplexée des raisonnements qui ne respectent pas les règles méthodologiques d'une « bonne » démarche scientifique, voire des lettres à enjeux clairement épistémologique à propos de ce qui peut, ou non, être reconnu comme « scientifique » (on pense notamment à la fameuse lettre de Pascal au Père Etienne Noël dont nous avons citer un extrait dans la reconstruction historique au chapitre 3). Dans le contexte de grande autorité de l'École, ou les idées ne se conformant pas à la philosophie scolastique sont sévèrement condamnées, on peut supposer ou du moins espérer que le caractère privé des échanges épistolaires soit source de libération de l'expression à propos des limites de certains types de raisonnements (finalistes, téléologiques, métaphysiques etc.)

L'amélioration de l'image que les élèves et enseignant·e·s ont de la nature de la science est une entreprise qui doit tirer profit aussi bien d'une exposition à la multiplicité des démarches scientifiques que d'une réflexion documentée à propos de ce qui, à l'inverse, *ne fait pas* (ou plus) la science.

2.3 Intérêt conceptuel

Le contenu scientifique des lettres échangées entre savants du XVII^e siècle est à prendre avec autant de sérieux que celui des traités, essais et discours publiés. Longtemps négligées dans les travaux de reconstructions historiques les lettres sont désormais considérées comme partie prenante de l'œuvre des savant·e·s, et sont donc intégrées aux explorations menées en histoire des sciences. Les correspondances présentent ainsi *a priori* les mêmes intérêts conceptuels que ceux que nous avons évoqués dans l'introduction de ce manuscrit en faveur d'un recours à l'histoire des sciences pour l'enseignement de façon générale.

En ce qui concerne la question de la reproblématisation à partir de l'histoire des sciences pour l'enseignement, les correspondances se présentent comme des ressources d'importance capitale. Comme l'écrit Torrini (1999, p.9), « la lettre — *l'epistola* — devient, dans l'entourage de Galilée et au delà, la forme naturelle et la plus diffuse de l'échange scientifique » ; en tant que pratique usuelle et forme majoritaire du dialogue scientifique à cette époque, les débats et problèmes y ont une place centrale à double titre :

- la lettre se présente comme un espace de continuité des controverses majeures, issues de la sphère publique, et comprises en tant qu' « événements singuliers, voire exceptionnels dans la biographie d'un personnage ou dans l'« établissement » d'une science » (Bodenmann & Rey, 2013, p.237) ;
- les correspondances sont le lieu de vie des controverses "routinières", c'est-à-dire comprises en tant que « pratique de la science en train de se faire », et qui demeurent essentiellement dans la sphère privée. Elles sont ainsi le lieu privilégié voire exclusif de l'expression de certains doutes, certaines difficultés conceptuelles.

Qu'il soit question ou non de rupture épistémologique majeure, les controverses et les arguments qui la sous-tendent sont un outil didactique mis en avant dans plusieurs études (Crépin-Obert, 2010 ; de Hosson, 2011). Les écrits épistolaires apportent donc des éléments complémentaires qui pourraient être mis au service d'un enseignement par la controverse.

2.4 Intérêt culturel

« Le savant de l'époque moderne se définirait, avant tout, par le commerce épistolaire qu'il entretient avec le monde savant, et avec le monde social tout court » (Chapron & Boutier, 2013, p.9). En tant que spécificité d'une époque, pas uniquement bornée au XVIIe siècle mais désormais révolue, l'existence même des correspondances est en soi un élément de culture. Si par nature la science se fait de façon interactive, la manière dont cette coopération et ces échanges s'opèrent évolue au fil des époques. Outre un apport culturel général à propos des techniques et moyens propres à cette époque, un recours aux correspondances dans l'enseignement serait ainsi l'occasion de questionner les outils et les structures assurant l'interaction entre scientifiques contemporain·e·s (mails, revues périodiques, conférences régulières), en les mettant en perspective avec ceux dont disposaient les savant·e·s de l'époque moderne (lettres, voyages ponctuels).

Par ailleurs l'étude des correspondances d'un auteur ou d'une autrice peut fournir d'autres renseignements, notamment biographiques, éclairant par exemple les activités extra-scientifiques des savant·e·s, leur position sociale etc. Autant d'éléments susceptibles de contribuer à la mise en culture et en contexte de la science.

3 Choix opérés pour la constitution du *corpus*

Nos lectures se sont concentrées sur les correspondances et les œuvres publiées au milieu du XVIIe siècle, ainsi que sur les sources secondaires relatives à ces écrits. Comme l'a révélé la reconstruction historique présentée au chapitre 3, c'est en effet à cette époque que les débats ont eu cours à propos des questions du vide et de la pesanteur de l'air, questions et problèmes qui forment le contexte d'émergence de la notion de pression.

Le circuit épistolaire sur la question du vide et de la pesanteur de l'air au XVIIe est très étendu :

de nombreux savants de toute l'Europe se sont saisis de ces questions et ont échangé à leur sujet, et ce pendant plusieurs dizaines d'années.

Le travail de reconstruction didactique a donc consisté en deux opérations conjointes : la sélection et l'élimination successive de différents éléments parcourus, jusqu'à ce que le *corpus* ait une taille, une cohérence, un contenu et une forme convenables. Nos choix ont été orientés de façon à servir au mieux tous les intérêts potentiels pour l'enseignement que recouvrent les correspondances et l'histoire des sciences de façon plus générale, comme nous l'avons développé précédemment.

La présente section explicite les choix qui ont été faits et les raisons associées dans la réduction du réseau épistolaire aux quelques extraits que nous avons conservés pour la constitution de notre *corpus*.

3.1 Choix pragmatiques : accessibilité des ressources

Les premières décisions que nous avons prises dans l'élaboration de notre *corpus* épistolaire sont d'ordre pragmatique. Bien que, par le biais des sources secondaires, nous ayons connaissance d'un certain nombre d'échanges épistolaires, le nombre de textes parmi lesquels nous avons finalement fait notre sélection n'est pas aussi important que ne l'est en réalité le réseau dans lequel ils s'inscrivent. En effet, plusieurs obstacles s'opposent à l'exhaustivité des ressources parmi lesquelles nous avons sélectionné les extraits pour notre *corpus* :

- certaines lettres (en tant qu'objet) n'ont pas été retrouvées par les historien·ne·es, et leur contenu ne peut donc pas être porté à notre connaissance bien que nous ayons des raisons diverses d'être convaincus qu'elles ont été écrites un jour ;
- toutes les lettres n'ont pas encore vu leur contenu dactylographié et publié entièrement, sous forme de recueil de correspondances par exemple, et diffusées de façon suffisamment large pour être accessibles avec une facilité compatible avec les contraintes d'un travail de thèse (qui n'est par ailleurs pas uniquement tourné vers l'histoire des sciences) ;
- beaucoup de lettres n'ont pas encore été traduites en français ; si une traduction « maison » est envisageable et effectivement mise en œuvre quand les extraits présentent un intérêt *a priori* (ce que les écrits secondaires permettent de supposer), le travail de prospection vers des lettres moins connues s'en voit grandement limité, surtout pour un lecteur ou une lectrice qui ne maîtrise ni le latin, ni l'italien.

3.2 Choix généraux de fond : exclusions et sélections d'extraits

3.2.1 Conformité avec les programmes scolaires

Le *corpus* que nous élaborons se présente comme un support documentaire visant à aider les enseignant·e·s de spécialité physique-chimie en première à introduire des éléments

d'histoire des sciences à l'occasion de la partie « Description d'un fluide au repos » du thème « Mouvement et interactions ». Les extraits que nous rassemblons pour constituer notre *corpus* ne sont donc pas étrangers aux différents items du programme, à savoir pour rappel :

| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
|---|---|
| Échelle de description. Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température. Modèle de comportement d'un gaz : loi de Mariotte. Action exercées par un fluide sur une surface : forces pressantes. Loi fondamentale de la statique des fluides. | Expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide et le comportement microscopique des entités qui le constituent. Utiliser la loi de Mariotte. <i>Tester la loi de Mariotte, par exemple en utilisant un dispositif comportant un microcontrôleur.</i> Exploiter la relation $F = P.S$ pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface plane S soumise à une pression P . Dans le cas d'un fluide incompressible au repos, utiliser la relation fournie exprimant la loi fondamentale de la statique des fluides : $P_2 - P_1 = \rho g(z_1 - z_2)$. <i>Tester la loi fondamentale de la statique des fluides.</i> |

TABLE 5.1 – Extrait du B.O. spécial n°1 du 22 janvier 2019 **Programme de spécialité physique-chimie de première générale**

L'avancement de la science sur la période sur laquelle nous avons centré nos lectures implique que les extraits que nous avons retenus ne présentent ni les termes actuellement en usage et au programme, ou du moins pas dans le sens qu'ils recouvrent aujourd'hui (fluide, pression, force pressante, masse volumique, équilibre [n.m], etc.), ni loi, ni formule. Pour autant leurs potentialités didactiques ne font aucun doute, comme nous le développerons dans la dernière partie de ce chapitre.

Par ailleurs dans la configuration actuelle des programmes scolaires, la notion de pression en première est abordée alors que certains éléments ont déjà été portés à la connaissance des élèves au cours de leur cursus passé, ce dont il a nécessairement fallu tenir compte pour proposer un *corpus* pertinent :

- l'air est pesant ;
la composition approchée de l'air et sa masse volumique font actuellement partie des connaissances exigibles d'après le programme de seconde.
- un système pesant subit une force verticale vers le bas appelée poids ;
cette connaissance est au programme de seconde, elle n'est qu'un rappel pour les élèves, qui ont déjà travaillé sur ce concept au collège.
- à l'équilibre les forces subies par un système se compensent ;
d'après le programme de seconde les élèves doivent savoir « exploiter le principe d'inertie

et sa contraposée pour en déduire des informations soit sur la nature du mouvement d'un système modélisé par un point matériel, soit sur les forces », en particulier dans le « cas de situations d'immobilité ».

- le vide existe ;

le vide n'est pas un objet d'étude à part entière dans le cursus des élèves français·e·s, mais dans plusieurs circonstances son existence est actée de façon plus ou moins explicite. Par exemple, en classe de seconde, les élèves doivent connaître la vitesse de la lumière *dans le vide*.

Bien que méritant certainement encore d'être consolidés, en particulier en ce qui concerne la question du vide, ces acquis présupposent tout de même que les élèves de première ne rencontrent *a priori* pas toutes les difficultés et ne mettent pas en œuvre tous les raisonnements observables chez les savants du XVIIe siècle.

Pour ces raisons nous avons ainsi choisi de proposer un *corpus* excluant les extraits apportant des éléments visant uniquement à prouver ou réfuter une des deux hypothèses suivantes :

1. le vide existe ;
2. l'air est pesant.

Malgré ce choix, justifié par la configuration actuelle des programmes scolaires, notons toutefois qu'il s'agit de deux hypothèses cruciales qui ne faisaient absolument pas consensus et qui ont été largement discutées pour elles-mêmes à l'époque à laquelle nous nous intéressons. D'ailleurs de nombreux extraits épistolaires à propos de ces questions précises constitueraient à coup sûr un apport profitable en vue d'une reconstruction didactique sur les thèmes particuliers de la pesanteur de l'air ou de l'existence du vide.

3.2.2 Pertinence vis-à-vis de l'état de l'art

Nous avons lu les différentes correspondances à propos du vide et de la pesanteur de l'air sous le prisme de la recherche en didactique, qui nous dévoile les difficultés rencontrées et raisonnements mis en œuvre par les élèves dans les différentes circonstances où ils font face à des phénomènes liés à la pression.

Ces différentes difficultés résonnent parfois avec celles rencontrées par les savant·e·s du XVIIe siècle, comme nous avons pu le constater au cours de nos lectures. Convaincus, comme Monk et Osborne (1997), qu'une exploitation de ce parallèle dans l'enseignement doit aider les élèves à développer une meilleure compréhension conceptuelle, nous avons choisi de sélectionner pour notre *corpus* des extraits dans lesquels ces raisonnements partagés par les élèves contemporain·e·s et les savant·e·s du XVIIe siècle sont clairement mis en œuvre. Ainsi nous avons pris soin de constituer un *corpus* comportant des traces apparentes de raisonnements

finalistes, et de raisonnements locaux amenant à attribuer une force de succion au vide. Outre l'intérêt motivationnel de voir les élèves s'identifier à l'un-e ou l'autre des savant-e-s mettant en œuvre ce type de raisonnement et défendant la résistance du vide, nous percevons des intérêts didactiques à exposer aussi les démarches mises en œuvre par d'autres savant-e-s pour contrer et discréditer de tels arguments. En effet, un objectif d'enseignement en classe de première, sur la base de ce *corpus*, pourrait être d'amener les élèves à mettre en œuvre des raisonnements valides face aux situations impliquant un fluide au repos.

En cela le dispositif expérimental composé d'une tube plein de liquide et retourné dans une cuve, autour duquel se sont cristallisées les discussions de nombreux savants au milieu du XVIIe siècle, se présente comme une source de réflexion particulièrement intéressante. Ainsi nous avons articulé notre *corpus* autour de la rhétorique développée par les savants du XVIIe siècle pour expliquer la suspension du liquide dans le dispositif torricellicien.

Par ailleurs certains raisonnements, invalides au demeurant, mis en œuvre par des savants du XVIIe siècle ne trouvent absolument pas d'écho chez les élèves contemporain-e-s, et ne correspondent à aucune difficulté sur laquelle la littérature aurait mis le jour. Nous pensons en particulier aux théories substantialistes à base d'air subtil ou d'éther, ou encore à la théorie cartésienne du mouvement circulaire dans le plein. Afin de ne pas complexifier le discours nous avons choisi d'éliminer de notre *corpus* tous les éléments faisant référence à ce type de raisonnement.

Ainsi notre *corpus* est un ensemble d'extraits épistolaires retraçant une partie du débat autour de la suspension du liquide dans le dispositif de Torricelli, se concentrant exclusivement sur le traitement des deux hypothèses suivantes :

1. la cause de la suspension du liquide est externe : il faut attribuer cet effet à la pesanteur de l'air atmosphérique ;
2. la cause de la suspension du liquide est interne : il faut attribuer cet effet à la résistance du vide.

De façon générale enfin, et en particulier dans l'affinement de la sélection d'extraits, nous avons toujours porté un regard critique aux différentes idées que nous choissions ou non de faire apparaître dans le *corpus* selon qu'elles nous semblaient pertinentes ou non au regard des résultats de la recherche en didactique. Une analyse plus fine de ces différents éléments sera effectuée dans le chapitre suivant.

3.2.3 Inscription dans la NoS

Comme nous l'avons évoqué, nous nous fixons comme objectif de proposer une ressource qui pourrait être exploitée non pas seulement à des fins conceptuelles, mais qui contribuerait notamment à améliorer l'image que les élèves ont de la nature de la science. Dans cette perspective

nous inscrivons notre travail dans le courant de la NoS qui met au premier plan les questions d'ordre épistémologique dans l'enseignement des sciences. Au cours de notre travail de sélection d'extraits pour constituer notre *corpus*, nous avons pris soin de conserver un maximum d'éléments illustrant l'une ou l'autre des neuf dimensions de la NoS identifiées par Maurines et al. (2013) :

- **visées et caractéristiques** générales de la science ;
- **objets** d'étude ;
- **ressources** disponibles pour l'étude ;
- **produits** de l'étude ;
- processus d'**élaboration** des produits ;
- **attitudes** permettant l'étude ;
- rôle de la **communauté** scientifique et interactions en son sein ;
- interactions entre science et **société** ;
- dimension temporelle (**temps**) de l'élaboration de la connaissance scientifique.

Nous expliciterons à la fin de ce chapitre lesquelles de ces dimensions trouvent finalement une place dans notre *corpus* et surtout, de quelle façon est-ce que cela se traduit : les différents items s'en verront ainsi clarifiés.

3.2.4 Cohérence et historicité du corpus

L'ensemble des extraits de lettres qui composent notre *corpus* répond à un double objectif de cohérence :

- une cohérence temporelle des faits relatés :
les différents extraits sont présentés dans un ordre qui correspond à la chronologie des faits qui y sont rapportés. Cette chronologie factuelle ne correspond d'ailleurs pas nécessairement à la chronologie des courriers, certains ayant été écrits longtemps après les évènements auxquels ils font référence. Quand c'est le cas, une précision est apportée en italique dans le *corpus* pour préciser la date à laquelle renvoient les évènements décrits, sans toutefois évoquer les raisons du décalage entre l'évènement et sa relation dans la mesure où celles-ci nous échappent ;
- une cohérence argumentative :
les différents extraits ont été choisis et organisés afin de constituer une histoire auto-cohérente, c'est-à-dire qui peut se lire dans l'ordre comme une discussion collective à laquelle chacun apporte un (ou plusieurs) élément(s) répondant aux extraits précédents. Ce vaste échange de nature polémique se présente comme un sous-ensemble d'extraits

initial qui pose le problème et les hypothèses pour le solutionner (extraits A, B et C), suivi d'un second sous-ensemble d'extraits, plus long, qui correspond à la phase de résolution (extraits D à I).

Cette double cohérence n'est pas feinte dans la mesure où elle met en jeu des auteurs (tous des hommes) et des événements qui ont réellement été corrélés selon la chronologie que nous avons préservée.

Dans un souci d'authenticité, et motivés par les potentialités épistémologiques des lettres parmi lesquelles il nous a fallu choisir, nous avons retenu un nombre relativement important d'extraits, impliquant des auteurs nombreux de toutes origines, et mettant en jeu des arguments variés pour rendre compte au mieux, d'une part de la difficulté qu'a représenté l'acceptation de l'hypothèse de la pesanteur de l'air comme explication à la suspension du liquide dans le dispositif de Torricelli, et d'autre part de l'étendue du réseau dans lequel ces savoirs ont circulé.

Ainsi constitué notre *corpus* montre une science qui avance grâce aux échanges entre les savants, et dont la dimension épistolaire semble quasiment autonome vis-à-vis de toute autre forme de diffusion du savoir scientifique. Voici là une des limites de l'historicité de notre *corpus* ; par le travail de sélection et donc de non exhaustivité, nous reconstruisons une histoire isolée de toute autre problématique, dans laquelle les enjeux sont partiellement passés sous silence, où les intentions des savant·e·s sont laissées à l'implicite et donc probablement à l'interprétation erronée du lecteur ou de la lectrice, et où la paternité d'une idée peut abusivement être attribuée à un des savants mis en scène dans notre *corpus* au détriment du (ou des) réel(s) initiateur(s). Ces biais, qui s'ils n'avaient pas été ceux-ci auraient existé quand même, mais peut-être sous une autre forme, sont des maux nécessaires à tout travail de reconstruction didactique. Quitte à prendre quelques libertés, nous avons pris soin qu'elles soient plutôt de l'ordre de l'omission que de la transformation volontaire de la réalité.

3.3 Choix généraux de forme : retravail des extraits retenus

De façon générale les lettres échangées entre les savant·e·s étaient longues ; beaucoup trop longues pour que nous les conservions en entier dans notre *corpus* qui, rappelons le, doit être raisonnablement proposable à des enseignant·e·s. Une fois les courriers choisis, nous avons donc retravaillé chacun des extraits afin de les réduire au maximum tout en s'assurant d'en conserver l'esprit, le sens et les divers éléments dignes d'intérêt. Nous avons aussi pris quelques libertés en ajoutant, retirant, modifiant ponctuellement certaines expressions quand la clarté du récit nous paraissait s'en voir améliorée sans toutefois porter atteinte à son authenticité.

3.3.1 Éléments de nature scientifique

3.3.1.1 Désignations du mercure

Pour désigner le liquide contenu dans le dispositif torricellicien nous avons trouvé dans les sources primaires et leurs traductions le terme « mercure », son ancienne dénomination « vif-argent » (« argento vivo » en italien, « quicksilver » en anglais) parfois réduite à « argent », ainsi que le mot générique « métal ». Par soucis d'uniformisation et afin d'éviter d'éventuelles confusions chez les enseignant·e·s nous avons choisi de toujours désigner le liquide par l'expression « vif-argent », et ce même si ce n'était pas l'expression initialement employée dans l'extrait (auquel cas nous l'avons mise en italique). Ce choix se justifie par le fait que c'est cette expression que nous avons rencontrée le plus fréquemment, et qui devait donc être majoritairement en usage à cette époque. Notre choix permet ainsi de faciliter la lecture et l'appropriation de notre *corpus* sans porter atteinte à cet aspect culturel dont pourront se saisir les enseignant·e·s, à savoir la dénomination des éléments chimiques avant l'établissement d'une nomenclature officielle à la fin du XVIII^e siècle. Pour favoriser cette réflexion nous avons ajouté des précisions à ce propos en note de bas de page dans le premier extrait où l'expression « vif-argent » apparaît.

3.3.1.2 Unités de longueur

Selon l'origine des auteurs, les unités utilisées pour rendre compte de la hauteur de suspension du liquide dans le tube diffèrent d'un extrait à l'autre. Pour un lecteur non initié cette multiplicité rime surtout avec complexité ; d'autant qu'une même unité, par exemple la *brasse*, ne désigne pas la même longueur d'une région à l'autre. La soumission du *corpus* à des enseignant·e·s non spécialistes doit donc nécessairement être accompagnée d'un minimum d'indications permettant de convertir les longueurs dans le système international d'unité. Pour faciliter au maximum l'appropriation de notre *corpus* par les enseignant·e·s nous avons fait le choix de donner directement et explicitement la conversion dans un multiple du mètre de toutes les longueurs qui apparaissent dans les extraits. Pour autant il nous a semblé indispensable de laisser en évidence la variabilité des unités en usage à une même époque et dans des zones géographiquement proches puisqu'il s'agit là d'une caractéristique culturelle digne d'intérêt, ouvrant la voie à une réflexion autour des systèmes métriques, du système international d'unité etc. Nous avons ainsi opté pour un maintien des longueurs telles qu'elles sont exprimées dans les sources que nous avons retenues, immédiatement suivies de leur conversion en un multiple du mètre entre parenthèses et en italique. Voici les différentes interprétations que nous avons faites des unités rencontrées dans notre *corpus* :

3.3.1.3 Description des expériences

De façon générale nous avons très peu conservé les différents éléments associés à la description des expériences. En effet, en plus de s'étendre sur plusieurs lignes voire plusieurs pages, elles sont assez compliquées et techniques, à l'image de l'ingéniosité dont les savant·e·s

| Unité | Conversion dans le système international d'unités |
|---|---|
| Ligne (Chez Pascal et Périer : « ligne » du système officiel du Moyen - Âge) | 1 ligne = 0,226 cm |
| Pouce (12 lignes du système officiel du Moyen - Âge) | 1 pouce = 2,71 cm |
| Doigt (« dito » chez Torricelli, « digit » chez Boyle) | 1 doigt = 2 cm |
| Pied (« piede » chez Galilée et Baliani) | 1 pied = 29,5 cm |
| Brasse (« braccio(s) / braccia (p) » chez Torricelli et Magiotti : « brasse de Toscane ») | 1 brasse = 58,32 cm |
| Toise (884 lignes du système officiel du Moyen - Âge) | 1 toise = 1,95 m |
| Mille (« milo » chez Torricelli) | 1 mille = 1609 m |

TABLE 5.2 – Conversions des unités de longueur

qui ont pensé ces expériences ont dû faire preuve. Dignes d'intérêt en soi, elles se révèlent toutefois trop éloignées de nos objectifs pour participer au *corpus* que nous proposons.

3.3.2 Éléments de langage

3.3.2.1 *Vocabulaire*

Dans les différents récits d'expériences que comportent les extraits que nous avons retenus, plusieurs termes sont employés pour désigner les différents récipients utilisés : cuve, cuvette, vase, vaisseau. Cette diversité des appellations, renvoyant parfois à des objets semblables, et la désuétude de certaines sont autant de difficultés que le lecteur ou la lectrice doit surmonter pour comprendre les dispositifs et les observations effectuées avec. Cette richesse du vocabulaire ne nous semblant présenter aucun intérêt ici, nous avons pris la liberté de simplifier les descriptions en réduisant les usages à deux mots : la « cuve » désigne pour nous le réceptacle ouvert dans lequel le liquide se déverse et le « vase » renvoie à un récipient fermé ou une partie de celui-ci. Chaque fois que nous avons substitué un terme par « cuve » ou « vase » nous avons utilisé la mise en forme italique afin de signifier l'écart au texte original.

De la même façon à une occasion il nous a paru judicieux de substituer le mot « canal » par le mot « tube » (alors écrit en italique), puisque les deux expressions étaient synonymes dans ce contexte, mais que la seconde est désormais plus commune et moins sujette à des pro-

blèmes de compréhension.

De façon plus générale, en tronquant des morceaux de lettres quelques aménagements étaient alors nécessaires pour assurer malgré tout la fluidité de la lecture, la cohérence grammaticale et l'intelligibilité du contenu. Chaque fois que nous avons du prendre des libertés pour ces raisons, nous nous sommes assurée que nos modifications collaient au plus près au texte original, et nous avons signifié cet écart par la mise en italique des termes modifiés et la mise entre crochets des termes ajoutés.

3.3.2.2 Orthographe

Quand il en existe, les traductions que nous avons pu trouver des différentes lettres sont assez inégales. Certaines ont eu cours à une période à laquelle la langue française ne s'écrivait pas comme elle s'écrit désormais, et les courriers sont alors jalonnés de ce qu'on aurait maintenant tendance à appeler « fautes ». Il n'est pourtant pas question d'erreurs, mais au contraire d'une spécificité culturelle, l'orthographe ayant une histoire dont il pourrait être l'occasion de discuter. Ainsi au premier abord nous étions tentée de constituer un *corpus* conservant toutes ces spécificités graphiques, pour plus d'authenticité et pour laisser le choix aux enseignant·e·s de mettre en avant, ou non, l'évolution de l'écriture de la langue française au moment d'utiliser notre corpus.

Toutefois deux raisons principales ont eu raison d'un tel choix :

- le manque de cohérence qu'il y aurait eu entre nos différents extraits, certains ayant été trouvés traduits ou retranscrits dans un français contemporain, et d'autres traduits par nos soins, il aurait fallu y ajouter des « fautes » artificiellement pour qu'ils ressemblent à ceux authentiquement traduits il y a longtemps, ce dont il n'était évidemment pas question ;
- le doute quant aux risques que peut engendrer pour les élèves une exposition à des textes pleins de « fautes » ; les questions de didactique de l'orthographe sont très éloignées de notre problématique, mais nous avons une conscience assez aiguë des difficultés que recouvre pour les élèves l'écriture de la langue française.

Quitte à uniformiser l'orthographe de nos extraits, le choix le plus pertinent et le plus raisonnable à tout point de vue est donc selon nous de retranscrire tous les extraits en français contemporain ; ou en d'autres termes à proposer un *corpus* « sans faute ».

3.3.2.3 Formes de politesse

Dans le travail de raccourcissement des différents extraits s'est posée la question de conserver ou non les différentes formules de politesse qui s'étendent parfois sur de longues

lignes et n'apportent *a priori* aucune information. S'il est vrai qu'en terme de contenu scientifique elles sont d'une utilité nulle, il nous a paru qu'en conserver des traces suffisamment conséquentes n'était toutefois pas dénué d'intérêt, et ce pour deux raisons :

- la première est que, sans ces formules, nos extraits se retrouvent considérablement déshumanisés. Or c'est justement la vie de ces écrits qui les distingue au premier abord d'un simple essai scientifique et qui est supposée rendre leur usage motivant pour des élèves.
- la seconde est que la nature très révérencieuse des relations entre les différents savants est assez intrigante. D'abord car les formules sont désuètes et paraissent exagérées : « Votre très humble et très obéissant serviteur ». Ensuite parce que cette révérence est toujours parfaitement réciproque, quelle que soit la notoriété et le statut des savants en relation. Enfin parce que malgré cette politesse de forme la teneur des écrits est parfois d'une condescendance tout aussi excessive ; les extraits que nous avons choisis ne s'en font toutefois pas témoins. Il nous semble que les conventions en matière d'échanges professionnels et en particulier dans le monde scientifique ont évolué ; c'est pour cette raison que nous avons choisi de laisser dans notre *corpus* quelques traces de ce qui pourrait être une spécificité culturelle de cette époque.

3.3.3 Notes de bas de page

Au fil du *corpus* des notes de bas de page sont disséminées pour apporter des précisions lorsque nous estimions qu'elles pourraient être un apport profitable à la prise en main du *corpus* et à l'émergence de réflexions utiles :

- informations biographiques, très courtes, essentiellement temporelles (dates de vie et de mort) et géographiques (nationalité et lieu de résidence des différents acteurs) pour situer la communauté savante mise en scène dans ce *corpus*, complétées à l'occasion par quelques éléments de contextualisation ;
- précisions quant à la manière dont les connaissances ont circulé, lorsque la cohérence entre des extraits consécutifs n'était pas explicite ;
- explicitations d'une part du sens lorsque le vocabulaire pouvait tromper ou être sujet à interprétations, d'autre part des enjeux quand il nous semblait indispensable qu'ils soient bien compris par le lecteur.

4 Présentation du *corpus* de correspondances sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air au XVII^e siècle

Contexte scientifique des correspondances

En 1638 Galilée publie son fameux *Discours concernant deux sciences nouvelles*. La nouveauté des deux sciences en question réside dans le fait qu'elles sont fondées sur la technique. En particulier un problème technique bien connu et bien documenté à l'époque se trouve transformé en un problème scientifique : il s'agit de la limite d'aspiration de l'eau dans les pompes. En effet, si le phénomène d'aspiration qui assure le fonctionnement des pompes était attribué à l'horreur du vide jusqu'au début du XVII^e siècle, aucune explication scientifique satisfaisante n'avait jusqu'alors été avancée pour justifier la limite inexorable que rencontrent toutes les pompes pour faire monter de l'eau au delà d'une dizaine de mètres de hauteur. Tandis que les ingénieurs s'évertuaient à inventer des aménagements pour contourner le problème technique, l'œuvre de Galilée transforme ce dernier en un problème scientifique. Les extraits qui composent ce *corpus* sont les correspondances échangées sur ce sujet par quelques scientifiques, en amont et en aval de la publication du *Discours*.

EXTRAIT A :

Lettre de Galilée¹ à Baliani², 6 août 1630

Je suis très reconnaissant à votre très illustre Seigneurie pour sa très gracieuse lettre, voyant en elle la continuation de votre affection à mon égard. Je suis vraiment désolé que vous ne m'ayez pas demandé mon avis sur le résultat [*de l'expérience*] du siphon³ avant que la dépense ne soit faite, car j'aurais pu vous l'épargner.

On peut faire monter l'eau à travers un *tube* ou un siphon par attraction ou par impulsion. En la soulevant par attraction, il y a une certaine hauteur du *tube* au-delà *de laquelle* il est impossible de faire monter l'eau d'un doigt, ou même d'un cheveu ; et cette hauteur me semble être d'environ 40 pieds [12 m], et je crois même moins. La cause de cet effet m'a beaucoup troublé avant que je ne l'étudie, mais j'ai finalement compris qu'elle était tout à fait manifeste ; il en va ainsi des vraies causes après qu'on les a trouvées.

Si les cordes de chanvre et d'acier se cassent quand elles doivent supporter plus de poids, quel doute devons-nous avoir sur le fait qu'on ne puisse également déchirer une corde d'eau ? Au contraire, elle se déchirera d'autant plus facilement que les parties de l'eau qui se séparent l'une de l'autre n'ont pas d'autre résistance à surmonter que celle du vide qui succède à la division.

EXTRAIT B :

Réponse de Baliani à Galilée, 26 octobre 1630

Je ne suis pas de l'opinion vulgaire⁴ suivant laquelle il n'y a pas de vide et, pour tout dire, j'ai commencé de croire que le vide était naturellement possible dans le même temps que j'ai reconnu à l'air un poids sensible. Je crois son immensité si grande qu'en dépit de la faiblesse de son poids spécifique, si l'on sentait la charge de tout l'air qu'on porte au-dessus de soi, on éprouverait un très grand poids. Au moyen d'une force proportionnée à ce poids, on pourrait le surmonter et produire le vide. Je juge que cette valeur est telle que l'on pourrait produire le vide avec une *force* égale à celle que peut produire l'eau dans un *tube* dont la longueur ne dépasse pas 40 pieds [12 m].

1. Galileo Galilei (1564-1642) - savant italien, résidant à Florence durant toute la période balayée par notre corpus. Ses thèses trop ouvertement opposées à la philosophie scolastique lui vaudront une condamnation en 1633, peu de temps après la publication de son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* en 1632. Ses théories sur la résistance du vide ménagent quant à elles beaucoup plus les enseignements de l'École, et seront publiées en 1638 dans un ultime ouvrage plus consensuel : le *Discours concernant deux sciences nouvelles*.

2. Giovanni Battista Baliani (1582-1666) - savant italien, résidant à Gênes.

3. Tube (servant à transvaser du liquide d'un récipient à un autre).

4. Le terme « vulgaire » n'a ici rien de péjoratif, mais qualifie une thèse largement répandue.

EXTRAIT C :

Lettre de Magiotti¹ à Mersenne², 12 mars 1648

(récit d'une expérience de 1640-41)

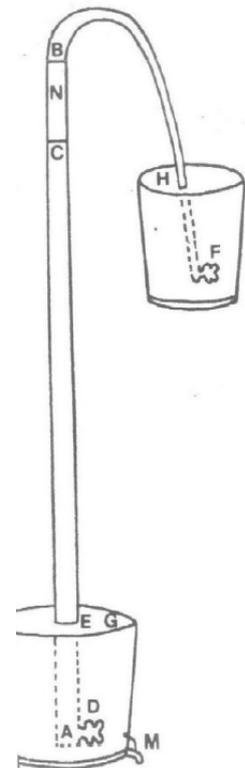
Je devais et souhaitais répondre avec plus de soins à la très aimable lettre de Votre Révérence, mais l'accident arrivé subitement m'oblige à écrire en toute hâte et en italien ces quelques lignes fort décousues.

Mr Gaspard Berti³, ici à Rome, a construit un siphon en plomb d'environ 22 brasses [13 m] qui reliait la cour [de sa maison] aux chambres. On fermait le robinet D et on remplissait tout le siphon et la cuve AG. Enfin, gardant pleine la cuve HF et fermé le robinet F, et de même pleine la cuve AG et ouvert D, l'eau commençait à descendre dans le siphon ; elle descendait jusqu'à N et elle s'arrêtait. Et chaque fois, en refaisant l'essai, on obtenait la même position d'équilibre et on pouvait très bien observer, car le morceau BC de siphon était en verre spécial et parfaitement collé et soudé.

Par cette expérience, Mr Berti pensait convaincre Mr Galilée⁴, en affirmant que de N à A il y avait plus de 18 brasses [10,5 m], mais il aurait dû voir que la partie AE du siphon n'entre pas en ligne de compte, car elle est plongée dans l'eau de la cuve AG et que la longueur EN était exactement de 18 brasses [10,5 m].

J'ai fait part de cette expérience à Mr Torricelli, pensant que si l'on avait employé de l'eau de mer, donc plus lourde, elle ne se serait pas arrêtée en N, mais plus bas.

Je prie Dieu de vous accorder tout bien.



1. Raffaello Magiotti (1597-1656) - savant et religieux italien ; résidant à Rome, il a assisté aux expériences (dont une seule est relatée ici) réalisées par Berti autour des années 1640.

2. Marin Mersenne (1588-1648) - savant et religieux français ; il entretient une correspondance très active avec les savants de toute l'Europe, et fait de nombreux voyages pour s'informer des nouvelles avancées de la science, et présenter celles dont il a connaissance.

3. Gasparo Berti (~1600-1643) - savant italien résidant principalement à Rome.

4. Berti eu probablement connaissance des hypothèses de Galilée à travers le *Discours concernant deux sciences nouvelles*, dernière œuvre fameuse du savant florentin, qui paraît et est diffusée à Rome en 1638. Berti nourrissait l'espoir de montrer expérimentalement la possibilité de créer par déversement une colonne d'eau qui se tient suspendue sur une hauteur supérieure à la limite indépassable de 18 brasses prévue par Galilée. L'échec de sa démonstration confirme l'existence d'une limite à la suspension de l'eau dans le tuyau ; les hypothèses de Galilée et de Baliani sont deux explications concurrentes possibles que les savants vont ensuite chercher à départager.

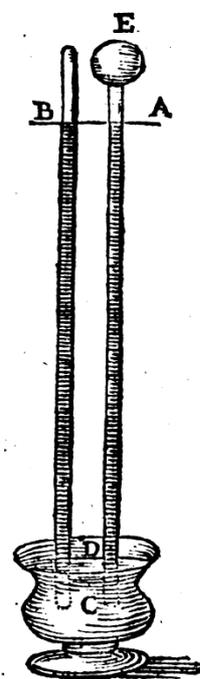
EXTRAIT D :

Lettre de Torricelli¹ à Ricci², 11 juin 1644

Nous avons fabriqué beaucoup de vases en verre et aussi de gros tuyaux comme les suivants désignés A et B longs de deux brasses [1,20 m]. Ceux-ci furent remplis de vif-argent³, puis si l'on bouchait l'orifice avec un doigt et qu'on les renversait dans *une cuve* où il y avait le vif-argent C, on les voyait se vider ; le *tube* AD pourtant restait toujours plein à la hauteur d'une brasses un quart et un doigt [74,9 cm].

Cette force qui retient ce vif-argent contre sa nature qu'il a de descendre, on a cru jusqu'à présent qu'elle était intérieure au vase AE ou qu'elle venait du vide. Mais je prétends que la force vient de l'extérieur : *sur* la superficie du liquide qui est dans la cuve l'air pèse d'une hauteur de cinquante milles [800 km].

Ce raisonnement se confirmait par l'expérience faite au même temps avec le vase A et avec le tuyau B dans lesquels le vif-argent s'arrêtait toujours au même niveau AB signe presque certain que la vertu n'était pas à l'intérieur ; car le vase AE aurait eu plus de force, ce vase où il y avait plus de substance raréfiée et attirante que *dans* le petit espace B.



1. Evangelista Torricelli (1608-1647) - savant italien, résidant initialement à Rome, il rejoint Galilée à Florence en 1641 et assiste le vieux savant dans ses derniers mois. Torricelli demeure ensuite à Florence jusqu'à sa propre mort.

2. Michelangelo Ricci (1619-1682) - savant et religieux italien, résidant à Rome il avait lui aussi assisté aux expériences de Berti, et correspond beaucoup avec Torricelli et son assistant Vincenzo Viviani.

3. Le vif-argent est l'ancienne appellation du mercure liquide (13,6 fois plus dense que l'eau) ; les deux appellations mercure et vif-argent étaient indifféremment utilisées au XVIIe siècle, jusqu'à ce que la première ne soit retenue définitivement pour désigner officiellement l'élément et ses différentes formes à la fin du XVIIIe siècle, à l'occasion de la normalisation de la nomenclature chimique.

EXTRAIT E :

Réponse de Ricci à Torricelli, 18 juin 1644

J'admire la noble bravoure de Votre Seigneurie d'avoir pris en considération quelque chose qui n'a été vu par personne jusqu'alors et qui est tellement probable qu'hormis deux objections que je prie Votre Seigneurie de bien vouloir résoudre, je considère que c'est ce qu'il y a de plus vrai et de plus raisonnable que l'on puisse dire dans une telle affaire.

Il me semble tout d'abord que nous pouvons exclure l'action de l'air pesant sur la surface extérieure du *vif-argent* qui se trouve dans *la cuve* en plaçant un couvercle de sorte que l'air au-dessus *de la cuve* ne communiquerait plus avec lui ; l'air pèserait alors non plus sur la surface du *vif-argent*, mais sur le couvercle, et le *vif-argent* se maintenant suspendu comme auparavant, on ne peut plus attribuer l'effet au poids de l'air. Deuxièmement, qu'on prenne une seringue et que son piston y soit entièrement enfoncé, de sorte qu'il chasse tous les autres corps par son volume, puis bouchons le trou à l'extrémité, et retirons de force le piston, on ressent une grande résistance, et cela ne se produit pas seulement en tenant la seringue vers le bas, et le piston en haut, sur la poignée duquel l'air pèse, mais cela se produit dans toutes les directions ; et pourtant, il ne semble pas qu'on puisse facilement comprendre dans ces cas en quoi le poids de l'air y est pour quelque chose.

C'est ce que ma folie m'a administré en opposition au bon sens de Votre Seigneurie, qui devra excuser le désir que j'ai de comprendre parfaitement la solution des objections que j'oppose, afin d'en être ensuite un défenseur absolu.

EXTRAIT F :

Lettre de Du Verdus¹ à Mersenne, fin juillet 1644
(contenant la réponse de Torricelli à Ricci, datant du 28 juin 1644)

Au Révérend Père Mersenne, religieux et minime de la place Royale.

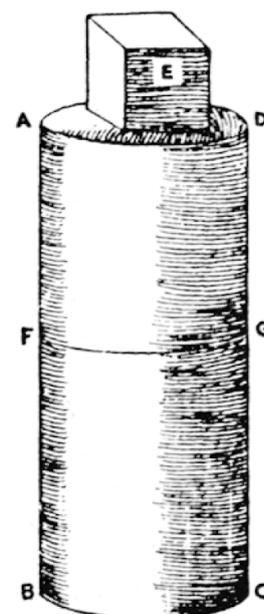
Extrait d'une lettre du Sieur Torricelli

Je tiens pour superflu de répondre à vos objections, parce que j'espère que les solutions vous seront apparues depuis l'écriture de la lettre.

Quant à la première je réponds que si Votre Seigneurie suppose que le couvercle prend encore de l'air à l'intérieur, je demande si Votre Seigneurie veut que cet air renfermé à l'intérieur possède le même degré de condensation que l'air extérieur et en ce cas, le vif-argent se maintiendra comme auparavant (par l'exemple que je donnerai maintenant avec de la laine); mais si l'air que Votre Seigneurie suppose est plus raréfié qu'à l'extérieur, aussitôt le *vif-argent* soulevé descendra un peu.

Le vase ABCD est un cylindre plein de laine ou de toute autre matière compressible (disons de l'air) et ce vase possède deux fonds : BC stable et AD mobile et s'adaptant; et soit AD chargé sur le dessus du plomb E qui pèse 10 000 000 livres. Maintenant, si nous enfonçons de force un plan coupant, FG, qui puisse entrer et couper la laine comprimée, je dis que si la laine FBCG était comprimée comme précédemment, quoique le fond BC ne sente plus rien du poids imposé par le plomb E, de toute façon il supportera le même poids qu'il supportait auparavant.

J'assure Votre Seigneurie que je ne serai pas plus long à l'ennuyer.



1. François du Verdus - savant français résidant à Rome au moment des faits relatés; il a probablement copié les extraits de la correspondance chez son ami Ricci et les a fait parvenir au Père Mersenne en les envoyant à un de ses disciples, le père Jean-François Nicéron, assurant ainsi la diffusion en France des « expériences d'Italie »

EXTRAIT G :

Lettre de Pascal¹ à Périer², 15 novembre 1647

Monsieur,

Je n'interromprais pas le travail continuel, où vos emplois vous engagent, pour vous entretenir de méditations physiques, si je ne savais que vous en aurez du divertissement.

Parce que tous les effets de cette dernière expérience des deux tuyaux³ peuvent encore être expliqués assez probablement par l'horreur du vide, je me tiens dans cette ancienne maxime, résolu néanmoins de chercher l'éclaircissement entier de cette difficulté par une expérience décisive. J'en ai imaginé une qui pourra seule suffire pour nous donner la lumière que nous cherchons. C'est de faire l'expérience ordinaire du vide plusieurs fois en même jour, dans un même tuyau avec le même vif-argent, tantôt au bas et tantôt au sommet d'une montagne, élevée pour le moins de cinq ou six cents toises [*environ 1000 m*].

Mais comme la difficulté se trouve d'ordinaire jointe aux grandes choses, j'en vois beaucoup dans l'exécution de ce dessein, puisqu'il faut pour cela choisir une montagne excessivement haute, proche d'une ville dans laquelle se trouve une personne capable d'apporter à cette épreuve toute l'exactitude nécessaire. J'ai beaucoup estimé mon bonheur d'avoir, en cette occasion, rencontrée l'un et l'autre, puisque notre ville de Clermont est au pied de la haute montagne du Puy-de-Dôme, et que j'espère de votre bonté que vous m'accorderez la grâce d'y vouloir faire vous-même cette expérience.

Je vous prie seulement que ce soit le plus tôt qu'il vous sera possible.

Votre très humble et très obéissant serviteur

Pascal

1. Blaise Pascal (1623-1662) - savant français, résidant à Rouen au moment des événements relatés ici.

2. Florin Périer (1605-1672) - beau-frère de Blaise Pascal, résidant à Clermont-Ferrand.

3. Expérience de Torricelli, dont Pascal dit avoir eu vent par l'intermédiaire de Pierre Petit, qui lui-même se l'était vu rapportée par le Père Mersenne.

EXTRAIT H :

Réponse de Périer à Pascal, 22 septembre 1648

Monsieur,

Enfin j'ai fait l'expérience que vous avez si longtemps souhaitée. Je vous aurais plus tôt donné cette satisfaction *mais* je n'ai pu joindre ma commodité avec celle de la saison, avant le 19 de ce mois. Je vous en donne ici une ample et fidèle relation, où vous verrez la précision et les soins que j'y ai apportés, auxquels j'ai estimé à propos de joindre encore la présence de personnes aussi savantes qu'irréprochables, afin que la sincérité de leur témoignage ne laissât aucun doute de la certitude de l'expérience.

Nous fûmes donc ce jour-là tous ensemble sur les huit heures du matin dans le jardin des Pères Minimes, qui est presque le plus bas lieu de la ville. Premièrement, je fis l'expérience ordinaire et il se trouva que le vif-argent qui était resté *dans le tuyau* était au-dessus de la superficie de celui *de la cuve* à vingt-six pouces trois lignes et demie [71,2 cm].

Cela fait, je fus, avec tous ces Messieurs, faire les mêmes expériences au haut du Puy-de-Dôme, élevé au dessus des Minimes environ de 500 toises [975 m], où il se trouva qu'il ne resta plus dans le tuyau que la hauteur de vingt-trois pouces deux lignes [62,7 cm] de vif-argent : ce qui nous ravit tous d'admiration et d'étonnement, et nous surprit de telle sorte, que, pour notre satisfaction propre, nous voulûmes la répéter. C'est pourquoi je la fis encore cinq autre fois très exactement, en divers endroits du sommet de la montagne, tantôt à couvert dans la petite chapelle qui y est, tantôt à découvert ; il s'est toujours trouvé la même hauteur de vif-argent de 23 pouces 2 lignes.

Après, en descendant la montagne, je refis en chemin la même expérience en un lieu appelé Lafon de l'arbre, beaucoup au-dessus des Minimes, mais beaucoup plus au-dessous du sommet de la montagne ; et là je trouvai que la hauteur du vif-argent resté dans le tuyau était de 25 pouces [67,7 cm].

Voilà au vrai tout ce qui s'est passé dans cette expérience.

Si vous trouvez quelques obscurités dans ce récit, je pourrai vous en éclaircir de vive voix dans peu de jours, étant sur le point de faire un petit voyage à Paris, où je vous assurerai que je suis,

Monsieur,

Votre très humble et très affectionné serviteur,
Périer

EXTRAIT I :

Lettre de Boyle¹ à son neveu, vicomte de Dungarvan², 20 décembre 1659

Mon cher Vicomte

Ayant perçu par lettres de la part d'autres ingénieuses personnes de Paris, que plusieurs de cette virtuosité avaient l'intention d'examiner l'intérêt porté à l'air dans la célèbre expérience concernant le vide, j'ai pensé que je ne pouvais me plier à vos désirs de façon plus appropriée et opportune qu'en poursuivant et en tentant de promouvoir cette noble expérience de Torricelli.

J'ai demandé à Mr.G. ainsi qu'à R.Hook de fabriquer une pompe à air. Pour donner à votre Seigneurie, dans un premier temps, une idée des deux principales parties : un *réceptacle* de verre et une pompe pour en extraire l'air.

Dans l'expérience du *vide*, le vif-argent dans le tube a l'habitude de rester élevé, au-dessus de la surface au dessus de laquelle il s'appuie, à environ 27 *pouces* [73 *cm*]. J'ai pensé que si l'expérience pouvait être tentée en dehors de l'atmosphère, le vif-argent dans le tube retomberait au niveau de celui dans *la cuve*. Ainsi l'expérience fut réalisée : le tube étant bouché par un doigt et renversé fut ouvert, comme dans l'expérience à l'intérieur de *la cuve*. *La cuve* et le tube furent précautionneusement insérés dans le réceptacle au moyen de ficelles : et le couvercle fut glissé et soigneusement fermé. A la suite de cette fermeture il semblerait qu'il n'y ait pas de changement dans la hauteur du cylindre de *vif-argent* qui apparaît *élevé au dessus de la surface* plutôt en vertu de son ressort que de son poids.

Toute chose étant ainsi prête, l'aspiration fut déclenchée : et, immédiatement après l'évacuation d'un cylindre d'air en dehors du réceptacle le vif-argent dans le tube s'abaissa, conformément aux attentes. Nous tournons maintenant la clé et laissons entrer de l'air ; sur ce le *vif-argent* commence immédiatement à monter (ou plutôt à être poussé vers le haut) dans le tube.

L'expérience fut répétée plusieurs jours après, en présence de ces excellents professeurs de mathématiques, célèbres à juste titre, Dr Wallis, Dr Ward et Mr Wren, qui furent ravis d'honorer l'expérience de leur présence ; et que je nomme fièrement comme témoins avertis et illustres de notre expérience.

Sa seigneurie,

Très obéissant serviteur et très affectueux oncle,

Robert Boyle

1. Robert Boyle (1627-1691) - savant irlandais, résidant à Oxford.

2. Charles Boyle (1639-1694)

Références du *corpus*

Extrait A

G. Galileo, « Lettera a Giambattista Baliani » (1630), *Epistolario di Galileo Galilei*, Vol.2 (1872), p. 54-59, Livourne : Coi tipi di Franc. Vigo (éd.).

Disponible à l'adresse :

https://archive.org/details/bub_gb_Rq1XUXu2b94C/page/n1/mode/2up

Extrait B

L. Rougier, « Précurseurs et émules de Torricelli », dans *De Torricelli à Pascal*, Kimé (éd.) « *Philosophia Scientiae* », 2010, p. 70.

Disponible à l'adresse :

<https://philosophiascientiae.revues.org/179>

Extraits C, D & F

C. De Waard et A. Beaulieu, *Correspondances du P. Marin Mersenne, religieux minime*, Paris : Editions du Centre National de Recherche Scientifique, 1969.

[C] : Tome XVI, p. 168-170.

[D] : Tome XIII, p. 181-182.

[F] : Tome XIII, p.182.

Extrait E

C. R. Dati, *Lettera a Filaleti di Timauro Antiata della vera storia della cicloide, e della famosissima esperienza dell'argento viuo*, Florence, 1663, p. 20-21.

Disponible aux adresses :

https://archive.org/details/bub_gb_eGIV2F17z1QC/mode/2up (impression originale)

<http://www.imss.fi.it/multi/torricel/1e180644.html> (dactylographie)

Extraits G & H

B. Pascal, « Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs », dans *Oeuvres complètes* (1647), Paris : Seuil, 1963, p. 221-224.

Extrait I

R. Boyle, « New Experiments physico-mechanical, touching the spring of the air », p.4 & p.22, dans T. Birch, *Works of the honorable Robert Boyle*, Londres : J.& F. Revington (éd.), 1772.

5 Analyse du *corpus* : éléments exploitables *a priori*

5.1 En réponse à des objectifs motivationnels

Le *corpus* que nous avons constitué, loin de n'être qu'une simple succession d'extraits de lettres, peut se lire comme une véritable aventure. Pour un lecteur qui ne connaît pas encore la science des fluides et qui ne sait donc pas encore laquelle des deux hypothèses (celle de Baliani ou celle de Galilée) fera autorité à la fin, on peut supposer que l'intérêt est particulièrement grand. Au delà de cette curiosité qui pourrait pousser à la lecture du *corpus*, et de l'attractivité que peut présenter la forme du discours, nous entrevoyons trois aspects qui pourraient influencer plus profondément et durablement la motivation des élèves.

5.1.1 Humanisation de la science et des savants

Le *corpus* que nous proposons fait intervenir huit savants qui s'expriment directement (Baliani, Galilée, Magiotti, Torricelli, Ricci, Pascal, Périer et R. Boyle), et donne aussi vie plus ou moins explicitement à des personnalités d'importance capitale dans l'évolution et la circulation des idées (Berti, du Verdur, Nicéron, Mersenne, Petit, Hooke et C. Boyle). Cette quinzaine d'hommes ne représente qu'une partie de toute la communauté qui s'est penchée sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air au XVII^e siècle, mais montre déjà une science vivante et dépeint l'évolution des idées sur ces questions comme une véritable aventure humaine.

Parmi les savants mis en scène dans notre *corpus*, quelques noms sont plus connus que les autres (Galilée et Pascal assurément, Torricelli et R. Boyle certainement dans une moindre mesure), mais ils ne représentent pas la majorité du panel. Cette place importante laissée aux savants anonymes, qu'ils aient « tort » ou « raison » dans les discussions retranscrites dans notre *corpus*, contribue à rendre à la science son caractère humaniste et collaboratif, à contrepied de la tendance observée dans les manuels scolaires consistant à réduire la science et son histoire à l'intervention géniale de quelques personnalités isolées (Maurines & Beaufils, 2011).

Par ailleurs le savant le plus connu intervenant dans notre *corpus*, Galilée, se trouve être ici le défenseur d'une hypothèse qui ne sera finalement pas retenue comme valide. En quelque sorte, il a tort, ce qui le fait descendre du piédestal sur lequel la postérité l'a placé ; le savant divin reprend une forme humaine. Il ne s'agit évidemment pas de nier les qualités de Galilée, mais au contraire de montrer que le génie d'un homme ne le prémunit pas du doute ou de l'erreur.

5.1.2 Statut de l'erreur

A la fin du *corpus* que nous proposons la controverse est comme réglée : les propriétés de la pesanteur de l'air ont été largement éprouvées, mettant à mal l'hypothèse de la résistance du vide pour justifier les limites observées dans les pompes et siphons. Cette avancée scienti-

fique a été permise grâce à la publication initiale de l'hypothèse « malheureuse » par Galilée : « les parties de l'eau qui se séparent l'une de l'autre n'ont pas d'autre résistance à surmonter que celle du vide qui succède à la division » (extrait A). Sans l'expression de cette erreur, il est difficile de savoir quand et comment la notion de pression de l'air puis des liquides aurait émergé, mais il y a fort à parier que le processus aurait été plus lent si la communauté scientifique n'avait pas été si animée autour de ces questions.

On remarque aussi le crédit accordé par Torricelli (extrait F) aux objections de Ricci. Ces dernières (extrait E) montrent la réticence avec laquelle certains savants ont adhéré à l'hypothèse valide, et l'intensité de leur conviction en une hypothèse pourtant fautive. Notre *corpus* met ainsi en évidence qu'il ne suffit pas d'entendre une théorie valide pour la comprendre et y adhérer pleinement. Il montre aussi que les erreurs de certains permettent à d'autres d'affiner leurs théories et argumentaires, à l'instar de Torricelli qui étaye une analogie entre l'air et la laine pour consolider sa thèse de la pesanteur de l'air comme cause de la suspension du mercure dans le tube.

Ces deux places faites à l'erreur dans le *corpus* sont susceptibles de participer à changer le statut de l'erreur, modification salutaire pour les élèves (Astolfi, 1997).

5.1.3 Appui sur des faits concrets

Remarquons que dans le *corpus* que nous avons élaboré, il n'y a aucun calcul et aucune formule mathématique. Au contraire, les discussions qui sont retranscrites reposent entièrement sur des faits concrets et des mesures simples : limite d'aspiration dans un siphon (extrait A), hauteur d'eau (extrait C) ou de mercure (extraits D, F et I) dans un tube, altitude (extrait H). Si les raisons de ces mesures et leurs interprétations ne sont pas triviales, on peut supposer que l'absence de tout formalisme mathématique et l'appui dans le réel sont autant d'atouts pour motiver les élèves s'ils et elles sont confronté·e·s à des extraits de ce *corpus*.

5.2 En réponse à des objectifs épistémologiques

Beaucoup d'objectifs d'apprentissage de nature épistémologique peuvent être définis à partir de ce *corpus* : autrement dit à de nombreux égards la ressource que nous avons élaborée pourrait permettre d'améliorer l'image que les élèves ont de la nature de la science. Nous présentons ces différents éléments selon les neuf dimensions de la NoS identifiés par Maurines et al. (2013) et évoqués à l'occasion de l'explicitation des choix qui ont présidé à l'élaboration de notre *corpus*.

5.2.1 Visées et caractéristiques générales de la science

Les échanges présentés dans notre *corpus* illustrent un des enjeux de la science, et certainement le plus commun d'entre tous : l'enjeu théorique. Il s'agit ici de comprendre un

ensemble de phénomènes qu'il a fallu non seulement identifier comme équivalents mais aussi expliquer de façon cohérente. Les questions de la cohérence et de la globalité des représentations proposées sont d'ailleurs centrales dans le *corpus* stabilisé et prennent notamment la forme d'équivalences entre différentes matières et situations :

- l'équivalence entre aspiration et déversement est d'abord évoquée par Galilée (extrait A), puis exploitée expérimentalement par Berti (extrait C) ;
- l'équivalence entre les différents liquides est suggérée par Magiotti (extrait C) et ensuite exploitée dans toutes les expériences qui ont suivi puisque l'eau y est définitivement remplacée par du mercure ;
- l'équivalence entre l'air et l'eau en ce qui concerne leurs propriétés pesantes et donc pressantes est postulée explicitement par Torricelli (extrait D) ;
- l'équivalence entre l'air et la laine en ce qui concerne leurs propriétés élastiques et donc pressantes est avancée encore par Torricelli (extrait F) ;
- équivalence de l'action de l'air sur la cuve du dispositif torricellien et sur le piston d'une seringue (Ricci, extrait E) ;

5.2.2 Objets d'étude

La majorité des échanges du *corpus* vise à expliquer (au sens de donner des causes) la suspension du liquide dans le dispositif torricellien. Ce n'est pourtant pas le dispositif lui-même qui est l'objet d'étude : il a été conçu pour faire avancer le débat opposant vaccuistes et plenistes. C'est en fait l'air qui constitue le véritable objet d'étude dans la ressource que nous avons élaborée, et notamment ses propriétés pesantes (extrait B, D, E, G), élastiques (extrait F et I), et donc pressantes.

5.2.3 Ressources disponibles pour l'étude

Pour mieux comprendre l'air et ses propriétés, ou continuer à défendre l'hypothèse du vide pour certains savants, un certain nombre de conditions matérielles ont dû être réunies. Notre *corpus* met volontairement en lumière la nécessaire question des ressources dans les progrès scientifiques :

- beaucoup d'outils et instruments ont été construits tout spécialement pour l'étude rapportée dans notre *corpus* :
 - pour essayer de démontrer que Galilée se trompait, Berti « a construit un siphon en plomb » 13 mètres muni d'une fenêtre transparente permettant d'observer la suspension de l'eau dans le tube (extrait C) ;
 - pour démontrer que le vide n'est doué d'aucune vertu Torricelli a « fabriqué beaucoup de vases en verre », notamment un dont l'extrémité scellée est très élargie (extrait D) ;

– pour corroborer l’hypothèse de l’air atmosphérique comme cause de la suspension du mercure dans le dispositif torricellien, Boyle dit avoir « demandé à Mr.G et R.Hook de fabriquer une pompe à air » (extrait I).

- de façon moins attendue, la ressource « géographique » est à ajouter aux autres ressources sur lesquelles repose la controverse puisque Pascal a eu besoin de « choisir une montagne excessivement haute, proche d’une ville dans laquelle se trouve une personne capable » de faire l’expérience décisive qu’il avait pensée (extrait G).

On pourrait aussi compter le temps (au sens chronologique du terme) comme ressource, Périer confiant notamment en avoir manqué pour mener rapidement l’expérience demandée par Pascal (extrait H) ; cette dimension du travail scientifique fait cependant l’objet d’un traitement indépendant à la fin de cette sous-section.

5.2.4 Produits de l’étude

Ce que produit la science n’est définitivement pas une succession de « découvertes » isolées ou inopinées : si les trente années balayées par notre *corpus* marquent bien un tournant décisif dans l’évolution des idées à propos de l’air et du vide, nous avons vu que cette période a consisté en la mise en œuvre de différents raisonnements permettant de discriminer les hypothèses expliquant la suspension de liquide dans les siphons puis dans le dispositif torricellien. Ce que produit la science, outre des lois, ce sont justement des hypothèses, dont la vraisemblance, la portée, la fécondité, la cohérence et l’adéquation empirique sont autant de qualités qui, une fois éprouvées, assoient la formulation de théories et le développement de modèles. Les deux hypothèses fortes et valides qui sont produites dans ce *corpus* sont que :

- le vide n’est doué d’aucune vertu (extraits B et D) ;
- l’air atmosphérique est la cause de la limite d’aspiration des pompes et siphons (extrait B) et de la suspension du mercure dans le dispositif Torricellien (extrait D).

De ces produits intermédiaires pourront émerger des lois telles que celles de Boyle et Mariotte par exemple, qui constituent alors des objectifs conceptuels au programme scolaire.

5.2.5 Processus d’élaboration des produits

Notre *corpus* s’oppose au fantasme de *la* méthode scientifique, en illustrant différentes activités mises au service de l’avancée scientifique. Ces activités sont ici de deux natures : le raisonnement et l’expérience. Il va sans dire que ces deux processus vont de pair : pas d’expérience fructueuse qui ne soit pas pensée en amont et en aval ; pas non plus de raisonnement décisif qui ne soit pas mis à l’épreuve de l’expérience.

5.2.5.1 Raisonnements

Plusieurs types de raisonnements caractéristiques de la pensée scientifique sont mis en œuvre dans le *corpus* que nous avons élaboré :

- Raisonnement critique : bien que certainement décidé à accorder toute confiance à l'hypothèse exprimée par Torricelli (qui n'est autre que celle de Baliani), Ricci se montre particulièrement inventif dans sa manière de la mettre à l'épreuve et d'imaginer des objections. En particulier son initiative de décentrer le débat autour d'une autre situation expérimentale (la seringue) pour éprouver la portée de l'explication proposée par Torricelli montre la force critique de son jugement (extrait E). L'attitude critique se montre salutaire quelque soit le traitement des objections : soit elles sont rejetées, ce qui renforce l'hypothèse mise à l'épreuve ; soit elles mettent effectivement à mal l'hypothèse éprouvée, ce qui oblige les savants à l'affiner ou à en changer, ce qui est aussi une forme d'avancée ;
- Raisonnements par inférences :
 - Raisonnement inductif : la généralisation à tous les fluides de la suspension observée dans le dispositif de Berti (extrait C) a été une étape essentielle dans l'avancée des idées puisqu'elle a permis d'envisager des expériences autrement moins compliquées que s'il avait fallu s'en tenir aux dispositifs géants adaptés à l'eau. De la même façon induire que l'air étant pesant, il agit comme de l'eau sur les corps qui y sont immergés a permis de formuler l'hypothèse de la pesanteur de l'air atmosphérique comme cause de la suspension du liquide dans le dispositif de Torricelli (extrait D) ;
 - Raisonnement hypothético-déductif : il est employé parfois pour réfuter l'hypothèse de la pesanteur de l'air comme cause de la suspension du mercure dans le tube (prévision du couvercle par Ricci, extrait E), d'autres fois pour la corroborer (prévision de l'expérience du Puy de Dôme de Pascal, extrait G ; prévision de l'expérience du vide de Boyle, extrait I), ou encore de réfuter l'hypothèse de la résistance du vide (prévision du tube élargi de Torricelli, extrait D).
- Raisonnement par analogie : Torricelli fait le rapprochement assez audacieux entre l'air atmosphérique et la laine, comparaison qui affirme que l'état de compression de l'air tout comme celui de la laine augmente d'autant qu'un grand poids repose sur lui (extrait F).

5.2.5.2 Expériences

Bien que nous ayons drastiquement allégé nos extraits des considérations pratiques associées, l'expérimentation (réelle ou empirique) occupe une très grande place dans notre *corpus*. Quatre expérimentations différentes y sont relatées :

- une dont le résultat n'a pas donné ce qui été espéré par son instigateur : il s'agit de l'obtention d'une colonne d'eau par déversement réalisée par Berti avec un siphon conçu tout exprès (extrait C) ;
- trois autres dont les résultats étaient à la hauteur des intentions avec lesquelles elles ont été imaginées puisqu'elles corroborent toutes les trois l'hypothèse de l'action de l'air atmosphérique (et non du vide) comme cause de la suspension du mercure dans le dispositif Torricellien :

- l'expérience de Torricelli (extrait D), qui est en fait une double expérience puisque deux tubes différents sont retournés dans la cuve et conduisent à la même hauteur de mercure à l'équilibre ;
- l'expérience du Puy de Dôme imaginée par Pascal et réalisée par Périer (extrait H) ;
- l'expérience du vide dans le vide de Boyle (extrait I).

L'évocation, même incomplète, de la construction et de l'aménagement des dispositifs, ainsi que de la réalisation de mesures laisse deviner les difficultés qui ont pu accompagner les expériences, révélant la dépendance des enjeux théoriques vis-à-vis des enjeux techniques.

5.2.6 Attitudes permettant l'étude

Notre ressource met en scène des savants curieux voire exaltés par l'étude en train de se faire. Cette implication se traduit par des expressions du type : « la cause de cet effet m'a longtemps troublé » (extrait A), « le désir que j'ai de comprendre parfaitement » (extrait E), « vous en aurez du divertissement » (extrait G), « ce qui nous ravit tous d'admiration et d'étonnement, et nous surpris de telle sorte, que, pour notre satisfaction propre, nous voulûmes la répéter » (extrait H).

Par ailleurs l'esprit critique est tout particulièrement mis en valeur à travers la lettre de Ricci : sans ces objections, nul besoin des contre-arguments de Torricelli, en particulier de l'analogie de la laine. Or le contenu de cette réponse (extrait F) renforce la robustesse de l'hypothèse de la pesanteur de l'air comme cause des phénomènes relatés dans notre *corpus*, y compris de ceux évoqués par Ricci (la résistance du piston d'une seringue, extrait E).

5.2.7 Rôle de la communauté scientifique et interactions en son sein

Par la nature du matériau sur lequel il est fondé le *corpus* que nous proposons présente des interactions directes entre les acteurs de la communauté savante européenne du XVIIe siècle. La plupart de ces hommes ne se sont jamais vus au cours de leur existence, mais qu'ils soient proches géographiquement ou séparés par plusieurs centaines de kilomètres, ils fondent par leur commerce épistolaire une communauté indépendante de toute structure organisationnelle (telle que les Académies, ou les Écoles par exemple). Ce que montre notre *corpus* c'est que ces échanges ne se font pas en marge des avancées de la science, mais qu'ils y participent réellement : la science se présente ainsi comme le résultat de l'interaction entre les savants. En effet, entre l'hypothèse valide de Baliani (en 1630) et le dernier extrait de R. Boyle rendant compte d'expériences menées 30 ans plus tard, la science a bel et bien avancé puisque les idées, bien que non renouvelées, se sont largement renforcées par le concours mutuel des différents savants. Le dispositif de Torricelli aurait-il vu le jour s'il n'avait pas été inspiré par le siphon géant créé par Berti ? Qu'en aurait-il été de l'expérience si fameuse et décisive du Puy-de-Dôme si aucun savant, à l'instar de Ricci, n'avait émis quelques objections à l'hypothèse défendue par Baliani puis Torricelli ? Sans ces mêmes réticences quand et comment le lien entre pesanteur de

l'air, compression puis pression de l'air aurait-il été établi ? Autant de question parfaitement rhétoriques mettant en avant le caractère décisif des interactions entre savants dans les avancées de la science.

Par ailleurs les références aux témoins convoqués lors de la mise en œuvre d'expériences décisives ont été laissées parce que ce mode de validation est caractéristique de cette époque :

- « j'ai estimé à propos de joindre encore la présence de personnes aussi savantes qu'irréprochables, afin que la sincérité de leur témoignage ne laissât aucun doute de la certitude de l'expérience » (extrait H) ;
- « L'expérience fut répétée plusieurs jours après, en présence de ces excellents professeurs de mathématiques, célèbres à juste titre, Dr Wallis, Dr Ward et Mr Wren, qui furent ravis d'honorer l'expérience de leur présence ; et que je nomme fièrement comme témoins avertis et illustres de notre expérience. » (extrait I)

Au XVII^e siècle, la valeur d'une expérience ne résidait pas tant dans ses résultats que dans la qualité des témoins qui pouvaient en attester. Ce mode de validation n'a plus cours, mais la question de la validation par la communauté demeure néanmoins d'actualité.

5.2.8 Interactions entre science et société

C'est la seule dimension de la NoS que notre *corpus* ne met pas en avant. Seule la précision fréquente de « savant religieux » dans les notes de bas de page laisse entrevoir une interaction assez forte entre science et religion, mais notre ressource ne donne pas d'élément permettant de mener une réflexion à ce sujet.

5.2.9 Dimension temporelle de l'élaboration de la connaissance

De façon implicite, la controverse qui s'étend sur trente années (de la lettre à Baliani à l'expérience de Boyle) est symptomatique de la lenteur avec laquelle la science avance. Il s'agit malgré tout d'une lenteur toute relative, cette controverse étant finalement assez furtive au regard des longs siècles d'errements la précédant, comme nous l'avons exposé dans la reconstruction historique au chapitre 3.

De façon plus explicite, l'extrait H montre que même quand les esprits sont productifs, certaines contraintes notamment matérielles viennent ralentir fortement les processus d'élaboration des connaissances.

5.3 En réponse à des objectifs conceptuels

Les lettres que nous avons choisies pour composer notre *corpus* sont jalonnées de questions qui pourraient très bien se rapprocher, pour certaines, d'interrogations qu'auraient des

élèves face aux mêmes situations. A plusieurs égards nous pensons que cette résonance peut être mise à profit dans un usage didactique de notre *corpus*.

5.3.1 Enseignement par la controverse

En retranscrivant une controverse majeure comme celle qui oppose les tenants de l'hypothèse du vide à ceux de l'hypothèse de la pesanteur de l'air, nous offrons la possibilité aux enseignant·e·s de mettre en œuvre un enseignement de la pression atmosphérique par la controverse, en réinvestissant tout ou partie des arguments et contre-arguments qui jalonnent notre *corpus*. Les plus-values d'un tel enseignement ont été vantées non seulement en physique par de Hosson (2011) mais aussi en sciences de la vie et de la terre par Crépin-Obert (2013). Elles doivent s'appliquer aussi bien aux controverses majeures qu'aux controverses mineures dont regorgent les correspondances, notamment à propos de l'opposition entre poids (de l'air) et force pressante.

5.3.2 Résonances avec les difficultés d'élèves

Au fil du *corpus* certaines difficultés faisant écho à celles que les élèves peuvent rencontrer sont exprimées plus ou moins explicitement par les différents savants. En aucun cas ni ces problèmes ni les idées développées pour les résoudre ne sont exprimées en terme de « pression » mais ces différents éléments résonnent toutefois avec les modèles de compréhension des élèves et étudiant·e·s contemporain·e·s. Un·e enseignant·e non documenté·e à propos des études menées à ce sujet peut avoir une indication, grâce à notre *corpus*, des convictions que ses élèves risquent de partager :

- le vide peine à exister : cette idée est la plus évidente à identifier dans le *corpus* (extrait A, D) et constitue d'ailleurs la raison d'être des échanges que nous retranscrivons ;
- la pression est égale au poids : d'abord présenté comme « pesant » et donc *a fortiori* comme « pressant », l'air atmosphérique est compris par Ricci comme n'agissant sur le mercure du dispositif Torricellien que par son poids (extrait E) : en l'empêchant de peser de toute sa hauteur (par l'ajout d'un couvercle par exemple), son action serait ainsi amoindrie. Cette assimilation de la « pression » (ici entendu comme « action de presser ») d'un fluide à son poids a été identifiée dans la littérature chez les élèves et étudiant·e·s comme nous l'avons évoqué dans l'état de l'art (chapitre 2).
- l'air atmosphérique agit verticalement (extrait E) : dans le prolongement de l'idée précédente assimilant l'action pressante de l'air atmosphérique à son poids, Ricci exprime l'idée largement partagée par les élèves selon laquelle l'air n'agirait que verticalement.

Par ailleurs, la situation expérimentale exploitée dans tout le *corpus* fait l'objet d'une analyse qualitative et n'est pas abordée sous l'angle mathématique. Cette approche contraste avec le traitement réservé aux situations impliquant des fluides dans le contexte scolaire, et met en avant le sens plutôt que l'application de relations mathématiques qui peuvent faire obstacle à la compréhension.

5.3.3 Outils et leviers

L'impossibilité de l'existence du vide, ou de façon moins radicale sa supposée résistance ou force de succion sont des conceptions recensées dans la littérature chez les élèves et étudiant·e·s de différents niveaux, comme nous l'avons explicité dans l'état de l'art (chapitre 2). L'enseignement de la pression, qui se fait au niveau de première dans la configuration actuelle des programmes, doit nécessairement s'envisager en tenant compte de cette difficulté, et doit se fixer comme objectif, entre autres, d'opérer un changement conceptuel¹ à propos du vide. Notre *corpus* peut être un appui salutaire dans cette perspective en cela qu'il rend précisément compte de la façon dont ce changement conceptuel s'est opéré au sein de la communauté savante au XVIIe siècle. Trois leviers peuvent être activés pour permettre un changement conceptuel des plus effectifs chez les élèves, les deux premiers sur la base de notre *corpus*, et le dernier dans un travail de prolongement :

Discréditation de l'hypothèse de la résistance du vide : l'expérience de Torricelli se présente comme une véritable mise à l'épreuve des théories naïves à propos du vide. En effet, non seulement elle remet en cause l'impossibilité de l'existence du vide, mais aussi, avec le tube élargi en haut, elle s'oppose à l'idée que le vide aurait des propriétés aspirantes ou résistantes (extrait D). Toutefois une confrontation à ces résultats ne suffirait pas à elle seule à modifier favorablement et durablement les idées des élèves à propos du vide puisqu'à l'instar des savants du XVIIe siècle, ils pourraient encore trouver des adaptations et des aménagements pour que leur modèle de compréhension du vide s'accommode des constats expérimentaux (résistance limitée, résistance intensive etc.)

Remplacement par l'hypothèse de la pesanteur de l'air : pour faire abandonner progressivement l'idée si séduisante de la résistance du vide, l'offre d'une hypothèse alternative se pose comme un second levier d'autant plus efficace que l'hypothèse fera ses preuves là où celle de la résistance du vide est mise en difficulté. Cette alternative, l'hypothèse de la pesanteur de l'air, a été discutée et éprouvée pour rendre compte de la suspension du liquide dans le dispositif Torricellien au cours de différents événements dont notre *corpus* rend compte (extraits F, H, I) ; une exposition de ce cheminement doit participer à l'adhésion des élèves à cette hypothèse dont on peut supposer qu'elle ne leur viendrait pas spontanément à l'idée dans la mesure où l'air est systématiquement ignoré dans les études mécaniques au lycée.

Mise à l'épreuve de l'hypothèse alternative dans des circonstances nouvelles : en supposant que le recours à notre *corpus* permette aux élèves de renoncer, dans le cadre si particulier du dispositif Torricellien, à l'hypothèse de la résistance du vide au profit de celle de la pesanteur de l'air, le changement conceptuel doit encore s'opérer de façon beaucoup plus générale. La poursuite de l'enseignement doit s'attacher à montrer que l'hypothèse de

1. Nous désignons par « changement conceptuel » l'évolution des conceptions ou théories explicatives des élèves au cours de leur apprentissage, renvoyant aux définitions fondamentales posées par Posner & al. (1982).

la pesanteur de l'air permet de « tout » expliquer sans adaptation ni aménagement, et pas uniquement la suspension du liquide dans le dispositif de Torricelli, ce qui la rend opérationnelle.

Ainsi les arguments employés dans notre *corpus* pour discréditer et remplacer la théorie pourtant très vraisemblable et de portée très large qu'est l'*horror vacui* sont autant d'atouts dont un·e enseignant·e peut se saisir pour aider les élèves à opérer ce changement conceptuel à leur tour.

Par ailleurs notre *corpus* comporte deux leviers qui peuvent être mis à profit pour aider les élèves à mieux comprendre l'action isotrope et élastique de l'air, sans la réduire à l'idée de poids :

- l'analogie avec la laine proposée par Torricelli (extrait F), mettant en relation les propriétés pressantes locales et la structure globale d'une colonne d'atmosphère ;
- le résultat de l'expérience réalisée par Boyle (extrait I) dans laquelle la hauteur de suspension du mercure reste inchangée quand le dispositif est placé à l'intérieur de la pompe à vide (et donc isolé du reste de l'atmosphère).

5.4 En réponse à des objectifs culturels

Quelques informations jalonnent le *corpus* qui sont autant d'éléments qui, s'ils ne constitueront pas un objectif d'apprentissage à eux seuls, peuvent participer à la culture générale et scientifique des élèves.

5.4.1 Repères chronologiques

Majoritairement par le biais des notes de bas de page notre *corpus* fournit de nombreux éléments de culture scientifique qui permettent de situer dans le temps et dans l'espace certains noms et quelques découvertes scientifiques : éléments biographiques des savants, invention du baromètre (au moins de l'outil, même s'il n'a pas été initialement construit pour mesurer les changements du temps), émergence du concept de pression atmosphérique.

Par ailleurs, les savants (Torricelli et Pascal) dont le nom est dorénavant utilisé pour désigner une unité de mesure de la pression (le torr et le pascal) prennent vie dans notre *corpus* en tant que contributeurs majeurs à l'avancée de la connaissance dans ce domaine. Notre *corpus* les mets en scène de façon honnête et permet au lecteur ou à la lectrice de se faire une idée plus juste des motivations qui conduisent la communauté scientifique à associer un nom de savant (Pascal) à une grandeur physique plutôt que de supposer abusivement par exemple que Pascal est « l'inventeur » ou « le découvreur » de la pression atmosphérique.

5.4.2 Monde savant au XVIIe siècle

5.4.2.1 Position sociale des savants

Tous les personnages de notre *corpus* sont des hommes, et beaucoup sont religieux. Ce panorama n'est pas un accident statistique : il traduit une réalité à propos de la position sociale des savants au XVIIe siècle.

5.4.2.2 Interactions entre savants

Le mode de communication mis à l'honneur dans notre *corpus* montre que les usages en termes d'échanges entre savants du XVIIe siècle étaient bien différents de ce que nous connaissons aujourd'hui. En effet nous sommes parvenus à reconstituer sans artifice un cheminement collectif dont la cohérence s'appuie majoritairement sur les lettres échangées entre les savants. Ces lettres jouaient ainsi un rôle central dans la circulation des idées et des connaissances au XVIIe siècle : les avancées scientifiques se faisaient collectivement par succession d'échanges (par courriers ou par voyages) pourtant très privés. Le concours des publications (traités, essais) se montre relativement secondaire dans notre *corpus* : hormis le *Dialogue sur les deux grands système du monde* de Galilée, aucune œuvre publique ne se pose comme nécessaire dans l'avancée dont notre *corpus* se fait témoin. Cette pratique s'oppose aux procédés employés de nos jours dans lesquels la communication publique (sous forme d'articles en particulier) rend compte de la science en train de se faire et constitue la base de travail pour n'importe quel·le chercheur ou chercheuse souhaitant faire avancer les connaissances sur un sujet donné.

5.4.2.3 Mode de validation

Comme nous l'avons évoqué dans la partie à propos des objectifs d'apprentissages relatifs à la NoS, le mode de validation par les pairs reposait sur un fonctionnement particulier, notamment la présence de témoins lors des expériences décisives.

Par ailleurs le rôle de l'église dans la validation des thèses scientifiques est à peine évoqué dans la première note de bas de page, au sujet de Galilée.

5.4.2.4 Standards de langage

A deux niveaux notre *corpus* montre les différences de standard entre le XVIIe siècle et de nos jours :

- l'introduction « l'accident arrivé subitement m'oblige à écrire en toute hâte et en italien ces quelques lignes fort décousues » (extrait C) interpelle : un italien s'excuse d'écrire en italien, ce qui sous-entend qu'une autre langue aurait été plus appropriée. Il s'agit du latin, qui était utilisé dans la sphère intellectuelle, contrairement à l'anglais qui a maintenant la faveur des communautés scientifiques ;

- la multiplicité des unités de longueur en usage au XVII^e siècle est retranscrite sans artifice dans notre *corpus*. Sans les précisions apportées entre parenthèses à notre initiative le lecteur ou la lectrice devrait passer beaucoup de temps à faire des recherches et convertir ces données pour que le contenu de l'ensemble soit intelligible ; ceci offre immanquablement l'occasion de réaliser ou de faire prendre conscience à des élèves les atouts que présente le système international d'unité.

6 Synthèse

En conclusion de ce chapitre, nous représentons de façon synoptique les liens conceptuels entre les différents éléments du *corpus* de correspondances que nous avons élaboré sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air au XVII^e siècle sont reliés conceptuellement :

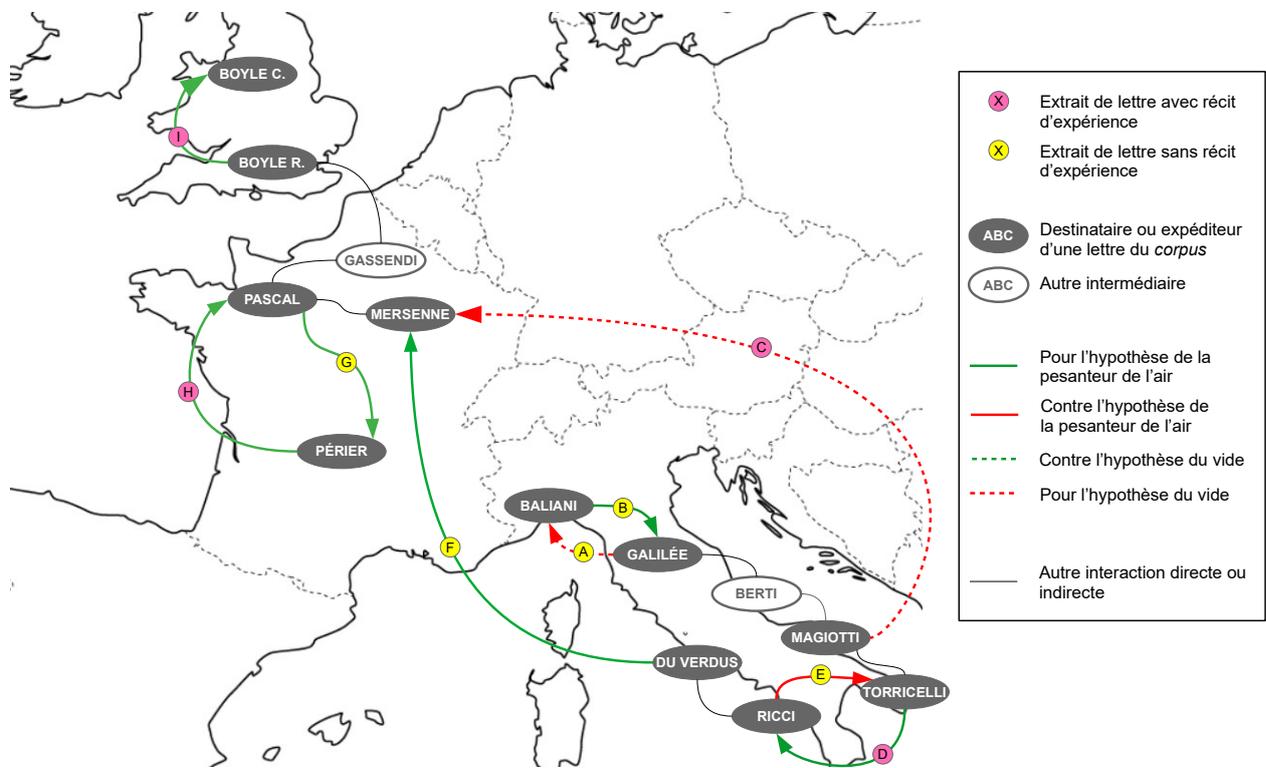


FIGURE 5.1 – Représentation synoptique de la façon dont sont conceptuellement reliés les éléments du *corpus* de correspondances

Références du chapitre 5

- Astolfi, J.-P. (2011). *L'erreur, un outil pour enseigner*. ESF Editeur.
- Barbarin, P. (1926). La correspondance entre Houël et de Tilly. *Bulletin des sciences mathématiques*, 2, 50-64.
- Beaufils, D., Maurines, L., & Chapuis, C. (2010). Compte-rendu d'enquête sur l'histoire des sciences auprès d'enseignants de physique—Chimie. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 104(924), 581-598.
- Bodenmann, S., & Rey, A.-L. (2013). La guerre en lettres : La controverse scientifique dans les correspondances des Lumières. *Revue d'histoire des sciences*, 66(2), 233-248.
- Chapron, E., & Boutier, J. (2013). Utiliser, archiver, éditer : Usages savants de la correspondance en Europe XVIIe - XVIIIe siècles. *Bibliothèque de l'École des chartes*, 171(1), 7-49.
- Crépin-Obert, P. (2010). *Construction de problèmes et obstacles épistémologiques à propos du concept de fossile : Étude épistémologique comparative entre des situations de débat à l'école primaire et au collège et des controverses historiques du XVIIe au XIXe siècle*. [Thèse de doctorat, Université de Nantes]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00493027/document>
- France. Ministère de l'éducation nationale. BOEN spécial n°1 22 janvier 2019.
- France. Ministère de l'éducation nationale. BOEN spécial n°31 30 juillet 2020.
- de Hosson, C. (2004). *Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences. Elaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation*. [Paris Diderot]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00083593/document>
- de Hosson, C. (2011). Una controversia histórica al servicio de una situación de aprendizaje : Una reconstrucción didáctica basada en diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo de Galileo. *Enseñanza de las ciencias : revista de investigación y experiencias didácticas*, 29(1), 115-126.
- Maurines, L., & Beaufils, D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : L'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *Recherches en didactique des*

sciences et des technologies, 3, 271-305.

Maurines, L., Gallezot, M., Ramage, M.-J., & Beaufiles, D. (2013). La nature des sciences dans les programmes de seconde de physique-chimie et de sciences de la vie et de la Terre. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 7. <https://doi.org/10.4000/rdst.674>

Monk, M., & Osborne, J. (1997). Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum : A Model for the Development of Pedagogy. *Science Education*, 81(4), 405-424.

Posner, G., Strike, K., Hewson, P., & Gertzog, W. (1982). Accomodation of a Scientific Conception : Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66(2), 211-227.

Torrini, M. (1999). La correspondance de Galilée entre chronique et histoire des sciences/Galileo's correspondence between chronicle and history of science. *Revue d'histoire des sciences*, 52(1), 139-154. <https://doi.org/10.3406/rhs.1999.1347>

Chapitre 6

Évaluation de la ressource

Dans le contexte de la formation initiale
d'enseignant·e·s de physique-chimie

1 Introduction

En parvenant à intégrer dans notre *corpus* des éléments relevant à la fois de préoccupations motivationnelles, épistémologiques, culturelles et conceptuelles, nous avons proposé une reconstruction didactique très élaborée qu'il faut maintenant évaluer. Nous souhaitons notamment mettre à l'épreuve la pertinence de la posture théorique qui a gouverné les choix que nous avons faits dans l'élaboration du *corpus* : parmi la multitude d'objectifs d'apprentissage que nous avons cherché à rendre possible sur la base de notre *corpus*, lesquels sont identifiés par les enseignant·e·s ? La question de l'usage que font les enseignant·e·s des ressources qui sont mises à leur disposition n'est d'ailleurs pas exclusive à notre propre production : plus la ressource proposée s'éloigne d'un scénario « clé en main », plus il y a de risques que les enseignant·e·s se l'approprient et la transforment d'une façon qui s'éloigne de l'esprit dans lequel elle a été conçue. Dans ce dernier chapitre nous procédons ainsi à l'évaluation de notre *corpus* selon deux critères : d'une part son appropriation par les enseignant·e·s, d'autre part l'analyse des transformations qu'ils et elles lui font subir pour préparer une séance d'enseignement s'appuyant dessus. Dans cette perspective nous inscrivons notre travail dans le cadre théorique de l'Approche Documentaire du Didactique (ADD), développé par Gueudet et Trouche (2008) et que nous présentons au début de ce chapitre.

Lors de l'enquête empirique conduite au chapitre 4 nous avons mis en évidence que les enseignant·e·s peinaient à comprendre la suspension du liquide dans le dispositif de Torricelli. Or cette expérience est au cœur de notre *corpus*. De plus l'étude conduite par Beaufilet et al. (2010) révèle qu'à peine la moitié des enseignant·e·s atteste avoir déjà reçu une formation à l'histoire des sciences. Pour ces deux raisons nous avons donc jugé opportun de proposer à un groupe d'enseignant·e·s une formation à propos de l'utilisation de l'histoire des sciences pour enseigner les phénomènes liés à la pression. Le *corpus* que nous avons élaboré y occupe une place centrale, en tant qu'objet de formation et objet de recherche. C'est au cours de cette formation que nous avons récolté de nombreuses données à partir desquelles nous avons évalué notre ressource.

Dans un premier temps nous présentons les objectifs, puis le scénario de la formation organisée en explicitant à chaque fois ce qui relève réellement de la formation, et ce qui relève des préoccupations liées à la recherche. Nous procédons ensuite à une analyse des différentes données recueillies, avant d'ouvrir la discussion et de répondre aux questions de recherche.

2 Élaboration du scénario de formation

Afin d'évaluer la ressource que nous avons présentée dans le chapitre précédent, nous avons choisi de demander à des apprentis-enseignant·e·s (M2 MEEF) de s'appuyer dessus pour élaborer un scénario d'apprentissage, et ce dans le cadre de leur formation initiale. Nous avons pensé les séances de formation que nous avons assurées de sorte à répondre à deux objectifs : un

objectif de formation des enseignant·e·s sur les problématiques liées à l'usage de l'histoire des sciences dans l'enseignement de phénomènes liés à la pression, et un objectif de recherche relatif à la réception de notre *corpus* par les enseignant·e·s. L'attention portée simultanément à ces deux préoccupations a des implications décisives dans l'élaboration du scénario de formation.

2.1 Objectifs de recherche

2.1.1 Cadre organisateur de la formation

En ce qui concerne les préoccupations proprement liées à l'évaluation de notre *corpus* nous nous plaçons dans le cadre de l'approche documentaire du didactique (Gueudet & Trouche, 2008). Ce cadre théorique dérive du cadre plus général qu'est l'approche instrumentale (Rabardel, 2005), dont nous commençons par dire quelques mots.

L'approche instrumentale consiste fondamentalement à distinguer les outils disponibles pour un utilisateur ou une utilisatrice (artefacts) et les outils construits par ces dernier·e·s (instruments). Pour résoudre un problème donné, un utilisateur ou une utilisatrice disposant d'un artefact peut s'approprier ce dernier selon un schème qui dépend du but à atteindre, et le transformer en un instrument : ce processus est appelé genèse instrumentale. Le schème d'utilisation de l'artefact dont il est question est à comprendre au sens de Vergnaud (2011) :

Définition 1 « Le schème est une organisation invariante de l'activité pour une classe de situations donnée. »

Définition 2 « Il est formé nécessairement de quatre composantes » :

- un but, des sous-buts et anticipations ;
- des règles d'action, de prise d'information et de contrôle ;
- des invariants opératoires : concepts-en-acte et théorèmes-en-acte ;
- des possibilités d'inférence en situation.

Par définition on ne peut discerner un schème que s'il se répète dans différentes situations d'une même classe.

Dans l'approche instrumentale, un instrument est ainsi un artefact personnalisé par un individu et associé à un schème d'utilisation pour résoudre un problème donné. La genèse instrumentale consiste donc en deux processus imbriqués : l'appropriation de l'artefact (instrumentation) et sa transformation (instrumentalisation) par un individu.

Le cadre théorique de l'approche documentaire du didactique (AAD) peut être vu comme une adaptation de l'approche instrumentale dans le cas particulier où les individus sont « des professeur·e·s engagé·e·s dans une activité professionnelle finalisée et donc poursuivant un but (qui peut être plus ou moins général), par exemple : "préparer et mettre en œuvre une leçon sur les pourcentages en classe de 4ème" ; "gérer l'hétérogénéité d'une classe de 2de". » (Gueudet & Trouche, 2021, p.142). Pour répondre à un de ces buts les enseignant·e·s s'approprient et transforment des ressources en documents au cours de leur travail documentaire. Les éléments

généraux de l'approche instrumentale sont ainsi spécifiés dans l'approche documentaire :

| Approche instrumentale | Approche documentaire |
|----------------------------|--------------------------------|
| utilisateur / utilisatrice | enseignant·e |
| problème donné | problème d'enseignement |
| artefact | ressource |
| instrument | document, système documentaire |

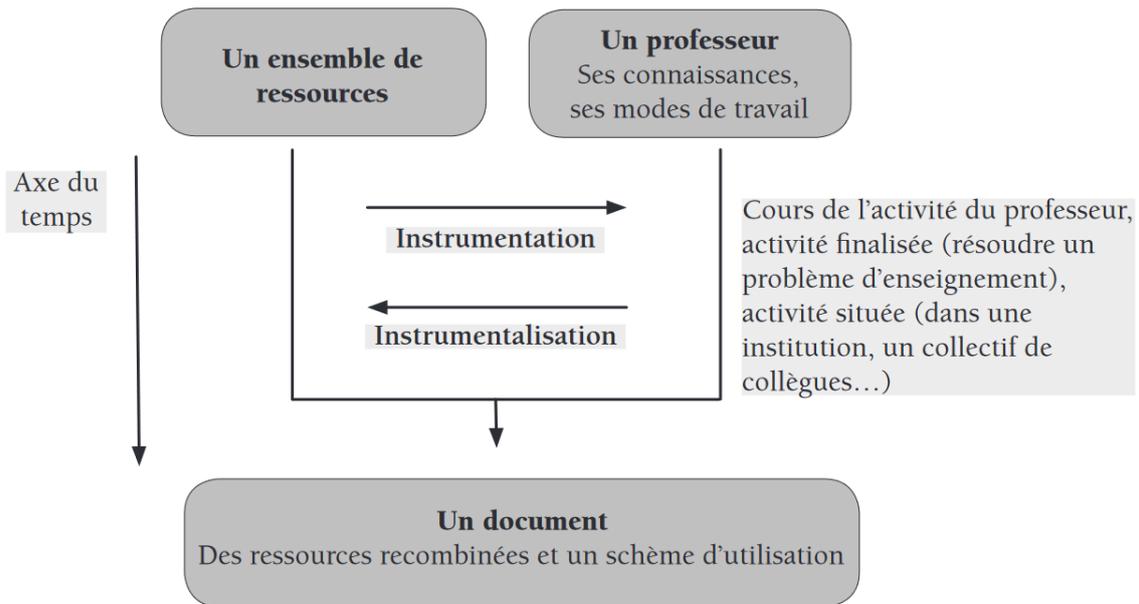


FIGURE 6.1 – Représentation schématique de la genèse d'un document (Gueudet & Trouche, 2008)

Dans la formation que nous organisons, les enseignant·e·s sont mis·e·s en situation de concevoir un *document* (produit); le scénario de formation et le recueil de données sont orientés de sorte à accéder à l'ensemble de ce *travail documentaire* (processus). Dans cette genèse documentaire, notre *corpus* est imposé comme une des ressources.

2.1.2 Hypothèses et questions de recherche

Nous avons élaboré le *corpus* en espérant qu'il soit accessible et exploitable par des enseignant·e·s en un temps raisonnable pour élaborer une séance d'enseignement. L'organisation de la formation met à l'épreuve ces caractéristiques, et vise à répondre à des questions pragmatiques liées à la compréhensibilité et à l'exploitabilité autonome de notre ressource. Ce premier questionnement porte donc sur le processus d'appropriation (instrumentation) de notre ressource et peut s'exprimer en ces termes :

QR1 : quelles sont les qualités et les défauts de notre *corpus* en tant que ressource que les enseignant·e·s doivent s'approprier ?

Par ailleurs nous cherchons à objectiver les transformations possibles de notre ressource. En effet, la forme stabilisée du *corpus* embarque volontairement une multitude d'éléments exploitables à des fins didactiques ou pédagogiques. Il s'agit là d'un parti pris théorique d'élaborer une ressource offrant l'opportunité de définir sans hiérarchie ni exclusivité des objectifs d'apprentissage de différentes natures. Qu'en font les enseignant·e·s ? Nous faisons notamment l'hypothèse qu'ils et elles ignorent les apports épistémologiques potentiels de notre *corpus*, et définissent des objectifs d'apprentissage uniquement conceptuels, à l'image de ce que les programmes scolaires semblent mettre en avant au détriment des objectifs d'apprentissage épistémologiques ou culturels. Ces questionnements qui nous animent et auxquels le scénario de formation doit permettre d'apporter des réponses peuvent être déclinés en deux questions de recherche supplémentaires :

QR2 : quelle image de la nature de la science est véhiculée dans les exploitations que les enseignant·e·s font du *corpus* ?

QR3 : quel est l'apport de l'histoire des sciences dans les situations d'apprentissage envisagées par les enseignant·e·s à partir du *corpus* ?

2.2 Objectifs de formation

2.2.1 Contenu : besoins identifiés

D'un point de vue conceptuel tout d'abord, nous avons remarqué dans l'enquête réalisée au chapitre 4 que la compréhension qu'ont les enseignant·e·s des situations impliquant un liquide au repos n'est pas très satisfaisante, notamment dans le cas du dispositif de Torricelli. Nous avons mis en évidence une corrélation entre leur compréhension et leur appréhension de ce type de situation à la fois dans le cadre hydrostatique contemporain mais aussi dans le cadre mécanique qui correspond plutôt à l'approche historique. Nous entendons profiter de cette formation pour améliorer la compréhension que les enseignant·e·s ont des phénomènes liés à la pression notamment en les initiant à cette double interprétation, profitable pour eux-mêmes mais possiblement aussi pour leurs élèves.

À propos de l'histoire des sciences ensuite, nous nous référons aux enquêtes menées par Beaufils & al. (2010) d'une part, et Guedj & Dusseau (1999) d'autre part pour cerner les besoins des enseignant·e·s. La formation que nous proposons entend ainsi :

- fournir quelques repères chronologiques quand à l'évolution au cours du temps des connaissances scientifiques, notamment à propos de l'émergence du concept de pression ;
- présenter des expériences essentielles à la compréhension du monde ;
- expliciter le sens « culturel » de l'approche historique ;
- présenter divers possibles en matière d'introduction de l'histoire des sciences en classe.

En somme la ligne directrice de la formation est de montrer aux enseignant·e·s que, bien que non spécialistes et non historien·ne·s, ils et elles ont les moyens d'avoir recours à l'histoire des sciences dans leur enseignement ; que ce recours peut prendre différentes formes plus ou moins explicites ; que l'objectif d'un tel usage n'est pas forcément unique, qu'il peut mêler préoccupations conceptuelles, épistémologiques, motivationnelles et/ou culturelles.

2.2.2 Modalité : analyse réflexive

La formation que nous avons organisée devant contribuer effectivement au développement professionnel des enseignant·e·s à qui elle s'adresse, nous nous sommes inspirée des hypothèses formulées dans le travail doctoral d'Emprin (2007) pour élaborer le scénario de formation. Ce dernier utilise ainsi la démarche réflexive, c'est-à-dire qu'il amène les enseignant·e·s formé·e·s à analyser leurs propres pratiques afin de faire construire des connaissances pratiques pour l'introduction, en classe, de l'histoire des sciences. Devant accommoder les modalités de formation avec nos objectifs de recherche, nous avons choisi de limiter l'analyse des enseignant·e·s à leur pratique dans le cadre de la formation uniquement, la mise en activité autour de notre *corpus* faisant partie intégrante de la formation. Les enseignant·e·s formé·e·s mènent alors une double réflexion :

- à propos du processus de production pendant une séance que nous qualifions de « pratique ». Les enseignant·e·s formé·e·s sont alors amené·e·s à voir l'introduction de l'histoire des sciences en classe comme un problème à résoudre ;
- à propos de l'ensemble des produits issus du groupe d'enseignant·e·s formé·e·s et donc des possibles en matière d'usage de l'histoire des sciences pour l'enseignement. Cette réflexion collective est animée par un formateur qui présente en complément quelques résultats issus de la recherche en didactique ; nous qualifions cette séance d'institutionnalisation de « théorique ».

2.3 Structure du scénario de formation

Le scénario de formation est constitué de trois parties qui sont décrites précisément dans l'annexe D :

Partie I (*présentation*) : découverte et lecture intégrale du *corpus*, précédée de la lecture d'un texte introductif (annexe F). Les enseignant·e·s peuvent poser des questions de compréhension au formateur.

Un questionnaire préliminaire (annexe E) visant à connaître les intérêts, les connaissances, et les pratiques des sujets formés quant à l'usage de l'histoire des sciences dans leur enseignement est diffusé au début de cette première partie. Il vise à recueillir des informations doublement utiles : d'abord les réponses sont susceptibles d'être mises en relation avec les productions issues de la suite de la formation, ensuite elles permettront éventuellement de confirmer *a posteriori* le besoin de formation.

Partie II (*pratique*) : exploitation du *corpus*, sans intervention du formateur. La consigne complète est rapportée dans l'annexe G : il est demandé aux enseignant·e·s de produire un document s'appuyant sur le *corpus*, et s'inscrivant dans une situation d'apprentissage permettant d'acquérir une ou plusieurs compétences du programme de 1ère spécialité physique – chimie sur le thème « Description d'un fluide au repos ». Les enseignant·e·s travaillent en binôme afin de favoriser les échanges et l'explicitation de leurs choix ; ils et elles doivent produire un document support pour l'enseignement ainsi qu'une fiche de préparation décrivant le scénario d'apprentissage dans lequel l'usage de ce document est envisagé.

Partie III (*théorie*) : analyse collective des productions issues de la partie II et institutionnalisation.

En introduction de cette partie, nous sondons l'avis des enseignant·e·s à propos des qualités et des défauts de notre *corpus* en tant que ressource pour l'enseignement par le biais d'un second questionnaire critique (annexe H).

Suivant l'exemple de Decamps et al. (2009), le scénario détaillé dans l'annexe D distingue pour chaque phase prévue dans la formation :

- le scénario d'apprentissage dans lequel sont explicités les objectifs de différentes phases, les activités qui y sont menées ainsi que leur caractère facultatif ou obligatoire, les ressources utilisées, les productions attendues, et enfin les conditions fixant le passage d'une phase à la suivante ;
- le scénario d'encadrement dans lequel sont explicitées les modalités d'intervention du formateur (proactives ou réactives), les fonctions de ces interventions, ainsi que les éléments d'informations fournis aux sujets formés.

3 Méthodologie de recherche

3.1 Recueil de données

3.1.1 Productions écrites

Chaque enseignant·e· formé·e est ainsi à l'origine de quatre productions écrites, dont deux élaborées en commun avec un·e (exceptionnellement deux) autre(s) enseignant·e(s) :

- **A** : réponse au questionnaire préliminaire (partie I) ;
- **B₁** : document support élaboré à partir du *corpus* (partie II, production en binôme) ;
- **B₂** : fiche de préparation précisant l'inscription du document support dans un scénario d'apprentissage (partie II, production en binôme)
- **C** : réponse au questionnaire critique (partie III)

Chacune de ces productions est rendue anonyme par la mention d'un code (un nombre correspondant au numéro du binôme et une lettre spécifiant le membre du binôme) en prévision d'éventuelles analyses brutes et croisées avec les autres productions d'un-e même enseignant-e.

3.1.2 Captations audio

Plusieurs captations audio sont réalisées :

- α : l'intégralité de la première partie de la formation est enregistrée afin de pouvoir analyser la teneur des échanges ayant cours entre les enseignant-e-s et le formateur à propos du *corpus*. En effet, toutes les interventions du formateur étant *a priori* de nature à interférer avec la façon spontanée dont les enseignant-e-s appréhendent le *corpus*, il est indispensable d'un point de vue méthodologique de pouvoir apprécier au mieux l'impact de ces interventions sur le cheminement intellectuel des enseignant-e-s.
- β : durant toute la phase pratique d'exploitation du *corpus* (partie II) chaque binôme (exceptionnellement trinôme) est enregistré. L'examen des échanges entre les membres d'un groupe permettra d'éclairer les intentions des enseignant-e-s ainsi que les difficultés et leviers rencontrés dans le processus d'exploitation du *corpus*. En outre le rôle des ressources utilisées ainsi que des éventuelles interventions du formateur pourra être apprécié ; autant d'éléments auquel l'examen seul des productions écrites ne permettrait pas d'accéder.
- γ : toute la partie III de la formation est elle aussi enregistrée, bien qu'elle ne fasse pas l'objet d'une analyse dans le cadre de cette recherche.

La figure 6.2 résume la répartition des données recueillies pour un cycle entier de formation.

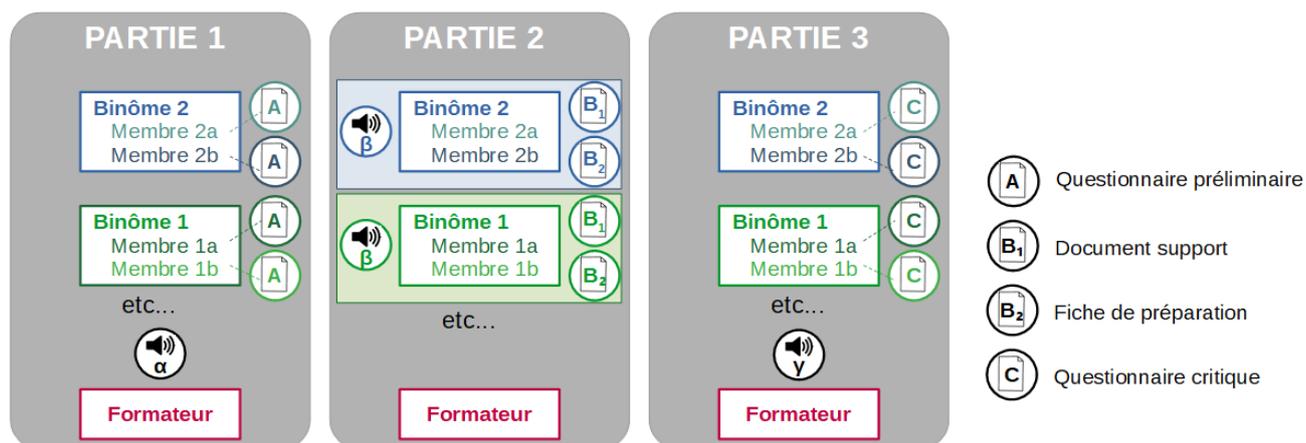


FIGURE 6.2 – Données recueillies au cours de l'ensemble de la formation

L'analyse des captations audio doit permettre d'accéder à l'appropriation du *corpus* par les enseignant-e-s tandis que celle des productions écrites de la phase II renseignera sur les transformations que les enseignant-e-s font subir à notre ressource.

3.2 Analyse des transformations du *corpus*

La second processus de la genèse documentaire ayant cours lors de la partie II de la formation est la transformation de notre *corpus* en un document support. Ce dernier devant s'inscrire dans un scénario d'apprentissage complet, l'analyse d'une transformation se compose non seulement de l'analyse du document support produit, mais aussi des éléments complémentaires fournis dans la fiche de préparation et dans les échanges captés.

3.2.1 Propriétés des documents supports

Dans un premier temps nous comparons les documents supports produits lors de la partie II de la formation (B_1 sur la figure 6.2) à notre *corpus* imposé comme ressource. Comme les enseignant·e·s sont libres de produire un document d'une nature de leur souhait (« Le document support peut prendre différentes formes : texte (simples extraits du *corpus* ou composition plus élaborée), énoncé d'exercice ou de travaux pratiques, vidéo, image etc. »), nous associons à chaque production un « degré de transformation » du *corpus* plus ou moins élevé selon l'échelle présentée figure 6.3. Le degré de transformation 0 correspondrait à un document support comportant l'intégralité du *corpus*, sans modification de celui-ci : ce n'est pas prévu par la consigne. La moindre transformation consiste alors à ne composer le document support qu'avec un (1) ou plusieurs (2) extrait(s) pris tel(s) quel(s). Les degrés de sophistication supérieurs viennent alors si les enseignant·e·s composent leur document support avec un (3) ou plusieurs (4) extrait(s) modifié(s). Par modification nous entendons retrait ou ajouts de phrases, de données (valeurs, formules, loi etc.) ou de schémas. Enfin, on peut aussi envisager que les enseignant·e·s proposent une composition totalement originale inspirée par notre *corpus* : soit un nouveau texte (5), soit une autre forme comme une vidéo, une mise en scène théâtralisée etc. (6)

| Extrait(s) brut(s) | | Extrait(s) retravaillé(s) | | Composition originale | |
|--------------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------------------|-------|
| un seul | plusieurs | un seul | plusieurs | écrite | autre |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |



FIGURE 6.3 – Degré de transformation du *corpus*

Dans cet effort de transformation du *corpus*, nous nous sommes tout particulièrement intéressée à certaines qualités des morceaux conservés ou retravaillés :

- présence du récit d'une expérience ou d'une observation (**exp**) ;
- présence d'arguments invalides (**inv**) ;
- présence d'arguments discriminant l'hypothèse des propriétés du vide comme justification de l'équilibre observé (**val1**) ;

- présence d'arguments corroborant l'hypothèse de la pesanteur et de l'élasticité de l'air comme justification de l'équilibre observé (val2).

3.2.2 Nature des situations d'apprentissage

Les enseignant·e-s devant construire une fiche de préparation (**B₂** sur la figure 6.2) « d'une situation d'apprentissage permettant d'acquérir certaines des compétences exigibles du programme » (annexe G), nous portons un intérêt particulier à quatre aspects qui circonscrivent le scénario d'apprentissage envisagé :

- objectifs du scénario (introduction d'une notion (**intro**), réinvestissement de connaissances et/ou de compétences (**appli**))
- la nature de la situation d'apprentissage envisagée (activité documentaire (**doc**), débat en classe (**deb**), travaux pratiques (**tp**), etc.)
- le savoir institutionnalisé ;
- les prérequis.

3.2.3 Apports du *corpus*

Nous souhaitons mesurer les apports du *corpus* sur les qualités des scénarios d'apprentissage envisagés : dans le chapitre précédent nous avons listé un nombre important d'objectifs d'apprentissage qui pourraient être définis à partir de notre ressource et d'éléments culturels qui pourraient être valorisés lors de la mise en œuvre en classe de scénarios construits à partir de notre *corpus*. Pour chaque scénario envisagé, nous identifions les différents éléments pris en charge par les scénarios envisagés par les enseignant·e-s, ce à trois niveaux :

- niveau 1 : prise en charge implicite dans le document support, identifiable selon les morceaux du *corpus* conservés et les éléments (texte, image, formule etc) ajoutés ;
- niveau 2 : prise en charge implicite dans les tâches prescrites ou dans le scénario envisagé, supposée selon les objectifs exprimés ou apparents ;
- niveau 3 : prise en charge explicite à une des étapes décrites dans la fiche de préparation et/ou dans l'explicitation orale des choix (analyse des captations audio) : intention de prise en charge exprimée clairement, volonté de faire de l'élément un objectif d'apprentissage. Ce niveau n'est pas sujet à notre interprétation, contrairement aux deux précédents.

Les différents éléments recherchés sont ceux détaillés lors de l'analyse du *corpus* présentée en fin de chapitre 5 :

- éléments susceptibles de motiver les élèves :

- *place faite à l'erreur (M1)* :
Prise en charge de niveau 1 : le document support défend au moins une hypothèse ou un argument invalide ;
Prise en charge de niveau 2 : une des tâches consiste à identifier ou expliciter cette hypothèse ou cet argument.
- *humanisation des savants (M2)* :
Prise en charge de niveau 1 : le document support fait intervenir plusieurs savants, en interaction explicite ou non, pas forcément tous connus ; ou bien les « faiblesses » de Galilée sont apparentes (doute et/ou défense d'une hypothèse invalide) ;
Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont amené·e·s à relever le raisonnement invalide de Galilée.
- *appui sur des faits concrets (M3)* :
Prise en charge de niveau 1 : le document support contient le récit d'une expérience ;
Prise en charge de niveau 2 : une tâche consiste à discuter des expériences, de l'interprétation de leurs résultats, des conditions matérielles de leur réalisation, et pas uniquement à exploiter calculatoirement des mesures.
- éléments relatif à la NoS :
 - *visées et caractéristiques générales de la science (E1)* :
Prise en charge de niveau 1 : le document support comporte la mention d'au moins une équivalence qui sert à assoir une hypothèse ou convaincre de la nécessité d'un résultat ;
Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont invité·e·s à identifier la recherche de cohérence et de globalité comme une caractéristique générale de la science.
 - *objets d'étude (E2)* :
Prise en charge de niveau 1 : le document support comporte des éléments à propos de la nature de l'air (pesanteur, élasticité), ou à propos des propriétés du vide ;
Prise en charge de niveau 2 : il est demandé aux élèves d'identifier l'objet étudié par les savants mis en scène. Cette prise de conscience de l'objet étudié dans le *corpus* nous semble incompatible avec le choix de considérer la pression atmosphérique comme pré-requis au scénario d'apprentissage.
 - *ressources disponibles pour l'étude (E3)* :
Prise en charge de niveau 1 : il reste dans le document support au moins une mention faite aux contraintes matérielles et/ou géographiques dont dépend l'étude ;
Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont amené·e·s à réfléchir aux difficultés matérielles relatives aux expériences, aux raisons pour lesquelles on ne pourrait pas les reproduire en classe par exemple. Cette réflexion nous semble compromise dans les scénarios d'apprentissage qui envisagent justement de faire faire aux élèves l'expérience du tube retourné avec différents liquides.

- *produits de l'étude (E4)* :
 Prise en charge de niveau 1 : le document support contient l'expression d'au moins une hypothèse (valide ou non) ;
 Prise en charge de niveau 2 : les élèves doivent eux-mêmes produire et défendre une hypothèse.
- *processus d'élaboration des produits (E5)* :
 Prise en charge de niveau 1 : dans le document support un résultat expérimental est mis en lien avec une hypothèse ou un argument ; ou un raisonnement hypothético-déductif est mis en œuvre de façon complète (hypothèse, prévision, confrontation) ;
 Prise en charge de niveau 2 : les élèves doivent eux-même élaborer ou mettre en œuvre un protocole, ou mettre en œuvre un raisonnement, pour valider une hypothèse.
- *attitudes permettant l'étude (E6)* :
 Prise en charge de niveau 1 : dans le document support il reste au moins une trace explicite d'émotion (doute, curiosité) exprimée par un savant ; ou il contient les critiques de Ricci à l'encontre de l'hypothèse de la pesanteur de l'air comme cause de la suspension du mercure dans le tube ;
 Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont incité-e-s à faire preuve d'esprit critique.
- *communauté scientifique (E7)* :
 Prise en charge de niveau 1 : le document support est composé d'au moins d'une lettre qui est explicitement présentée comme telle ; ou il comporte la mention explicite à une rencontre entre savants (voyage ou invitation pour assister à une expérience) ;
 Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont invité-e-s à remarquer le caractère collaboratif de la science, ou sont mis-e-s en situation de collaborer pour résoudre un problème.
- *dimension temporelle (E8)* :
 Prise en charge de niveau 1 : le document support contient des repères chronologiques qui montrent qu'un même sujet a fait l'objet de plusieurs années de discussion ;
 Prise en charge de niveau 2 : l'attention des élèves est portée d'une façon ou d'une autre sur l'étendue temporelle des discussions autour des questions du vide, de la pesanteur de l'air, ou encore du dispositif Torricellien.
- éléments conceptuels :
 - *enseignement par la controverse (D1)* :
 Prise en charge de niveau 1 : le document support puise à la fois dans les hypothèses et arguments valides, et les non valides ;
 Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont amenés à une construire une connaissance par confrontation de différents arguments.
 - *résonances avec les difficultés des élèves* :
 - * *résistance du vide (D2a)*

* *action verticale de l'air* (D2b)

Prise en charge de niveau 1 : au moins une des deux idées invalides ci-dessus est exprimée clairement dans le document support ;

Prise en charge de niveau 2 : les élèves adhérant·e·s à l'une de ces idées invalides sont amené·e·s à l'exprimer.

– *outils et leviers* :

* *discréditation* (D3a)

* *remplacement* (D3b)

* *mise à l'épreuve* (D3c)

Prise en charge de niveau 1 : le document support contient la contradiction expérimentale de Torricelli vis-à-vis de l'hypothèse du vide ; ou la portée de l'analogie de l'air et de la laine ; ou l'expression (avec des mots) de l'hypothèse de la pesanteur de l'air comme cause probable de la suspension des colonnes de liquide comparée à l'hypothèse du vide ; ou enfin le récit d'une des deux expériences (celle du Puy-de-Dôme et celle du vide dans le vide) présentée soit comme preuve de l'hypothèse de la pesanteur de l'air, soit comme contradiction de l'hypothèse du vide ;

Prise en charge de niveau 2 : la réflexion des élèves est portée successivement sur ces étapes de résolution (discrétisation, remplacement et mise à l'épreuve).

• éléments culturels :

– *repères chronologiques* :

* *éléments biographiques de savants* (C1a)

* *date d'élaboration de dispositifs ou de théories* (C1b)

Prise en charge de niveau 1 : présence d'au moins une date (écriture du texte, vie et mort des savants) dans le document support ;

Prise en charge de niveau 2 : au moins une tâche consiste *a minima*, à faire relever ces informations aux élèves.

– *monde savant au XVIIe siècle* :

* *position sociale des savants* (C2a) :

Prise en charge de niveau 1 : présence d'informations à propos des savants (nom traduisant leur genre, précision de leur appartenance à une religion) ;

Prise en charge de niveau 2 : au moins une tâche consiste *a minima*, à faire relever ces informations aux élèves ; éventuellement à mettre ces constats en perspective avec les profils scientifiques actuels.

* *interactions entre savants* (C2b) :

Prise en charge de niveau 1 : le document support est composé d'au moins d'une lettre qui est explicitement présentée comme telle ; ou il comporte la mention explicite à une rencontre entre savants (voyage ou invitation pour assister à une

expérience) ;

Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont *a minima* amené·e·s à remarquer la façon dont les savants interagissaient au XVIIe ; éventuellement à mettre ces procédés en perspective avec ceux en vigueur aujourd’hui.

* *mode de validation* (C2c) :

Prise en charge de niveau 1 : le document support est composé d’au moins une référence à la sollicitation de témoins lors des expériences ;

Prise en charge de niveau 2 : les élèves sont *a minima* amené·e·s à remarquer le mode de contrôle et de validation au XVIIe siècle ; éventuellement à comparer ces procédés avec ceux en vigueur aujourd’hui.

* *standards de langage* (C2d) :

Prise en charge de niveau 1 : les unités de mesure historiques apparaissent dans le document support ; ou les excuses de Magiotti écrivant en italien sont conservées ;

Prise en charge de niveau 2 : une des tâches consiste à faire un travail autour des unités (conversion, recherche documentaire) ; ou une réflexion est prévue à propos des unités et des langues privilégiées dans la communauté scientifique, au XVIIe siècle et/ou aujourd’hui.

3.3 Analyse de l’appropriation du *corpus*

La premier processus de la genèse documentaire opérée par les enseignant·e·s formé·e·s est l’appropriation de notre *corpus* ; il débute lors de la partie I de la formation, et se poursuit lors de la partie II.

Nous déclinons l’analyse de l’appropriation du *corpus* par les enseignant·e·s en distinguant deux aspects :

- les réactions spontanées : lors de la partie I elles correspondent aux prises de parole des enseignant·e·s, soit explicitement face au groupe, soit implicitement mais d’une façon suffisamment peu discrète pour avoir été captée par l’enregistreur. Lors de la partie II elles participent aux échanges entre membres de chaque binôme enregistré ;
- l’influence du formateur : lors de la partie I nous prêtons attention à la nature des inférences spontanées du formateur, ainsi qu’aux réponses apportées aux questions des enseignant·e·s. Lors de la partie II nous analysons le cas échéant les interventions du formateur auprès des binômes enregistrés.

Les interventions du formateur ou des enseignant·e·s sont mises autant que possible en lien avec les apports potentiels du *corpus* tels que déclinés dans la grille d’analyse présentée précédemment (sous-section 3.2.3) : ces apports potentiels sont-ils perçus *a priori* par les enseignant·e·s ? Si oui, s’agit-il d’une perception spontanée ou induite par le formateur ?

4 Résultats

Pour des questions d’opportunités la formation dont nous venons d’exposer le scénario fut adressée à un public d’apprentis-enseignant·e·s en M2 MEEF physique-chimie¹ ; elle s’inscrit ainsi dans le cadre de leur formation initiale, et implique qu’ils et elles n’étaient pas spécialement volontaires pour recevoir de formation sur ce volet de leurs pratiques. Notons que dans ce contexte l’enjeu du « vouloir agir » appelle à une vigilance toute particulière.

La formation a été dispensée auprès d’une trentaine² d’apprentis-enseignant·e·s de l’INSPE de Paris en trois parties espacées dans le temps : novembre 2021, décembre 2021 et février 2022. Le formateur à qui cette formation a été confiée est un des enseignant·e·s de ce groupe d’étudiant·e·es en M2 MEEF ; il s’agit par ailleurs d’un chercheur en didactique confirmé, co-directeur de ce travail doctoral.

4.1 Questionnaire préliminaire

4.1.1 Profil des enseignant·e·s sondé·e·s

Ce premier questionnaire (annexe E) vise à recueillir des informations relativement au profil, aux connaissances et modes de travail des enseignant·e·s formé·e·s. S’agissant d’apprenti-enseignant·e·s encore peu expérimenté·e·s il convient évidemment de traiter les réponses à propos des habitudes en matière d’usage de l’histoire des sciences plus comme des intentions exprimées que comme des pratiques effectives que l’on pourrait qualifier de courantes.

Au total 25 apprentis-enseignant·e·s ont répondu à ce premier questionnaire, provenant à part presque égale du collège (12) et du lycée (14). La plupart (17) atteste avoir déjà enseigné avant cette année de stage.

Notre formation à l’histoire des sciences est une première pour la majorité des enseignant·e·s (19) répondant à ce questionnaire. Pourtant, presque toutes et tous manifestent un minimum d’intérêt : à la question « avez-vous un goût personnel pour l’histoire des sciences », 16 répondent « oui plutôt » et 4 « oui beaucoup ». En dépit de cet enthousiasme globalement partagé, 18 enseignant·e·s confessent avoir rarement recours à l’histoire des sciences pour préparer des séances d’enseignement. Dans l’écrasante majorité des cas (21), ce recours, quand il a lieu, s’opère pour introduire une nouvelle notion.

4.1.2 Motivations en faveur de l’histoire des sciences

À la question des intérêts perçus par les enseignant·e·s en faveur d’un recours à l’histoire des sciences dans l’enseignement, beaucoup de réponses résonnent avec les potentialités que nous

1. Il ne s’agit pas des mêmes apprentis-enseignant·e·s que celles et ceux qui ont participé à l’enquête préliminaire rapportée dans le chapitre 4 de ce manuscrit.

2. En raison de la crise sanitaire le nombre d’enseignant·e·s a varié d’une session à l’autre, contrariant notre projet de faire des analyses croisées des différentes données recueillies lors de chaque partie de la formation.

entrevoyons nous-même et que nous avons catégorisées dans l'introduction de cette partie du manuscrit :

- intérêts motivationnels : les élèves peuvent être intéressé·e·s par l'aspect historique ou anecdotique (15) ; ils et elles peuvent s'identifier aux savants (1) ; c'est l'occasion de changer le statut de l'erreur (1) ;
- intérêts épistémologiques : une exposition historique peut illustrer la (ou les) méthode(s) scientifique(s) (8) et montrer à quel point la science avance de façon complexe (7) ;
- intérêts conceptuels : l'histoire des sciences peut éclairer les enseignant·e·s à propos des difficultés que les élèves risquent de rencontrer (6) ;
- intérêts culturels : apporter des éléments d'histoire des sciences contribue à la culture générale (7) et scientifique (21) des élèves.

4.1.3 Réticences vis-à-vis d'un tel recours

Quand aux réticences qui justifient en partie le faible recours à l'histoire des sciences par les enseignant·e·s formé·e·s, les raisons principales sont les suivantes :

- le manque de documentation (11) ;
- la difficulté des textes issus des sources primaires (11) ;
- le manque de pertinence de ce recours au regard des items au programme (10) ;
- le temps de préparation accru pour les enseignant·e·s (9) ;
- la nécessité de finir le programme dans les temps (7) ;
- le manque d'intérêt des élèves (6) ;
- le risque de semer la confusion dans l'esprit des élèves (4).

4.2 Transformations du *corpus*

L'analyse suivante porte sur les productions écrites et captations audio de 11 binômes (exceptionnellement trinômes).

4.2.1 Propriétés des documents support

Le tableau 6.1 regroupe les caractéristiques principales des documents supports produits : degré de transformation, extraits du *corpus* sur lequel les documents supports s'appuient, et enfin qualités auxquelles nous attachons une importance et que nous avons énumérées dans la section consacrée à la méthodologie de recherche (sous-section 3.2.1).

Nous remarquons rapidement qu'aucun binôme ne propose de composition originale, mais qu'au contraire tous les documents support consistent en une compilation plus ou moins

| | Degré de transformation | Extraits du <i>corpus</i> utilisés | | | | | | | | | Qualités | | | |
|-----------|-------------------------|------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----------|-----|------|------|
| | | A | B | C | D | E | F | G | H | I | exp | inv | val1 | val2 |
| Binôme 1 | 3 | X | | | | | | | X | | X | X | | |
| Binôme 2 | 1 | | | | X | | | | | | X | | X | X |
| Binôme 3 | 4 | | | | X | | | | X | X | X | | X | X |
| Binôme 4 | 4 | | | | | | | X | X | | X | | X | |
| Binôme 5 | 4 | | | | X | | | | X | | X | | | |
| Binôme 6 | 3 | | | | X | | | | | | X | | X | X |
| Binôme 7 | 3 | | | X | | | | | | | X | | | |
| Binôme 8 | 4 | X | | | X | X | | | | | X | X | X | X |
| Binôme 9 | 2 | | | | | | | | X | X | X | | | |
| Binôme 10 | 1 | | | | | | | | X | | X | | | |
| Binôme 11 | 3 | | | X | | | | | | | X | | | |

TABLE 6.1 – Analyse des documents support

élaborée d'extraits du *corpus*. Environ la moitié ne repose que sur un seul extrait ; la lettre exposant l'expérience de Torricelli (extrait D) et celle rendant compte de l'expérience au Puy-de-Dôme (extrait H) ayant clairement eu la faveur des enseignant·e·s.

Notons par ailleurs que les récits d'expériences ou d'observations sont présents dans tous les documents support, bien qu'ils n'occupent que la moitié des extraits de notre ressource. Par ailleurs les arguments invalides, que ce soit à propos des propriétés du vide, comme de l'action verticale de l'air, sont très peu relayés dans les documents supports. Les arguments et hypothèses valides le sont un peu plus, mais leur présence ne concerne toutefois qu'une petite moitié des documents support produits, ce qui laisse présager des situations d'apprentissage peu orientées vers une réflexion à leur sujet.

4.2.2 Nature des situations d'apprentissage

L'analyse des scénarios d'apprentissage dans lesquels s'inscrivent les documents supports produits est résumée dans le tableau 6.2. Les codes utilisés pour la nature des situations et de leurs objectifs sont ceux explicités dans la section consacrée à la méthodologie de recherche (sous-section 3.2.2).

Les enseignant·e·s envisagent majoritairement des activités mêlant expérience et recherche documentaire, et visant à introduire ou quelques fois réinvestir la loi fondamentale de l'hydrostatique. Une seule fiche de préparation mentionne un objectif d'apprentissage autre que notionnel : « alimenter la culture scientifique [des élèves] ». Dans quasiment tous les scénarios la pression (y compris atmosphérique) constitue un prérequis à la situation d'apprentissage envisagée, ce qui interpelle puisque c'est justement l'objet d'étude autour duquel s'animent les savants mis en scène dans notre *corpus*.

| | Nature | | | Objectif | | Savoir institutionnalisé | Prérequis |
|-----------|--------|-----|----|----------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | doc | deb | tp | intro | appli | | |
| Binôme 1 | X | | X | X | | Loi fondamentale | Tout le reste de l'extrait de B.O |
| Binôme 2 | X | | | | X | Loi fondamentale Écart relatif | Tout l'extrait de B.O |
| Binôme 3 | X | X | | X | | Loi fondamentale | Tout le reste de l'extrait de B.O |
| Binôme 4 | X | | X | X | | Loi fondamentale | Tout le reste de l'extrait de B.O |
| Binôme 5 | X | | X | X | | Loi fondamentale | Pression |
| Binôme 6 | X | | X | X | | Force pressante | Pression, loi de Mariotte |
| Binôme 7 | X | | X | X | | Loi fondamentale | Tout le reste de l'extrait de B.O |
| Binôme 8 | X | | X | X | | Loi fondamentale | Pression |
| Binôme 9 | X | | | | X | Force pressante | Pression |
| Binôme 10 | X | | | | X | Loi fondamentale | Tout l'extrait de B.O |
| Binôme 11 | X | | X | | X | Loi fondamentale | Pression, masse volumique |

TABLE 6.2 – Analyse des situations d'apprentissage

D'autre part les tâches prévues pour les élèves autour du document support consistent pour une grande part à extraire des informations, faire des mesures et/ou des calculs notamment sur la base des données chiffrées contenues dans les extraits.

4.2.3 Apports du corpus

| | motivational | | | épistémologique | | | | | | | | conceptuel | | | | | | culturel | | | | | | |
|-----------|--------------|----|----|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | M1 | M2 | M3 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | D1 | D2a | D2b | D3a | D3b | D3c | C1a | C1b | C2a | C2b | C2c | C2d | |
| Binôme 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |
| Binôme 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | | | | |

Légende :
 Niveau 1 : 
 Niveau 2 : 

TABLE 6.3 – Éléments du corpus pris en charge dans les situations d'apprentissage

Enfin nous regroupons dans un dernier tableau 6.3 le niveau de prise en charge, dans les situations d'apprentissage envisagées par les enseignant·e-s, des différents éléments issus de

notre *corpus* et que nous jugeons dignes d'intérêt. Les codes utilisés pour désigner ces éléments ainsi que l'explicitation des niveaux de prise en charge sont ceux détaillés dans la section consacrée à la méthodologie de recherche (3.2.3). Nous n'avons évalué le niveau 3 que pour le binôme 8 (voir sous-section suivante), donc nous ne le faisons pas apparaître dans le tableau 6.3.

Le constat frappant est le peu d'éléments pris en charge explicitement dans les situations d'apprentissage, quelque soit leur catégorie (lié à la motivation, à la NoS, aux concepts scientifiques ou à la culture). Au mieux les éléments apparaissent presque malgré eux dans les documents support produits puisque ceux-ci consistent majoritairement en des sélections d'extraits de notre *corpus* ; mais ni les tâches prescrites aux élèves, ni les intentions explicitées oralement ou dans les fiches de préparation ne laissent penser qu'une réelle prise en charge de ces éléments seraient assurée lors de la mise en œuvre de ces scénarios d'apprentissage. Le binôme qui affiche l'intention d' « alimenter la culture scientifique » des élèves est le binôme 8, dont le scénario présente le plus grand nombre d'éléments implicitement pris en charge, et est le seul à contenir une question directement en lien avec un aspect culturel (en l'occurrence les systèmes d'unités). Dans l'ensemble, l'apport de notre *corpus* se révèle donc bien maigre.

4.3 Appropriation du *corpus*

4.3.1 Première étape du processus d'appropriation (partie I)

Après avoir été introduit conformément aux précisions portées en annexe D, le *corpus* a été lu à haute voix par le formateur, et chaque extrait a fait l'objet d'échanges plus ou moins longs entre les enseignant·e·s et le formateur. Ceux-ci sont retranscrits dans l'annexe I.

4.3.1.1 Longueur et complexité du corpus

Entre le début et la fin de la lecture du *corpus*, il s'est écoulé une heure et dix minutes, ce qui n'est pas anodin : la première étape du processus d'appropriation est déjà très longue. On remarque que le temps passé pour chaque extrait décline progressivement, ce qui peut s'interpréter soit de façon pessimiste comme un effet de lassitude, soit de façon optimiste comme un signe d'adaptation progressive au sujet traité.

Les enseignant·e·s ont fait état de difficultés à différents endroits :

- pour comprendre l'analogie galiléenne entre les colonnes d'eau et les cordes de chanvre (fin de l'extrait A) ;
- pour comprendre le dispositif expérimental décrit par Galilée dans l'extrait A, notamment à propos de la possibilité d'obtenir des colonnes d'eau par « impulsion » (extrait A) ;
- pour comprendre l'expérience des deux « tuyaux » de Torricelli, l'appellation retenue laissant planer un doute quant à la fermeture des tubes à l'une des extrémités (extrait D) ;

- pour comprendre où est-ce que Boyle « fait le vide » (extrait I).

Notons que l'extrait C n'a pas posé de difficulté, mais l'obtention d'une colonne d'eau par déversement avait préalablement été expliquée par le formateur lors des discussions à propos de l'extrait A.

4.3.1.2 *Apports potentiels perçus a priori*

- atout motivationnel :
 - *erreur* (M1) : le formateur signale spontanément qu'« à l'époque tout le monde pensait que la nature a horreur du vide » (43'11") avant de préciser que « depuis Baliani on sait que la nature n'a pas horreur du vide » (45'30"). L'erreur portée notamment par Galilée est ainsi inévitablement remarquée par les enseignant·e·s ;
 - *humanisation des savants* (M2) : il n'a pas échappé aux enseignant·e·s que le *corpus* était vivant (ils et elles le remarquent spontanément alors même que la lecture collective ait commencé, et s'en amusent), les formulations révérencieuses à l'excès ont d'ailleurs suscité beaucoup de réactions. Par ailleurs le formateur précise à la fin de la formation que Ricci et Magiotti sont des savants moins connus mais que ce sont des maillons importants (1h28'51"), attirant un peu l'attention sur ces personnages que la postérité n'a pas très bien retenus.
- apport épistémologique :
 - *ressources* (E3) : la question des ressources est relevée à plusieurs reprises, d'abord dans l'extrait C où les enseignant·e·s s'étonnent avec amusement de la construction d'un siphon géant avant que le formateur précise spontanément qu'il était difficile de faire des tubes en verre de plus de dix mètre de long (51'55"). Ensuite ils et elles se sont de nouveau amusé·e·s à l'évocation par Pascal de son besoin de trouver une montagne assez haute proche d'une « personne capable d'apporter à cette épreuve toute l'exactitude nécessaire » : les questions de ressources géographiques et humaines est ainsi visiblement relevée ;
 - *processus d'élaboration des produits* (E5) : cette question est explicitement soulevée par une enseignante : « comment il peut conclure que du coup ce qui se crée c'est du vide et pas de l'air ? » (47'14"), ce à quoi le formateur finit par répondre qu'à l'époque il n'y pas d'expérience cruciale permettant de tirer cette conclusion, mais qu'« ils ont des arguments vous allez voir » (48'50") ;
 - *communauté scientifique* (E7) : en fin de séance (1h26'04") un enseignant pose la question de l'existence d'un cercle savant officiel en Europe au XVIIe siècle, ouvrant la discussion sur les modes de publication et de consultation des résultats des uns et des autres ;

- *dimension temporelle* (E8) : les enseignant·e·s s'intéressent spontanément au délai entre certaines lettres et leurs réponses : « mais ça va vite une semaine » (59'51") entre les extraits E et F ; ou au contraire « ça fait presque un an » (1h17'20") entre les extraits G et H ;
- apport conceptuel :
 - *résonances avec les difficultés des élèves* (D2a et D2b) : rien ne permet de dire si pour les enseignant·e·s les difficultés rencontrées par les savants mis en scène dans le *corpus* sont effectivement transposables aux élèves, mais en tout cas les deux difficultés (résistance du vide et action verticale de l'air) ont été remarquées et discutées par les enseignant·e·s. Le fait que la dernière n'ait d'ailleurs pas été explicitement résolue dans le corpus laisse les enseignant·e·s sur leur faim : « est-ce qu'on a des nouvelles de Ricci après sa déconvenue ? il s'est fait démonter » (1h29'17") ;
 - *outils et leviers* :
 - * *discréditation* (D3a) : l'expérience de Torricelli est bien dépeinte d'abord par les étudiant·e·s qui l'ont comprise puis par le formateur comme une preuve expérimentale que le vide n'exerce pas d'action spéciale sur la colonne de liquide (entre 56' et 59') ;
 - * *remplacement* (D3b) : l'hypothèse de la pesanteur de l'air formulée par Torricelli est présentée par le formateur comme l'hypothèse alternative à celle du vide : « si c'est pas le vide qui retient la colonne de mercure c'est putôt ici l'air qui l'empêche de tomber » (58'57") ;
- apport culturel :
 - *repères chronologiques* (C1a et C1b) : les enseignant·e·s sont sensibles aux repères chronologiques, ils et elles ont signalé une erreur dans la note de bas de page à propos des dates de vie et de mort de Pascal, et évoquent spontanément l'état des connaissances à l'époque considérée : caractère pesant de l'air (44'34"), invention du baromètre (1h16'04") ;
 - *interactions entre savants* (C2b) : les enseignant·e·s questionnent les pratiques en vigueur en matière de communication entre savant au XVIIe siècle et le formateur répond en mettant en perspective les pratiques anciennes avec celles contemporaines : « c'est les codes de l'époque on dit les choses poliment mais on attaque bien fort ça se fait toujours dans les conférences » (1h03'54") ou encore en parlant du XVIIe siècle « il n'y a pas les conférences internationales il y a des ouvrages et des lettres » (1h27'42") ;
 - *modes de validation* (C2c) : c'est le formateur lui même relève avec ironie la référence aux témoins dans l'extrait H : « il l'a fait devant huissiers cette expérience » (1h18'20") ;

- *standards de langage (C2d)* : les enseignant·e·s ont trouvé dans le *corpus* des incohérences de conversion d'unité, ce qui a donné lieu à une discussion à ce sujet en fin de séance : « une des difficultés de l'histoire des sciences » (1h33'40").

4.3.2 Deuxième étape du processus d'appropriation (partie II)

4.3.2.1 Analyse des échanges dans un binôme

Compte-tenu du peu d'éléments globalement pris en charge ne serait-ce qu'implicitement dans les documents produits et les scénarios d'apprentissage envisagés (voir sous-section précédente, tableau 6.3), nous avons finalement limité notre analyse complète des audios issus de la partie II de la formation au binôme prenant le plus d'éléments en charge : le binôme 8. La transcription des échanges captés au sein de ce binôme est rapportée dans l'annexe J. Nous avons cherché dans ces échanges des traces d'intention de prise en charge des éléments identifiés de façon plus ou moins explicite dans les productions écrites de ce binôme :

- *Éléments motivationnels* : les enseignant·e·s utilisent l'extrait de Ricci (exprimant ses doutes quant à la « bonne » hypothèse) mais on n'arrive pas très bien à savoir pourquoi. Le binôme lui-même ne sait pas bien : « donc là il faudrait qu'on ait un intérêt à l'avoir mis Ricci. Alors je me rappelle plus ce qu'il dit dans son truc » (45'49") alors que le binôme a déjà son « fil conducteur » (14'36"). En tout cas ce n'est pas pour valoriser le statut de l'erreur, leur discours allant même à l'inverse : « Ricci on s'en fout il va à la poubelle » (56'55"). En ce qui concerne le caractère vivant du discours l'utilité des formules de révérence n'est pas perçue : « tout ça on n'a pas besoin de le mettre » (32'51"). Le binôme s'amuse pourtant lui-même de ces formulations originales : « Votre seigneurie, votre révérence, auriez vous l'obligeance d'accomplir votre obligation ? » (11'28"), mais ça ne lui donne pas l'idée que leurs élèves pourraient apprécier aussi cet enrobage.
- *Éléments épistémologiques* : le binôme recherche sur internet « quand est-ce que justement la loi a été établie » (4'14") et se réjouit de trouver une date (« 1651 » (5'58")) et un nom (« Pascal » (47'31")) qu'il va pouvoir « mettre dans un encadré » (47'45"). Il n'en faut pas beaucoup plus pour comprendre que les préoccupations relatives à l'image de la nature de la science leur ont échappé.
- *Éléments conceptuels* : à plusieurs reprises les échanges traduisent les difficultés de compréhension dont souffre le binôme, ce qui laisse penser qu'il est lui-même dépassé par le contenu conceptuel en jeu : « c'est profondeur ou c'est hauteur ? » (52'32") , « parce que si tu veux, la pression, c'est une manifestation, effectivement, du poids appliqué par chacune des molécules d'air » (57'16"). Par ailleurs le potentiel didactique de l'expérience des deux tubes de Torricelli n'est pas perçu : « le truc sur l'ampoule de verre je pense que ce n'est pas nécessaire » (13'28").
- *Éléments culturels* : on remarque à plusieurs reprises que le binôme a le souci du détail en ce qui concerne les dates, les noms et même les prénoms fournis dans leurs documents

écrits, quitte à chercher sur internet pour être exhaustif sur ces questions. En revanche on n'entend rien à propos des raisons de cette obsession. Une discussion est amorcée à propos du genre d'Evangelista Torricelli : « c'est un garçon ou une fille » (15'32") mais à aucun moment elle ne s'oriente vers cette réflexion que les savants du XVIIe siècle sont des hommes. Il est peu probable que cet élément culturel soit pris en charge dans la séance prévue par ce binôme. Enfin en ce qui concerne les unités, elles sont occultées de la discussion, l'un des membres du binôme dicte mécaniquement l'unité originale et sa conversion dans le système international, par exemple : « entre crochets 74,9 cm » (23'37")

En résumé, aucun des éléments que nous avons identifiés comme pris en charge au moins de manière implicite le sont intentionnellement, hormis peut-être en ce qui concerne les noms des savants ou les dates des extraits. Mais cette rigueur sélective semble plus relever de l'automatisme inconscient que d'une réelle prise de position quant à leur intérêt, la question de leur traitement avec les élèves n'étant pas soulevée.

4.3.2.2 Schèmes d'utilisation de notre corpus

En parcourant les différentes captations audio, il semble se répéter la chaîne d'actions suivante :

- explicitation des objectifs d'apprentissage (très peu questionné, la loi fondamentale de l'hydrostatique étant identifiée spontanément et sans hésitation comme le contenu conceptuel en jeu) ;
- sélection et organisation des extraits du *corpus* retenus (sans qu'on ne sache toujours pourquoi ceux-là et pas d'autres) pour répondre à la consigne « Élaborer un document support » (annexe G) ;
- élaboration du scénario sur la base d'un document support désormais immuable.

Ce qui pourrait éventuellement être identifié comme des schèmes d'utilisation de notre *corpus* (si cette chaîne d'action se généralisait, ce qui n'est pas absolument le cas) est à considérer relativement à la consigne très spécifique qui a été imposée, notamment envisager une séance « permettant d'acquérir certaines des compétences exigibles du programme sur le thème ci-dessous » et « s'appuyer sur tout ou partie du corpus ». Cette tendance à ne pas envisager l'élaboration du document support simultanément à celle de la séance à proprement parler nous semble quand même significative.

4.3.3 Questionnaire critique

De nouveau 25 enseignant·e-s ont répondu à ce dernier questionnaire (annexe H), mais il ne s'agit pas exactement du même groupe que celui ayant répondu au questionnaire préliminaire, certain·e-s enseignant·e-s ayant été absent·e à l'une des séances mais pas à l'autre.

4.3.3.1 Attentes des enseignant·e·s

Interrogé·e·s à propos du type de documentation qu'ils et elles aimeraient trouver pour les aider dans la préparation de séances basées sur l'histoire des sciences, les enseignant·e·s sélectionnent les réponses dans cet ordre :

- des idées d'activités (20) ;
- des scénarios pédagogiques complets et détaillés (14) ;
- des résumés des repères spatiaux temporels (12) ;
- des extraits de textes historiques modifiés (traduits, reformulés etc.) (12) ;
- des extraits de textes historiques originaux (10) ;
- des références bibliographiques (7).

En ce qui concerne les informations complémentaires attendues, on compte principalement les éléments de contextualisation (16), l'explicitation des enjeux (12) ainsi qu'une mise en relation avec les items des programmes scolaires (12), et des explicitations du contenu scientifique (10). Les éléments biographiques ne semblent pas intéresser les enseignant·e·s puisque cette case n'a été cochée que trois fois.

Il aurait été intéressant de poser ces mêmes questions au début de la formation, avant l'éventuel découragement provoqué par la longueur et la complexité de notre *corpus*. La partie III de la formation, dont nous ne faisons ni analyse ni compte-rendu dans ce manuscrit, participe notamment à répondre aux attentes des enseignant·e·s en matière de documentation.

4.3.3.2 Évaluation du corpus

Le tableau 6.4 dénombre les réponses des enseignant·e·s quant à leurs sentiments vis-à-vis de la ressource que nous leur proposons. Pour chaque qualité de notre ressource, les enseignant·e·s approuvent ou non sur une échelle allant de « non, pas du tout ! » (1) jusqu'à « Oui, vraiment ! » (4), et passant par les opinions plus modérées « non, pas vraiment » (2) et « oui, plutôt » (3).

Il faut avouer humblement que notre *corpus* n'a pas rencontré un succès retentissant auprès des enseignant·e·s, ces dernier·e·s le trouvant majoritairement trop long et trop complexe, notamment « pour les élèves » (bien qu'il ne leur soit pas directement adressé). Dans les suggestions d'amélioration on retient principalement l'idée de proposer un résumé, un abrégé, et/ou une version simplifiée, encore une fois pour les élèves. Nous en déduisons que la ressource que nous proposons n'est pas adaptée pour que les enseignant·e·s se l'approprient de façon autonome en vue d'élaborer une situation d'apprentissage basée sur l'histoire des sciences.

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| utile | 0 | 13 | 12 | 0 |
| intéressante | 1 | 4 | 15 | 5 |
| inspirante | 1 | 10 | 11 | 3 |
| accessible | 1 | 10 | 8 | 2 |
| exploitable | 6 | 15 | 4 | 0 |
| contextualisée | 0 | 4 | 15 | 5 |
| à généraliser | 2 | 8 | 11 | 4 |

TABLE 6.4 – Évaluation du *corpus* par les enseignant·e·s

5 Discussion

5.1 Évaluation du *corpus*

Les enseignant·e·s formé·e·s ont globalement été personnellement intéressé·e·s par notre *corpus* : celui-ci participe à leur culture et leur apporte des connaissances qu'ils et elles pourraient réinvestir dans le cadre de leur enseignement. Toutefois, en tant que ressource à transformer en vue d'élaborer une situation d'apprentissage, notre *corpus* présente plus de défauts que de qualités. C'est du moins ce que les productions analysées laissent penser, et ce que confirment globalement les réponses au questionnaire critique distribué en fin de formation.

Le premier défaut est la longueur de notre ressource. Composé de neuf extraits de lettres chacun assez long, l'appropriation nécessite beaucoup de temps. Entre la séance de présentation du *corpus* et celle d'exploitation, les enseignant·e·s formé·e·s ont disposé de quasiment quatre heures pour élaborer un document support et le scénario d'apprentissage associé. Nous en avons reçu seulement les contours, ce qui veut dire qu'il faudrait compter du temps supplémentaire de mise en forme afin de rendre le scénario opérationnel. L'appropriation et la transformation de notre *corpus* sont ainsi trop chronophages pour constituer une ressource que les enseignant·e·s exploiteraient spontanément en autonomie.

Le second défaut est la complexité de son contenu, dont plus de la moitié des enseignant·e·s s'est plainte. On peut souligner l'ironie de cette volonté des enseignant·e·s de vouloir rendre compte de la complexité de l'entreprise scientifique tout en disposant de ressources simplifiées à l'extrême. Malgré les éclaircissements apportés par le formateur lors de la première séance, la majorité ne semble pas avoir saisi l'enjeu conceptuel sous-jacent aux débats que notre ressource rapporte.

Ainsi notre *corpus* est une ressource intéressante mais qui mériterait d'être encore transformée en une ressource intermédiaire à mettre entre les mains des enseignant·e·s pour qu'ils puissent en faire usage de façon autonome dans l'élaboration de leurs séances d'enseignement.

5.2 Apport de l'histoire des sciences

On remarque que les scénarios d'apprentissage dans lesquels s'inscrivent les documents supports prévoient majoritairement des tâches qui ne sont ni inspirées, ni directement mises en relation avec les aspects historiques. Les documents supports se présentent principalement comme des compte-rendu d'expérience dont les élèves n'ont pas tant à comprendre le sens qu'à exploiter les valeurs numériques. Dans cette mesure, il aurait bien pu ne pas s'agir d'histoire des sciences, les documents n'en auraient pas été tellement différents. On rejoint ainsi le constat fait par Guedj et Dusseau (1999) qui qualifient l'histoire des sciences de « cerise [...] sur leur gâteau d'enseignement ». La superficialité du recours à l'histoire des sciences par les enseignant·e·s est d'ailleurs assez bien illustrée par un des binômes qui, dans son document support, propose d'ajouter aux extraits retenus les « têtes de Galilée et Pascal ».

Un des binômes se démarque toutefois de ce constat puisque le *corpus* semble lui avoir inspiré un scénario poussant les élèves à exprimer leur croyance en la force d'aspiration du vide. Cette exploitation d'une potentielle résonance entre difficulté des élèves et difficulté rencontrée par les savants du XVII^e siècle est certainement l'apport le plus marquant de notre *corpus* dans toutes les productions que nous avons analysées.

5.3 Image de la NoS véhiculée par les documents et scénarios

En conséquence de cette indépendance de l'histoire des sciences vis-à-vis des objectifs d'apprentissage définis dans les différents scénarios, la prise en charge des éléments relatifs à la NoS est uniquement implicite, donc soumise à l'interprétation des élèves. Si l'usage de plusieurs extraits laisse régulièrement entrevoir la nature collective de l'entreprise scientifique, le choix des extraits et donc des savants présentés renvoie à une histoire des vainqueurs. De plus le rôle de la communauté n'est pas mis en lumière dans les documents produits : on ne perçoit pas le caractère décisif des idées des uns, et des réticences des autres dans les progrès dont notre *corpus* se fait témoin. Les idées et raisonnements occupent d'ailleurs bien peu de place dans les documents support produits par les enseignant·e·s, l'accent étant plus fréquemment mis sur les données chiffrées, et les récits d'expérience dont les questions techniques sont éludées et les objectifs détournés. L'expérience du Puy-de-Dôme peut ainsi apparaître dans certains scénarios d'apprentissage comme une opportunité de mesurer la pression atmosphérique à haute altitude, voire à déterminer la masse volumique d'un fluide. La complexité de l'entreprise scientifique n'apparaît pas même implicitement dans la plupart des scénarios envisagés : extensions temporelle et spatiale réduites à l'extrême, visées et objet d'étude associés aux extraits retenus non clarifiés, interdépendance des questions techniques et de l'évolution des idées souvent occultée et prévalence de la démarche inductive dans les activités envisagées pour les élèves.

Références du chapitre 6

- Beaufils, D., Maurines, L., & Chapuis, C. (2010). Compte-rendu d'enquête sur l'histoire des sciences auprès d'enseignants de physique—Chimie. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 104(924), 581-598.
- Decamps, S., Lièvre, B. D., & Depover, C. (2009). Entre scénario d'apprentissage et scénario d'encadrement. *Distances et savoirs*, 7(2), 141-154.
- Emprin, F. (2007). *Formation initiale et continue pour l'enseignement des mathématiques avec les TICE : Cadre d'analyse des formations et ingénierie didactique*. [These de doctorat, Paris 7]. <https://www.theses.fr/2007PA070050>
- Guedj, M., & Dusseau, J.-M. (1999). A propos d'une formation des enseignants de sciences physiques à l'épistémologie et à l'histoire des sciences. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 93(815), 991-1015.
- Gueudet, G., & Trouche, L. (2008). Du travail documentaire des enseignants : Genèses, collectifs, communautés. *Éducation et didactique*, 2(3). <https://doi.org/10.0/educationdidactique.342>
- Gueudet, G., & Trouche, L. (2021). Étudier les interactions professeurs-ressources : Questions de méthode. *Éducation et didactique*, 15(2), 141-158.
- Maurines, L., & Beaufils, D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : L'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, 271-305.
- Rabardel, P. (1995). Les hommes et les technologies : approche cognitive des instruments contemporains (p. 239). Armand Colin.
- Rabardel, P., & Beguin, P. (2005). Instrument mediated activity : From subject development to anthropocentric design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(5), 429-461. <https://doi.org/10.1080/14639220500078179>
- Vergnaud, G. (2011). La pensée est un geste Comment analyser la forme opératoire de la connaissance. *Enfance*, 1(1), 37-48. <https://doi.org/10.3917/enf1.111.0037>

Conclusion de la reconstruction didactique

La reconstruction didactique que nous avons proposée a l'originalité de consister en un *corpus* de correspondances. De par la nature de ce matériau habituellement peu exploité, nous sommes parvenue à élaborer une ressource permettant de définir une multitude d'objectifs d'apprentissage qui ne se limitent pas aux contenus notionnels. Nous avons notamment été animée par le souhait de faire de cette ressource une occasion d'améliorer l'image que les élèves ont de la nature de la science. Nous avons évalué l'appropriation et les transformations de notre *corpus* par un groupe d'apprentis-enseignant·e·s dans le cadre de leur formation continue. On tire de cette étude deux conclusions :

La première est que la richesse de notre *corpus* est plutôt perçue comme de la complexité par les enseignant·e·s formé·e·s. Ces dernier·e·s jugent cette ressource trop longue et trop complexe, et nous conseillent d'en proposer une version simplifiée plus facilement exploitable pour préparer des séances d'enseignement. Nous reconnaissons qu'en l'état, notre *corpus* est ardu à appréhender en autonomie. Ce constat trahit une préoccupation sous-jacente à notre entreprise de « super » reconstruction didactique : celle de savoir comment les enseignant·e·s interagissent avec ce type de ressource. Nous avons volontairement privilégié la multitude des objectifs définissables sur la base de notre *corpus* à la simplicité de ce dernier, afin d'être en mesure d'évaluer quel(s) type(s) d'objectif(s) les enseignant·e·s se fixent quand ils et elles ont recours à l'histoire des sciences.

La deuxième conclusion concerne ainsi cette dernière question : l'apport de l'histoire des sciences dans les situations d'apprentissage envisagées par les enseignant·e·s est réduit à quelques maigres aspects culturels, l'image de la nature de la science véhiculée dans ces scénarios étant laissée à l'interprétation des élèves. Les enseignant·e·s se concentrent exclusivement sur les objectifs conceptuels, et ce en dépit des objets d'étude véritablement en question dans le *corpus* que nous leur avons soumis : c'est ainsi que dans tous les scénarios que nous avons analysés, c'est la loi fondamentale de l'hydrostatique qui constitue le savoir institutionnalisé, alors que le *corpus* se fait plutôt témoin de l'émergence du concept de pression atmosphérique. Cette concentration exclusive sur les objectifs conceptuels n'est probablement pas étrangère à la consigne que nous avons imposée : en indiquant les compétences exigibles du programme scolaire sur lesquelles la séance élaborée doit s'orienter nous introduisons inévitablement un biais. Ceci dit, rien dans notre consigne n'imposait de se limiter à un seul objectif d'enseignement, et nous pouvions nous attendre à ce que d'autres aspects du *corpus* que nous avons identifiés comme valorisables à la fin du chapitre 5 soient explicitement pris en charge dans les scénarios envisagés par les enseignant·e·s.

Nos résultats sont à prendre avec quelques précautions : tout d'abord, notre formation a été adressée à des enseignant·e·s stagiaires. Il serait intéressant de savoir si les conclusions

seraient les mêmes avec un public plus expérimenté. Ensuite, les documents support que nous avons analysés ont été produits dans un cadre qui a possiblement été déterminant dans la façon dont les enseignant·e·s ont introduit l’histoire des sciences dans leur scénario : travail en binôme, consigne leur imposant de s’appuyer sur « tout ou partie du *corpus* », interaction avec le formateur etc. Dans un cadre moins contraint, on peut imaginer que les enseignant·e·s auraient pris plus de libertés, par exemple en n’incluant pas d’extrait du *corpus* dans leurs documents mais en utilisant celui-ci simplement comme source d’inspiration du scénario. Enfin, nous n’avons accès qu’au scénario prévu, non pas à une séance effective en classe. Rien n’exclut que les éléments que nous jugeons dignes d’intérêt et qui semblent être négligés par les enseignant·e·s dans leurs scénarios ne feraient pas l’objet d’une prise en charge plus explicite en classe, à l’oral, par exemple en réponse à des questions d’élèves.

Bien qu’à relativiser, nos analyses révèlent quand même des limites qui méritent d’être considérées sérieusement. Une façon de remédier simultanément aux deux conclusions assez négatives à propos de l’appropriation et des transformations de notre *corpus* par les enseignant·e·s serait de proposer, en plus, une (ou plusieurs) séance(s) « prête(s) à l’emploi » basé(es) sur notre *corpus* et explicitant les différents objectifs d’apprentissage qu’elle(s) se fixe(nt). Dans la perspective d’une prise en main en autonomie des produits de notre recherche par les enseignant·e·s il fait peu de doute qu’une reconstruction didactique, même très élaborée, ne présente pas autant d’intérêt qu’on pourrait l’espérer si elle ne prend pas la forme aboutie d’une séance complète, tel que prévu par de Hosson (2011) dans le cadre originel.

Conclusion générale

1 Principaux résultats

1.1 Difficultés recensées

La pression est une grandeur physique qui revêt de multiples facettes que l'analyse de contenu (chapitre 1) contribue à mettre en cohérence, notamment en ce qui concerne les différentes échelles de description auxquelles elle intervient. Quelques subtilités méritent d'être remarquées dans ce passage d'une échelle à une autre.

La première est relative au lien entre pression et vitesse : définie à l'échelle mésoscopique comme le tiers de la trace du tenseur des contraintes *indépendantes de la vitesse*, nous avons établi dans quelques cas simples une relation sans équivoque entre pression et vitesse à l'échelle de l'écoulement (relation de Bernoulli). La relation vitesse / pression est ainsi non triviale voire parfois contre-intuitive.

La deuxième concerne le lien entre pression et densité moléculaire : en postulant l'incompressibilité d'un fluide, on démontre d'une part la loi fondamentale de l'hydrostatique (pour les fluides au repos), et d'autre part la loi de Bernoulli rendant compte de l'effet Venturi (pour les fluides parfaits en écoulement stationnaire). Ni l'une ni l'autre de ces lois macroscopiques ne peut pourtant s'interpréter, au niveau microscopique, en faisant l'hypothèse de l'homogénéité stricte de la densité moléculaire. L'incompressibilité constitue donc une approximation acceptable au niveau macroscopique mais pas à l'échelle microscopique où elle doit être relativisée pour rendre compte des variations d'interactions intermoléculaires, et donc de pression dans les fluides « incompressibles ».

La troisième et dernière subtilité tient à la notion de fluide : unifiant deux états de la matière (liquide et gazeux) traités indifféremment *via* les lois mésoscopiques, elle peut porter à confusion à l'échelle macroscopique où chacun des états physiques que le mot désigne fait l'objet d'hypothèses spécifiques. Ainsi la loi fondamentale de l'hydrostatique ne concerne que les liquides, autrement dit les fluides incompressibles ; tandis que le modèle de l'atmosphère isotherme décrit les variations de pression d'un gaz parfait avec l'altitude. Or, sur une épaisseur de quelques dizaines de mètres, nous avons montré que le modèle de l'atmosphère isotherme prévoit une décroissance linéaire de la pression avec l'altitude, tout comme le prévoit la loi fondamentale de l'hydrostatique. Cette dernière similitude comportementale entre les liquides et les gaz n'est pas unique en son genre ; mais derrière cette apparente unité, confortée par l'emploi du terme « fluide », se cachent des interprétations microscopiques et des hypothèses de départ différentes.

Ainsi donc à plusieurs égards nous trouvons des motifs de difficultés dans l'enseignement et l'apprentissage de phénomènes liés à la notion de pression. Hormis celles relatives au lien pression / vitesse qui n'ont pour l'instant pas fait l'objet d'étude particulière, l'état de l'art (chapitre 2) révèle que ces difficultés supposées sont avérées pour un nombre important d'étudiant·e·s : ils et elles associent préférentiellement la pression à la densité moléculaire, négligeant les aspects cinétiques dans les gaz, et peinant ainsi à expliquer les variations de pression au sein des liquides supposés incompressibles. À ces difficultés s'ajoutent de nombreuses autres

que les élèves peuvent rencontrer dès le plus jeune âge. Certaines relèvent plutôt de la conception naïve : la pression est l'apanage des situations exceptionnelles, la nature à horreur du vide, la pression dépend de la quantité totale de liquide dans un récipient et de la forme de ce dernier. D'autres semblent découler d'interprétations abusives ou erronées des principes enseignés : la poussée d'Archimède n'a rien à voir avec la pression, la pression est égale à une force, souvent verticale, voire assimilée au poids, les forces de pression ne se propagent pas de façon isotrope. D'autres, enfin, résultent de raisonnements bien connus en physique et dont la mise en œuvre s'avère parfois peu fructueuse : raisonnements animiste, finaliste, causal, local, mécanique ou encore mathématique.

Ces difficultés auxquelles se heurtent les élèves et étudiant·e·s résonnent, pour certaines, avec celles rencontrées par les savants au cours de l'émergence du concept de pression. La reconstruction historique (chapitre 3) que nous avons proposée montre un processus très lent de construction du concept de pression qui trahit la complexité de ce dernier. Initiée dès l'antiquité par des réflexions à propos du vide et de la flottaison, elle est poursuivie au moyen-âge par Stevin qui énonce des principes d'hydrostatique à propos du « pressement » de l'eau au fond des récipients. Toutes ces réflexions menées indépendamment, ajoutées à celles du début du XVIIe siècle à propos de la pesanteur de l'air, ne sont que des prémisses de la controverse majeure qui conduira, au milieu du XVIIe siècle, à l'émergence du concept de pression atmosphérique et aux lois de Boyle et Mariotte. C'est autour de cette controverse qu'est axée la reconstruction historique que nous avons proposée. Nous y mettons en évidence non seulement les obstacles auxquels se sont heurtés certains savants dans l'acceptation de l'idée de pression de l'air (croyance en l'horreur de la nature pour le vide, confusion entre pesanteur et pression de l'air, entraînant une difficulté à concevoir une action pressante autrement que verticale) mais aussi les arguments qui ont conduit à l'acceptation progressive du concept de pression atmosphérique (discretisation de l'*horror vacui*, analogies air / eau et air / laine, et expériences décisives du Puy-de-Dôme et du vide dans le vide). La fin de cette controverse, datée environ à 1660, n'est que le commencement de l'élaboration de toutes les facettes du concept de pression dans les décennies qui ont suivi : unification des liquides et des gaz sous l'appellation fluide, théories des écoulements, interprétation microscopiques. Dans le même temps, les lois et principes concernant les fluides sont progressivement formalisés et mathématisés, l'approche hydrostatique contemporaine prévalant désormais sur l'approche mécanique adoptée par les savants du XVIIe siècle.

Interpelée par cette différence d'approche entre celle, mécanique, adoptée lors de l'émergence du concept de pression au XVIIe siècle, et celle que nous qualifions d'hydrostatique, privilégiée en contexte scolaire, nous avons mené une dernière enquête (chapitre 4) visant à éprouver l'impact de l'approche employée sur la compréhension des phénomènes liés à la pression. Cette étude, menée auprès d'une centaine d'enseignant·e·s stagiaires, est portée par l'hypothèse que la compréhension pourrait être favorisée si les situations impliquant un liquide au repos étaient

appréhendées simultanément dans ce que nous avons défini comme deux cadres de rationalité : l'un mécanique, l'autre hydrostatique. Les résultats de cette recherche corroborent notre hypothèse puisque les enseignant·e·s sondé·e·s font moins de prévisions erronées à propos de deux situations impliquant un liquide au repos s'ils fondent leur justification dans les deux cadres à la fois. Bien que réalisée auprès d'un effectif répondant assez restreint, et orientée uniquement vers les liquides au repos, cette étude porte à croire que l'histoire des sciences pourrait être un levier pour favoriser la compréhension des phénomènes liés à la pression dans la mesure où elle offre une approche complémentaire à celle privilégiée traditionnellement dans l'enseignement.

1.2 Notre apport pour y remédier

Compte tenu des nombreuses difficultés que recouvre le concept de pression nous nous sommes fixé comme objectif de contribuer à y remédier. Encouragée à la fois par les résultats de nos différentes enquêtes préliminaires et surtout par les argumentaires récurrents en ce sens, nous avons pris le parti de nous appuyer sur l'histoire des sciences pour ce faire. Cette entreprise n'est pas inédite : comme nous l'avons présenté dans l'état de l'art (chapitre 2), quelques recherches ont déjà porté sur la proposition de solutions aux difficultés recensées dans la littérature autour de l'enseignement des phénomènes liés à la pression, et parmi celles-ci deux sont basées sur l'histoire des sciences : la première vise l'enseignement d'un modèle particulière des gaz au niveau 4e, la seconde celui des propriétés thermoélastiques des gaz au niveau universitaire. Notre propre reconstruction didactique (chapitre 5) se distingue des deux propositions précédemment évoquées à différents égards : premièrement par le niveau et contenu d'enseignement qu'elle vise ; deuxièmement par l'extension de ses ambitions à des objectifs non conceptuels. Ce dernier point constitue une prise de position théorique forte : quitte à faire l'effort d'introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement, nous considérons qu'il est possible si ce n'est souhaitable d'en tirer le maximum de profit à différents égards : motivationnel, épistémologique, conceptuel et culturel.

Ainsi nous avons élaboré un *corpus* de textes issus de sources primaires à destination des enseignant·e·s de première générale spécialité physique-chimie ; ce *corpus* a été pensé en tant que ressource utilisable par les enseignant·e·s pour préparer des séances d'enseignement sur le thème « description d'un fluide au repos ». De nombreuses préoccupations ont présidé à son élaboration : la pertinence au regard du programme et des difficultés potentielles des élèves pointées dans l'état de l'art (préoccupation d'ordre conceptuel), l'inscription dans la NoS, c'est-à-dire le souhait de faire de notre ressource une opportunité d'améliorer l'image que les élèves ont de la nature de la science (préoccupation d'ordre épistémologique), l'adhésion des élèves de lycée à ce genre de contenu (préoccupation d'ordre motivationnel) et enfin l'immersion la plus authentique possible dans le contexte scientifique du XVIIe siècle (préoccupation d'ordre culturel). Compte-tenu de ces ambitions, il nous est apparu que les correspondances historiques présentaient de nombreuses qualités qui leur ont valu de constituer le matériau unique de notre *corpus*. Ce dernier, composé de neuf extraits de lettres échangées par des sa-

vants italiens, français et anglais au milieu du XVII^e siècle sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air, peut selon nous servir de nombreux objectifs d'apprentissage simultanément.

Nous avons procédé à une évaluation de notre ressource (chapitre 6) selon deux critères : la façon dont les enseignant·e·s l'accueillent (appropriation), et la qualité des exploitations qu'ils et elles proposent d'en faire (transformation). Pour ce faire, nous avons élaboré un scénario de formation au cours duquel notre *corpus* serait d'abord présenté à des enseignant·e·s, puis ces dernier·e·s seraient invité·e·s à s'appuyer dessus pour créer un document support dont l'emploi s'inscrirait dans un scénario d'apprentissage. Cette formation a effectivement été dispensée auprès d'une trentaine d'enseignant·e·s stagiaire·s. Les analyses des diverses données recueillies (audios et écrites) convergent vers une même conclusion : les apprentis-enseignant·e·s sont largement passé·e·s à côté du potentiel que nous entrevoyions dans notre *corpus*. Premièrement, bien que définissant des objectifs d'apprentissage conceptuels sur la base de notre ressource, ils et elles ne se sont pas appuyé dessus pour en faire un usage didactique, visant à anticiper ou contourner les difficultés que les élèves sont susceptibles de rencontrer. Or la première raison d'être de notre *corpus* est justement de nature didactique puisque nous l'avons élaboré dans l'idée de contribuer à améliorer l'enseignement des phénomènes liés à cette notion complexe qu'est la pression. Deuxièmement en se cantonnant à des objectifs d'apprentissage conceptuels les apprentis-enseignant·e·s ont négligé les apports culturels, motivationnels et épistémologiques offerts par notre ressource. Dans la majorité des cas les apports de cette nature dans les scénarios d'apprentissage envisagés sont implicites et si édulcorés qu'ils véhiculent une image de la science à l'opposé de ce que nous avons souhaité proposer. C'est ainsi que nous assumons que sans accompagnement supplémentaire notre *corpus* ne constitue pas une ressource facilement valorisable par les enseignant·e·s pour élaborer une séance d'enseignement.

2 Perspectives

2.1 Formation des enseignant·e·s

Par « accompagnement supplémentaire » nous entendons par exemple « formation ». Le questionnaire préliminaire que nous avons diffusé au cours de la formation dont nous rendons compte dans le chapitre 6 nous apprend que, malgré les encouragements institutionnels en faveur du recours à l'histoire des sciences dans l'enseignement, la majorité des apprentis-enseignant·e·s n'a jamais reçu de formation sur ce volet de leurs pratiques. Ils et elles évoquent spontanément les intérêts que nous percevons nous-même à recourir à l'histoire des sciences pour préparer des séances d'enseignement (motivationnels, épistémologiques, conceptuels et culturels) mais le font finalement assez peu, notamment à cause des tensions qui semblent exister entre histoire des sciences et prescriptions curriculaires d'une part, et entre histoire des sciences et appétences des élèves d'autre part. De notre point de vue les tensions sont modérées si on envisage un recours abouti à l'histoire des sciences, c'est-à-dire si on ne se prive d'aucun de ses apports

potentiels. C'est l'hypothèse qui sous-tend l'élaboration du *corpus* que nous avons présenté dans le chapitre 5, et qui mériterait d'être défendue auprès des enseignant·e·s au même titre qu'elle a été défendue dans la phase d'institutionnalisation (partie III) de la formation dont nous avons présenté le scénario au chapitre 6.

2.2 Autres apports envisageables autour du concept de pression

2.2.1 À partir de notre ressource

Éveiller les enseignant·e·s aux façons efficaces et rentables d'avoir recours à l'histoire des sciences dans la préparation de leurs séances d'enseignement ne résout pas les problèmes de la documentation et du temps pointés par les apprentis-enseignant·e·s que nous avons sondé·e·s pour justifier qu'ils et elles se tournent peu vers l'histoire. Nous envisageons donc un deuxième type d' « accompagnement supplémentaire » qui consiste en l'élaboration de séances « clés en main » fondées sur notre *corpus*. Ce dernier est en effet jugé trop long, trop complexe, voire trop « cohérent » pour être compris et transformé à moindre effort par les enseignant·e·s. Nous imaginons pourtant une multitude de transformations (y compris sous d'autres formes que de simples textes) de notre *corpus*, pouvant s'inscrire dans un nombre non moins important de scénarios d'apprentissage visant des objectifs de différents ordres. Le prolongement de nos travaux pourrait porter sur ces créations, autrement dit sur l'aboutissement du processus de reconstruction didactique vers des séances prêtes à l'emploi et mises à disposition des enseignant·e·s.

2.2.2 À propos d'autres facettes du concept de pression

Outre les perspectives d'approfondissement de notre proposition didactique, nous pensons à toutes les autres directions que notre travail doctoral aurait pu prendre s'il n'avait pas retracé l'émergence du concept de pression au XVII^e siècle. Nous avons notamment évoqué dans le chapitre 1 les subtilités de l'approche microscopique dont certaines sont source de difficultés pour les élèves et étudiant·e·s (chapitre 2). Une reconstruction didactique pourrait être envisagée sur ce niveau de description. Par ailleurs le domaine des écoulements reste encore laissé pour compte tant du point de vue de l'identification de difficultés pour les élèves et étudiant·e·s que de celui des propositions didactiques basées sur l'histoire des sciences. Il y a pourtant fort à parier que les premières existent (notamment en ce qui concerne le lien pression / vitesse) tandis que les deuxièmes enrichiraient la palette d'action des enseignant·e·s pour aborder ce thème désormais au programme de spécialité physique-chimie en terminale.

2.3 Compréhension et cadres de rationalité

La dernière brèche ouverte au cours de notre travail doctoral concerne la corrélation entre compréhension de phénomènes (en l'occurrence ceux liés à la pression) et appréhension de ceux-ci dans différents cadres de rationalité (chapitre 4).

2.3.1 Réplication de l'enquête réalisée

Les résultats que nous avons obtenus et présentés dans le chapitre 4 mériteraient d'être consolidés puisque la nature des questions posées cumulée à la déperdition des effectifs en cours d'enquête conduisent à une significativité limitée de certaines observations. Le questionnaire pouvant être diffusé facilement *via* la plateforme en ligne LimeSurvey il serait intéressant de répliquer l'enquête d'une part en sondant chaque année les nouvelles promotions de M2 MEEF, et d'autre part en élargissant le panel aux enseignant·e·s plus expérimenté·e·s.

2.3.2 Ouverture à d'autres champs disciplinaires

Par ailleurs la voie ouverte dans le contexte particulier des phénomènes liés à la pression pourrait être explorée dans d'autres champs disciplinaires dans lesquels un même phénomène peut être appréhendé dans des cadres de rationalité scientifiques différents. Une première étude consisterait à recenser ces autres contextes et définir les cadres de rationalité associés; une seconde étude porterait sur la mise à l'épreuve de l'hypothèse selon laquelle la compréhension de *n'importe quel* phénomène est favorisée par son appréhension dans *au moins deux cadres* de rationalité différents.

Annexes

ANNEXE A

Formulaire mathématique

Dans ce formulaire sont exprimées, dans un système de coordonnées tridimensionnel et cartésien, les fonctions et opérateurs utilisés dans ce chapitre, ainsi que quelques relations entre ces derniers.

A1. Notations des grandeurs physiques

$$\text{Scalaire : } a \qquad \text{Vecteur : } \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \qquad \text{Tenseur : } \bar{\bar{a}} = \begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{zx} & a_{zy} & a_{zz} \end{pmatrix}$$

A2. Opérateurs

Divergence

$$\text{Divergence d'un champ vectoriel } \mathbf{a} : \text{div}(\mathbf{a}) = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$$

$$\text{Divergence d'un champ tensoriel } \bar{\bar{a}} : \text{div}(\bar{\bar{a}}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial a_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial a_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial a_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial a_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial a_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial a_{yz}}{\partial z} \\ \frac{\partial a_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial a_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial a_{zz}}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Gradient

$$\text{Gradient d'un champ scalaire } a : \mathbf{grad}(a) = \begin{pmatrix} \frac{\partial a}{\partial x} \\ \frac{\partial a}{\partial y} \\ \frac{\partial a}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Rotationnel

$$\text{Rotationnel d'un champ vectoriel } \mathbf{a} : \mathbf{rot}(\mathbf{a}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial a_z}{\partial y} - \frac{\partial a_y}{\partial z} \\ \frac{\partial a_x}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial x} \\ \frac{\partial a_y}{\partial x} - \frac{\partial a_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Laplacien

$$\text{Laplacien d'un champ scalaire } a : \Delta a = \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial z^2}$$

$$\text{Laplacien d'un champ vectoriel } \mathbf{a} : \Delta \mathbf{a} = \begin{pmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{pmatrix}$$

A3. Relations entre opérateurs

Soient a un champ scalaire et \mathbf{u} un champ vectoriel : $\text{div}(a\mathbf{u}) = a \text{div}(\mathbf{u}) + \mathbf{u} \cdot \text{grad}(a)$

Soit \mathbf{u} un champ vectoriel : $(\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \mathbf{u} = \text{grad}\left(\frac{u^2}{2}\right) - \mathbf{u} \wedge \mathbf{rot}(\mathbf{u})$

Pour tout champ scalaire a : $\mathbf{rot}(\text{grad}(a)) = 0$

Soit \mathbf{a} un champ vectoriel : $\Delta \mathbf{a} = \text{grad}(\text{div}(\mathbf{a})) - \mathbf{rot}(\mathbf{rot}(\mathbf{a}))$

A4. Théorème de Green-Ostrogradski (ou théorème de la divergence)

Le flux d'un champ vectoriel \mathbf{a} à travers une surface fermée \mathcal{S} est égal à l'intégrale de la divergence du champ vectoriel sur le volume \mathcal{V} délimité par \mathcal{S} :

$$\iint_{\mathcal{S}} \mathbf{a} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_{\mathcal{V}} \text{div}(\mathbf{a}) dV$$

ANNEXE B

Détail des justifications choisies par les enseignant·e·s

L'objectif de cette annexe est d'analyser plus en détail la distribution des justifications choisies par les enseignant·e·s parmi toutes celles qui leur sont proposées à chaque question, et ainsi vérifier que les résultats exprimés dans ce chapitre ne sont pas simplement le reflet de la variabilité du nombre de justifications valides ou non proposées dans chacun des cadres.

B1. Effectifs bruts par justification

Les tableaux (6.5) et (6.6) précisent le nombre d'enseignant·e·s qui choisissent chaque option de réponse, et le nombre de fois où chaque justification est cochée pour chaque question. Les effectifs qui apparaissent en gras correspondent aux justifications valides (cf. 4.7 et 4.9)

| A | m sera plus grande... | | | | | m sera plus petite... | | | | | m sera égale... | | | | |
|-----------------|------------------------------|----|----|----|----|------------------------------|----|----|----|----|------------------------|----|----|----|----|
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 |
| <i>Effectif</i> | 13 | 29 | 0 | 17 | 1 | 1 | 5 | 11 | 14 | 0 | 32 | 9 | 31 | 8 | 40 |
| JAM1a | 1 | | | | | | | | | | | 6 | 12 | 3 | 16 |
| JAM1b | | | | | | | 5 | 0 | 10 | 0 | | | | | |
| JAM2 | | 20 | 0 | 12 | 1 | | | | | | 24 | | 25 | | 24 |
| JAM3 | | | | | | | | | | | 2 | 2 | | | |
| JAH1 | 2 | 9 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 6 | 5 | 0 | 9 | 0 | 2 | 3 | 8 |
| JAH2 | | 15 | | 5 | | | | 8 | | 0 | 17 | | | 4 | 21 |
| JAH3 | | | | | | | | | | | | | 4 | | |
| JAH4 | | 5 | | 4 | | 1 | | 6 | | | 3 | 1 | 2 | | 5 |

TABLE 6.5 – Effectifs sélectionnant chaque question et justification (situation A)

| B | h sera plus grande... | | | | | h sera plus petite... | | | | | h sera égale... | | | | |
|-----------------|------------------------------|----|----|----|----|------------------------------|----|----|----|----|------------------------|----|----|----|----|
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 |
| <i>Effectif</i> | 6 | 5 | 7 | 8 | 3 | 22 | 11 | 3 | 19 | 20 | 4 | 15 | 21 | 4 | 8 |
| JBM1 | 3 | 2 | 7 | 3 | 0 | | | 1 | | 11 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 |
| JBM2 | | | | | | 10 | 6 | | 11 | | | | 6 | | 3 |
| JBM3 | | | | | | | | | | | 1 | 0 | | 0 | |
| JBH1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | | | 2 | | 9 | 1 | 7 | 8 | 4 | 3 |
| JBH2 | | | | | 1 | 8 | 5 | | 6 | 3 | | 8 | 7 | | 3 |
| JBH3 | | | | | | | | | | | 0 | | | | |
| JBH4 | 4 | | | 5 | 2 | 8 | | | 9 | 7 | 1 | 8 | 12 | | 4 |

TABLE 6.6 – Effectifs sélectionnant chaque question et justification (situation B)

B2. Nombre moyen de justifications choisies

Le tableau 6.7 exprime le nombre moyen de justifications choisies par les enseignant·e·s selon la validité de leur réponse. La moyenne la plus élevée pour chaque question apparaît en gras dans le tableau.

On remarque que les réponses valides s'appuient toujours sur plus de justifications que les

| | AQ1 | AQ2 | AQ3 | AQ4 | AQ5 | BQ1 | BQ2 | BQ3 | BQ4 | BQ5 |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Réponse valide | 1,8 | 1,7 | 1,2 | 1,6 | 1,8 | 1,0 | 1,6 | 1,8 | 1,4 | 1,5 |
| Non valide | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 1,1 | 1,9 | 1,2 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 2 |

TABLE 6.7 – Nombre moyen de justifications choisies selon la validité des réponses

réponses non valides. De plus, dans la moitié des questions les réponses non valides ne sont justifiées que par une seule proposition

B3. Proportion de justifications choisies dans chaque cadre

Selon la prévision faite par un enseignant (plus grande / plus petite / égale), les justifications proposées diffèrent, comme nous l'avons explicité dans les tableaux 4.7 et 4.9 : chaque prévision entraîne l'affichage d'un certain nombre de justifications dans le cadre culturel de la mécanique et dans le cadre culturel de l'hydrostatique. Les enseignant·e·s choisissent alors de cocher une ou plusieurs de ces justifications parmi toutes celles qui leur sont proposées. Le tableau 6.8 détaille, pour chaque question, le nombre total de justifications affichées et le nombre total de justifications cochées (choisies parmi celles affichées) pour chacun des deux cadre culturels : d'abord pour toutes les réponses confondues, ensuite en déclinant les totaux pour les réponses valides uniquement d'une part, et pour les réponses invalides uniquement d'autre part. Les pourcentages exprimés pour les justifications choisies sont relatifs aux justifications affichées dans le cadre correspondant. Les données (nombre de justifications et pourcentage associé) du cadre de rationalité le plus choisi en proportion pour chaque question et chaque configuration (toutes les réponses, réponses valides et réponses non valides) apparaissent en gras.

On constate que les proportions de justifications choisies s'écartent globalement significativement des proportions de justifications proposées dans chaque cadre, ce qui semble confirmer que la prédominance du recours à un cadre plutôt que l'autre n'est pas corrélée à l'offre disponible. Par ailleurs, le cadre de la mécanique apparaît toujours comme le cadre privilégié pour appréhender la situation A lorsque l'on observe les proportions de justifications choisies dans ce cadre plutôt que dans l'autre. Pour la situation B, on n'observe pas de tendance notable : en terme de justifications choisies on ne peut pas estimer qu'un des cadres est privilégié par rapport à l'autre, quelle que soit la validité des réponses.

| | Toutes les réponses | | | | Réponses valides | | | | Réponses non valides | | | |
|------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|------|-------------------------|--------------------|--------------------------|------|-------------------------|--------------------|--------------------------|------|
| | Justifications choisies | | Justifications proposées | | Justifications choisies | | Justifications proposées | | Justifications choisies | | Justifications proposées | |
| | Méc. | Hyd. | Méc. | Hyd. | Méc. | Hyd. | Méc. | Hyd. | Méc. | Hyd. | Méc. | Hyd. |
| AQ1 | 37 (48%) | 35 (32%) | 77 | 111 | 26 (41%) | 32 (33%) | 64 | 96 | 11 (85%) | 3 (20%) | 13 | 15 |
| AQ2 | 33 (63%) | 30 (27%) | 52 | 110 | 20 (69%) | 29 (33%) | 29 | 87 | 13 (57%) | 1 (4%) | 23 | 23 |
| AQ3 | 37 (51%) | 25 (20%) | 73 | 126 | 16 (47%) | 4 (8%) | 34 | 51 | 21 (54%) | 21 (28%) | 39 | 75 |
| AQ4 | 25 (64%) | 27 (33%) | 39 | 81 | 12 (71%) | 15 (29%) | 17 | 51 | 13 (59%) | 12 (40%) | 22 | 30 |
| AQ5 | 41 (51%) | 34 (28%) | 81 | 121 | 16 (33%) | 26 (36%) | 48 | 72 | 25 (76%) | 8 (16%) | 33 | 49 |
| BQ1 | 16 (44%) | 24 (35%) | 36 | 68 | 2 (50%) | 0 (0%) | 4 | 6 | 14 (44%) | 24 (39%) | 32 | 62 |
| BQ2 | 9 (20%) | 31 (43%) | 46 | 72 | 1 (4%) | 23 (51%) | 30 | 45 | 8 (50%) | 8 (30%) | 16 | 27 |
| BQ3 | 19 (37%) | 30 (41%) | 52 | 73 | 11 (26%) | 27 (43%) | 42 | 63 | 8 (80%) | 3 (30%) | 10 | 10 |
| BQ4 | 15 (43%) | 26 (45%) | 35 | 58 | 11 (58%) | 16 (42%) | 19 | 38 | 4 (25%) | 10 (50%) | 16 | 20 |
| BQ5 | 15 (38%) | 37 (40%) | 39 | 93 | 9 (53%) | 14 (27%) | 17 | 51 | 6 (27%) | 23 (55%) | 22 | 42 |

TABLE 6.8 – Justifications proposées et choisies dans chaque cadre de rationalité

ANNEXE C

Tests statistiques sur les résultats observés

L'objectif de cette annexe est d'expliciter les différents tests statistiques qui ont été réalisés pour évaluer la significativité des résultats obtenus dans ce chapitre. Chaque test statistique revient à calculer la probabilité que, sous une hypothèse qualifiée de « nulle » (H_0) que l'on cherche en général à réfuter, on puisse observer le résultat obtenu ou un résultat plus rare encore. On nomme cette probabilité « p-value » (p_v) ; plus elle est faible, plus le résultat observé est robuste si l'objectif est de rejeter l'hypothèse nulle.

C1. Taux de réponses valides

L'hypothèse nulle qui est éprouvée est que la validité de la réponse à une question est le fruit du hasard (les enseignant·e-s ont coché des cases de façon arbitraire). Parmi les N enseignant·e-s qui répondent à une question de prévision :

- un nombre N_0 d'entre eux coche la réponse « je ne sais pas »
- un nombre $N - N_0$ fait un choix de prévision :
 - N_1 choisissent la prévision correcte
 - N_2 choisissent la prévision correcte **et** justifient bien leur choix

Les probabilités de faire partie des N_1 ou N_2 sous l'hypothèse nulle sont représentées sur l'arbre de probabilité (figure 6.4) :

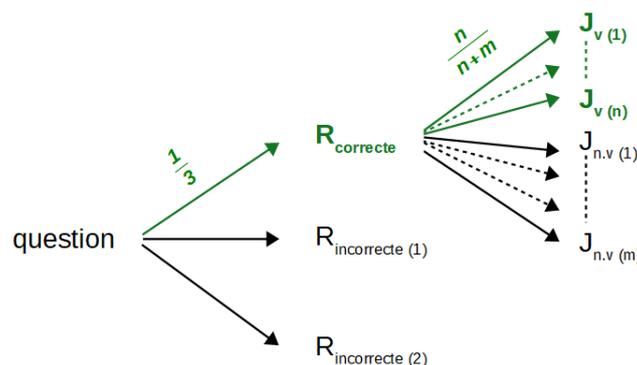


FIGURE 6.4 – Probabilité de faire une prévision correcte sous l'hypothèse nulle

Ainsi pour chaque question, la probabilité de faire une prévision correcte sous l'hypothèse nulle est

$$p_1 = \frac{1}{3}$$

tandis que la probabilité de faire une prévision correcte **et** bien justifiée sous l'hypothèse nulle est :

$$p_2 = \frac{1}{3} \times \frac{n}{n+m}$$

Avec le logiciel R nous obtenons ainsi chaque « p-value » p_v (probabilité d'obtenir les effectifs observés ou des effectifs plus rares encore sous l'hypothèse nulle) en effectuant un test binomial :

$$\text{binom.test}(N_i, N - N_0, p_i)$$

C2. Répartition des justifications (Mécanique et/ou Hydrostatique)

L'hypothèse nulle que nous mettons à l'épreuve est que les deux pourcentages obtenus (justification mécanique *versus* justification hydrostatique) à une question sont égaux. Cela revient à mettre à l'épreuve l'hypothèse que les quantités indépendantes B et C apparaissant dans la table de contingence observée (table 6.9) sont compatibles avec une probabilité 0.5 (ce que l'on cherche à réfuter).

| | | Mécanique | |
|---------------|-----|-----------|-----|
| | | oui | non |
| Hydrostatique | oui | A | B |
| | non | C | D |

TABLE 6.9 – Table de contingence observée

Avec le logiciel R nous obtenons ainsi chaque « p-value » p_v (probabilité d'obtenir la table de contingence observée ou une table de contingence plus rare encore sous l'hypothèse nulle) en effectuant le test binomial suivant :

$$\text{binom.test}(B, B + C, p = 0.5)$$

C3. Distribution du nombre de cadres mobilisés

L'hypothèse nulle que nous mettons à l'épreuve est que les deux pourcentages obtenus (réponses valides ou non) sont indépendants du fait qu'ils soient justifiés par un cadre ou deux cadres. Ces pourcentages que l'on souhaite comparer sont estimés sur des unités expérimentales différentes, à savoir tous les enseignant·e·s qui répondent de façon valide d'une part et tous ceux qui font une réponse non valide d'autre part. Il s'agit donc d'échantillons indépendants. Pour réaliser la comparaison nous effectuons le test du Khi2 pour échantillons indépendants. Ce test consiste en la comparaison de la table de contingence observée (table 6.10) à la table de contingence théorique (c'est-à-dire composée des effectifs calculés sous l'hypothèse nulle).

Comme dans toutes les questions traitées il y a au moins un effectif très petit (< 5), nous employons le test exact de Fisher ; ainsi avec le logiciel R nous obtenons chaque « p-value »

| | valide | non valide |
|-------------|----------|------------|
| un cadre | <i>A</i> | <i>B</i> |
| deux cadres | <i>C</i> | <i>D</i> |

TABLE 6.10 – Table de contingence observée

p_v (probabilité d'obtenir la table de contingence observée ou une table de contingence plus rare sous l'hypothèse nulle) avec la commande suivante :

```
fisher.test(matrix(c(A, C, B, D), nrow = 2))
```

ANNEXE D

Scénario de formation

PARTIE I : Introduction (1h)

La première partie de la formation consiste en une présentation générale de la formation ainsi qu'en un questionnaire préliminaire visant à connaître les intérêts, les connaissances, et les pratiques des sujets formés quant à l'usage de l'histoire des sciences dans leur enseignement.

| | Scénario d'apprentissage | Scénario d'encadrement | Durée |
|--------------------------------------|--|--|--------|
| Présentation générale | | | 15 min |
| Phase 1 | Écoute passive | Intervention proactive : <i>Diaporama</i> | 10 min |
| Phase 2 | Répartition autonome en binôme | <ul style="list-style-type: none"> • Attribution et communication d'un code à chaque étudiant. • Remplir <i>Tableau codes</i> | 5 min |
| Questionnaire préliminaire | | | 20 min |
| Phase 3 | Écoute passive | Intervention pro-active : <ul style="list-style-type: none"> • Lecture du préambule <i>Questionnaire 1</i> • Distribution <i>Questionnaire 1</i> | 5 min |
| Phase 4 | Réponse autonome et individuelle au questionnaire Fin de la phase quand tous les étudiants ont terminé. | Interventions réactives ¹ . | 15 min |
| Présentation du <i>corpus</i> | | | 25 min |
| Phase 5 | Lecture individuelle <i>Introduction</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Distribution <i>Introduction</i> • Interventions réactives¹. | 10 min |
| Phase 6 | Écoute passive | <ul style="list-style-type: none"> • Intervention proactive : Lecture <i>Corpus</i> • Interventions réactives¹. | 15 min |

1. Si besoin, et dans la mesure où elles ne trahissent pas les hypothèses et objectifs de la recherche, et à condition qu'elles ne fournissent pas d'informations de nature à biaiser les intentions spontanées des étudiants.

PARTIE II : Production (3h)

La seconde partie de la formation consiste en l'élaboration par les binômes d'étudiants d'un scénario d'apprentissage et d'un document s'appuyant sur tout ou partie du *corpus* distribué et lu lors de la partie I. Pour des raisons liées au projet de recherche, les binômes seront enregistrés oralement pendant cette phase de la formation.

| | Scénario d'apprentissage | Scénario d'encadrement | Durée |
|---------|--|---|--------|
| Phase 1 | <ul style="list-style-type: none"> • Installation en binôme • Allumage des enregistreurs | <ul style="list-style-type: none"> • Distribution des enregistreurs (un par binôme, enregistreur numéroté avec le numéro du binôme) → cf. <i>Tableau code</i> • Vérification de l'allumage. | 10 min |
| Phase 2 | Lecture <i>Consigne</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Distribution <i>Consigne</i> • Interventions réactives¹. | 5 min |
| Phase 3 | Réalisation du travail à effectuer. | Aucune intervention | 2h40 |
| Phase 4 | Vérification de la présence du numéro de binôme sur chaque feuille rendue | Ramassage de toutes les productions (fiches de préparation et documents) | 5 min |

PARTIE III : Analyse (1h30)

Dans cette troisième et dernière partie chaque binôme est chargé d'analyser le document qu'il a produit lors de la phase précédente. Cette analyse se fait par le remplissage d'une grille précisant les différents éléments contenus dans le document.

| | Scénario d'apprentissage | Scénario d'encadrement | Durée |
|---------------------------------------|---|---|---------------|
| Discussion introductive | | | 30 min |
| Phase 1 | <ul style="list-style-type: none"> • Installation en binôme • Allumage des enregistreurs | <ul style="list-style-type: none"> • Distribution des enregistreurs (un par binôme, enregistreur numéroté avec le numéro du binôme) → <i>Tableau code</i> • Vérification de l'allumage. | 8 min |
| Phase 2 | Discussion sur les intérêts d'avoir recours à l'histoire des sciences | <ul style="list-style-type: none"> • Animation de la discussion • Prise en note et affichage en direct des suggestions | 15 min |
| Phase 3 | Écoute passive | Interventions proactives : <ul style="list-style-type: none"> • Répartition des suggestions dans les 4 thèmes de la <i>Grille</i> • Explicitation des thèmes | 5 min |
| Phase 4 | Écoute passive | Intervention proactive : Énoncé de la consigne | 2 min |
| Analyse des documents produits | | | 40 min |
| Phase 5 | Lecture <i>Grille</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Distribution <i>Grille</i> • Interventions réactives | 5 min |
| Phase 6 | Remplissage <i>Grille</i> <u>en binôme</u> | Interventions réactives | 30 min |
| Phase 7 | Vérification de la présence du numéro de binôme sur chaque <i>Grille</i> rendue | Ramassage de toutes les grilles remplies | 5 min |
| Synthèse | | | 20 min |
| Phase 8 | Écoute passive | Intervention pro-active : <ul style="list-style-type: none"> • Lecture du préambule <i>Questionnaire 2</i> • Distribution | 5 min |
| Phase 9 | Réponse autonome et <u>individuelle</u> au questionnaire Fin de la phase quand tous les étudiants ont terminé. | Interventions réactives ¹ . | 15 min |

ANNEXE E

Questionnaire préliminaire

Préambule :

Ce premier questionnaire ne vise pas à pointer de mauvaises pratiques ou connaissances, mais à évaluer la pertinence de la formation dispensée et à éclairer l'analyse qui sera faite des productions réalisées dans la seconde partie de la formation.

Répondre à l'intégralité du questionnaire devrait vous prendre une quinzaine de minutes. L'enquête respecte le principe de l'anonymat.

Questions générales

1) Code étudiant·e :

2) Avez-vous déjà eu des expériences d'enseignement avant cette année de stage ?

Oui Non

Si oui, dans quel cadre ?

3) Vous enseignez actuellement :

au collège au lycée

Votre rapport à l'histoire des sciences

4) Avez-vous un goût personnel pour l'histoire des sciences ?

Pas du tout Non pas vraiment Oui plutôt Oui beaucoup !

5) Avez-vous déjà reçu une ou plusieurs formation(s) en histoire des sciences ?

Oui Non

Si oui, dans quel cadre ?

6) Avez-vous recours à l'histoire des sciences pour préparer des séances d'enseignement ?

Jamais Rarement Souvent Toujours

Pourquoi ?

7) Si vous le faites (même occasionnellement), dans quelle(s) circonstance(s) employez vous l'histoire des sciences :

- Pour introduire une nouvelle notion
- En guise d'ouverture culturelle de fin de chapitre
- A l'occasion d'exercices
- Autre (précisez) :

Avantages et inconvénients du recours à l'histoire des sciences

Selon vous, et même si vous ne le faites pas :

8) Quels peuvent être les intérêts d'avoir recours à l'histoire des sciences dans l'enseignement ?

9) Quelles peuvent être les difficultés dans ce recours à l'histoire des sciences ?

ANNEXE F

Texte introductif au *corpus*

Le *corpus* est composé de neuf extraits de correspondances entre savants européens au XVIII^e siècle. Il a été élaboré afin de vous servir de ressource dans votre travail de préparation de séances en classe. Deux préoccupations ont ainsi présidé aux choix de sélection et de retravail des extraits retenus :

- L'adéquation du *corpus* avec les contraintes et conditions institutionnelles exprimées dans le B.O. ;
- Le respect d'une authenticité historique maximale.

Ces deux préoccupations ainsi que leurs effets concrets sur le *corpus* sont explicités dans cette introduction.

Adéquation entre le *corpus* et les contraintes institutionnelles

Ce *corpus* constitue une ressource pour préparer l'enseignement des phénomènes liés à la pression en spécialité physique-chimie au niveau première. Les contenus du programmes associés se trouvent dans la partie « **Description d'un fluide au repos** » du thème « **Mouvement et interactions** » ; les connaissances et compétences attendues sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
|---|---|
| Échelle de description. Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température. Modèle de comportement d'un gaz : loi de Mariotte. Action exercées par un fluide sur une surface : forces pressantes. Loi fondamentale de la statique des fluides. | Expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopique de description d'un fluide et le comportement microscopique des entités qui le constituent. Utiliser la loi de Mariotte. <i>Tester la loi de Mariotte, par exemple en utilisant un dispositif comportant un microcontrôleur.</i> Exploiter la relation $F = P.S$ pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface plane S soumise à une pression P . Dans le cas d'un fluide incompressible au repos, utiliser la relation fournie exprimant la loi fondamentale de la statique des fluides : $P_2 - P_1 = \rho g(z_1 - z_2).$ <i>Tester la loi fondamentale de la statique des fluides.</i> |

La ressource que constitue ce *corpus* étant par ailleurs composée de textes historiques, elle peut être un appui d'autant plus précieux si vous souhaitez aller dans le sens des encouragements formulés dans le préambule du B.O. : « dès qu'elle est possible, une mise en perspective des savoirs avec l'**histoire des sciences** et l'**actualité scientifique** est fortement recommandée. Cette recommandation est d'ailleurs rappelée explicitement dans l'introduction du thème visé par notre *corpus* : « l'étude de la mécanique fournit d'excellentes opportunités de faire référence à l'histoire des sciences ».

Limites à l'authenticité historique

Lors de l'opération d'extraction et d'exposition de morceaux de sources primaires, les parties choisies sont prises isolément (ou quasi) de l'environnement culturel, social, scientifique dont elles sont issues. Cette considération mise à part, le *corpus* a malgré tout été composé dans un souci d'authenticité maximale : il s'agit d'extraits et d'auteurs réels, non fictifs. Les textes ont été traduits le plus fidèlement possible (de l'italien, de l'anglais, ou même du français du XVIIe). Les écarts nécessaires à l'authenticité la plus pure, qu'on ne saurait d'ailleurs pas définir, se traduisent concrètement ainsi :

- tous les extraits ont été retravaillés et/ou traduits pour être rédigés dans un français grammaticalement contemporain ;
- aucun extrait ne correspond à une lettre dans son intégralité, il ne s'agit que de portions choisies pour leur intérêt à différents égards. Les textes sources d'où ces extraits sont issus peuvent être retrouvés grâce aux éléments bibliographiques laissés en fin de document ;
- les expressions entre crochets ont été rajoutées volontairement pour garantir la clarté du propos dans les extraits tronqués ;
- les expressions en italiques sont des reformulations volontaires de termes employés dans les textes originaux (ou leur traduction) ; elles visent essentiellement à uniformiser et/ou moderniser le vocabulaire employé au fil des différents extraits ;
- les conversions apposées entre parenthèses dans les différents extraits ont été ajoutées lors de la constitution de ce *corpus* pour des questions de commodité d'usage.

ANNEXE G

Consigne

Thème : Mouvement et interactions

Description d'un fluide au repos

Niveau d'enseignement : première, spécialité physique-chimie

TRAVAIL A EFFECTUER

- ▶ Construire une fiche de préparation d'une situation d'apprentissage permettant d'acquérir certaines des compétences exigibles du programme sur le thème ci-dessus.
- ▶ Élaborer au moins un document support pour la situation d'apprentissage envisagée.
- ▶ S'appuyer sur tout ou partie du « *corpus* de correspondances sur les questions du vide et de la pesanteur de l'air au XVIIe siècle ».

La fiche de préparation explicite entre autres choses :

- les objectifs de la situation d'apprentissage ;
- la forme de la situation d'apprentissage (activité documentaire, expérimentale etc.) ;
- la durée envisagée de la situation d'apprentissage ;
- le déroulement des différentes phases de la situation d'apprentissage ;
- l'activité (ou les activités) des élèves ;
- le type de production attendu le cas échéant ;
- le contenu à institutionnaliser ;
- les pré-requis.

Le document support peut prendre différentes formes : texte (simples extraits du *corpus* ou composition plus élaborée), énoncé d'exercice ou de travaux pratiques, vidéo, image etc.

Si pour des questions logistiques le document que vous envisagez d'élaborer ne peut pas être finalisé ce jour, précisez-en au maximum les éléments constitutifs.

Ressources complémentaires :

Vous pouvez disposer de toutes les ressources que vous souhaitez (manuel scolaire, livre, internet etc.) et les utiliser dans la stricte mesure du droit d'usage prévu pour chacune de ces ressources.

ANNEXE H

Questionnaire critique

Préambule :

A l'occasion du questionnaire préliminaire qui vous a été soumis en début de formation, près de la moitié d'entre vous avez répondu qu'une des difficultés dans le recours à l'histoire des sciences pour l'enseignement est le manque de documentation à votre disposition. Le corpus sur lequel vous avez été invités à travailler a été conçu pour contribuer à combler ce manque. Ce second questionnaire a pour objectif de recueillir vos avis, critiques et suggestions à propos de cette ressource.

Questions générales

1) Quel type de documentation souhaiteriez vous trouver pour vous aider dans la préparation de vos séances basées sur l'histoire des sciences ?

- Des résumés de repères spatiaux temporels
- Des références bibliographiques
- Des extraits de textes historiques originaux
- Des extraits de textes historiques modifiés (traduits, reformulés etc.)
- Des idées d'activités
- Des scénarios pédagogiques complets et détaillés
- Autres (précisez ci-dessous) :

2) Quel(s) type(s) de complément souhaiteriez vous voir associé(s) à ces ressources :

- Un fléchage précis vers des contenus de programme scolaire
- Des éléments de contextualisation
- Des éléments biographiques
- Des explications du contenu scientifique
- Une explicitation des enjeux (théorique, technique et/ou épistémologique)
- Aucun
- Autres (précisez ci-dessous) :

A propos du *corpus* de correspondances

3) Jugez-vous cette ressource utile ?

Non, pas du tout ! Non, pas vraiment Oui, plutôt Oui, vraiment !

4) Jugez-vous cette ressource intéressante ?

Non, pas du tout ! Non, pas vraiment Oui, plutôt Oui, vraiment !

5) Jugez-vous cette ressource inspirante pour l'enseignement ?

Non, pas du tout ! Non, pas vraiment Oui, plutôt Oui, vraiment !

6) Jugez-vous cette ressource accessible du point de vue de la complexité de son contenu ?

Non, pas du tout ! Non, pas vraiment Oui, plutôt Oui, vraiment !

7) Jugez-vous cette ressource facile à exploiter pour l'enseignement ?

Non, pas du tout ! Non, pas vraiment Oui, plutôt Oui, vraiment !

8) Jugez-vous les textes suffisamment contextualisés ?

Non, pas du tout ! Non, pas vraiment Oui, plutôt Oui, vraiment !

9) Souhaiteriez-vous trouver plus de ressources de ce type là pour enseigner ?

Non, pas du tout Non, pas vraiment Oui, plutôt Oui, tout à fait !

10) Explicitez une (ou plusieurs) de vos critiques si vous le souhaitez :

Suggestions de modifications

11) Quelles modifications suggèreriez-vous pour améliorer la ressource ?

ANNEXE I

Transcription (partie I)

00 :00 → 00 :04 Ça ne me rapportera rien non plus.

00 :06 → 00 :10 Je vais le faire en double parce que je suis un peu stressé.

00 :12 → 00 :14 Voilà, ça doit être bon.

00 :30 → 00 :55 Bien, alors on va commencer ce que je vais vous proposer en fait.

00 :55 → 01 :05 Aujourd'hui, ça durera enfin je ne sais pas combien de temps ça durera mais ça commence aujourd'hui ce sera l'essentiel de la séance de la semaine prochaine.

01 :05 → 01 :12 Et puis il y aura une petite partie aussi dans deux séances.

01 :12 → 01 :22 C'est une sorte de mini formation autour de l'utilisation d'un *corpus* de correspondance du 17ème.

01 :22 → 01 :29 Vous allez voir tout de suite de quoi il s'agit et vous allez voir le rapport avec ce que vous faites.

01 :29 → 01 :36 En fait, il y a une double raison à cette proposition que je vous fais.

01 :36 → 01 :47 La première, c'est pour vous pour vous former c'est de vous montrer l'intérêt d'avoir recours à l'histoire des sciences dans vos cours.

01 :47 → 01 :56 Plus spécifiquement, comment exploiter une ressource avec quelques textes historiques.

01 :56 → 01 :59 Ça, c'est pour vous en fait.

01 :59 → 02 :10 Et puis, il y a un intérêt aussi pour une doctorante du laboratoire dans lequel je travaille qui s'appelle Anne Le Mézo-Boulais.

02 :10 → 02 :18 Parce qu'elle fait une recherche doctorale justement sur l'appropriation et la transformation par les enseignants de textes historiques.

02 :18 → 02 :22 Comment est-ce que les enseignants utilisent les textes historiques dans la classe.

02 :22 → 02 :26 C'est pour ça que j'ai accepté de participer à cette recherche.

02 :26 → 02 :35 Et comme vous, comme dans vos mémoires de recherche, on enregistre, enfin on essaie de garder des traces de ce qui se fait.

02 :35 → 02 :39 Alors donc, aujourd'hui, on est le mardi 23 novembre.

02 :39 → 02 :44 Donc ce qu'on va faire aujourd'hui, ce que je vais faire avec vous, c'est...

02 :44 → 02 :49 Non, je me suis trompé, c'est le 14 décembre.

02 :49 → 02 :57 Donc aujourd'hui, le 23 novembre, je vais vous présenter le *corpus* et puis je vais vous distribuer un petit questionnaire.

02 :57 → 03 :03 Le 14 décembre, c'est la prochaine fois qu'on se voit, ce n'est pas la semaine prochaine, vous avez raison.

03 :03 → 03 :09 Eh bien, vous travaillerez en binôme sur le *corpus* que je vous ai présenté aujourd'hui.

03 :09 → 03 :13 Je vous expliquerai tout ça.

03 :13 → 03 :20 Et le 4 janvier, on analysera ensemble ce que vous avez produit. Entre temps je ramasserai ce que vous aurez produit on l'analysera ensemble.

03 :21 → 03 :27 Voilà, pour la partie 2, on en parlera pour la partie du 14 décembre.

03 :27 → 03 :30 On en parlera le 14 décembre.

03 :30 → 03 :32 Vous aurez à votre disposition...

03 :32 → 03 :37 Sinon, je peux quand même vous dire, vous aurez à votre disposition, en plus du *corpus* de textes qu'on va écrire aujourd'hui,

03 :37 → 03 :42 vous aurez à votre disposition, en plus du *corpus* de texte qu'on va écrire aujourd'hui,

03 :42 → 03 :44 évidemment, vous pouvez ramener tout ce que vous voulez.

03 :44 → 03 :50 Nous, on essaiera de vous ramener des extraits de manuels correspondant à la classe de première,

03 :50 → 03 :56 parce qu'en fait, c'est un extrait qui correspond à un enseignement qui se fait en première.

03 :56 → 04 :00 Mais vous pourrez ramener des livres de physique.

04 :00 → 04 :06 Pour ce qui est du bulletin on vous donnera un extrait.

04 :07 → 04 :13 Donc, c'est juste pour vous signaler que si vous avez chez vous des livres de physique ou des manuels correspondant à la classe de première,

04 :19 → 04 :23 vous pouvez les ramener le 14 décembre.

04 :23 → 04 :27 Alors, la première chose, ça, on va le faire...

04 :33 → 04 :37 Enfin, on va le faire en même temps que la suite.

04 :37 → 04 :41 C'est que, pour nous, on va anonymiser les choses.

04 :41 → 04 :47 Donc, si vous voulez bien noter sur cette feuille à chaque fois votre nom et votre prénom en face d'un code,

04 :49 → 04 :51 Comme ça, vous aurez chacun un code.

04 :51 → 04 :53 Donc, retenez.

04 :53 → 04 :57 Mettez votre nom et votre prénom en face d'un numéro, là.

04 :57 → 05 :01 Mettez votre nom et votre prénom en face d'un numéro, là.

05 :01 → 05 :05 Et puis, gardez ce numéro, soit sur votre agenda, soit sur votre téléphone.

05 :11 → 05 :15 Vous êtes naturellement entre guillemets mis en binôme ? ou on rechange ?

05 :15 → 05 :19 Vous avez des binômes préférentiels.

05 :19 → 05 :21 Ça vous va ?

05 :35 → 05 :37 Ça vous ennuie quand on ferme les fenêtres ?

05 :37 → 05 :41 Je vais en laisser quand même une.

05 :41 → 05 :47 Vous savez que la mesure prophylactique la plus utile, c'est d'aérer.

05 :47 → 05 :49 Oui, bien sûr.

05 :49 → 05 :53 Et comme ça monte pas mal en ce moment...

06 :09 → 06 :13 Je peux se mettre en binôme avec la personne avec qui on est ?

06 :13 → 06 :17 Comme vous voulez. Vous vous mettez en binôme avec qui vous voulez.

06 :17 → 06 :21 Ce sera surtout pour la semaine prochaine, que ce sera utile d'être en binôme.

06 :21 → 06 :25 Du coup, cette démarche de recherche remplace un peu les cours de didactique qu'on avait commencés ?

06 :27 → 06 :31 Non, ça en fait partie, vous verrez.

06 :31 → 06 :37 Pendant que vous remplissez ça, je vais vous distribuer le questionnaire préliminaire.

06 :37 → 06 :43 C'est un questionnaire préliminaire sur l'histoire des sciences

06 :43 → 06 :47 et l'utilisation de l'histoire des sciences en classe.

06 :47 → 06 :51 Ça fait une double page.

06 :51 → 06 :55 Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse comme ça.

06 :55 → 06 :59 C'est vraiment nous pour sonder ce que vous pensez de l'histoire des sciences

06 :59 → 07 :05 et de l'utilisation de l'histoire en classe.

07 :05 → 07 :09 C'est écrit, ça vise à évaluer la pertinence de la formation.

07 :09 → 07 :11 On va faire ensemble.

07 :11 → 07 :17 C'est écrit, ça vise à évaluer la pertinence de la formation.

07 :17 → 07 :21 Ça doit prendre une quinzaine de minutes et ce sera anonyme.

07 :47 → 08 :15 ...

08 :15 → 08 :43 ...

08 :43 → 09 :05 ...

09 :05 → 09 :09 De toute façon, le code correspond à votre nom.

09 :09 → 09 :37 ...

09 :37 → 09 :45 ...

09 :45 → 09 :49 Mais bon, vous êtes un cas ultra particulier.

09 :49 → 10 :17 ...

10 :17 → 10 :45 ...

10 :45 → 11 :13 ...

11 :13 → 11 :41 ...

11 :41 → 12 :09 ...

12 :09 → 12 :37 ...

12 :37 → 13 :05 ...

13 :05 → 13 :33 ...

13 :33 → 14 :01 ...

14 :01 → 14 :29 ...

14 :29 → 14 :57 ...

14 :57 → 15 :25 ...

15 :25 → 15 :53 ...

15 :53 → 16 :21 ...

16 :21 → 16 :49 ...

16 :49 → 17 :17 ...

17 :17 → 17 :45 ...

17 :45 → 18 :13 ...

18 :13 → 18 :41 ...

18 :41 → 19 :09 ...

19 :09 → 19 :37 ...

19 :37 → 20 :05 ...

20 :05 → 20 :33 ...

20 :33 → 21 :01 ...

21 :01 → 21 :27 ...

21 :27 → 21 :41 Petite introduction au *corpus* que je vais vous distribuer.

21 :41 → 21 :45 Je vais vous distribuer l'introduction aussi.

21 :45 → 21 :49 On va lire ensemble, ne vous inquiétez pas.

22 :15 → 22 :33 ...

22 :33 → 22 :43 C'est une introduction pour vous expliquer comment le *corpus* de textes que je vais vous distribuer juste après a été constitué.

22 :43 → 22 :49 Donc, vous allez voir, c'est huit extraits de correspondance entre savants européens.

22 :49 → 22 :55 Ça fait huit pages en fait.

22 :55 → 23 :09 Et évidemment, ça a été élaboré, c'est un *corpus* qui a été choisi afin de vous servir de ressource dans votre travail de préparation de la séance en classe qu'on fera le 14 décembre.

23 :09 → 23 :13 Donc, il y a deux préoccupations qui ont présidé au choix de sélection des extraits.

23 :13 → 23 :21 La première, c'est l'adéquation du *corpus* avec les contraintes institutionnelles, le B.O., etc.

23 :21 → 23 :31 Et l'autre préoccupation principale, c'est que c'était vraiment des extraits avec une authenticité historique maximale.

23 :31 → 23 :37 C'est vraiment des extraits bruts de correspondance de ça.

23 :37 → 23 :45 Alors, c'est un *corpus* qui constitue une ressource pour préparer l'enseignement des phénomènes liés à la pression en physique-chimie au niveau première.

23 :45 → 23 :51 Et donc, on vous a remis en dessous les contenus du programme associé en première.

23 :51 → 23 :54 Donc, vous voyez qu'en première, il y a description d'un fluide au repos.

23 :54 → 23 :57 Ça fait partie du thème mouvement et interaction.

23 :57 → 24 :05 Et vous avez on vous a remis le petit tableau avec d'un côté les notions et contenus et de l'autre côté les capacités exigibles.

24 :06 → 24 :09 Alors, quelles sont les notions et contenus? Je vais aller vite.

24 :09 → 24 :16 Échelle de description, grandeur macroscopique de description d'un fluide au repos, donc masse volumique, pression, température.

24 :16 → 24 :19 Modèle de comportement d'un gaz, la loi de Mariotte.

24 :19 → 24 :23 Action exercée par un fluide sur une surface, les forces pressantes.

24 :23 → 24 :26 Et loi fondamentale de la statique des fluides.

24 :26 → 24 :33 Donc, vous voyez, il faut savoir expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide

24 :33 → 24 :37 et le comportement microscopique des entités qui le constituent.

24 :37 → 24 :41 Alors, ça, c'est très simple pour les gaz, mais c'est très compliqué pour les liquides.

24 :41 → 24 :43 C'est comment la loi de Mariotte déjà?

24 :43 → 24 :48 La loi de Mariotte, c'est PV égal constante.

24 :48 → 24 :54 C'est une version simplifiée de la loi des gaz parfaits.

24 :57 → 25 :02 Tester la loi de Mariotte avec, par exemple, un dispositif comportant un microcontrôleur.

25 :02 → 25 :08 Exploiter la relation F égale P fois S pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface.

25 :08 → 25 :11 S soumise à une pression P.

25 :11 → 25 :15 Et puis, la loi fondamentale de la statique des fluides.

25 :15 → 25 :20 C'est ΔP égale $\rho G \Delta Z$.

25 :20 → 25 :23 Vous la connaissez.

25 :23 → 25 :26 Alors, vous pouvez tourner la page.

25 :31 → 25 :38 Ça, c'est la recommandation sur le contenu à enseigner au sujet de la pression.

25 :38 → 25 :44 Mais dans le préambule, vous avez aussi des recommandations sur l'utilisation de l'histoire des sciences.

25 :44 → 25 :48 Parce que, comme vous le savez, si je vous fais une formation à l'utilisation de l'histoire des sciences,

25 :48 → 25 :55 c'est aussi parce que ça fait partie des choses qu'on vous demande dans les préambules.

25 :55 → 26 :03 Précisément, il est écrit, dès qu'elle est possible, une mise en perspective des savoirs avec l'histoire des sciences et l'actualité scientifique est fortement recommandée.

26 :03 → 26 :09 Cette recommandation est rappelée explicitement dans l'introduction du thème visé par notre *corpus*, celui sur la pression.

26 :09 → 26 :15 L'étude de la mécanique fournit d'excellentes opportunités de faire référence à l'histoire des sciences.

26 :16 → 26 :22 Alors, ça, c'est pour la partie, disons, B.O, officielle.

26 :22 → 26 :25 Qu'est-ce qu'il faut que vous sachiez pour la classe de première hein

26 :25 → 26 :30 Il y a aussi des remarques liées à l'authenticité historique du corpus.

26 :30 → 26 :32 Alors, qu'est-ce que ça veut dire, authentique ?

26 :32 → 26 :37 Alors on ne vous a pas amené regardez les manuscrits de l'époque.

26 :37 → 26 :47 Ceci dit, on a vraiment cherché à rester au plus près possible du texte initial.

26 :47 → 26 :52 Donc, vous voyez qu'il y a des opérations d'extraction et d'exposition de morceaux de sources primaires.

26 :52 → 26 :56 Évidemment, on ne prend pas des lettres en entier, on coupe, etc.

26 :56 → 27 :01 On les a un peu isolées de leur environnement culturel, social, etc.

27 :01 → 27 :08 Même si je vous donnerai à chaque fois des informations sur l'auteur des lettres du *corpus*.

27 :08 → 27 :15 Mais ceci dit, c'est des extraits et les auteurs sont réels.

27 :15 → 27 :18 Tout a été transcrit le plus fidèlement possible.

27 :18 → 27 :22 Ça a été traduit éventuellement de l'italien, en particulier, de l'anglais,

27 :22 → 27 :27 et parfois même du français du XVIIe, qui n'est pas tout à fait le français actuel.

27 :27 → 27 :37 Les seules modifications, c'est que la grammaire a parfois été très légèrement modifiée pour que ce soit compréhensible.

27 :37 → 27 :46 Ce n'est jamais une lettre dans une intégralité, c'est des portions de lettres qui sont choisies pour être utiles pour le travail qui va être demandé.

27 :46 → 27 :52 De temps en temps, on a rajouté des expressions entre crochets pour clarifier le propos.

27 :53 → 27 :57 Tout ce qui est entre crochets, c'est vraiment des choses qu'on a rajoutées.

27 :57 → 28 :02 Quand c'est en italique, c'est nous-mêmes qui avons reformulé certains termes,

28 :02 → 28 :05 parce que bon le vocabulaire a varié.

28 :05 → 28 :13 Et puis, on a ajouté euh... on a ajouté des conversions.

28 :14 → 28 :20 On a tout transformé dans les unités d'aujourd'hui,

28 :20 → 28 :24 parce que sinon, ça devient compliqué. Voilà

28 :25 → 28 :29 Je vous distribue le *corpus* et on va le regarder ensemble.

28 :31 → 28 :36 S'il y a des choses que vous ne comprenez pas dans ce *corpus*, on va le regarder ensemble.

28 :44 → 28 :49 J'ai eu peut-être tort, mais je n'ai pas agrafé.

28 :49 → 28 :56 C'est peut-être une bêtise de ma part, mais je l'ai fait volontairement parce que je me suis dit que c'était plus pratique pour regarder.

29 :01 → 29 :04 Si jamais vous en avez deux...

29 :13 → 29 :17 Ça, ça va plus facile.

30 :07 → 30 :11 Merci à vous.

31 :37 → 31 :52 Alors, on y va ? Donc ce que je vous propose, c'est qu'on lise ça ensemble et vous m'arrêtez.

31 :52 → 31 :57 Enfin dès qu'il y a un truc que vous ne comprenez pas ou dès que vous voulez des informations supplémentaires,

31 :57 → 32 :01 vous m'arrêtez pendant la lecture.

32 :01 → 32 :07 Alors, la première page, ce n'est pas directement une correspondance, c'est le contexte scientifique des correspondances.

32 :07 → 32 :14 Donc en 1638, ça je pense que vous connaissez, Galilée publie son fameux discours concernant deux sciences nouvelles.

32 :14 → 32 :19 La nouveauté des deux sciences en question réside dans le fait qu'elles sont fondées sur la technique.

32 :19 → 32 :23 C'est vraiment ça qui est marquant.

32 :23 → 32 :29 En particulier, un problème technique bien connu et bien documenté à l'époque se trouve transformé en un problème scientifique.

32 :29 → 32 :33 Il s'agit de la limite d'aspiration de l'eau dans les pompes.

32 :33 → 32 :40 En effet, si le phénomène d'aspiration qui assure le fonctionnement des pompes était attribué à l'horreur du vide,

32 :40 → 32 :43 vous voyez cette expression *horror vacui* régulièrement,

32 :43 → 32 :51 jusqu'au début du XVIIe, aucune explication scientifique satisfaisante n'avait jusqu'alors été avancée pour justifier la limite inexorable

32 :51 → 32 :56 que rencontrent toutes les pompes pour faire monter de l'eau au-delà d'une dizaine de mètres de hauteur.

32 :57 → 33 :03 Tandis que les ingénieurs s'évertuaient à inventer des aménagements pour contourner le problème technique,

33 :03 → 33 :07 l'œuvre de Galilée transforme ce dernier en un problème scientifique.

33 :07 → 33 :11 Les extraits qui composent ce *corpus* sont les correspondances échangées sur ce sujet par quelques scientifiques

33 :11 → 33 :15 en amont et en aval de la publication du discours.

33 :15 → 33 :21 C'est vraiment l'époque où l'on convertit ce problème technique des pompes en un problème scientifique.

33 :22 → 33 :25 Alors, première lettre.

33 :25 → 33 :36 La première lettre, extrait A, c'est une lettre de Galilée à Baliani qui date de 1630, donc 8 ans avant le discours.

33 :36 → 33 :47 Donc bon Galilée, vous connaissez, Florentin, vous voyez la petite note 1 là,

33 :47 → 33 :53 ses thèses sont trop ouvertement opposées à la philosophie scolastique.

33 :53 → 34 :00 Elles lui vaudront une condamnation en 1633, peu de temps après la publication de son Dialogue sur les deux grands systèmes du monde.

34 :00 → 34 :04 Donc, il ne faut pas confondre les dialogues et le discours sur deux sciences nouvelles.

34 :04 → 34 :08 C'est les deux œuvres les plus importantes de Galilée, je pense.

34 :08 → 34 :14 Ses théories sur la résistance du vide ménagent, quant à elle, beaucoup

plus les enseignements de l'école.

34 :14 → 34 :17 Quand on dit l'école, c'est la scolastique.

34 :17 → 34 :24 Et seront publiées en 1638, dans un ultime ouvrage plus consensuel, le discours concernant deux sciences nouvelles.

34 :24 → 34 :26 Et les deux sciences nouvelles, c'est lesquelles ?

34 :26 → 34 :33 Alors, les deux sciences nouvelles, c'est la résistance des matériaux, c'est l'histoire de poutres.

34 :33 → 34 :37 Et d'ailleurs, vous allez voir que ce problème-là en fait partie.

34 :37 → 34 :41 On considère au début que c'est un problème de résistance des matériaux.

34 :41 → 34 :44 Aussi curieux que ça puisse paraître.

34 :44 → 34 :48 Et l'autre, c'est le mouvement des projectiles.

34 :48 → 34 :51 C'est comment envoyer un boulet canon.

34 :51 → 34 :55 Ce qu'il appelle science, c'est un problème scientifique ?

34 :55 → 34 :58 Oui, c'est ça.

34 :58 → 35 :02 C'est un problème scientifique.

35 :03 → 35 :07 En fait, c'est deux problèmes techniques.

35 :16 → 35 :23 Et Baliani, c'est un autre savant italien, qui vit à la même époque et qui habite lui à Gênes.

35 :23 → 35 :25 Alors, je commence la lecture.

35 :25 → 35 :31 Je suis très reconnaissant à votre très illustre seigneurie pour sa très gracieuse lettre,

35 :31 → 35 :35 voyant en elle la continuation de votre affection à mon égard.

35 :35 → 35 :41 Je suis vraiment désolé que vous ne m'ayez pas demandé mon avis sur le résultat de l'expérience du siphon

35 :41 → 35 :46 avant que la dépense ne soit faite, car j'aurais pu vous l'épargner.

35 :46 → 35 :51 On peut faire monter l'eau à travers un tube ou un siphon par attraction,

35 :51 → 35 :53 ou par impulsion.

35 :53 → 35 :57 En la soulevant par attraction, il y a une certaine hauteur du tube,

35 :57 → 36 :03 au-delà de laquelle il est impossible de faire monter l'eau d'un doigt ou même d'un cheveu.

36 :03 → 36 :10 Et cette hauteur me semble être d'environ 40 pieds, c'est-à-dire 12 mètres, et je crois même moins.

36 :10 → 36 :14 La cause de cet effet m'a beaucoup troublé avant que je ne l'étudie.

36 :14 → 36 :17 Mais j'ai finalement compris qu'elle était tout à fait manifeste,

36 :17 → 36 :20 Il en va ainsi des vraies causes après qu'on les a trouvées.

36 :20 → 36 :25 Si les cordes de chambre et d'acier se cassent quand elles doivent supporter plus de poids,

36 :25 → 36 :30 quels doutes devons-nous avoir sur le fait qu'on ne puisse également déchirer une corde d'eau ?

36 :30 → 36 :36 Au contraire, elle se déchirera d'autant plus facilement que les parties de l'eau qui se séparent l'une de l'autre

36 :36 → 36 :41 n'ont pas d'autre résistance à surmonter que celle du vide qui succède à la division.

36 :41 → 36 :45 Est-ce que c'est clair pour vous ce qu'il exprime là ?

36 :45 → 36 :47 J'ai pas compris le dernier paragraphe. Des cordes d'eau

36 :47 → 36 :57 En fait, ce qu'il dit, c'est que, vous voyez, on aspire de l'eau, en fait on tire, on tire, on tire,

36 :57 → 37 :01 parce que la nature a horreur du vide, donc dès qu'il y a un vide, elle cherche à le combler.

37 :01 → 37 :03 Donc vous pouvez tirer sur de l'eau.

37 :03 → 37 :11 Il dit que pour une colonne d'eau, c'est pareil que pour une corde de chanvre ou d'acier.

37 :11 → 37 :17 En gros, il y a une limite maximale, parce qu'en fait, elle se casse quand elle doit supporter plus de poids.

37 :17 → 37 :21 C'est-à-dire qu'il y a une limite maximale, c'est-à-dire qu'elle se casse quand elle doit supporter plus de poids.

37 :21 → 37 :25 Donc il y a une limite maximale, c'est-à-dire qu'elle se casse quand elle doit supporter plus de poids.

37 :33 → 37 :37 Et donc, ça, c'est le seul problème, ça, c'est le seul problème.

37 :37 → 37 :39 C'est la même chose que pour une corde.

37 :39 → 37 :41 C'est-à-dire qu'il y a un vide. C'est plutôt de la cavitation.

37 :41 → 37 :44 C'est exactement ce qu'on appellerait aujourd'hui de la cavitation.

37 :44 → 37 :46 C'est ça qui se passe.

37 :46 → 37 :48 Ça, c'est la version moderne de la chose. Mais pour Galilée c'est du vide.

38 :06 → 38 :16 Et il fait aussi remarquer que c'est la même chose

38 :16 → 38 :22 par attraction ou par impulsion.

38 :22 → 38 :28 Surtout, s'il y a quelque chose qui n'est pas clair,

38 :28 → 38 :30 n'hésitez pas demander-moi.

38 :30 → 38 :33 J'ai du mal à visualiser l'expérience dont il parle.

38 :34 → 38 :36 On a un récipient avec un tube

38 :36 → 38 :39 et juste on diminue la pression au-dessus pour faire monter l'eau ?

38 :39 → 38 :42 C'est ça. Vous faites le vide au-dessus.

38 :42 → 38 :44 Vous pompez, en fait.

38 :44 → 38 :45 Pardon ?

38 :45 → 38 :46 Vous pompez.

38 :46 → 38 :47 Ok, d'accord.

38 :47 → 38 :51 Donc, vous avez juste un tube le plus grand possible
 38 :51 → 38 :53 qui baigne dans de l'eau.
 38 :56 → 38 :59 Et puis là, vous installez un système de pompe.
 38 :59 → 39 :02 Mais le réservoir en bas, il est ouvert ?
 39 :02 → 39 :04 Ça, c'est ouvert, oui.
 39 :05 → 39 :07 Sinon, ça ne bouge pas du tout.
 39 :07 → 39 :09 Il ne se passe rien.
 39 :09 → 39 :11 Vous arrivez à faire monter.
 39 :11 → 39 :13 Et hop, ça s'arrête.
 39 :13 → 39 :17 Il dit à une hauteur qui est inférieure à 12 mètres.
 39 :17 → 39 :20 Il dit 12 mètres, mais un peu moins.
 39 :20 → 39 :23 Je ne comprends pas trop le par impulsion.
 39 :23 → 39 :25 Moi, ce que ça me fait penser,
 39 :25 → 39 :27 c'est qu'on pousse l'eau par en bas.
 39 :27 → 39 :29 C'est ça qu'il entend, par impulsion ?
 39 :29 → 39 :32 En fait, je ne sais pas.
 39 :34 → 39 :36 Si c'est ça, ça ne marche pas.
 39 :36 → 39 :39 Je ne sais pas exactement ce qu'il entend par impulsion,
 39 :39 → 39 :42 mais vous avez deux manières de faire cette expérience.
 39 :42 → 39 :44 On va le voir après.
 39 :44 → 39 :46 La première, c'est effectivement de pomper.
 39 :46 → 39 :48 Vous aspirez l'air,
 39 :48 → 39 :51 et ça fait monter l'eau au bout d'un moment.
 39 :53 → 39 :56 Et l'autre manière de faire cette expérience,
 39 :57 → 39 :59 c'est...
 40 :02 → 40 :05 En fait, l'autre manière, c'est d'avoir...
 40 :05 → 40 :08 En fait, c'est un tout petit peu plus compliqué.
 40 :08 → 40 :11 En gros, ce que vous pouvez faire [écrit au tableau]
 40 :11 → 40 :14 c'est fermer ici, mettre une sorte de robinet.
 40 :14 → 40 :17 Fermez votre colonne d'eau.
 40 :18 → 40 :20 La remplir par en haut.
 40 :20 → 40 :23 Vous remplissez, vous remplissez, vous remplissez...
 40 :23 → 40 :25 Une fois que c'est plein d'eau comme ça,
 40 :25 → 40 :27 vous fermez en haut.
 40 :27 → 40 :30 Donc là, vous avez un truc plein d'eau.
 40 :30 → 40 :32 Et puis vous ouvrez en bas.
 40 :32 → 40 :34 Et si vous faites ça,
 40 :34 → 40 :36 c'est pareil.
 40 :36 → 40 :39 Ça descend, et ça s'arrête là.
 40 :40 → 40 :43 Je suppose que c'est ça qu'il veut dire par...

- 40 :45 → 40 :47 Ça, c'est aspiration.
- 40 :47 → 40 :49 Ça, c'est peut-être par impulsion,
- 40 :49 → 40 :52 mais je ne suis pas complètement certain que ce soit ça.
- 40 :53 → 40 :55 Si on pouvait mettre l'eau par en haut,
- 40 :55 → 40 :57 il n'y aurait pas besoin de la pompe,
- 40 :57 → 41 :00 par rapport à la terre à terre qu'il essaie de régler.
- 41 :00 → 41 :03 L'autre version, c'est peut-être ça qui veut dire...
- 41 :03 → 41 :05 C'est le siphon, c'est le vrai siphon.
- 41 :05 → 41 :08 C'est-à-dire, le siphon, c'est comme ça.
- 41 :12 → 41 :15 Le siphon, vous mettez de l'eau partout.
- 41 :15 → 41 :18 Et en fait si votre tuyau, vous le montez...
- 41 :18 → 41 :20 Imaginez que vous ayez un tuyau souple.
- 41 :20 → 41 :23 Ça et ça, ça reste dans l'eau.
- 41 :23 → 41 :26 Mais vous le montez, vous le montez, vous le montez...
- 41 :26 → 41 :29 Vous ne pouvez pas non plus dépasser les 12 mètres.
- 41 :29 → 41 :32 Peut-être que c'est plutôt ça.
- 41 :32 → 41 :35 En fait, tout ça revient un peu au même.
- 41 :35 → 41 :39 Aujourd'hui, c'est possible qu'à l'époque, ce ne soit pas le cas.
- 41 :40 → 41 :43 Vous avez déjà siphonné des trucs, non ?
- 41 :47 → 41 :49 Aujourd'hui... avec le prix de l'essence !
- 41 :51 → 41 :54 C'est peut-être vraiment cette histoire de siphon.
- 41 :54 → 41 :56 Parce que quand on fait un siphon, en fait,
- 41 :56 → 41 :59 on arrive un peu à dépasser un peu les 10 mètres.
- 41 :59 → 42 :01 C'est plus compliqué.
- 42 :01 → 42 :03 Ça devient de l'hydraulique.
- 42 :07 → 42 :10 C'est toute une autre histoire.
- 42 :13 → 42 :16 C'est bon pour la première lettre ?
- 42 :16 → 42 :18 Ou vous avez d'autres questions ?
- 42 :18 → 42 :21 Si vous avez des questions de physique aussi, n'hésitez pas.
- 42 :21 → 42 :23 On pourra en parler du pourquoi du comment.
- 42 :26 → 42 :28 Donc pour lui, pour Galilée,
- 42 :28 → 42 :31 c'est une question de résistance de la colonne d'eau.
- 42 :31 → 42 :33 Elle se casse.
- 42 :33 → 42 :35 Elle se brise.
- 42 :37 → 42 :40 Alors, réponse de Baliani à Galilée,
- 42 :41 → 42 :45 le 26 octobre 1630.
- 42 :49 → 42 :52 « Je ne suis pas de l'opinion vulgaire
- 42 :52 → 42 :54 suivant laquelle il n'y a pas de vide. »
- 42 :54 → 42 :57 Alors, on vous a mis une petite note vulgaire.
- 42 :57 → 42 :59 Ça vient de *vulgus*.

42 :59 → 43 :01 C'est-à-dire l'opinion commune, en fait.
 43 :01 → 43 :03 Ça n'a rien de péjoratif dans cette histoire.
 43 :03 → 43 :05 C'est juste qu'il ne pense pas, comme tout le monde,
 43 :05 → 43 :07 que la nature a horreur du vide.
 43 :07 → 43 :09 À l'époque, tout le monde pensait
 43 :09 → 43 :11 que la nature a horreur du vide.
 43 :11 → 43 :13 D'ailleurs, c'est une expression qu'on entend encore.
 43 :13 → 43 :15 « Je ne suis pas de l'opinion commune,
 43 :15 → 43 :18 suivant laquelle il n'y a pas de vide. »
 43 :18 → 43 :20 Et pour tout dire,
 43 :20 → 43 :22 j'ai commencé de croire que le vide
 43 :22 → 43 :24 était naturellement possible
 43 :24 → 43 :26 dans le même temps que j'ai reconnu à l'air
 43 :26 → 43 :28 un poids sensible.
 43 :29 → 43 :32 Je crois son immensité si grande
 43 :32 → 43 :35 qu'en dépit de la faiblesse de son poids spécifique,
 43 :35 → 43 :38 si l'on sentait la charge de tout l'air
 43 :38 → 43 :40 qu'on porte au-dessus de soi,
 43 :40 → 43 :43 on éprouverait un très grand poids.
 43 :44 → 43 :47 Au moyen d'une force proportionnée à ce poids,
 43 :47 → 43 :50 on pourrait le surmonter et produire le vide.
 43 :50 → 43 :53 Je juge que cette valeur est telle
 43 :53 → 43 :55 que l'on pourrait produire le vide
 43 :55 → 43 :58 avec une force égale à celle que peut produire l'eau
 43 :58 → 44 :00 dans un tube dont la longueur
 44 :00 → 44 :02 ne dépasse pas 40 pieds,
 44 :02 → 44 :04 c'est-à-dire 12 mètres.
 44 :07 → 44 :10 Ça va ou c'est très obscur ?
 44 :10 → 44 :13 Vous voyez ce qu'il oppose à Galilée,
 44 :13 → 44 :16 il a une autre explication,
 44 :16 → 44 :19 si vous voulez, à cette histoire.
 44 :19 → 44 :22 En termes de contexte scientifique,
 44 :22 → 44 :25 il parle justement du poids de l'air.
 44 :25 → 44 :28 Ce n'est pas encore quelque chose
 44 :28 → 44 :31 qui est reconnu universellement
 44 :31 → 44 :34 à ce moment là si ?
 44 :34 → 44 :37 Si le poids de l'air est connu
 44 :37 → 44 :40 mais on n'a pas une idée très claire
 44 :40 → 44 :43 de la quantité d'air qu'il y a au-dessus de la terre.
 44 :43 → 44 :46 Lui, ce qu'il dit, c'est que

44 :46 → 44 :49 certes l'air est très peu pesant,
 44 :49 → 44 :52 mais il y en a tellement
 44 :52 → 44 :55 que si on pouvait peser
 44 :55 → 44 :58 le poids de l'air,
 44 :58 → 45 :01 il y en aurait tellement
 45 :04 → 45 :07 C'est-à-dire que si on pouvait peser
 45 :07 → 45 :10 cet air-là, on tomberait
 45 :10 → 45 :13 sur quelque chose qui correspond à ces millimètres.
 45 :23 → 45 :26 Je pense que dès Baliani,
 45 :26 → 45 :29 on a cette idée que voilà
 45 :29 → 45 :32 Ce n'est pas que la nature a peur du vide ici.
 45 :33 → 45 :36 Aucun problème, il ne pèse rien.
 45 :36 → 45 :39 Aujourd'hui, on sait que ce n'est pas du vide,
 45 :39 → 45 :42 mais c'est encore une autre histoire vous avez raison c'est de la vapeur

d'eau.

45 :47 → 45 :50 Donc là, le vide ne pèse rien [montre au tableau]
 45 :50 → 45 :53 Là, par contre, l'air pèse.
 45 :53 → 45 :56 Et en gros, il y a un équilibre
 45 :56 → 45 :59 entre ce que pèse tout l'air,
 45 :59 → 46 :02 l'océan d'air dans lequel on est,
 46 :02 → 46 :05 et les 12 mètres d'eau en fait.
 46 :11 → 46 :14 C'est pour ça qu'il dit à la fin je juge que cette valeur est telle
 46 :14 → 46 :17 que l'on pourrait produire le vide
 46 :17 → 46 :20 avec une force égale à celle
 46 :20 → 46 :23 que peut produire l'eau dans un tube
 46 :23 → 46 :26 dont la longueur ne dépasse pas 40 mètres.
 46 :30 → 46 :33 Donc à l'époque ils pensent que le vide n'existe pas ?
 46 :33 → 46 :36 Il y a une controverse oui sur l'existence du vide
 46 :36 → 46 :39 qui remonte à l'histoire.
 46 :44 → 46 :47 À cette époque-là,
 46 :47 → 46 :50 ils ne sont pas tous d'accord.
 46 :50 → 46 :53 Il y en a qui pensent que ça existe
 46 :53 → 46 :56 et d'autres qui pensent que ça n'existe pas.
 47 :00 → 47 :03 Mais le vide, ils le définissent
 47 :03 → 47 :06 comment ?
 47 :06 → 47 :09 comme aujourd'hui comme un espace dans lequel il n'y a rien du
 tout.
 47 :09 → 47 :12 Mais comment ils peuvent être sûr que ça peut être de l'air ou du
 vide ?
 47 :20 → 47 :23 C'est une vraie question.

- 47 :23 → 47 :26 Comment savoir quand on ferme le truc
 47 :26 → 47 :29 et qu'on laisse l'eau tomber,
 47 :29 → 47 :32 s'il y a de l'air ou du vide ?
 47 :32 → 47 :35 Il parle d'air depuis le début
 47 :35 → 47 :38 et après, sur cet expérience
 47 :38 → 47 :41 il parle de production de vide.
 47 :41 → 47 :44 Je me demandais comment il pouvait
 47 :44 → 47 :47 en conclure si c'était du vide ou de l'air.
 48 :03 → 48 :06 Ils ont des arguments vous allez voir après. Une expérience de l'époque
 48 :06 → 48 :09 qui permet vraiment de savoir
 48 :09 → 48 :12 si c'est du vide ou de l'air,
 48 :12 → 48 :15 c'est compliqué.
 48 :15 → 48 :18 Vous, on vous a peut-être présenté
 48 :18 → 48 :21 tout ça comme étant du vide.
 48 :21 → 48 :24 Souvent, c'est ce qu'on fait.
 48 :24 → 48 :27 On ne parle pas par exemple des vapeurs de mercure
 48 :27 → 48 :30 en haut du baromètre.
 48 :30 → 48 :33 Dès que vous avez du vide,
 48 :33 → 48 :36 ce que vous avez en tout,
 48 :36 → 48 :39 c'est la vapeur.
 48 :49 → 48 :52 Vous avez raison,
 48 :52 → 48 :55 il n'y a pas vraiment moyen
 48 :55 → 48 :58 de savoir ce qu'il y a en haut à l'époque. Ceci vous allez voir que les arguments...
- 48 :58 → 49 :01 Bon on continue.
 49 :05 → 49 :08 Extrait C, c'est une lettre
 49 :08 → 49 :11 de Magiotti à Mersenne,
 49 :11 → 49 :14 c'est le père Mersenne,
 49 :14 → 49 :17 qui date de 1648.
 49 :17 → 49 :20 Là, on est un peu après.
 49 :20 → 49 :23 Il raconte une expérience qu'il a faite
 49 :23 → 49 :26 en 1640-1641.
 49 :26 → 49 :29 C'est pareil, ils sont cités
 49 :29 → 49 :32 dans les petites notes en bas.
 49 :32 → 49 :35 C'est un savant et religieux
 49 :35 → 49 :38 italien qui réside à Rome.
 49 :38 → 49 :41 Il a assisté aux expériences
 49 :41 → 49 :44 réalisées par Berti autour
 49 :44 → 49 :47 des années 40.
 49 :47 → 49 :50 C'est Berti et Magiotti.

49 :50 → 49 :53 Il raconte dans cette lettre l'expérience de Berti ok ?
 49 :54 → 49 :57 et Mersenne, le père Mersenne,
 49 :57 → 50 :00 c'est un savant et religieux français
 50 :00 → 50 :03 qui a une correspondance très active
 50 :03 → 50 :06 avec toute l'Europe.
 50 :06 → 50 :09 Il fait de nombreux voyages pour s'informer
 50 :09 → 50 :12 des nouvelles avancées de la science
 50 :12 → 50 :15 et présenter celle dont il a connaissance.
 50 :15 → 50 :18 C'est Magiotti qui raconte l'expérience de Berti.
 50 :18 → 50 :21 Je devais répondre
 50 :21 → 50 :24 Mais l'accident arrivé subitement
 50 :24 → 50 :27 m'oblige à écrire en toute hâte
 50 :27 → 50 :30 et en italien ces quelques lignes
 50 :30 → 50 :33 fort décousues.
 50 :33 → 50 :36 M. Gaspard Berti, ici à Rome,
 50 :36 → 50 :39 a construit un siphon en plomb
 50 :39 → 50 :42 d'environ 22 brasses, 13 mètres,
 50 :42 → 50 :45 qui reliait la cour de sa maison
 50 :45 → 50 :48 aux chambres. [rires]
 50 :48 → 50 :51 On fermait le
 50 :51 → 50 :54 robinets D.
 50 :54 → 50 :57 Vous voyez le D, c'est tout en bas
 50 :57 → 51 :00 dans le sceau. On fermait le robinet D
 51 :00 → 51 :03 et on remplissait tout le siphon
 51 :03 → 51 :06 et la cuve HG.
 51 :06 → 51 :09 En fait, tout était rempli.
 51 :09 → 51 :12 Enfin, gardant pleine la cuve HF
 51 :12 → 51 :15 et fermé le robinet F,
 51 :15 → 51 :18 la cuve HG
 51 :18 → 51 :21 était aussi remplie d'eau
 51 :21 → 51 :24 et ouvert D. On ouvre le robinet du bas.
 51 :24 → 51 :27 L'eau commençait à descendre dans le siphon.
 51 :27 → 51 :30 Elle descendait jusqu'à N
 51 :30 → 51 :33 et elle s'arrêtait. N, c'est un point
 51 :33 → 51 :36 qui se trouve entre B et C.
 51 :36 → 51 :39 Chaque fois, en refaisant l'essai,
 51 :39 → 51 :42 on obtenait la même position d'équilibre. Et on pouvait très bien
 l'observer car
 51 :42 → 51 :45 Le morceau baissé de siphon
 51 :45 → 51 :48 était en verre spécial et parfaitement collé et soudé.

51 :48 → 51 :51 En fait, tout était en plomb, mais il y avait
 51 :51 → 51 :54 cette petite partie en verre.
 51 :54 → 51 :57 C'est compliqué de faire du verre de 10 mètres de hauteur.
 51 :57 → 52 :00 Un truc bien calibré.
 52 :00 → 52 :03 Par cette expérience, M. Berti pensait convaincre M. Galilée
 52 :03 → 52 :06 en affirmant que de N à A,
 52 :06 → 52 :09 il y avait plus
 52 :09 → 52 :12 de 18 brasses, c'est-à-dire 10 mètres 50.
 52 :12 → 52 :15 Mais il aurait dû voir que la partie
 52 :15 → 52 :18 AE du siphon n'entre pas en ligne de compte
 52 :18 → 52 :21 car elle est plongée dans l'eau de la cuve AG
 52 :21 → 52 :24 et que la longueur EN était exactement
 52 :24 → 52 :27 de 18 brasses, c'est-à-dire 10 mètres 50.
 52 :27 → 52 :30 J'ai fait part de cette expérience à M. Torricelli
 52 :30 → 52 :33 pensant que si l'on avait employé de l'eau de mer, donc plus lourde,
 52 :33 → 52 :36 elle ne se serait pas arrêtée en N, mais plus bas.
 52 :36 → 52 :39 Je prie Dieu de vous accorder.
 52 :42 → 52 :45 Donc là, c'est vraiment exactement le schéma
 52 :45 → 52 :48 de l'expérience que je vous ai expliquée.
 52 :48 → 52 :51 Vous voyez qu'il discute pour savoir s'il faut prendre
 52 :51 → 52 :54 le bas du tube ici
 52 :54 → 52 :57 ou cet endroit-là.
 52 :57 → 53 :00 Et en fait, ce qu'il dit, c'est que si on prend cet endroit-là
 53 :00 → 53 :03 jusqu'au haut là où l'eau s'arrête, ça fait toujours 10 mètres 50.
 53 :06 → 53 :09 Donc il n'y a pas de...
 53 :09 → 53 :12 Il n'y a pas de contradiction avec ce qu'on savait à l'époque
 53 :12 → 53 :15 sur l'histoire des 10 mètres.
 53 :18 → 53 :21 Des questions là-dessus ou pas ?
 53 :21 → 53 :24 Non ? C'est bon ? C'est une sorte de siphon statique.
 53 :30 → 53 :33 Alors, extrait D.
 53 :34 → 53 :37 Donc cette fois-ci, c'est une lettre de Torricelli.
 53 :37 → 53 :40 Donc Torricelli, je pense que vous le connaissez tous.
 53 :40 → 53 :43 C'est toujours un Italien qui était à Rome,
 53 :43 → 53 :46 qui rejoint Galilée à Florence en 1641,
 53 :46 → 53 :49 qui assiste le vieux savant dans ses derniers mois
 53 :49 → 53 :52 et qui reste ensuite à Florence jusqu'à sa mort.
 53 :52 → 53 :55 Et Ricci, c'est un savant et religieux italien
 53 :55 → 53 :58 qui est aussi de Rome,
 53 :58 → 54 :01 qui a aussi assisté aux expériences de Berti et qui correspond
 54 :01 → 54 :04 beaucoup avec Torricelli et avec son assistant Vincenzo Viviani.

54 :07 → 54 :10 Alors, je vous lis cette lettre.

54 :10 → 54 :13 Nous avons fabriqué beaucoup de vases en verre

54 :13 → 54 :16 et aussi de gros tuyaux comme les suivants,

54 :16 → 54 :19 désignés A et B, longs de deux brasses.

54 :19 → 54 :22 Donc là, c'est beaucoup plus court, 1,20 m, il fait ça entièrement en verre.

54 :22 → 54 :25 Ceux-ci furent remplis de vif-argent.

54 :25 → 54 :28 Donc le vif-argent, vous savez tous,

54 :28 → 54 :31 c'est l'ancienne appellation du mercure liquide.

54 :34 → 54 :37 C'était utilisé indifféremment au XVIIe,

54 :37 → 54 :40 et puis finalement, c'est le mercure qui est resté.

54 :43 → 54 :46 Donc ceux-ci furent remplis de vif-argent,

54 :46 → 54 :49 donc les deux tubes.

54 :49 → 54 :52 Puis, si l'on bouchait l'orifice avec un doigt

54 :52 → 54 :55 et qu'on les renversait dans une cuve où il y avait le vif-argent,

54 :55 → 54 :58 vous voyez la cuve, elle est en C, là en bas,

54 :58 → 55 :01 on les voyait se vider.

55 :01 → 55 :04 Le tube AD, pourtant, restait toujours plein

55 :04 → 55 :07 à la hauteur d'une brasse un quart et un doigt,

55 :07 → 55 :10 c'est-à-dire 74,9 cm.

55 :13 → 55 :16 Cette force qui retient le vif-argent contre sa nature,

55 :16 → 55 :19 qui l'a de descendre,

55 :19 → 55 :22 on a cru jusqu'à présent qu'elle était inférieure

55 :22 → 55 :25 au vase AE où qu'elle venait du vide.

55 :25 → 55 :28 Mais je prétends que la force vient de l'extérieur,

55 :28 → 55 :31 sur la superficie du liquide qui est dans la cuve,

55 :31 → 55 :34 l'air pèse d'une hauteur de 50 milles,

55 :34 → 55 :37 c'est-à-dire 800 km.

55 :37 → 55 :40 C'est une estimation de l'atmosphère.

55 :41 → 55 :44 Ce raisonnement se confirmait par l'expérience

55 :44 → 55 :47 faite au même temps avec le vase A et avec le tuyau B,

55 :47 → 55 :50 dans lesquels le vif-argent s'arrêtait toujours au même niveau AB,

55 :51 → 55 :54 signe presque certain que la vertu n'était pas à l'intérieur,

55 :54 → 55 :57 car le vase AE aurait eu plus de force,

55 :57 → 56 :00 ce vase où il y avait plus de substance raréfiée et attirante

56 :00 → 56 :03 que dans le petit espace B.

56 :05 → 56 :08 Est-ce que vous comprenez ce qu'il veut dire ?

56 :08 → 56 :11 Les tubes sont pas fermés en haut ?

56 :11 → 56 :14 Si, si.

56 :14 → 56 :17 Il a l'air fermé sur le dessin.

56 :17 → 56 :20 Oui, c'est ça qui prend plus de force.
 56 :26 → 56 :29 Vous faites deux expériences avec deux tubes,
 56 :29 → 56 :32 est-ce que les deux sont fermés ?
 56 :34 → 56 :37 Est-ce que les deux tubes sont touchés ?
 56 :37 → 56 :40 Non, je pense que l'histoire c'est que
 56 :40 → 56 :43 qu'ils mettent le tube A tout seul
 56 :43 → 56 :46 ou qu'ils le mettent avec le tube B ça change rien.
 56 :47 → 56 :50 Ce qu'il ne veut pas dire c'est qu'il y a un volume plus grand ?
 56 :50 → 56 :53 Oui, il y a plus de volume de mercure
 56 :53 → 56 :56 quand il y a le deuxième tube.
 56 :56 → 56 :59 Que le volume au-dessus
 56 :59 → 57 :02 ne change en rien sur la hauteur.
 57 :02 → 57 :05 C'est pas parce qu'il y a plus ou moins de volume
 57 :05 → 57 :08 que cette hauteur.
 57 :08 → 57 :11 AE, on a un volume de V peut-être plus grand
 57 :11 → 57 :14 et donc ça a plus de force.
 57 :15 → 57 :18 D'accord, j'ai compris.
 57 :28 → 57 :31 Si le tube...
 57 :31 → 57 :34 Ce n'est pas dit que les tubes sont bouchés.
 57 :34 → 57 :37 Ils sont tous les deux bouchés.
 57 :37 → 57 :40 En fait, ils les remplissent
 57 :40 → 57 :43 de mercure du côté
 57 :43 → 57 :46 du côté qui est ouvert,
 57 :46 → 57 :49 ils mettent leurs doigts au bout,
 57 :49 → 57 :52 ils les plongent dans le truc,
 57 :52 → 57 :55 ils enlèvent le doigt
 57 :55 → 57 :58 et ils regardent comment ça se vide.
 57 :58 → 58 :01 Donc là, en fait...
 58 :16 → 58 :19 En fait, il dit si c'est le vide qui retient...
 58 :19 → 58 :22 Enfin, si c'est quelque chose qui est là-dedans.
 58 :22 → 58 :25 D'accord.
 58 :26 → 58 :29 S'il vous plaît, s'il vous plaît.
 58 :29 → 58 :32 Il dit si c'est quelque chose qui est là-dedans,
 58 :32 → 58 :35 qui retient le mercure de tomber.
 58 :35 → 58 :38 Alors, si on prend un grand espace ici,
 58 :38 → 58 :41 ça devrait retenir mieux
 58 :41 → 58 :44 que si on prend juste un tout petit espace.
 58 :44 → 58 :47 Et son expérience montre que ça ne change rien.
 58 :47 → 58 :50 Ça tombe toujours et ça s'arrête toujours
 58 :50 → 58 :53 à la même hauteur.

58 :53 → 58 :56 Donc il dit que c'est pas ça qui retient,
 58 :56 → 58 :59 c'est pas le vide qui retient la colonne de mercure,
 58 :59 → 59 :02 c'est plutôt ici, l'air,
 59 :02 → 59 :05 qui l'empêche de tomber.
 59 :11 → 59 :14 Voilà, 800 km.
 59 :17 → 59 :20 Ceci dit, il faudrait vérifier.
 59 :24 → 59 :27 C'est bon ?
 59 :27 → 59 :30 C'est clair ou pas ?
 59 :30 → 59 :33 Oui.
 59 :38 → 59 :41 Alors,
 59 :41 → 59 :44 extrait E.
 59 :44 → 59 :47 Donc, réponse
 59 :47 → 59 :50 de Ricci à Torricelli. Alors vous allez voir,...
 59 :51 → 59 :54 Eh mais c'est rapide une semaine !
 59 :54 → 59 :57 cette lettre est très peu connue en fait,
 59 :57 → 01 :00 :00 mais vous allez voir qu'elle est vraiment,
 01 :00 :00 → 01 :00 :03 vraiment passionnante.
 01 :00 :03 → 01 :00 :06 J'admire la noble bravoure de votre seigneurie
 01 :00 :06 → 01 :00 :09 d'avoir pris en considération quelque chose
 01 :00 :09 → 01 :00 :12 qui n'a été vu par personne jusqu'alors
 01 :00 :18 → 01 :00 :21 Et qui est tellement probable
 01 :00 :21 → 01 :00 :24 qu'hormis deux objections que je prie votre seigneurie
 01 :00 :24 → 01 :00 :27 de bien vouloir résoudre, je considère que c'est
 01 :00 :27 → 01 :00 :30 ce qu'il y a de plus vrai, de plus raisonnable
 01 :00 :30 → 01 :00 :33 que l'on puisse dire dans une telle affaire.
 01 :00 :33 → 01 :00 :36 Donc autrement dit, vous êtes merveilleux,
 01 :00 :36 → 01 :00 :39 mais j'ai juste deux petits contre-arguments
 01 :00 :39 → 01 :00 :42 à votre théorie.
 01 :00 :42 → 01 :00 :45 Dès que vous aurez résolu ça tout ira bien.
 01 :00 :45 → 01 :00 :48 On va donc exclure l'action de l'air
 01 :00 :48 → 01 :00 :51 pesant sur la surface extérieure du vif-argent
 01 :00 :51 → 01 :00 :54 qui se trouve dans la cuve,
 01 :00 :54 → 01 :00 :57 en plaçant un couvercle.
 01 :00 :57 → 01 :01 :00 Il dit, ben voilà, c'est facile, [dessine au tableau]
 01 :01 :00 → 01 :01 :03 je place un couvercle ici,
 01 :01 :03 → 01 :01 :06 de sorte que l'air au-dessus de la cuve
 01 :01 :06 → 01 :01 :09 ne communiquerait plus avec lui.
 01 :01 :09 → 01 :01 :12 L'air peserait alors non plus sur la surface [montre au tableau]
 01 :01 :12 → 01 :01 :15 mais sur le couvercle.
 01 :01 :15 → 01 :01 :18 Et le vif-argent se maintient suspendu

- 01 :01 :18 → 01 :01 :21 comme auparavant.
- 01 :01 :21 → 01 :01 :24 On ne peut plus y attribuer l'effet au poids de l'air.
- 01 :01 :24 → 01 :01 :27 Donc ça c'est son premier argument
- 01 :01 :27 → 01 :01 :30 et c'est exactement ce qui se passe.
- 01 :01 :30 → 01 :01 :33 Si vous fermez la cuve, vous la scellez bien
- 01 :01 :33 → 01 :01 :36 hermétiquement et tout ça, ça ne bouge pas d'un iota
- 01 :01 :36 → 01 :01 :39 et pourtant,
- 01 :01 :39 → 01 :01 :42 on ne peut plus dire que l'air appuie sur le couvercle.
- 01 :01 :42 → 01 :01 :45 Donc ça c'est son premier petit ennui.
- 01 :01 :45 → 01 :01 :48 Deuxièmement,
- 01 :01 :48 → 01 :01 :51 qu'on prenne une seringue
- 01 :01 :51 → 01 :01 :54 et que son piston y soit entièrement enfoncé
- 01 :01 :54 → 01 :01 :57 de sorte qu'il chasse tous les autres corps
- 01 :01 :57 → 01 :02 :00 par son volume. Puis bouchons le trou à l'extrémité.
- 01 :02 :00 → 01 :02 :03 Donc vous prenez une seringue, vous poussez jusqu'au bout,
- 01 :02 :03 → 01 :02 :06 vous bouchez le bout de la seringue, vous la scellez
- 01 :02 :06 → 01 :02 :09 et retirons de force le piston.
- 01 :02 :09 → 01 :02 :12 On ressent une grande résistance
- 01 :02 :12 → 01 :02 :15 et cela ne se produit pas seulement en tenant la seringue vers
le bas
- 01 :02 :15 → 01 :02 :18 et le piston en haut
- 01 :02 :18 → 01 :02 :21 sur la poignée duquel l'air pèse
- 01 :02 :21 → 01 :02 :24 mais cela se produit dans toutes les directions.
- 01 :02 :24 → 01 :02 :27 Et pourtant, il ne me semble pas qu'on puisse facilement
comprendre
- 01 :02 :27 → 01 :02 :30 dans ces cas en quoi le poids de l'air y est pour quelque chose.
- 01 :02 :30 → 01 :02 :33 C'est le deuxième argument.
- 01 :02 :33 → 01 :02 :36 Vous avez autant de mal à tirer horizontalement
- 01 :02 :36 → 01 :02 :39 même vers le bas que vers le haut.
- 01 :02 :39 → 01 :02 :42 Si l'explication est que l'air pèse sur le truc,
- 01 :02 :42 → 01 :02 :45 il y a un problème.
- 01 :02 :45 → 01 :02 :48 C'est ce que ma folie m'a administré
- 01 :02 :48 → 01 :02 :51 en opposition au bon sens de Votre Seigneurie
- 01 :02 :51 → 01 :02 :54 qui devra excuser le désir que j'ai de comprendre
- 01 :02 :54 → 01 :02 :57 parfaitement la solution des objections que j'oppose
- 01 :02 :57 → 01 :03 :00 afin d'en être ensuite un défenseur absolu. [rires]
- 01 :03 :01 → 01 :03 :04 Oui, je suis d'accord.
- 01 :03 :04 → 01 :03 :07 Il se moque un peu.
- 01 :03 :16 → 01 :03 :19 Ça va ?
- 01 :03 :19 → 01 :03 :22 C'est parfaitement clair ? Vous voyez ce qu'il se passe ?

01 :03 :23 → 01 :03 :26 Donc ça, c'était l'extrait E.

01 :03 :34 → 01 :03 :37 Bon, j'en rajoute un peu, mais...

01 :03 :37 → 01 :03 :40 C'est juste l'époque.

01 :03 :40 → 01 :03 :43 Oui, c'est l'époque.

01 :03 :43 → 01 :03 :46 On dit les choses très poliment,

01 :03 :46 → 01 :03 :49 mais on attaque bien fort.

01 :03 :49 → 01 :03 :52 Mais c'est vrai que ces deux arguments...

01 :03 :54 → 01 :03 :57 Oui, oui, c'est l'époque mais ça se fait toujours dans les conférences.

01 :03 :57 → 01 :04 :00 Je pense qu'on dit très gentiment des choses,

01 :04 :00 → 01 :04 :03 et en fait...

01 :04 :03 → 01 :04 :06 Simplement, là, c'est encore plus fort.

01 :04 :11 → 01 :04 :14 Alors, extrait F.

01 :04 :14 → 01 :04 :17 Lettre de Du Verdus à Mersenne

01 :04 :18 → 01 :04 :21 fin juillet 1644

01 :04 :21 → 01 :04 :24 contenant la réponse de Torricelli à Ricci

01 :04 :24 → 01 :04 :27 datant du 28 juin 1644.

01 :04 :27 → 01 :04 :30 Donc en fait, on retrouve

01 :04 :30 → 01 :04 :33 dans cette lettre de François Du Verdus

01 :04 :33 → 01 :04 :36 qui est un savant toujours...

01 :04 :36 → 01 :04 :39 C'est toujours à Rome, mais cette fois-ci c'est un savant français.

01 :04 :39 → 01 :04 :42 On retrouve la réponse de Torricelli dans cette lettre.

01 :04 :42 → 01 :04 :45 Il a recopié la réponse de Torricelli.

01 :04 :48 → 01 :04 :51 C'est la réponse ou la lettre ? Parce que...

01 :04 :51 → 01 :04 :54 Dans la lettre, il y a la réponse de Torricelli.

01 :04 :54 → 01 :04 :57 C'est Ricci qui a répondu à Torricelli.

01 :05 :00 → 01 :05 :03 La réponse à la lettre où il y avait les deux arguments...

01 :05 :03 → 01 :05 :06 Mais ça, c'est Ricci qui a répondu à Torricelli.

01 :05 :06 → 01 :05 :09 Ricci dit à Torricelli ces deux arguments.

01 :05 :09 → 01 :05 :12 Torricelli répond à Ricci.

01 :05 :12 → 01 :05 :15 Là, c'est Torricelli qui répond à Ricci.

01 :05 :16 → 01 :05 :19 Là, ce que vous lisez, c'est la lettre de Torricelli à Ricci

01 :05 :19 → 01 :05 :22 en réponse à celle que je viens de lire.

01 :05 :22 → 01 :05 :25 Simplement, elle se trouve dans une autre lettre.

01 :05 :25 → 01 :05 :28 Au révérend père Mersenne, religieux et minime

01 :05 :28 → 01 :05 :31 de la place royale,

01 :05 :31 → 01 :05 :34 extrait d'une lettre du sieur Torricelli.

01 :05 :34 → 01 :05 :37 Je tiens pour superflu de répondre à vos objections.

01 :05 :37 → 01 :05 :40 Parce que j'espère que les solutions vous seront apparues

01 :05 :40 → 01 :05 :43 depuis l'écriture de la lettre. [rires]
 01 :05 :46 → 01 :05 :49 Quant à la première, je réponds que si votre seigneurie suppose
 01 :05 :49 → 01 :05 :52 que le couvercle prend encore de l'air à l'intérieur,
 01 :05 :52 → 01 :05 :55 je demande si votre seigneurie veut que cet air
 01 :05 :55 → 01 :05 :58 renfermé à l'intérieur possède le même degré de condensation
 01 :05 :58 → 01 :06 :01 que l'air extérieur.
 01 :06 :01 → 01 :06 :04 Et en ce cas, le vif-argent se maintiendra comme auparavant.
 01 :06 :04 → 01 :06 :07 Par l'exemple que je donnerai maintenant,
 01 :06 :07 → 01 :06 :10 avec de la laine.
 01 :06 :10 → 01 :06 :13 Mais si l'air que le couvercle prend encore de l'air à l'intérieur
 01 :06 :13 → 01 :06 :16 avec de la laine, mais si l'air que votre seigneurie suppose
 01 :06 :16 → 01 :06 :19 est plus raréfié qu'à l'extérieur,
 01 :06 :19 → 01 :06 :22 aussitôt le vif-argent soulevé descendra un peu.
 01 :06 :25 → 01 :06 :28 Oui ça se tient
 01 :06 :28 → 01 :06 :31 Le vase ABCD est un cylindre plein de laine
 01 :06 :31 → 01 :06 :34 ou de toute autre matière compressible, disons de laine.
 01 :06 :34 → 01 :06 :37 Et ce vase possède deux fonds,
 01 :06 :37 → 01 :06 :40 BC stable
 01 :06 :40 → 01 :06 :43 et AB mobile et s'adaptant.
 01 :06 :43 → 01 :06 :46 Et, soit AD chargé sur le dessus
 01 :06 :46 → 01 :06 :49 du plomb,
 01 :06 :49 → 01 :06 :52 E qui pèse 10 millions de livres. [rires]
 01 :06 :52 → 01 :06 :55 Maintenant, si nous enfonçons de force
 01 :06 :55 → 01 :06 :58 un plan coupant FG
 01 :06 :58 → 01 :07 :01 qui puisse entrer et couper la laine comprimée,
 01 :07 :01 → 01 :07 :04 je dis que si la laine
 01 :07 :04 → 01 :07 :07 FBCG est comprimée comme précédemment,
 01 :07 :07 → 01 :07 :10 quoique le fond BC ne sente plus rien du poids imposé
 01 :07 :10 → 01 :07 :13 par le plomb E, de toute façon il supportera le même poids
 01 :07 :13 → 01 :07 :16 qu'il supportait auparavant.
 01 :07 :16 → 01 :07 :19 J'assure votre seigneurie que je ne serai pas plus long à
 l'ennuyer.
 01 :07 :19 → 01 :07 :22 Donc, il répond quand même à la première objection,
 01 :07 :22 → 01 :07 :25 pas celle du piston mais celle du couvercle,
 01 :07 :25 → 01 :07 :28 avec cette histoire de laine.
 01 :07 :28 → 01 :07 :31 Il dit, vous voyez, on prend un poids,
 01 :07 :31 → 01 :07 :34 on écrase de la laine avec ce poids
 01 :07 :34 → 01 :07 :37 et puis la laine se tasse,
 01 :07 :37 → 01 :07 :40 elle se condense.
 01 :07 :40 → 01 :07 :43 En fait, si à ce moment-là on met au milieu de la laine

01 :07 :43 → 01 :07 :46 un plan qui est fixe, ça ne bougera pas

01 :07 :46 → 01 :07 :49 parce que l'état de condensation de la laine sera à peu près le même.

01 :07 :49 → 01 :07 :52 Donc il dit, en gros, que l'air là

01 :07 :52 → 01 :07 :55 il appuie, il doit condenser l'air

01 :07 :55 → 01 :07 :58 qui est ici, et cet air est dans un état de condensation

01 :07 :58 → 01 :08 :01 tel qu'une fois que c'est fait, vous pouvez intercaler

01 :08 :01 → 01 :08 :04 un couvercle, bah ça retient

01 :08 :04 → 01 :08 :07 de la même façon en dessous.

01 :08 :07 → 01 :08 :10 Vous voyez ce que je veux dire ? C'est dans le même état de...

01 :08 :10 → 01 :08 :13 Juste 10 millions de livres,

01 :08 :13 → 01 :08 :16 ce n'est pas 10 millions de livres, c'est d'autres livres, j'espère ?

01 :08 :16 → 01 :08 :19 Oui, ce ne sont plus nos livres

01 :08 :19 → 01 :08 :22 à 500 grammes.

01 :08 :22 → 01 :08 :25 Je ne sais pas d'où est-ce qu'il a autant de plomb.

01 :08 :25 → 01 :08 :28 Non, il ne doit pas dire autant que ça.

01 :08 :29 → 01 :08 :32 Non, ce n'est pas les livres..

01 :08 :40 → 01 :08 :43 Non, c'est plutôt dans le sens

01 :08 :43 → 01 :08 :46 de condenser.

01 :08 :49 → 01 :08 :52 Ce qu'on appelle la matière condensée

01 :08 :52 → 01 :08 :55 en physique, en fait, c'est la matière solide

01 :08 :55 → 01 :08 :58 ou la matière liquide, c'est des états

01 :08 :58 → 01 :09 :01 qui sont plus condensés que le gaz.

01 :09 :01 → 01 :09 :04 Il y a un lien, évidemment.

01 :09 :04 → 01 :09 :07 La condensation de l'air, c'est que vous le faites

01 :09 :07 → 01 :09 :10 passer dans une phase qui est plus condensée

01 :09 :10 → 01 :09 :13 que dans la phase gazeuse, en fait.

01 :09 :13 → 01 :09 :16 Ce n'est pas absolument,

01 :09 :16 → 01 :09 :19 ce n'est pas un sens complètement opposé.

01 :09 :19 → 01 :09 :22 A cette époque là ils utilisaient déjà aussi le terme condensation

01 :09 :22 → 01 :09 :25 pour justement changer d'état ou ?

01 :09 :25 → 01 :09 :28 Alors ça, là, vous me posez une colle.

01 :09 :28 → 01 :09 :31 Je peux regarder.

01 :09 :36 → 01 :09 :39 En tout cas, ce qu'il veut dire là,

01 :09 :39 → 01 :09 :42 c'est de l'air condensé

01 :09 :42 → 01 :09 :45 comme on dirait compressé

01 :09 :45 → 01 :09 :48 ou comprimé.

01 :09 :48 → 01 :09 :51 Ça va ?

01 :09 :52 → 01 :09 :55 Alors, suite de l'affaire.

01 :09 :55 → 01 :09 :58 On est fini avec Torricelli.

01 :09 :58 → 01 :10 :01 C'est très très mal défini entre
 01 :10 :01 → 01 :10 :04 grandeur intensive et grandeur extensive.
 01 :10 :04 → 01 :10 :07 À l'époque, ça passe de l'un à l'autre.
 01 :10 :07 → 01 :10 :10 Parce que vous, vous savez que c'est
 01 :10 :10 → 01 :10 :13 que la pression est plus forte.
 01 :10 :13 → 01 :10 :16 Non, parce qu'en fait, le poids,
 01 :10 :16 → 01 :10 :19 il est plus fort.
 01 :10 :19 → 01 :10 :22 C'est une bonne remarque.
 01 :10 :22 → 01 :10 :25 Il y a cette histoire de poids.
 01 :10 :25 → 01 :10 :28 En fait, effectivement, c'est assez mal
 01 :10 :28 → 01 :10 :31 défini parce que le poids,
 01 :10 :31 → 01 :10 :34 dans cette histoire, ça dépend pas.
 01 :10 :34 → 01 :10 :37 Vous savez bien que ça dépend pas
 01 :10 :37 → 01 :10 :40 de la taille de la surface de la cuve,
 01 :10 :40 → 01 :10 :43 effectivement.
 01 :10 :43 → 01 :10 :46 Donc, quand il dit poids, effectivement,
 01 :10 :46 → 01 :10 :49 on ne sait pas très bien de quel
 01 :10 :49 → 01 :10 :52 poids il parle.
 01 :10 :52 → 01 :10 :55 Vous avez raison.
 01 :10 :55 → 01 :10 :58 C'est une remarque très juste.
 01 :10 :58 → 01 :11 :01 On est d'accord que le poids, c'est bien
 01 :11 :01 → 01 :11 :04 l'attraction vers le sol à cette époque là ?
 01 :11 :04 → 01 :11 :07 Oui, le poids, c'est le même poids
 01 :11 :07 → 01 :11 :10 que maintenant.
 01 :11 :10 → 01 :11 :13 Mais effectivement,
 01 :11 :13 → 01 :11 :16 on appuie sur quelque chose.
 01 :11 :19 → 01 :11 :22 Oui, la pesanteur.
 01 :11 :22 → 01 :11 :25 Mais c'est la même chose.
 01 :11 :25 → 01 :11 :28 C'est la même idée de poids, en fait.
 01 :11 :28 → 01 :11 :31 Oui, vous avez raison.
 01 :11 :31 → 01 :11 :34 Il y a un petit problème de définition
 01 :11 :34 → 01 :11 :37 de ce que c'est maintenant.
 01 :11 :37 → 01 :11 :40 On ne le voit pas très explicitement
 01 :11 :40 → 01 :11 :43 alors même que ça rentre un peu
 01 :11 :43 → 01 :11 :46 en ligne de compte, parce que dans
 01 :11 :46 → 01 :11 :49 cette histoire-là, il y avait ça.
 01 :11 :52 → 01 :11 :55 On continue ?
 01 :11 :58 → 01 :12 :01 Donc, extrait G, lettre de Pascal.
 01 :12 :01 → 01 :12 :04 Pascal, c'est notre Blaise Pascal
 01 :12 :04 → 01 :12 :07 Auvergnat favori.

01 :12 :07 → 01 :12 :10 Savant français résident à Rouen
01 :12 :10 → 01 :12 :13 au moment des...
01 :12 :13 → 01 :12 :16 Non, il n'est pas Auvergnat.
01 :12 :16 → 01 :12 :19 Il fait expérience du Puy de Dôme.
01 :12 :19 → 01 :12 :22 Je dis des grosses bêtises.
01 :12 :22 → 01 :12 :25 Non, non, il n'est pas du tout Auvergnat.
01 :12 :25 → 01 :12 :28 Et il n'a pas vécu neuf ans.
01 :12 :28 → 01 :12 :31 Je vois que vous avez vraiment l'œil.
01 :12 :31 → 01 :12 :34 Je vais le noter tout de suite.
01 :12 :37 → 01 :12 :40 Il y a un problème dans les dates.
01 :12 :40 → 01 :12 :43 Je veux bien que vous cherchiez...
01 :12 :43 → 01 :12 :46 Je veux bien que vous cherchiez où est-ce qu'il est né.
01 :12 :46 → 01 :12 :49 1662.
01 :12 :49 → 01 :12 :52 1662, c'est sa mort.
01 :12 :52 → 01 :12 :55 Et il est né où à Paris ?
01 :12 :55 → 01 :12 :58 Il est né à Clermont.
01 :12 :59 → 01 :13 :02 Il me semblait bien qu'il y avait un lycée Pascal à Clermont.
01 :13 :02 → 01 :13 :05 Savant français résident à Rouen
01 :13 :05 → 01 :13 :08 au moment des événements relatés ici.
01 :13 :08 → 01 :13 :11 Et Florent Périer, c'est son beau-frère
01 :13 :11 → 01 :13 :14 qui habite à Clermont-Ferrand.
01 :13 :19 → 01 :13 :22 Et donc la lettre date de 1647
01 :13 :22 → 01 :13 :25 ce qui est du coup possible.
01 :13 :25 → 01 :13 :28 Monsieur.
01 :13 :28 → 01 :13 :31 Je n'interromprai pas le travail continu
01 :13 :31 → 01 :13 :34 où vos emplois vous engagent
01 :13 :34 → 01 :13 :37 pour vous entretenir de méditation physique
01 :13 :37 → 01 :13 :40 si je ne savais que vous en aurez du divertissement.
01 :13 :40 → 01 :13 :43 Comme moi en ce moment avec vous.
01 :13 :43 → 01 :13 :46 Je pense que vous en avez du divertissement.
01 :13 :46 → 01 :13 :49 Parce que tous les effets de cette dernière expérience
01 :13 :49 → 01 :13 :52 des deux tuyaux, donc l'expérience des deux tuyaux
01 :13 :52 → 01 :13 :55 et l'expérience de Torricelli
01 :13 :55 → 01 :13 :58 dont Pascal a eu connaissance
01 :13 :58 → 01 :14 :01 par intermédiaires successifs.
01 :14 :01 → 01 :14 :04 Parce que tous les effets de cette dernière expérience
01 :14 :04 → 01 :14 :07 des deux tuyaux peuvent encore être expliqués
01 :14 :07 → 01 :14 :10 assez probablement par l'horreur du vide
01 :14 :10 → 01 :14 :13 je me tiens dans cette ancienne maxime
01 :14 :13 → 01 :14 :16 résolue néanmoins de chercher l'éclaircissement

01 :14 :16 → 01 :14 :19 entier de cette difficulté par une expérience décisive.
 01 :14 :19 → 01 :14 :22 J'en ai imaginé une qui pourra seule suffire
 01 :14 :22 → 01 :14 :25 pour nous donner la lumière que nous cherchons.
 01 :14 :25 → 01 :14 :28 C'est de faire l'expérience ordinaire du vide
 01 :14 :28 → 01 :14 :31 plusieurs fois en même jour
 01 :14 :31 → 01 :14 :34 dans un même tuyau avec le même vif-argent
 01 :14 :34 → 01 :14 :37 tantôt au bas, tantôt au sommet d'une montagne élevée
 01 :14 :37 → 01 :14 :40 pour le moins de 5 ou 6 cent toises
 01 :14 :40 → 01 :14 :43 c'est-à-dire environ 1000 mètres.
 01 :14 :43 → 01 :14 :46 Mais comme la difficulté se trouve d'ordinaire
 01 :14 :46 → 01 :14 :49 jointe aux grandes choses
 01 :14 :49 → 01 :14 :52 j'en vois beaucoup dans l'exécution de ce dessin
 01 :14 :52 → 01 :14 :55 puisqu'il faut pour cela choisir une montagne
 01 :14 :55 → 01 :14 :58 excessivement haute, proche d'une ville
 01 :14 :58 → 01 :15 :01 dans laquelle se trouve une personne capable
 01 :15 :01 → 01 :15 :04 d'apporter à cette épreuve toute l'exactitude nécessaire
 01 :15 :04 → 01 :15 :07 donc pas chez des ploucs de la campagne.
 01 :15 :07 → 01 :15 :10 J'ai beaucoup estimé mon bonheur d'avoir rencontré
 01 :15 :10 → 01 :15 :13 l'un et l'autre puisque notre ville de Clermont
 01 :15 :14 → 01 :15 :17 et que j'espère de votre bonté que vous m'accorderez la grâce
 01 :15 :17 → 01 :15 :20 d'y vouloir faire vous-même cette expérience.
 01 :15 :20 → 01 :15 :23 Je vous prie seulement que ce soit le plus tôt possible
 01 :15 :23 → 01 :15 :26 qu'il vous sera possible, votre très humble et très obéissant
 01 :15 :26 → 01 :15 :29 serviteur Pascal.
 01 :15 :32 → 01 :15 :35 Expérience décisive selon Pascal
 01 :15 :35 → 01 :15 :38 si on veut savoir si c'est le vide qui retient le truc
 01 :15 :38 → 01 :15 :41 ou si c'est l'air qui pousse, il y a un bon moyen
 01 :15 :41 → 01 :15 :44 si on est en bas ou en haut d'une montagne
 01 :15 :44 → 01 :15 :47 il y a moins d'air qui pousse
 01 :15 :47 → 01 :15 :50 donc ça devrait être un peu moins haut.
 01 :15 :52 → 01 :15 :55 J'ai une question.
 01 :15 :55 → 01 :15 :58 Il suppose que la pression atmosphérique
 01 :15 :58 → 01 :16 :01 n'est pas la même quand on est en altitude
 01 :16 :01 → 01 :16 :04 et ça ils le savent mais d'où ils le sortent ?
 01 :16 :04 → 01 :16 :07 parce que visiblement il n'ont pas encore inventé le baromètre.
 01 :16 :07 → 01 :16 :10 En fait c'est juste qu'il y a moins d'air au-dessus.
 01 :16 :10 → 01 :16 :13 Il y a moins d'atmosphère.
 01 :16 :16 → 01 :16 :19 ça découle de Torricelli.
 01 :16 :19 → 01 :16 :22 Vous allez me dire si on pense qu'il y en a 800 km
 01 :16 :22 → 01 :16 :25 1 km

- 01 :16 :25 → 01 :16 :28 C'est pour ça qu'il dit qu'il faut le refaire plein de fois
- 01 :16 :28 → 01 :16 :31 il a raison en plus
- 01 :16 :31 → 01 :16 :34 en fonction de la température
- 01 :16 :35 → 01 :16 :38 Bon et en plus effectivement
- 01 :16 :38 → 01 :16 :41 ce qu'ils ne savent pas c'est que
- 01 :16 :41 → 01 :16 :44 la densité n'est pas constante
- 01 :16 :44 → 01 :16 :47 mais bon, c'est encore autre chose
- 01 :16 :47 → 01 :16 :50 qu'ils ne le savent pas je ne sais pas
- 01 :16 :54 → 01 :16 :57 Extrait H
- 01 :16 :57 → 01 :17 :00 Réponse de Périer à Pascal
- 01 :17 :00 → 01 :17 :03 le 22 septembre 1648
- 01 :17 :04 → 01 :17 :07 Monsieur
- 01 :17 :07 → 01 :17 :10 c'est une lettre extrêmement célèbre
- 01 :17 :10 → 01 :17 :13 enfin j'ai fait l'expérience que vous avez si longtemps souhaité
- 01 :17 :13 → 01 :17 :16 alors juste pour voir
- 01 :17 :16 → 01 :17 :19 15 novembre
- 01 :17 :19 → 01 :17 :22 ça fait presque un an
- 01 :17 :22 → 01 :17 :25 c'est compliqué
- 01 :17 :25 → 01 :17 :28 parce qu'apparemment il a un travail Périer
- 01 :17 :28 → 01 :17 :31 il fait quoi dans la vie ?
- 01 :17 :32 → 01 :17 :35 Monsieur
- 01 :17 :35 → 01 :17 :38 enfin j'ai fait l'expérience que vous avez si longtemps souhaité
- 01 :17 :38 → 01 :17 :41 je vous aurais plutôt donné cette satisfaction
- 01 :17 :41 → 01 :17 :44 mais je n'ai pu joindre ma commodité avec celle de la saison
- 01 :17 :44 → 01 :17 :47 avant le 19 de ce mois
- 01 :17 :47 → 01 :17 :50 je vous en donne ici une ample et fidèle relation
- 01 :17 :50 → 01 :17 :53 où vous verrez la précision et les soins que j'y ai apportés
- 01 :17 :53 → 01 :17 :56 auxquels j'ai estimé à propos de joindre encore
- 01 :17 :56 → 01 :17 :59 la présence de personnes aussi savantes qu'irréprochables
- 01 :17 :59 → 01 :18 :02 je vous en donne ici une ample et fidèle relation
- 01 :18 :02 → 01 :18 :05 où vous verrez la précision et les soins que j'ai apportés
- 01 :18 :05 → 01 :18 :08 auxquels j'ai estimé à propos de joindre encore
- 01 :18 :08 → 01 :18 :11 la présence de personnes aussi savantes qu'irréprochables
- 01 :18 :20 → 01 :18 :23 il l'a fait devant huissiers cette expérience
- 01 :18 :23 → 01 :18 :26 nous fumes donc à huit heures...
- 01 :18 :26 → 01 :18 :29 premièrement nous fîmes l'expérience ordinaire et il se trouva
que le mercure se trouvait
- 01 :18 :29 → 01 :18 :32 à 26 pouces, 3 lignes et demi
- 01 :18 :32 → 01 :18 :35 71,2 cm
- 01 :18 :35 → 01 :18 :38 cela fait, je fus avec tous ces messieurs

01 :18 :38 → 01 :18 :41 faire les mêmes expériences au haut du puits de dôme

01 :18 :41 → 01 :18 :44 élevé au-dessus des minimales environ de 500 toises

01 :18 :44 → 01 :18 :47 donc 975 mètres

01 :18 :47 → 01 :18 :50 où il se trouva qu'il ne resta plus dans le tuyau

01 :18 :50 → 01 :18 :53 que la hauteur de 23 pouces, 2 lignes

01 :18 :53 → 01 :18 :56 72,7 cm

01 :18 :56 → 01 :18 :59 de vif argent

01 :18 :59 → 01 :19 :02 ce qui nous ravit tous d'admiration et d'étonnement

01 :19 :02 → 01 :19 :05 et nous surpris de telle sorte que pour notre satisfaction propre

01 :19 :05 → 01 :19 :08 nous voulûmes la répéter

01 :19 :08 → 01 :19 :11 c'est pourquoi je l'a fis encore 5 autres fois très exactement

01 :19 :11 → 01 :19 :14 en divers endroits du sommet de la montagne

01 :19 :14 → 01 :19 :17 tantôt à couvert dans la petite chapelle qui y est

01 :19 :17 → 01 :19 :20 tantôt à découvert il y a toujours cette idée du couvercle est-ce que ça change

01 :19 :21 → 01 :19 :24 il s'est toujours trouvé la même hauteur de vif argent

01 :19 :24 → 01 :19 :27 de 23 pouces, 2 lignes

01 :19 :27 → 01 :19 :30 après, en descendant la montagne

01 :19 :30 → 01 :19 :33 je refis en chemin la même expérience en un lieu appelé

01 :19 :33 → 01 :19 :36 la fond de l'arbre, beaucoup au-dessus des minimales

01 :19 :36 → 01 :19 :39 mais beaucoup plus au-dessous du sommet de la montagne

01 :19 :39 → 01 :19 :42 et là, je trouvais que la hauteur de vif argent restée dans le tuyau

01 :19 :42 → 01 :19 :45 était de 25 pouces

01 :19 :45 → 01 :19 :48 donc vous voyez une hauteur intermédiaire, 67,7 cm qui est ni 71 ni...

01 :19 :49 → 01 :19 :52 voilà au vrai tout ce qui s'est passé dans cette expérience

01 :19 :52 → 01 :19 :55 si vous trouvez quelques obscurités dans ce récit

01 :19 :55 → 01 :19 :58 je pourrais vous en éclaircir de vive voix dans peu de jours

01 :19 :58 → 01 :20 :01 étant sur le point de faire un petit voyage à Paris

01 :20 :01 → 01 :20 :04 où je vous assurerai que je suis monsieur

01 :20 :04 → 01 :20 :07 votre très humble et très affectionné serviteur, Périer

01 :20 :10 → 01 :20 :13 voilà donc l'expérience que Pascal projette

01 :20 :13 → 01 :20 :16 Périer la réalise

01 :20 :17 → 01 :20 :20 et ça semble fonctionner

01 :20 :20 → 01 :20 :23 c'est à dire que ça semble être quand même lié

01 :20 :23 → 01 :20 :26 à la quantité d'air qu'il y a au-dessus

01 :20 :44 → 01 :20 :47 là on ressaut à nouveau

01 :20 :47 → 01 :20 :50 ailleurs en tout cas

01 :20 :50 → 01 :20 :53 dans les lieux

01 :20 :53 → 01 :20 :56 puisque vous avez comme dernier extrait

01 :20 :56 → 01 :20 :59 une lettre de Boyle

01 :20 :59 → 01 :21 :02 donc Boyle, savant irlandais résident à Oxford

01 :21 :02 → 01 :21 :05 à son neveu, Vicomte de Dungarvan

01 :21 :05 → 01 :21 :08 le 20 décembre 1659

01 :21 :13 → 01 :21 :16 mon cher Vicomte

01 :21 :16 → 01 :21 :19 ayant perçu par lettres de la part d'autres ingénieuses personnes
de Paris

01 :21 :19 → 01 :21 :22 que plusieurs de cette virtuosité

01 :21 :23 → 01 :21 :26 avait l'intention d'examiner l'intérêt porté à l'air

01 :21 :26 → 01 :21 :29 dans la célèbre expérience concernant le vide

01 :21 :29 → 01 :21 :32 j'ai pensé que je ne pouvais me plier

01 :21 :32 → 01 :21 :35 à vos désirs de façon plus appropriée et opportune

01 :21 :35 → 01 :21 :38 qu'en poursuivant et en tentant de promouvoir

01 :21 :38 → 01 :21 :41 cette noble expérience de Torricelli

01 :21 :41 → 01 :21 :44 j'ai demandé

01 :21 :44 → 01 :21 :47 à monsieur G. ainsi qu'à Hook

01 :21 :47 → 01 :21 :50 de fabriquer une pompe à air

01 :21 :50 → 01 :21 :53 pour donner à votre seigneurie dans un premier temps

01 :21 :53 → 01 :21 :56 une idée des deux principales parties

01 :21 :56 → 01 :21 :59 un réceptacle de verre et une pompe pour en extraire l'air

01 :21 :59 → 01 :22 :02 de l'expérience du vide

01 :22 :02 → 01 :22 :05 le vif-argent dans le tube a l'habitude de rester élevé

01 :22 :05 → 01 :22 :08 au-dessus de la surface au-dessus de laquelle il s'appuie

01 :22 :08 → 01 :22 :11 à environ 27 doigts, c'est-à-dire 54 cm

01 :22 :11 → 01 :22 :14 j'ai pensé que si l'expérience pouvait être tentée

01 :22 :14 → 01 :22 :17 en dehors de l'atmosphère

01 :22 :17 → 01 :22 :20 tout retomberait au niveau de celui dans la cuve

01 :22 :20 → 01 :22 :23 donc vous voyez

01 :22 :23 → 01 :22 :26 pour marquer un coup un peu définitif

01 :22 :26 → 01 :22 :29 pour être sûr que c'est bien l'air ici qui appuie

01 :22 :29 → 01 :22 :32 et qui retient le vif-argent de tomber

01 :22 :32 → 01 :22 :35 bah il suffit de faire le vide ici [montre au tableau]

01 :22 :35 → 01 :22 :38 il n'y a plus d'air

01 :22 :38 → 01 :22 :41 donc à ce moment-là tout devrait s'égaliser

01 :22 :41 → 01 :22 :44 Quand vous dites ici, c'est où ici ?

01 :22 :44 → 01 :22 :47 là, au-dessus, ici soit vous mettez tout ça dans une grande
cuve

01 :22 :47 → 01 :22 :50 si je me souviens bien

01 :22 :50 → 01 :22 :53 en fait il fait un truc comme ça, c'est coupé comme ça

01 :22 :53 → 01 :22 :56 et là il pompe

01 :22 :56 → 01 :22 :59 mais c'est bien hermétiquement fermé

01 :22 :59 → 01 :23 :02 ici il faut mettre du vide

01 :23 :09 → 01 :23 :12 j'ai pensé que l'expérience pouvait être tentée en dehors de l'atmosphère

01 :23 :12 → 01 :23 :15 et le vif-argent dans le tube retomberait au niveau de celui dans la cuve

01 :23 :15 → 01 :23 :18 ainsi l'expérience fut réalisée

01 :23 :18 → 01 :23 :21 le tube étant bouché par un doigt et renversé

01 :23 :21 → 01 :23 :24 fut ouvert, comme dans l'expérience, à l'intérieur de la cuve

01 :23 :24 → 01 :23 :27 donc cette fois-ci ils font tout ça

01 :23 :27 → 01 :23 :30 ils font toute l'expérience classique mais à l'intérieur de la cuve

01 :23 :30 → 01 :23 :33 tout est dans une cuve

01 :23 :33 → 01 :23 :36 la cuve et le tube

01 :23 :36 → 01 :23 :39 furent précautionneusement insérés dans le réceptacle

01 :23 :39 → 01 :23 :42 au moyen de ficelles

01 :23 :42 → 01 :23 :45 et le couvercle fut glissé et soigneusement fermé

01 :23 :45 → 01 :23 :48 à la suite de cette fermeture, il semblerait

01 :23 :48 → 01 :23 :51 qu'il n'y ait pas eu de changement dans la hauteur du cylindre de vif-argent

01 :23 :51 → 01 :23 :54 qui apparaît élevé au-dessus de la surface

01 :23 :54 → 01 :23 :57 plutôt en vertu de son ressort que de son poids

01 :23 :57 → 01 :24 :00 c'est la même histoire du couvercle

01 :24 :01 → 01 :24 :04 on met tout dans une cuve

01 :24 :04 → 01 :24 :07 l'air n'appuie plus

01 :24 :07 → 01 :24 :10 lui dit que c'est parce qu'il y a le ressort de l'air

01 :24 :10 → 01 :24 :13 toute chose étant.. mais c'est insupportable ces gosses !

01 :24 :13 → 01 :24 :16 C'est enregistré hein !

01 :24 :25 → 01 :24 :28 ça c'est le problème, c'est qu'on oublie au bout d'un moment

01 :24 :29 → 01 :24 :32 toute chose étant ainsi prête

01 :24 :32 → 01 :24 :35 l'aspiration fut déclenchée

01 :24 :35 → 01 :24 :38 et immédiatement après l'évacuation d'un cylindre d'air

01 :24 :38 → 01 :24 :41 en dehors du réceptacle

01 :24 :41 → 01 :24 :44 le vif-argent dans le tube s'affaissa conformément aux attentes

01 :24 :44 → 01 :24 :47 nous tournons maintenant la clé et laissons rentrer de l'air

01 :24 :47 → 01 :24 :50 sur ce, le vif-argent commence immédiatement à monter

01 :24 :50 → 01 :24 :53 ou plutôt à être poussé vers le haut dans le tube

01 :24 :53 → 01 :24 :56 l'expérience fut répétée plusieurs jours après

01 :24 :56 → 01 :24 :59 en présence de ces excellents professeurs de mathématiques

01 :24 :59 → 01 :25 :02 célèbres à juste titre
 01 :25 :02 → 01 :25 :05 le docteur Wallis, le docteur Ward et le monsieur Wren
 01 :25 :05 → 01 :25 :08 qui furent ravis d'honorer l'expérience de leur présence
 01 :25 :08 → 01 :25 :11 et que je nomme fièrement comme témoins avertis et illustres
 01 :25 :11 → 01 :25 :14 de notre expérience
 01 :25 :14 → 01 :25 :17 sa seigneurie, très obligée sans serviteur et très affectueux

oncle

01 :25 :17 → 01 :25 :20 Robert Boyle
 01 :25 :20 → 01 :25 :23 il a fait l'expérience
 01 :25 :23 → 01 :25 :26 alors, quand on met dans la cuve complète
 01 :25 :26 → 01 :25 :29 ça ne change rien
 01 :25 :29 → 01 :25 :32 il a l'air d'être un peu ennuyé de ça
 01 :25 :32 → 01 :25 :35 on aspire, les deux niveaux s'égalisent
 01 :25 :35 → 01 :25 :38 on remet de l'air
 01 :25 :38 → 01 :25 :41 on rouvre, on remet de l'air, pouf ça remonte
 01 :25 :41 → 01 :25 :44 on aspire, ça retombe, on remet de l'air
 01 :25 :44 → 01 :25 :47 voilà, donc ça, ça les convainc
 01 :25 :47 → 01 :25 :50 définitivement que c'est bien l'air qui appuie
 01 :25 :50 → 01 :25 :53 j'ai une question sur les travaux
 01 :25 :53 → 01 :25 :56 que les différents savants faisaient dans leurs pays
 01 :25 :56 → 01 :25 :59 c'était toujours très public ?
 01 :25 :59 → 01 :26 :02 est-ce que c'était souvent publié ?
 01 :26 :02 → 01 :26 :05 où il y avait beaucoup de communication dans le pays
 01 :26 :05 → 01 :26 :08 ou alors, il y avait beaucoup de choses cachées
 01 :26 :08 → 01 :26 :11 et finalement, quelqu'un peut travailler dans son coin
 01 :26 :11 → 01 :26 :14 quelqu'un aussi, et puis on se rend compte peut-être parfois... ?
 01 :26 :14 → 01 :26 :17 alors, ça arrive
 01 :26 :17 → 01 :26 :20 en fait, c'est public
 01 :26 :20 → 01 :26 :23 ça arrive que des gens ne connaissent pas
 01 :26 :23 → 01 :26 :26 mais ça arrive encore aujourd'hui
 01 :26 :26 → 01 :26 :29 que des gens, tout d'un coup, refassent une expérience qui a

déjà été faite

01 :26 :29 → 01 :26 :32 simplement parce qu'il y a tellement de littérature scientifique
 01 :26 :32 → 01 :26 :35 mais même à l'époque
 01 :26 :35 → 01 :26 :38 il y a des choses un peu étonnantes
 01 :26 :38 → 01 :26 :41 de Galilée
 01 :26 :41 → 01 :26 :44 qui pourtant à qui euh...
 01 :26 :45 → 01 :26 :48 pour lesquels les travaux de Kepler auraient dû être connus
 01 :26 :48 → 01 :26 :51 parce qu'il a reçu de la correspondance
 01 :26 :51 → 01 :26 :54 et en fait, soit il n'en tient pas compte

01 :26 :54 → 01 :26 :57 soit il n'a pas lu
 01 :26 :57 → 01 :27 :00 donc oui, ça arrive que des choses connues
 01 :27 :00 → 01 :27 :03 n'aient pas diffusé suffisamment
 01 :27 :03 → 01 :27 :06 mais là, vous voyez quand même que ça circule bien
 01 :27 :06 → 01 :27 :09 entre l'Italie, la France
 01 :27 :09 → 01 :27 :12 il y a une sorte de publication
 01 :27 :12 → 01 :27 :15 où ils peuvent plus ou moins se renseigner sur ce qui a été fait
 01 :27 :15 → 01 :27 :18 parce que souvent, si c'est des savants
 01 :27 :18 → 01 :27 :21 qui ont décidé de traverser la Manche ou de descendre en

Italie

01 :27 :21 → 01 :27 :24 pour aller voir quelqu'un
 01 :27 :24 → 01 :27 :27 je crois que c'est dans les grandes villes
 01 :27 :27 → 01 :27 :30 il y a des cercles
 01 :27 :30 → 01 :27 :33 oui, c'est ça, c'est les réseaux sociaux de l'époque
 01 :27 :33 → 01 :27 :36 vous voyez que là, c'est parce que Mersenne est revenue de

Rome

01 :27 :36 → 01 :27 :39 à Paris, qui discute avec Pascal
 01 :27 :39 → 01 :27 :42 c'est moins formel
 01 :27 :42 → 01 :27 :45 il n'y a pas la conférence internationale
 01 :27 :45 → 01 :27 :48 mais ça circule pas mal en fait
 01 :27 :48 → 01 :27 :51 il y a des ouvrages, il y a des lettres
 01 :27 :51 → 01 :27 :54 il y a des ouvrages publiés
 01 :27 :54 → 01 :27 :57 Pascal, des expériences sur le vide
 01 :27 :57 → 01 :28 :00 il y a un ouvrage public, il est comme ça
 01 :28 :00 → 01 :28 :03 certes en français, mais à l'époque
 01 :28 :03 → 01 :28 :06 on faisait ça
 01 :28 :06 → 01 :28 :09 et effectivement, il y a pas mal de lettres
 01 :28 :09 → 01 :28 :12 de correspondance entre ceux qui se connaissent
 01 :28 :12 → 01 :28 :15 comme ça se fait aussi encore aujourd'hui
 01 :28 :15 → 01 :28 :18 c'est-à-dire que quand on lit un truc
 01 :28 :18 → 01 :28 :21 et que soi-même on a fait une expérience
 01 :28 :21 → 01 :28 :24 qui semble contraire
 01 :28 :24 → 01 :28 :27 on écrit en général
 01 :28 :27 → 01 :28 :30 à la personne en question
 01 :28 :30 → 01 :28 :33 on échange directement
 01 :28 :33 → 01 :28 :36 Boyle, ça se trouve
 01 :28 :36 → 01 :28 :39 là c'est une lettre mais on trouve ses ouvrages
 01 :28 :39 → 01 :28 :42 mais on trouve ses ouvrages, Pascal
 01 :28 :42 → 01 :28 :45 on les trouve aussi
 01 :28 :45 → 01 :28 :48 il y en a qui sont un peu moins connus

- 01 :28 :48 → 01 :28 :51 Torricelli c'est connu, mais bon
- 01 :28 :51 → 01 :28 :54 Ricci, Maggiotti sont un peu moins connus aujourd'hui
- 01 :28 :54 → 01 :28 :57 c'est des maillons
- 01 :28 :57 → 01 :29 :00 importants
- 01 :29 :04 → 01 :29 :07 Voilà, vous avez...
- 01 :29 :07 → 01 :29 :10 n'hésitez pas si vous avez d'autres questions sur ce...
- 01 :29 :10 → 01 :29 :13 Est-ce qu'on a des nouvelles de Ricci après sa déconvenue ?
- 01 :29 :13 → 01 :29 :16 Oui, parce qu'il s'est fait démonter là
- 01 :29 :16 → 01 :29 :19 Ben non, mais
- 01 :29 :19 → 01 :29 :22 son autre
- 01 :29 :22 → 01 :29 :25 son autre remarque sur la
- 01 :29 :25 → 01 :29 :28 sur la seringue, il n'y a pas répondu
- 01 :29 :28 → 01 :29 :31 je crois qu'il n'y a pas de...
- 01 :29 :31 → 01 :29 :34 peut-être, mais je crois qu'il n'y a pas de réponse à cette...
- 01 :29 :34 → 01 :29 :37 en tout cas à cette époque, à cet argument qu'il y en a pas
- 01 :29 :42 → 01 :29 :45 si ce n'est cet argument
- 01 :29 :45 → 01 :29 :48 de la laine
- 01 :29 :48 → 01 :29 :51 C'est ça, l'argument sur l'état de compression de l'air
- 01 :29 :51 → 01 :29 :54 parce qu'il y aurait un poids d'air en plus
- 01 :29 :54 → 01 :29 :57 et qu'il garde son état de compression même si on le manipule
- 01 :29 :57 → 01 :30 :00 C'est ça, oui, on pourrait dire
- 01 :30 :00 → 01 :30 :03 Peut-être que pour Torricelli, je ne sais pas là, j'interprète
- 01 :30 :03 → 01 :30 :06 Peut-être que pour Torricelli, cette histoire de laine
- 01 :30 :06 → 01 :30 :09 ça explique tout, c'est-à-dire qu'elle est dans un état comprimé
- 01 :30 :09 → 01 :30 :12 et elle pousse autant à droite
- 01 :30 :12 → 01 :30 :15 que...
- 01 :30 :15 → 01 :30 :18 tout en haut de la laine ça ne pousse pas trop
- 01 :30 :18 → 01 :30 :21 sur les côtés, en bas ça pousse plus, je ne sais pas
- 01 :30 :21 → 01 :30 :24 Il y a un état
- 01 :30 :24 → 01 :30 :27 pour Torricelli, il y a un état de compression
- 01 :30 :27 → 01 :30 :30 de compression de l'air, enfin de condensation de l'air
- 01 :30 :30 → 01 :30 :33 pour Boyle c'est un ressort de l'air, ils appellent ça comme ça
- 01 :30 :33 → 01 :30 :36 C'est à l'époque les
- 01 :30 :36 → 01 :30 :39 interprétations
- 01 :30 :45 → 01 :30 :48 Voilà, après vous avez la liste
- 01 :30 :48 → 01 :30 :51 des extraits, enfin c'est les références
- 01 :30 :51 → 01 :30 :54 si ça vous intéresse et que vous voulez retrouver
- 01 :30 :54 → 01 :30 :57 D'ailleurs je crois qu'il y a un oubli dans la bibliographie
- 01 :30 :57 → 01 :31 :00 Il y a un oubli, c'est le I
- 01 :31 :00 → 01 :31 :03 Le I c'est le dernier extrait, je crois que c'est la lettre

01 :31 :03 → 01 :31 :06 Ah oui c'est ça, l'extrait
 01 :31 :06 → 01 :31 :09 I c'est Boyle
 01 :31 :09 → 01 :31 :12 Il n'y a pas la lettre
 01 :31 :12 → 01 :31 :15 Du Verdus
 01 :31 :15 → 01 :31 :18 I c'est décalé, G et H
 01 :31 :18 → 01 :31 :21 ça doit être les extraits
 01 :31 :21 → 01 :31 :24 précédents
 01 :31 :24 → 01 :31 :27 Il manque la F
 01 :31 :27 → 01 :31 :30 de la lettre Du Verdus
 01 :31 :30 → 01 :31 :33 Ouais, effectivement
 01 :31 :33 → 01 :31 :36 il manque la F
 01 :31 :36 → 01 :31 :39 Et j'ai une autre question
 01 :31 :39 → 01 :31 :42 à propos du dernier extrait
 01 :31 :42 → 01 :31 :45 quand il parle de la hauteur de 27 doigts
 01 :31 :45 → 01 :31 :48 et que c'est converti en 54 cm
 01 :31 :48 → 01 :31 :51 est-ce que c'est, je ne comprends pas très bien
 01 :31 :51 → 01 :31 :54 c'est un problème de conversion
 01 :31 :54 → 01 :31 :57 c'est-à-dire qu'il y a un problème de conversion
 01 :31 :57 → 01 :32 :00 de la hauteur de 27 doigts
 01 :32 :00 → 01 :32 :03 et que c'est converti en 54 cm
 01 :32 :03 → 01 :32 :06 c'est un problème de conversion
 01 :32 :06 → 01 :32 :09 par rapport aux autres mesures qu'il y avait avant
 01 :32 :09 → 01 :32 :12 c'est vrai qu'il y a un problème
 01 :32 :12 → 01 :32 :15 ça devrait être plutôt 74 cm
 01 :32 :15 → 01 :32 :18 ouais
 01 :32 :18 → 01 :32 :21 là il y a un problème de conversion
 01 :32 :21 → 01 :32 :24 ou alors ils sont vraiment à haute altitude
 01 :32 :28 → 01 :32 :31 c'est l'Angleterre
 01 :32 :32 → 01 :32 :35 c'est pas trop possible quand même
 01 :32 :37 → 01 :32 :40 c'est bizarre
 01 :32 :40 → 01 :32 :43 peut-être qu'il y a une erreur
 01 :32 :43 → 01 :32 :46 dans la manière dont ça a été retranscrit
 01 :32 :46 → 01 :32 :49 c'est possible aussi
 01 :32 :49 → 01 :32 :52 soit c'est une mauvaise valeur du doigt
 01 :32 :52 → 01 :32 :55 parce que j'imagine que des doigts
 01 :32 :55 → 01 :32 :58 il y en a par ville
 01 :32 :59 → 01 :33 :02 ça ne correspond pas exactement à 54 cm
 01 :33 :02 → 01 :33 :05 vous avez raison
 01 :33 :05 → 01 :33 :08 c'est bizarre
 01 :33 :08 → 01 :33 :11 74, j'aurais compris

- 01 :33 :11 → 01 :33 :14 54, c'est quand même pas beaucoup
- 01 :33 :22 → 01 :33 :25 si on prend un doigt qui fait 1 pouce
- 01 :33 :25 → 01 :33 :28 dans la lettre de derrière il dit 26 pouces
- 01 :33 :28 → 01 :33 :31 donc si ça se trouve c'est directement des pouces
- 01 :33 :31 → 01 :33 :34 si ça se trouve c'est des pouces
- 01 :33 :34 → 01 :33 :37 c'est directement la même unité
- 01 :33 :37 → 01 :33 :40 oui vous avez raison
- 01 :33 :40 → 01 :33 :43 Une des difficultés de l'histoire des sciences !
- 01 :33 :51 → 01 :33 :54 absolument
- 01 :33 :54 → 01 :33 :57 il faut trouver les valeurs des différents trucs
- 01 :34 :00 → 01 :34 :03 ça n'a rien d'évident
- 01 :34 :07 → 01 :34 :10 c'est bien du vif-argent
- 01 :34 :11 → 01 :34 :14 il y a peut-être un peu de ...
- 01 :34 :14 → 01 :34 :17 après c'est tellement...
- 01 :34 :22 → 01 :34 :25 oui mais ça ne va pas dans le bon sens
- 01 :34 :25 → 01 :34 :28 s'il est plus léger il aurait une hauteur plus grande
- 01 :34 :28 → 01 :34 :31 il faudrait que ce soit quelque chose de plus dense
- 01 :34 :31 → 01 :34 :34 que le vif-argent
- 01 :34 :34 → 01 :34 :37 de liquide à température ordinaire
- 01 :34 :37 → 01 :34 :40 je ne sais pas ce que ça pourrait être
- 01 :34 :43 → 01 :34 :46 non vous avez raison, il y a un problème
- 01 :34 :49 → 01 :34 :52 il y a la toise de 100 pieds
- 01 :34 :52 → 01 :34 :55 pardon ?
- 01 :34 :55 → 01 :34 :58 dans la lettre de Pascal à Périer et la réponse de Pascal
- 01 :34 :58 → 01 :35 :01 la toise n'est pas la même
- 01 :35 :01 → 01 :35 :04 il dit une montagne de 5 ou 6 toises
- 01 :35 :05 → 01 :35 :08 je suis monté sur cette même montagne, 5 cent toises
- 01 :35 :08 → 01 :35 :11 ah oui c'est 5 ou 6 cent toises
- 01 :35 :11 → 01 :35 :14 il y a un 100 qui manque
- 01 :35 :19 → 01 :35 :22 on va la corriger au fur et à mesure
- 01 :35 :34 → 01 :35 :37 c'est bon ?
- 01 :35 :37 → 01 :35 :40 pas d'autres questions sur le corpus ?
- 01 :35 :43 → 01 :35 :46 vous le conservez bien
- 01 :35 :46 → 01 :35 :49 je vous en prie, vous l'aurez
- 01 :35 :49 → 01 :35 :52 merci
- 01 :35 :52 → 01 :35 :55 merci
- 01 :35 :55 → 01 :35 :58 merci
- 01 :35 :58 → 01 :36 :01 merci
- 01 :36 :02 → 01 :36 :05 je vous en prie, vous le ramenez le 14 décembre
- 01 :36 :05 → 01 :36 :08 maintenant que vous avez des élèves, vous savez ce que c'est

01 :36 :08 → 01 :36 :11 vous oubliez toujours de ramener la feuille dont on a absolument besoin

01 :36 :16 → 01 :36 :19 j'en ferai en plus

01 :36 :19 → 01 :36 :22 mais ramenez-le le 14 décembre

01 :36 :22 → 01 :36 :25 et puis on travaillera dessus à ce moment-là

01 :36 :25 → 01 :36 :28 le 14 décembre ?

01 :36 :29 → 01 :36 :32 c'est finalement le dernier dans le travail

01 :36 :32 → 01 :36 :35 l'extrait C

01 :36 :38 → 01 :36 :41 c'est en fait l'avant-dernier

01 :36 :48 → 01 :36 :51 vraiment à la fin, nous allons faire

01 :36 :51 → 01 :36 :54 un peu d'histoire

01 :36 :54 → 01 :36 :57 et on se rend compte que les numérotations

01 :36 :57 → 01 :37 :00 ne sont pas

01 :37 :00 → 01 :37 :03 dans la chronologie, il paraît logique

01 :37 :03 → 01 :37 :06 d'être la plus fine, mais souvent la date ne correspond pas

01 :37 :06 → 01 :37 :09 à la position

01 :37 :12 → 01 :37 :15 l'extrait C qui est de 48

01 :37 :19 → 01 :37 :22 oui, ça s'entrecroise en fait

01 :37 :23 → 01 :37 :26 c'est le récit de Magiotti à Mersenne

01 :37 :26 → 01 :37 :29 et après on retrouve Mersenne dans l'extrait F

01 :37 :29 → 01 :37 :32 je pense qu'il parle d'une expérience de l'année 40

01 :37 :32 → 01 :37 :35 c'est un peu décalé

01 :37 :35 → 01 :37 :38 c'est dans l'ordre des expériences

01 :37 :38 → 01 :37 :41 ce n'est pas forcément dans l'ordre des traces

01 :37 :41 → 01 :37 :44 qu'on trouve de ces expériences

01 :37 :44 → 01 :37 :47 donc il faut penser que

01 :37 :47 → 01 :37 :50 il faut penser que Torricelli

01 :37 :51 → 01 :37 :54 ce qui se passe c'est qu'entre l'extrait C et l'extrait D

01 :37 :54 → 01 :37 :57 il y a un gros changement

01 :37 :57 → 01 :38 :00 c'est qu'on passe d'expériences avec de l'eau

01 :38 :00 → 01 :38 :03 qui sont extrêmement complexes à réaliser

01 :38 :03 → 01 :38 :06 parce qu'il faut 10 mètres de hauteur

01 :38 :06 → 01 :38 :09 à une version presque portable

01 :38 :12 → 01 :38 :15 mais vous avez raison, on peut faire

01 :38 :15 → 01 :38 :18 toutes les expériences qu'on fait avec l'eau

01 :38 :19 → 01 :38 :22 et c'est beaucoup plus facile

01 :38 :33 → 01 :38 :36 il suffit de faire

01 :38 :36 → 01 :38 :39 c'est 100 sur 76

01 :38 :39 → 01 :38 :42 non c'est ça ?

01 :38 :42 → 01 :38 :45 pardon c'est 1000 sur 76

01 :38 :46 → 01 :38 :49 parce que le poids
01 :38 :49 → 01 :38 :52 le poids de 76 cm de mercure
01 :38 :52 → 01 :38 :55 est à peu près égal
01 :38 :55 → 01 :38 :58 au poids de 1000 cm d'eau
01 :38 :58 → 01 :39 :01 donc c'est 1000 divisé par 76
01 :39 :01 → 01 :39 :04 la densité du mercure
01 :39 :06 → 01 :39 :09 ça vaut 150
01 :39 :09 → 01 :39 :12 c'est ça ?
01 :39 :12 → 01 :39 :15 c'est plus que 12
01 :39 :15 → 01 :39 :18 non, un peu plus
01 :39 :18 → 01 :39 :21 non, 10 mètres
01 :39 :21 → 01 :39 :24 c'est 1000 cm
01 :39 :24 → 01 :39 :27 on est d'accord ?
01 :39 :27 → 01 :39 :30 donc 1000 divisé par 76
01 :39 :30 → 01 :39 :33 vous avez raison
01 :39 :33 → 01 :39 :36 ça fait à peu près 500
01 :39 :36 → 01 :39 :39 ça me parait pas énorme
01 :39 :39 → 01 :39 :42 c'est beau quand même
01 :39 :42 → 01 :39 :45 c'est beaucoup quand même
01 :39 :45 → 01 :39 :48 il n'y a pas grand chose qui fait que la densité
01 :39 :48 → 01 :39 :51 c'est en liquide
01 :39 :51 → 01 :39 :54 parce qu'en solide il y a des choses
01 :39 :54 → 01 :39 :57 qui font beaucoup de douleur
01 :39 :57 → 01 :40 :00 le plomb
01 :40 :03 → 01 :40 :06 oui c'est vrai que c'est beaucoup
01 :40 :09 → 01 :40 :12 c'est bon on arrête là ?
01 :40 :12 → 01 :40 :15 en fait on a mis beaucoup moins de temps que je pensais
01 :40 :15 → 01 :40 :18 pour faire ça
01 :40 :18 → 01 :40 :21 donc je vous libère

ANNEXE J

Transcription (partie II, binôme 8)

00 :00 → 00 :11 Alors, du point ... on peut faire monter l'eau à travers un tube ou un siphon, par impulsion ou par attraction, en la soulevant par impulsion

00 :11 → 00 :14 Il y a une certaine hauteur...

00 :14 → 00 :15 Merci.

00 :15 → 00 :20 Il y a une certaine hauteur, hauteur, hauteur, hauteur, hauteur, hauteur, au-delà du tube.

00 :20 → 00 :22 Non, hauteur du tube, au-delà...

00 :22 → 00 :24 Du tube, au-delà de laquelle ?

00 :24 → 00 :27 Au-delà de laquelle

00 :28 → 00 :31 De-la-quelle.

00 :31 → 00 :33 Non, je veux dire, est-ce qu'il y avait un trait d'union entre de et là ?

00 :33 → 00 :34 Oui.

00 :34 → 00 :35 Et il y a un accent sur a.

00 :35 → 00 :36 Oui, merci.

00 :42 → 00 :46 Au-delà de laquelle il est impossible de faire monter,

00 :46 → 01 :00 il est impossible de faire monter l'eau d'un doigt, virgule, ou même ou même d'un cheveu, point virgule.

01 :00 → 01 :02 Il y a un accent sur le cheveu, ça ?

01 :02 → 01 :03 Oui.

01 :03 → 01 :06 Non, il y a un cheveu, donc il n'y a pas de...

01 :06 → 01 :07 Non, accent sur le point virgule.

01 :07 → 01 :08 Oui, mais il n'y a pas d'accent circonflexe

01 :08 → 01 :09 Oui, il n'y a pas de d'accent circonflexe.

01 :11 → 01 :12 Merci.

01 :12 → 01 :30 D'un cheveu, point virgule, et cette hauteur me semble être d'environ 40 pieds, entre crochets de 12 mètres.

01 :30 → 01 :38 D'un cheveu, point virgule, et cette hauteur me semble être d'environ 40 pieds, entre crochets de 12 mètres.

01 :38 → 01 :39 Donc...

01 :44 → 01 :46 T'as dit qu'il y en a du coup...

01 :53 → 01 :54 Baliani.

01 :55 → 01 :56 Est-ce qu'on met Baliani ?

01 :56 → 01 :58 Peut-être juste lettre de Galilée ?

01 :58 → 01 :59 Oui.

02 :00 → 02 :02 Parce que si on introduit Baliani, il faudrait que...

02 :02 → 02 :03 Il faudrait qu'il lui réponde.

02 :03 → 02 :04 C'est ça, voilà.

- 02 :30 → 02 :31 Bonjour.
- 02 :31 → 02 :32 Bonjour.
- 02 :47 → 02 :53 Ah, je ne savais pas que Torricelli c'était son assistant.
- 02 :53 → 02 :54 À qui ? À Galilée ?
- 02 :54 → 02 :55 À Galilée, ouais.
- 02 :56 → 02 :58 Bah, je ne savais pas non plus, mais c'est pertinent à savoir.
- 02 :58 → 02 :59 Ouais.
- 02 :59 → 03 :00 De quoi ?
- 03 :00 → 03 :02 Torricelli, c'était l'assistant de Galilée.
- 03 :03 → 03 :04 Wow.
- 03 :08 → 03 :10 Comment tu l'as pris comme si t'en avais quelque chose à cirer ?
- 03 :17 → 03 :19 Le théâtre sauve beaucoup de choses.
- 03 :19 → 03 :20 Quoi ?
- 03 :21 → 03 :23 Je lui ai dit pourquoi pour Torricelli...
- 03 :24 → 03 :26 Comment tu l'as pris comme si t'en avais quelque chose à cirer ?
- 03 :26 → 03 :28 Le théâtre sauve beaucoup de choses.
- 03 :29 → 03 :30 Bravo.
- 03 :30 → 03 :33 Je ne suis pas sûre que ça soit très utile, mais bravo.
- 03 :43 → 03 :45 Je ne suis pas sûre du coup que les questions correspondent en fait.
- 03 :47 → 03 :48 Ça ne passe pas.
- 03 :49 → 03 :51 Il faut nuancer les choses en fait.
- 03 :51 → 03 :52 Enfin, nuancer...
- 03 :52 → 03 :57 A priori, il doivent vraiment déjà savoir, connaître déjà la loi en fait.
- 03 :57 → 04 :00 le statique des fuites pour pouvoir répondre.
- 04 :00 → 04 :04 Il faut leur évoquer déjà, avant,
- 04 :04 → 04 :06 pour qu'ils puissent faire l'activité documentaire,
- 04 :06 → 04 :09 et après leur demander de la prouver expérimentalement.
- 04 :09 → 04 :11 Ouais, donc a priori, on la donne la loi.
- 04 :11 → 04 :12 Ouais.
- 04 :12 → 04 :14 Elle est donnée avant.
- 04 :14 → 04 :17 Est-ce qu'on pourrait trouver quand est-ce que justement la loi a été établie ?
- 04 :18 → 04 :19 Euh...
- 04 :19 → 04 :26 Quand elle date, comme ça tu vois, on indique justement de quand date le problème, et au final...
- 04 :26 → 04 :28 hop, on retrouve...
- 04 :49 → 05 :14 ...
- 05 :14 → 05 :15 Écoute...
- 05 :16 → 05 :18 Comment tu fais pour demain...
- 05 :18 → 05 :20 Parce que demain on a visio, c'est le midi.

05 :20 → 05 :22 Je vais venir ici.

05 :22 → 05 :25 Je vais faire le visio ici, j'ai pas le choix, sinon j'arriverai jamais là.

05 :25 → 05 :29 À moins qu'ils nous donnent des dates de passage pour le visio, tu vois.

05 :29 → 05 :30 Mais sinon...

05 :30 → 05 :31 Dates de passage ?

05 :31 → 05 :32 Genre, tu sais, les heures.

05 :32 → 05 :37 Parce qu'ils ont dit qu'ils allaient nous parler de ce qu'ils allaient écrire sur Compass, tu vois.

05 :37 → 05 :39 À moins qu'ils l'aient dit devant tout le monde, mais sinon...

05 :39 → 05 :41 J'aime pas Compass.

05 :41 → 05 :43 Ah si, j'ai Compass.

05 :43 → 05 :46 Je ne sais plus si je me suis inscrite ou pas à Compass.

05 :46 → 05 :51 Moi, je me suis inscrite, mais j'ai pas l'impression que ce soit le bon.

05 :51 → 05 :54 Parce que moi, je suis au Compass de Créteil.

05 :54 → 05 :58 Et je vois aucun rapport, nulle part.

05 :58 → 06 :03 Ils ont probablement rédigé en 1651 la loi, probablement rédigée.

06 :03 → 06 :05 Ah, d'accord.

06 :05 → 06 :08 Y a quoi comme source en bas ?

06 :08 → 06 :11 C'est ça le problème, c'est que j'ai cherché, mais...

06 :11 → 06 :12 Ils ont pas mis de source.

06 :12 → 06 :14 Enfin, y a un truc.

06 :14 → 06 :15 Une vidéo.

06 :15 → 06 :16 Sur YouTube.

06 :16 → 06 :17 C'est ça.

06 :17 → 06 :18 Donc, ouais.

06 :18 → 06 :19 Pas ouf.

06 :20 → 06 :21 Pas ouf du tout, même.

06 :23 → 06 :24 Un énorme problème.

06 :24 → 06 :25 Attends, attends.

06 :25 → 06 :26 Décolle.

06 :26 → 06 :29 Non, non, non, non, non, non.

06 :41 → 06 :42 Oh.

06 :45 → 06 :46 Moi regarde

06 :46 → 06 :47 le problème a longtemps tourmenté...

07 :02 → 07 :03 oui, c'est ça.

07 :04 → 07 :05 Moi aussi.

07 :12 → 07 :13 Non, mais...

07 :43 → 07 :51 ...

07 :51.200 → 07 :56 ok ça vous irait de faire une mini pause ?

07 :56 → 07 :58.200 Il est 42, d'ailleurs.

07 :58 → 07 :59 On a des fiches de presse.

07 :59.600 → 08 :02.440 ...

08 :02 → 08 :04.680 Vous n'avez pas le même trajet.

08 :04.880 → 08 :06.320 Surtout, ils sont sur Paris.

08 :06.520 → 08 :07.960 ...

08 :08.160 → 08 :09.160 Donc...

08 :09.360 → 08 :10.600 ...

08 :10.720 → 08 :12.520 Salut, mes amis, on a bien travaillé.

08 :12.720 → 08 :13.720 ...

08 :13.920 → 08 :15.160 Donc là, t'es en train de...

08 :15.360 → 08 :16.360 Ouais, ouais, ouais.

08 :16.560 → 08 :17.960 C'est ça que tu mérites, d'ailleurs.

08 :18.160 → 08 :19.160 ...

08 :19.360 → 08 :20.360 Voilà, je commence le truc.

08 :20.560 → 08 :23.320 Donc, un énorme problème à longterm tourmenté les communautés minières européennes du 17e siècle

08 :23.520 → 08 :24.520 du 17e siècle.

08 :24.720 → 08 :25.720 Le 17e siècle ?

08 :25.920 → 08 :26.920 Le 17e siècle.

08 :27.120 → 08 :28.720 Un consulta Galilée.

08 :28.920 → 08 :29.920 Deux L.

08 :30.120 → 08 :31.120 ...

08 :31.320 → 08 :32.600 Ou un E, peut-être ?

08 :32 → 08 :33 ...

08 :34 → 08 :35 Enfin...

08 :35.200 → 08 :36.200 ...

08 :36 → 08 :39 Un consulta à Galilée en Italie au sujet de ce phénomène.

08 :39 → 08 :40 ...

08 :41 → 08 :42 Donc...

08 :42.200 → 08 :43.200 On peut faire une...

08 :43 → 08 :44 ...

08 :44.600 → 08 :46.600 Comme ça, il y a la présentation du problème.

08 :46 → 08 :47 ...

08 :48 → 08 :49 Galilée.

08 :49.200 → 08 :50.200 ...

08 :50 → 08 :53 Son assistant, qui, à lui-même, fait des recherches de son côté.

08 :54 → 08 :55 Un truc comme ça.

08 :55.200 → 08 :56.200 ...

08 :56 → 09 :00 Donc, on va peut-être indiquer que, justement, après la mort de Galilée,

09 :00.600 → 09 :01.600 ...

09 :01 → 09 :03 le problème avait toujours pas été résolu.

09 :04 → 09 :09 Et c'est effectivement son assistant qui reprend le flambeau sur les recherches.

09 :09 → 09 :10 ...

09 :10.200 → 09 :11.200 ...

09 :11 → 09 :12 Oui, oui, oui.

09 :12.600 → 09 :13.600 ...

09 :13 → 09 :14 Oui, oui, oui, oui, oui.

09 :15 → 09 :16 ...

09 :16.200 → 09 :17.200 Après la mort de celui-ci.

09 :17 → 09 :18 ...

09 :18.600 → 09 :19.600 Pourquoi t'avances pas ta chaise ?

09 :19 → 09 :20 ...

09 :21 → 09 :23 Je voudrais pas l'avancer, en fait. Je voudrais pousser.

09 :23.200 → 09 :24.200 Mais pourquoi tu...

09 :24 → 09 :27 Je veux mettre ça comme ça, en fait. Ça me stresse de bosser sur la table.

09 :27.600 → 09 :28.600 ...

09 :28 → 09 :29 Ah, tu veux dire comme ça ?

09 :30 → 09 :31 Ouais, c'est pour la pousser.

09 :31.200 → 09 :32.200 Vas-y, moi, je m'en fous.

09 :32 → 09 :36 Moi, je croyais que tu voulais la pousser vers toi, en fait.

09 :36.600 → 09 :37.600 C'est tiré.

09 :37.600 → 09 :38.600 C'est tiré ?

09 :38 → 09 :40 Oui, mais je pensais pousser vers toi.

09 :41 → 09 :42 Donc, le fait...

09 :42.200 → 09 :43.200 ...

09 :43 → 09 :44 ...

09 :44.600 → 09 :45.600 T'inquiètes.

09 :45 → 09 :46 On va dire que c'est la semaine

09 :47 → 09 :48 Même pas, on est mardi.

09 :48.200 → 09 :49 T'as même pas d'excuses.

09 :49 → 09 :50 ...

09 :50.600 → 09 :51 J'ai le week-end.

09 :51 → 09 :52 ...

09 :53 → 09 :54 Toi tes en vacances jeudi ?

09 :54.200 → 09 :55.200 ...

09 :55 → 09 :56 ...

09 :56.600 → 09 :57.600 Bouh !

09 :57 → 09 :58 ...

09 :59 → 10 :01 Toi, t'en vas dans ce vendredi ? Non, jeudi.

10 :01.200 → 10 :02.200 Jeudi, ouais.

10 :02 → 10 :07 Mais jeudi, j'ai un rendez-vous avec ma tutrice pour faire le bilan de mi année.

10 :07.600 → 10 :10.600 Qu'elle doit envoyer, justement.

10 :10 → 10 :12 Ah, toi, tu m'avais dit ça, peut-être ?

10 :13 → 10 :15 Non, parce que je l'ai su il n'y a pas longtemps.

10 :15.200 → 10 :16.200 Ah, d'accord.

10 :16 → 10 :19 Parce qu'en fait, évidemment, ma tutrice m'en a parlé.

10 :19.600 → 10 :23.600 Moi, elle m'a dit qu'elle allait faire un bilan de mi année, qu'elle devait l'envoyer.

10 :23 → 10 :26 Et que je pense qu'elle doit le mettre sur Compass, peut-être.

10 :27 → 10 :28 Et c'est pour ça qu'elle s'en va.

10 :28.200 → 10 :31.200 En vrai, je pense qu'elle me fait un peu confiance.

10 :31 → 10 :34 Donc, je lui fais confiance.

10 :35 → 10 :38 Elle m'a dit, justement, je vais te montrer ce que j'envoie avant et tout.

10 :38.600 → 10 :40.600 Pour voir si ça te convient.

10 :40 → 10 :42 Moi, je me fais confiance pour le rapport, tu vois.

10 :43 → 10 :46 Parce que, du coup, j'ai dit à Victorine,

10 :46.200 → 10 :50.200 j'avais remplacé ma tutrice pour des cours, pour les terminales spé, tu vois.

10 :50 → 10 :53 En fait, elle sait déjà ce que t'as dans le bide

10 :53.600 → 10 :54.600 C'est très bien.

10 :54 → 10 :57 Et en fait, elle m'a re-demandé de la remplacer pour la rentrée.

10 :58 → 11 :01 Du coup, c'est qu'elle me fait vraiment confiance pour me confier ce spé.

11 :01.200 → 11 :03.200 Parce qu'elle est en formation.

11 :03 → 11 :06 Et du coup, c'était super bien.

11 :07 → 11 :08 J'étais vraiment flattée.

11 :08.200 → 11 :10.200 Donc, allez, vas-y. Écris. Travaille.

11 :10 → 11 :12 Alors, tu veux me parler d'autre chose ?

11 :12.600 → 11 :14.600 Ce n'est qu'après la mort de Galilée que son assistant.

11 :14 → 11 :15 Non, non, non.

11 :16 → 11 :18 Allez, passe.

11 :18.200 → 11 :20.200 Oui, donc.

11 :20 → 11 :22 Ce n'est qu'après la mort de Galilée.

- 11 :22.600 → 11 :23.600 Non, non, non. Toujours pas.
- 11 :23 → 11 :24 Non.
- 11 :25 → 11 :27 C'était une blague.
- 11 :27.200 → 11 :28.200 Ah oui, mais non.
- 11 :28 → 11 :31 Je suis désolée, Votre Seigneurie.
- 11 :31 → 11 :33 Votre référence.
- 11 :33.600 → 11 :36.600 Auriez-vous l'obligeance d'accomplir votre obligation ?
- 11 :36 → 11 :37 Alors, obligation ?
- 11 :38 → 11 :40 Oui, c'est une obligation.
- 11 :40.200 → 11 :43.200 Alors, votre obligation, c'est mon obligation.
- 11 :43 → 11 :45 C'est tout quel document ?
- 11 :45.600 → 11 :46.600 C'est mon obligation.
- 11 :46 → 11 :47 C'est tout quel document ?
- 11 :48 → 11 :49 C'est mon obligation.
- 11 :49.200 → 11 :51.200 J'ai la bonté.
- 11 :51 → 11 :53 J'ai la bonté.
- 11 :53.600 → 11 :55.600 De l'oublier.
- 11 :55 → 11 :57 La générosité.
- 11 :58 → 12 :00 Rentre bien !
- 12 :00 → 12 :02 T'as l'air grave motivée.
- 12 :02.200 → 12 :03.200 J'ai quoi ?
- 12 :03 → 12 :05 T'as l'air grave motivée, dis donc.
- 12 :05.600 → 12 :07.600 Parce que j'ai clairement la flemme.
- 12 :07 → 12 :09 C'est la réunion parents-profs quoi.
- 12 :10 → 12 :11 Et en fait, ouais.
- 12 :11.200 → 12 :13.200 Et après, les PP, ils rentrent le plus tard.
- 12 :13 → 12 :16 Ouais, c'est ça, mais je vais aider une PP.
- 12 :16.600 → 12 :17.600 Pourquoi ?
- 12 :17 → 12 :20 Parce que il y a trop d'élèves.
- 12 :21 → 12 :24 En gros, on est deux, quoi.
- 12 :24.200 → 12 :27.200 Comme ça, ça m'entraîne.
- 12 :28.200 → 12 :30 Je me suis entraînée.
- 12 :30 → 12 :32 À être PP.
- 12 :34 → 12 :37 L'année prochaine, selon le bahut, en fait, il se peut que tu sois PP.
- 12 :38 → 12 :40 Antoine il est PP là.
- 12 :40.200 → 12 :41.200 L'année prochaine ?
- 12 :41 → 12 :43 Et moi, mon collègue Nicolas aussi.
- 12 :43.600 → 12 :45.600 Il est PP alors qu'il est stagiaire.
- 12 :45 → 12 :47 En tout cas...
- 12 :48 → 12 :50 En tout cas, il faisait ça déjà l'année dernière.

12 :50.200 → 12 :52.200 Donc il peut aussi être PP.
12 :52 → 12 :55 Donc je reprends à partir de le maestro.
12 :55 → 12 :58 Parce qu'en fait, il faut quand même montrer qu'il a fait des choses,
12 :59 → 13 :02 qu'il n'a pas juste...
13 :02.200 → 13 :04.200 Du coup, on est...
13 :04 → 13 :06 On est le binôme combien, du coup ?
13 :06.600 → 13 :07.600 10, ouais.
13 :07 → 13 :08 Regarde.
13 :09 → 13 :10 Quoi ?
13 :10.200 → 13 :11.200 À demain.
13 :11 → 13 :12 Ah !
13 :12.600 → 13 :13.600 Ah !
13 :28 → 13 :31 Mais le truc sur l'ampoule de verre, je pense que ce n'est pas nécessaire.
13 :32 → 13 :34 Non, c'est pour ça que je comptais commencer à partir de...
13 :34.200 → 13 :36.200 Non, mais le maestro, c'est là.
13 :36 → 13 :39 Mais justement, j'allais dire...
13 :39.600 → 13 :42.600 Donc le maestro savait que l'air avait un poids.
13 :42 → 13 :44 C'est déjà ça.
13 :45 → 13 :46 Et après, sa mort...
13 :46.200 → 13 :49.200 Ensuite, ce n'est qu'après la mort de Galilée que je suis
d'accord avec toi.
13 :49 → 13 :50 Je suis d'accord avec toi.
13 :50.600 → 13 :52.600 Ouais, je sais. De toute façon, tu ne peux être que d'accord
avec moi.
13 :52 → 13 :54 Je suis d'accord avec toi.
13 :57 → 14 :00 Alors, je vais mettre notre binôme en tête, comme ça...
14 :00.200 → 14 :02 Viens, viens, viens.
14 :02 → 14 :03 Je rigole.
14 :03.600 → 14 :04 On l'éjecte
14 :04 → 14 :06 Je rigole.
14 :07 → 14 :08 Je rigole.
14 :13.200 → 14 :16.200 L'esprit du mal est gravé sur sa face.
14 :16 → 14 :18 Non, mais vraiment, c'est trop dur pour bosser.
14 :19 → 14 :21 Moi, je ne vais pas commencer.
14 :23 → 14 :25.200 Il faut qu'on se reconcentre.
14 :25 → 14 :28 De toute façon, mes mains n'arrêtent pas de travailler.
14 :28.600 → 14 :32 Le problème, c'est que les cerveaux ne sont pas aussi rapides.
14 :32.200 → 14 :34 Ah mais oui, c'est vrai qu'en fait.
14 :34.200 → 14 :36 Vu ce qu'on avait déjà dit que je suis en train d'écrire, tout va
bien.

- 14 :36 → 14 :38 En ce moment, on a déjà notre fil conducteur.
- 14 :38 → 14 :39 Yep.
- 14 :39 → 14 :41 Il y aurait vraiment plus qu'à nous écouter.
- 14 :41 → 14 :42 C'est binôme 10.
- 14 :49 → 14 :52 Le maestro savait ?
- 14 :52 → 14 :54 Que l'air avait un poids.
- 14 :54 → 14 :56 Ce n'est qu'après la mort de Galilée.
- 15 :00 → 15 :02 Ce n'est qu'après la mort de Galilée.
- 15 :02 → 15 :04 Que son assistant.
- 15 :04 → 15 :06 Que son assistant.
- 15 :10 → 15 :13 C'est après la mort de Galilée, que son assistant...
- 15 :13 → 15 :15 Pourquoi tu ne peux pas copier-coller ?
- 15 :15 → 15 :17 Laisse-moi écrire, ok ?
- 15 :17 → 15 :19 Que son assistant...
- 15 :19 → 15 :21 De Galilée ?
- 15 :21 → 15 :23 Que son assistant...
- 15 :25 → 15 :28 Evangelista.
- 15 :28 → 15 :30 C'est trop mignon comme nom.
- 15 :30 → 15 :31 Ça fait un peu ?
- 15 :31 → 15 :32 Excuse-moi ?
- 15 :32 → 15 :33 C'est une fille ou un garçon ?
- 15 :33 → 15 :34 C'est un garçon.
- 15 :34 → 15 :36 J'aurais pu avoir une discussion genre avec toi.
- 15 :36 → 15 :39 Non, mais j'aurais pensé directement à une femme.
- 15 :39 → 15 :41 Parce que ça finit par a ?
- 15 :41 → 15 :43 Non, pas forcément.
- 15 :45 → 15 :47 C'est que ça me fait penser à Ève en fait.
- 15 :47 → 15 :48 Ou Évangélie.
- 15 :48 → 15 :49 À Évangélie ?
- 15 :50 → 15 :52 Tu vois, c'est pour ça que ça me fait penser à Évangélie.
- 15 :52 → 15 :57 C'est parce que ce n'est pas le a, c'est la référence française que ça m'amène.
- 15 :57 → 16 :00 Du coup, t'as le côté Angélique qui va forcément avec la femme,
- 16 :00 → 16 :04 alors que Stromboli, ça sera forcément l'homme quoi.
- 16 :05 → 16 :06 Non.
- 16 :06 → 16 :09 Non, pour moi c'est un non d'animal, t'as vu ?
- 16 :10 → 16 :12 Non, c'est le marionnettiste dans Pinocchio.
- 16 :14 → 16 :19 Alors donc, Evangelista Torricelli.
- 16 :21 → 16 :22 Même dans la façon de le dire.
- 16 :22 → 16 :23 Évangélistes.

16 :23 → 16 :25 Ça fait Évangélie, tu vois.

16 :27 → 16 :28 Ouais.

16 :29 → 16 :31 Ils vont se taper des barres en écoutant notre truc.

16 :32 → 16 :34 Si ça vous divertit tant mieux.

16 :44 → 16 :48 Là, je ne suis pas sûre que ce soit très pertinent de tourner la phrase comme ça.

16 :48 → 16 :49 Ah ouais, non.

16 :49 → 16 :52 Plutôt de dire que son assistant reprit le flambeau.

16 :52 → 16 :54 Flaira que les forces à vaincre.

16 :55 → 16 :56 Ça te va en fait ?

16 :58 → 16 :59 Ouais, ouais, ouais.

17 :02 → 17 :04 C'est bizarre comme mot, mais ça marche.

17 :09 → 17 :12 Si, ça fait mieux, parce que sinon je trouve que ça fait un petit peu hors du contexte.

17 :12 → 17 :13 Ouais, je suis d'accord.

17 :13 → 17 :16 En fait, on se demandera desquels effets on parle.

17 :21 → 17 :23 Que les forces à vaincre.

17 :24 → 17 :26 Que les forces à vaincre.

17 :27 → 17 :29 Pour pomper un liquide.

17 :32 → 17 :33 Dépendent.

17 :33 → 17 :34 Dépendaient pardon.

17 :37 → 17 :39 Non seulement de la hauteur.

17 :39 → 17 :40 Dépendent ou dépendaient ?

17 :40 → 17 :41 Dépendaient.

17 :41 → 17 :45 Non seulement de la hauteur, mais aussi de la densité du liquide.

17 :46 → 17 :51 Non seulement de la hauteur, mais aussi de la densité du liquide.

17 :53 → 17 :54 Non, non.

18 :03 → 18 :05 Alors, flairant sans accent circonflexe.

18 :08 → 18 :09 Torricelli avec deux « r » ?

18 :10 → 18 :11 Ouais, deux « r ».

18 :16 → 18 :20 Ah, Torricieri, ça fait rigolo qu'il n'y ait pas deux « c » du coup.

18 :21 → 18 :22 Vu que c'est "tché".

18 :30 → 18 :31 Alors, d'accord.

18 :31 → 18 :34 Et maintenant, on va mettre la lettre de Torricelli.

18 :39 → 18 :40 Pour l'instant, non.

18 :40 → 18 :42 Flairant sans accent circonflexe.

18 :43 → 18 :47 Dépendaient, non seulement de la hauteur, mais aussi de la densité du liquide.

18 :51 → 18 :55 Dépendaient, non seulement de la hauteur, mais aussi de la densité du liquide.

18 :56 → 18 :59 Il faudrait préciser la masse volumique du mercure.

18 :59 → 19 :00 Bien sûr.

19 :00 → 19 :01 Bien sûr ?

19 :01 → 19 :02 Oui, bien sûr.

19 :03 → 19 :04 Est-ce qu'il y a...

19 :04 → 19 :05 Ok, comment ?

19 :05 → 19 :10 Là, dans notre source, on ne le dit pas directement, ou est-ce qu'on le dit directement ?

19 :10 → 19 :12 Genre, la masse volumique du mercure, c'est ça.

19 :12 → 19 :16 Là, ils disent qu'elle est 13,6 fois plus haute que celle de l'eau.

19 :16 → 19 :17 Ah, c'est pas mal.

19 :17 → 19 :18 C'est une bonne idée.

19 :18 → 19 :19 Ça les fait un peu travailler.

19 :19 → 19 :21 Ouais, ouais, c'est une bonne idée.

19 :22 → 19 :26 Et en même temps, d'un côté, l'extraction d'informations des documents et tout, conversion,

19 :26 → 19 :29 ouais, ça fait bosser plus de compétences.

19 :32 → 19 :35 Donc là, tu mettrais la lettre, c'est ça ?

19 :35 → 19 :36 Oui.

19 :36 → 19 :37 Enfin, les lettres, du coup.

19 :37 → 19 :38 Les lettres.

19 :38 → 19 :39 Les deux lettres.

19 :39 → 19 :40 Tu veux que je te les lise ?

19 :41 → 19 :42 Vas-y, par contre...

19 :45 → 19 :46 Fais quoi ?

19 :47 → 19 :49 De mettre tout en liaison, c'est ça ?

19 :52 → 19 :56 Après, rien ne nous empêche d'imprimer ça et de rajouter juste ça en haut derrière.

19 :56 → 19 :58 Ah, faut mettre ça en annexe, ouais, j'avoue.

19 :59 → 20 :01 Bah oui, en plus, c'est sur la même page

20 :02 → 20 :07 Donc, tu mets peut-être, genre, documents ou...

20 :07 → 20 :12 Ah ouais, après, c'est vrai que j'aime bien le fait qu'on ait, tu sais, les éléments comme ça à la suite.

20 :12 → 20 :13 Ouais.

20 :13 → 20 :16 Donc, il nous reste une heure.

20 :16 → 20 :18 À tuer, ouais.

20 :19 → 20 :20 Une copie des lettres ?

20 :20 → 20 :21 Vas-y.

20 :22 → 20 :23 Tu vas tout taper ?

20 :23 → 20 :24 Vas-y, go.

20 :25 → 20 :26 Tu vas tout taper ?
20 :26 → 20 :27 Vas-y.
20 :28 → 20 :29 Tu veux que je te le scanne ?
20 :29 → 20 :30 Et je te l'envoie par mail ?
20 :30 → 20 :31 Non !
20 :31 → 20 :33 Comme s'il s'agissait à faire un copier-coller.
20 :33 → 20 :34 Donc, elle va le scanner comment ?
20 :34 → 20 :35 Je le scanne pas.
20 :35 → 20 :36 Ouais.
20 :36 → 20 :37 Non, je le scanne avec mon téléphone.
20 :38 → 20 :40 Pourquoi on ne fait pas ça au lieu de le taper ?
20 :40 → 20 :42 Parce qu'elle sera moins propre, elle sera moins jolie.
20 :43 → 20 :45 Donc, tu lis, s'il te plaît.
20 :45 → 20 :46 Ok.
20 :47 → 20 :49 Alors, vas-y. Nous avons...
20 :49 → 20 :51 Nous avons fabriqué...
20 :52 → 20 :54 Avec un S fabriqué ?
20 :54 → 20 :55 Non.
20 :55 → 20 :58 Nous avons fabriqué beaucoup de vases en verre
20 :59 → 21 :01 et aussi de gros tuyaux
21 :02 → 21 :03 comme les suivants
21 :04 → 21 :05 désignés
21 :07 → 21 :08 A et B
21 :09 → 21 :11 longs de deux brasses
21 :14 → 21 :16 désignés A et B
21 :17 → 21 :19 longs de deux brasses
21 :21 → 21 :22 entre crochets
21 :22 → 21 :23 Les deux sont longs, non ?
21 :23 → 21 :24 Mais longs S de deux brasses ?
21 :24 → 21 :26 Oui, oui. Longs S de deux brasses.
21 :26 → 21 :27 Avec une brasse S.
21 :28 → 21 :30 Crochets 1,20 m.
21 :32 → 21 :34 C'est un crochet point.
21 :35 → 21 :37 Ceux-ci furent remplis
21 :38 → 21 :40 Ceux-ci furent remplis
21 :43 → 21 :44 de vif d'argent
21 :44 → 21 :46 Vif argent, pardon.
21 :46 → 21 :48 Vif-argent
21 :49 → 21 :50 Puis
21 :51 → 21 :53 si l'on bouchait l'orifice

21 :54 → 21 :57 puis si l'on bouchait l'orifice
21 :59 → 22 :00 avec un doigt
22 :02 → 22 :04 et qu'on les renversait
22 :04 → 22 :06 et qu'on les renversait
22 :06 → 22 :08 dans une cuve
22 :08 → 22 :10 dans une cuve
22 :11 → 22 :12 Renverser, c'est avec un T.
22 :12 → 22 :13 C'est on.
22 :14 → 22 :16 On les renversait, merci.
22 :16 → 22 :17 Tu dis pas ça.
22 :18 → 22 :20 Et qu'on les renversait
22 :20 → 22 :22 mais c'est on qui les renverse.
22 :22 → 22 :23 C'est on le sujet.
22 :23 → 22 :25 Donc c'est on les renversait avec un T.
22 :25 → 22 :26 C'est écrit.
22 :26 → 22 :27 Ah oui, d'accord, d'accord.
22 :27 → 22 :29 Donc c'est là, du coup, il y a juste un T.
22 :29 → 22 :31 Et pas on, c'était le verre, on est d'accord.
22 :31 → 22 :32 Non, non.
22 :32 → 22 :34 On les renversait dans une cuve
22 :35 → 22 :37 où il y avait
22 :37 → 22 :39 où il y avait
22 :39 → 22 :41 le vif
22 :41 → 22 :43 le vif argent C.
22 :43 → 22 :45 Ouh, c'est dur là.
22 :45 → 22 :46 Argent C.
22 :46 → 22 :47 Virgule.
22 :47 → 22 :48 C ou pas C ?
22 :48 → 22 :49 C, C, C.
22 :49 → 22 :50 Ok.
22 :50 → 22 :51 Virgule.
22 :51 → 22 :52 Ok.
22 :52 → 22 :53 C'est une longue trace.
22 :53 → 22 :54 C.
22 :54 → 22 :55 C.
22 :55 → 22 :56 C, C.
22 :56 → 22 :57 Virgule.
22 :57 → 22 :59 On les voyait se vider.
23 :00 → 23 :02 Le tube AD.
23 :02 → 23 :03 Ok.

23 :04 → 23 :06 Le tube AD.
23 :06 → 23 :08 Pourtant,
23 :10 → 23 :12 restait toujours
23 :12 → 23 :14 restait toujours
23 :14 → 23 :15 plein
23 :16 → 23 :17 à la hauteur
23 :18 → 23 :20 plein à la hauteur
23 :20 → 23 :22 de la cuve.
23 :22 → 23 :23 C'est ça.
23 :30 → 23 :32 D'une place, 1 cm.
23 :32 → 23 :34 D'une place, 1 cm,
23 :34 → 23 :37.060 et 1 doigt
23 :37 → 23 :39 entre le crochet
23 :39 → 23 :41 74,9 cm.
23 :41 → 23 :42 Point.
23 :42 → 23 :44 Et tu reviens la ligne.
23 :44 → 23 :46 ...
23 :46 → 23 :48 74 , 9.
23 :48 → 23 :50 Point tu reviens la ligne, et tu ...
23 :50 → 23 :52 On reprend ça après.
23 :52 → 23 :54 Euh, c'est cette ligne là.
23 :54 → 23 :55 Ou c'est l'alinéa ?
23 :55 → 23 :58 L'alinéa, c'est ce que j'ai cherché.
23 :58 → 24 :11 Cette force qui retient ce vif argent contre sa nature et qu'il...
24 :11 → 24 :13 Oh putain !
24 :13 → 24 :14 Zut alors !
24 :14 → 24 :15 Zut alors !
24 :15 → 24 :16 Ça c'est S A, sa force
24 :16 → 24 :17 Oui merci.
24 :18 → 24 :22 T'inquiète, généralement je le lis après pour...
24 :23 → 24 :29 Contre sa nature qu'il a de descendre.
24 :32 → 24 :42 On a cru jusqu'à présent
24 :42 → 25 :02 qu'elle était intérieure au vase A.E.
25 :02 → 25 :06 Ou qu'elle prenait du vide.
25 :06 → 25 :07 Qu'elle prenait du vide ?
25 :07 → 25 :08 Qu'elle venait, putain.
25 :08 → 25 :09 Qu'elle venait du vide.
25 :09 → 25 :11 Qu'elle venait du vide.
25 :11 → 25 :12 Ça marche.
25 :12 → 25 :15 Qu'elle venait du vide.

25 :15 → 25 :16 Point.
 25 :16 → 25 :17 Ça marche.
 25 :17 → 25 :20 Mais je prétends...
 25 :20 → 25 :23 Mais je prétends...
 25 :23 → 25 :25 Avec un S.
 25 :25 → 25 :26 Qu'est-ce que j'ai dis ?
 25 :26 → 25 :27 Prétends avec un S.
 25 :27 → 25 :28 Qu'est-ce que j'ai dis ?
 25 :28 → 25 :29 Que tu relis.
 25 :29 → 25 :34 Que la force vient de l'extérieur.
 25 :34 → 25 :36 Vient de l'extérieur.
 25 :36 → 25 :39 Deux points.
 25 :39 → 25 :43 Sur la superficie du liquide
 25 :43 → 25 :46 Sur la superficie du liquide
 25 :46 → 25 :49 qui est dans la cuve.
 25 :49 → 25 :50 C'est pas vrai ?
 25 :50 → 25 :51 Du liquide.
 25 :51 → 25 :57 Sur la superficie du liquide qui est dans la cuve.
 25 :57 → 26 :02 L'air pèse d'une hauteur de 50 milles.
 26 :02 → 26 :03 Pèse.
 26 :03 → 26 :08 Qui est en hauteur de 50 milles.
 26 :08 → 26 :11 L'air pèse d'une...
 26 :11 → 26 :13 L'air pèse d'une hauteur de 50 milles.
 26 :13 → 26 :14 Ah d'accord.
 26 :14 → 26 :18 L'air pèse d'une hauteur de 50 milles.
 26 :18 → 26 :22 L'air pèse d'une hauteur de 50...
 26 :22 → 26 :24 C'est écrit en nombre.
 26 :24 → 26 :26 Mais c'est pas vrai.
 26 :26 → 26 :28 Enfin c'est écrit en lettres plutôt, putain.
 26 :28 → 26 :31 Alors 50 milles, c'est pas pareil que milles.
 26 :31 → 26 :33 Oui c'est vrai.
 26 :33 → 26 :38 Et entre parenthèses, ça correspond à 800 kilomètres.
 26 :38 → 26 :39 Ok, ça marche.
 26 :39 → 26 :41 Donc descendre.
 26 :41 → 26 :43 100.
 26 :43 → 26 :47 Présente avec un 100.
 26 :47 → 26 :49 Et là, de descendre.
 26 :49 → 26 :52 Sur la superficie du liquide intérieur.
 26 :52 → 26 :53 Le vase A.E.
 26 :53 → 26 :55 Quelqu'un vient de l'extérieur.

- 26 :55 → 26 :58 Je prétends que la force vienne de l'extérieur.
26 :58 → 27 :01 L'air pèse du liquide dans les cuves.
27 :01 → 27 :04 L'air pèse... Il y a rien entre cuve et l'air ?
27 :04 → 27 :05 Non.
27 :05 → 27 :06 Ok.
27 :06 → 27 :07 C'est pas très logique.
27 :07 → 27 :09 Ouais, ça fait bizarre qu'on le remette ici.
27 :09 → 27 :10 Vas-y mais...
27 :10 → 27 :11 Ok.
27 :11 → 27 :14 Ce raisonnement se confirme par l'expérience.
27 :14 → 27 :16 Je vais juste mettre mon alinea au dessus.
27 :16 → 27 :18 Et aussi tu devrais le mettre là.
27 :18 → 27 :19 Ouais.
27 :19 → 27 :20 Non plutôt là.
27 :20 → 27 :21 Oui c'est ça.
27 :21 → 27 :23 Ah ok, je pensais que tu me le disais là.
27 :23 → 27 :24 Non.
27 :24 → 27 :25 Faut qu'on se bouge les...
27 :25 → 27 :26 Hein ?
27 :26 → 27 :27 Il nous reste une heure.
27 :27 → 27 :28 Mais on compte taper notre texte.
27 :28 → 27 :30 On a pas encore écrit le exercice.
27 :30 → 27 :31 Enfin notre question.
27 :31 → 27 :33 Et en plus il faut expliciter ça.
27 :33 → 27 :34 Oui.
27 :34 → 27 :35 T'inquiète.
27 :35 → 27 :39 Ce raisonnement se confirmait par l'expérience.
27 :39 → 27 :42 Ce raisonnement se confirmait...par l'expérience
27 :45 → 27 :47 Fait au même temps...
27 :49 → 27 :51 Avec le vase A.E.
27 :52 → 27 :55 Et avec le tuyau B.E.
28 :02 → 28 :03 Le vase 1 ?
28 :03 → 28 :05 Le vase A
28 :05 → 28 :06 Ah d'accord.
28 :06 → 28 :07 Le vase A pas le vase 1.
28 :07 → 28 :08 Non le vase 1.
28 :08 → 28 :09 D'accord.
28 :09 → 28 :10 Et avec le tuyau B
28 :10 → 28 :11 C'est bon.
28 :11 → 28 :22 Dans lesquels le vif argent s'arrêtait toujours au même niveau A.B.

28 :23 → 28 :24 D'accord.
 28 :29 → 28 :31 Signe presque certain.
 28 :32 → 28 :42 Signe presque certain que la vertu n'était pas à l'intérieur.
 28 :43 → 28 :44 N'était.
 28 :44 → 28 :45 Non mais la vertu.
 28 :45 → 28 :50 Oui bah écoute que la vertu n'était pas à l'intérieur.
 28 :50 → 28 :51 D'accord.
 28 :51 → 28 :52 La vertu.
 28 :54 → 28 :55 Oui.
 28 :56 → 28 :57 Point virgule.
 28 :57 → 28 :59 Car le vase A
 29 :03 → 29 :04 A
 29 :04 → 29 :06 Aurait eu plus de force.
 29 :06 → 29 :09 Aurait eu plus de force.
 29 :10 → 29 :11 Point virgule.
 29 :11 → 29 :14 Ce vase où il y avait plus de substance.
 29 :14 → 29 :18 Ce vase où il y avait plus de substance.
 29 :19 → 29 :21 Rarifié.
 29 :21 → 29 :22 Rarifié.
 29 :24 → 29 :25 Rarifié.
 29 :25 → 29 :26 Rarifié.
 29 :26 → 29 :27 Avec un E.
 29 :27 → 29 :28 Et attirante.
 29 :28 → 29 :29 Avec un E.
 29 :29 → 29 :30 Rarifié.
 29 :30 → 29 :33 C'est la substance qui est rarifiée.
 29 :33 → 29 :36 Et attirante que dans le petit espace B.
 29 :36 → 29 :42 Et attirante que dans le petit espace B.
 29 :42 → 29 :44 Et c'est fini pour toi.
 29 :48 → 29 :50 Alors là je mets juste...
 29 :50 → 29 :53 C'est lettre de Torricelli à Ricci.
 29 :53 → 29 :56 Ah oui si parce que ça tu peux dire si on met ça
 29 :57 → 29 :58 Torricelli à.
 29 :58 → 30 :00 Ah tu m'as dit à Ricci.
 30 :00 → 30 :01 A Ricci.
 30 :03 → 30 :04 Et l'année s'il te plaît ?
 30 :04 → 30 :05 Et l'année s'il te plaît ?
 30 :05 → 30 :08 11 juin 1644.
 30 :08 → 30 :09 11 juin 1644.
 30 :09 → 30 :10 Ouais.

30 :11 → 30 :16 Et après il faudra rajouter genre que le vif argent c'est le mercure qui là du coup

30 :16 → 30 :20 une masse volumique 13,6 fois plus importante que celle de l'autre.

30 :20 → 30 :21 C'est ça.

30 :21 → 30 :22 On met ça juste après la lettre.

30 :22 → 30 :23 Il reste...

30 :23 → 30 :25 Il reste celle de l'autre là.

30 :26 → 30 :28 Ah ça va elle est juste plus longue que celle de l'autre.

30 :29 → 30 :31 En vrai c'est kiff kiff.

30 :31 → 30 :32 Ouais.

30 :32 → 30 :34 En vrai c'est kiff kiff parce que regarde même là tu le vois.

30 :35 → 30 :36 Ah ouais.

30 :36 → 30 :38 C'est juste qu'elle est plus basse.

30 :38 → 30 :40 Et je pense que le vocabulaire utilisé est peut-être...

30 :40 → 30 :41 Non c'est parce qu'il y a le schéma.

30 :41 → 30 :43 C'est pour ça que ça a tout de suite ça passe.

30 :43 → 30 :45 Ça a tout de suite

30 :45 → 30 :47 Il faut le mettre le schéma.

30 :47 → 30 :48 Comment ?

30 :48 → 30 :49 Bien sûr.

30 :49 → 30 :50 Bon allez.

30 :50 → 30 :53 Tu peux lui dire que du coup il eut la réponse.

30 :54 → 30 :55 Alors...

30 :55 → 30 :58 Peut-être faire une petite phrase en disant qu'il y a quelqu'un qui lui a répondu tu vois.

31 :00 → 31 :04 Donc on peut mettre ci dessous.

31 :08 → 31 :12 La réponse de Ricci.

31 :13 → 31 :16 On mettrait du coup c'est quoi son nom complet ?

31 :16 → 31 :18 Il y a écrit normalement.

31 :19 → 31 :21 Michelangelo.

31 :21 → 31 :22 Michelangelo.

31 :22 → 31 :24 Ça devrait partir déjà.

31 :26 → 31 :28 On a dit qu'on se concentrait.

31 :28 → 31 :30 C'est Michelangelo.

31 :30 → 31 :33 Je regarde en fait la fin du truc là pour voir ce qu'on peut...

31 :33 → 31 :34 Oui merci.

31 :36 → 31 :38 Peut-être qu'on peut se répartir déjà comme ça non ?

31 :39 → 31 :43 En fait c'est que c'est plus rapide que je te le dicte parce que du coup sinon t'es obligée de regarder à chaque fois.

31 :43 → 31 :44 Oui c'est clair.

31 :44 → 31 :47 Michelangelo, Ricci, Savant, Italien.

31 :57 → 32 :02 Parce qu'on comprend bien dans ce texte là que le mercure il descend jusqu'à un certain niveau.

32 :02 → 32 :04 Dans le texte D.

32 :04 → 32 :06 Est-ce que c'est clair pour toi.

32 :07 → 32 :10 Que le mercure descend jusqu'à un certain niveau.

32 :19 → 32 :25 Ça veut dire qu'en gros au début il était plein complètement et après il ne devient plein que jusqu'à 75.

32 :30 → 32 :32 Non parce que tu vois ici ils le disent.

32 :32 → 32 :34 Sauf qu'en fait c'est ce qu'ils disent là mais version plus simple.

32 :34 → 32 :35 Oui c'est ça.

32 :48 → 32 :51 Juste écrire sa réponse et préciser par rapport au mercure.

32 :51 → 32 :53 En fait tout ça on n'a pas besoin de mettre.

32 :54 → 32 :57 Il me semble tout d'abord que vous pouvez exclure l'action de l'air.

32 :58 → 33 :00 Et ça aussi c'est peut-être pas nécessaire.

33 :01 → 33 :02 Euh ouais.

33 :04 → 33 :07 Donc on met juste en gros le gros paragraphe ici.

33 :07 → 33 :08 Oui voilà.

33 :08 → 33 :09 Ok.

33 :09 → 33 :26 Il me semble tout d'abord que nous pouvons exclure l'action de l'air pesant sur la surface.

33 :27 → 33 :34 L'action de l'air pesant sur la surface extérieure du vif argent.

33 :36 → 33 :55 Extérieur du vif argent qui se trouve dans la cuve en plaçant un couvercle de sorte que l'air

33 :55 → 34 :05 que l'air, de sorte que l'air au-dessus de la cuve, au-dessus de la cuve ne communiquerait plus avec lui.

34 :05 → 34 :08 Ne communiquerait plus avec lui.

34 :14 → 34 :15 Point virgule.

34 :16 → 34 :17 Avec lui.

34 :17 → 34 :18 Point virgule.

34 :19 → 34 :23 L'air pèserait alors non plus sur la surface.

34 :23 → 34 :27 L'air pèserait alors non plus sur la surface.

34 :27 → 34 :31 Pèserait alors non plus sur la surface.

34 :32 → 34 :33 Du vif argent.

34 :35 → 34 :39 Non plus sur la surface du vif argent.

34 :40 → 35 :03 Mais sur le couvercle et le vif argent se maintenant suspendu comme auparavant.

35 :03 → 35 :04 Point virgule.

35 :06 → 35 :09 On ne peut plus attribuer l'effet du poids de l'air.

35 :11 → 35 :14 On ne peut plus attribuer l'effet du poids de l'air.

- 35 :16 → 35 :18 L'effet au poids de l'air, pardon.
35 :18 → 35 :19 Désolée.
35 :22 → 35 :23 Point.
35 :23 → 35 :24 Enfin.
35 :25 → 35 :27 Deuxièmement, virgule.
35 :27 → 35 :28 À la ligne ?
35 :28 → 35 :29 Non.
35 :29 → 35 :30 D'accord.
35 :30 → 35 :31 Deuxièmement, virgule.
35 :32 → 35 :34 Qu'on prenne une seringue.
35 :35 → 35 :36 Qu'on prenne.
35 :36 → 35 :37 Qu'on prenne.
35 :38 → 35 :40 Qu'on prenne une seringue.
35 :40 → 35 :41 Et que son piston.
35 :42 → 35 :43 Et que son piston.
35 :45 → 35 :47 Y soit entièrement enfoncé.
35 :48 → 35 :49 Et que son piston.
35 :49 → 35 :50 Y soit entièrement.
35 :50 → 35 :51 Y soit ?
35 :51 → 35 :52 Non, y soit.
35 :52 → 35 :53 Ah, ici.
35 :53 → 35 :54 Y soit.
35 :54 → 35 :56 Y soit entièrement enfoncé.
35 :57 → 35 :58 Virgule.
35 :59 → 36 :01 De sorte qu'il chasse.
36 :01 → 36 :02 De sorte.
36 :04 → 36 :05 Qu'il chasse.
36 :08 → 36 :09 Qu'il chasse.
36 :11 → 36 :12 Tous les autres corps.
36 :16 → 36 :18 Par son volume, virgule.
36 :19 → 36 :21 Puis bouchons le trou à l'extrémité.
36 :22 → 36 :23 Puis bouchons.
36 :24 → 36 :25 Bouchons, bouchons.
36 :26 → 36 :27 Le fait de boucher.
36 :28 → 36 :29 Donc avec un S.
36 :29 → 36 :30 Merci.
36 :30 → 36 :31 Bouchons.
36 :31 → 36 :32 S.
36 :32 → 36 :33 Merci.
36 :34 → 36 :36 Le trou à l'extrémité.

36 :36 → 36 :37 Virgule.
36 :40 → 36 :41 Virgule.
36 :41 → 36 :42 Et retirons.
36 :42 → 36 :43 Avec un S.
36 :44 → 36 :45 De force le piston.
36 :48 → 36 :49 Retirons de force le piston.
36 :50 → 36 :51 Virgule.
36 :51 → 36 :53 On ressent une grande résistance.
36 :53 → 36 :55 On ressent une grande résistance.
36 :57 → 36 :58 Virgule.
36 :58 → 37 :00 Et cela ne se produit pas seulement.
37 :00 → 37 :02 Et cela ne se produit pas seulement.
37 :03 → 37 :04 En tenant la seringue.
37 :05 → 37 :06 En tenant la seringue.
37 :07 → 37 :08 Vers le bas.
37 :09 → 37 :10 Virgule.
37 :10 → 37 :11 En tenant la seringue.
37 :12 → 37 :13 Vers le bas.
37 :13 → 37 :14 Virgule.
37 :15 → 37 :16 Et le piston en haut.
37 :20 → 37 :21 Le piston en haut.
37 :22 → 37 :23 Le piston en haut.
37 :23 → 37 :24 Virgule.
37 :25 → 37 :27 Sur la poignée duquel l'air pèse.
37 :27 → 37 :28 Sur la poignée.
37 :29 → 37 :30 Poignée.
37 :30 → 37 :31 Duquel.
37 :32 → 37 :33 Duquel, duquel, duquel.
37 :33 → 37 :34 C'est attaché.
37 :34 → 37 :35 Duquel.
37 :36 → 37 :37 L'air pèse.
37 :39 → 37 :40 Virgule.
37 :40 → 37 :43 Mais cela se produit dans toutes les directions.
37 :52 → 37 :53 Point virgule.
37 :55 → 37 :56 Et pourtant.
37 :56 → 37 :57 Virgule.
37 :59 → 38 :00 Il ne semble pas.
38 :01 → 38 :02 Il ne semble pas.
38 :05 → 38 :06 Qu'on puisse facilement.
38 :07 → 38 :08 Qu'on puisse facilement.

- 38 :09 → 38 :10 Comprendre.
38 :10 → 38 :11 Dans ces cas.
38 :12 → 38 :13 Comprendre.
38 :13 → 38 :14 Dans ces cas.
38 :15 → 38 :16 En quoi.
38 :18 → 38 :19 Le poids de l'air.
38 :19 → 38 :20 Il y est pour quelque chose.
38 :45 → 38 :46 Je vais indiquer du coup.
38 :48 → 38 :49 Oui.
38 :49 → 38 :50 Merci.
38 :50 → 38 :51 Si ça n'a pas de bouchon.
38 :51 → 38 :52 C'est ça.
38 :54 → 38 :55 Ah donc.
38 :55 → 38 :56 Lettre.
38 :56 → 38 :57 De.
38 :57 → 38 :58 Ricci.
38 :58 → 38 :59 a Torricelli.
38 :59 → 39 :00 18 juin 44.
39 :00 → 39 :01 Ricci.
39 :02 → 39 :03 Merci.
39 :04 → 39 :05 18 juin 44.
39 :05 → 39 :06 Ritchie.
39 :06 → 39 :07 Ok.
39 :15 → 39 :16 C'est là que ça marche.
39 :16 → 39 :17 Alors.
39 :18 → 39 :21 On va indiquer du coup, en bas de la page.
39 :23 → 39 :24 Au second on va l'indiquer ici.
39 :25 → 39 :26 Le vif argent.
39 :26 → 39 :27 Ouais.
39 :27 → 39 :28 Alors.
39 :28 → 39 :30 Est aujourd'hui appelé mercure.
39 :30 → 39 :32 Je vais faire une note vocabulaire.
39 :44 → 39 :48 Alors, nom donné au mercure...
39 :51 → 39 :53 Attends, je vais même te dire...
39 :56 → 39 :59 C'est ancienne appellation du mercure liquide.
39 :59 → 40 :01 13 fois plus dense que l'eau.
40 :01 → 40 :03 Ancienne appellation...
40 :05 → 40 :07 Du mercure liquide...
40 :08 → 40 :12 En même temps, ça avait la couleur argent, donc c'était pas complètement illogique.

40 :13 → 40 :17 Et il y a marqué, entre parenthèses, 13,6 fois plus dense que l'eau.

40 :25 → 40 :27 Que l'eau.

40 :30 → 40 :32 Pourquoi t'as mis 16 ?

40 :32 → 40 :34 Euh, non, c'est...

40 :34 → 40 :41 Parce que du coup, j'avais mis 13, et je pense qu'en voulant effacer, j'ai appuyé là, et c'est devenu 13.

40 :41 → 40 :42 Bref.

40 :43 → 40 :44 Ok.

40 :44 → 40 :46 Et donc là, on passe aux questions.

40 :46 → 40 :48 Et il faut juste rajouter l'image.

40 :48 → 40 :49 Oui.

40 :49 → 40 :52 C'est très bien, parce qu'en fait, avec l'image, ça fera descendre un petit peu tout ça,

40 :52 → 40 :55 et donc c'est-à-dire que sur la première page, on n'aurait que des documents.

40 :55 → 40 :57 Et ça, j'aime.

40 :57 → 40 :59 Donc ensuite, on a...

41 :00 → 41 :01 Questions.

41 :01 → 41 :03 Questions préliminaires.

41 :03 → 41 :06 C'est ça, questions préliminaires.

41 :07 → 41 :08 Ok.

41 :08 → 41 :09 Donc on a...

41 :09 → 41 :16 Alors, du point de vue des unités, quelle est la difficulté pour que les scientifiques puissent échanger sur leurs travaux ?

41 :17 → 41 :18 Ensuite...

41 :18 → 41 :19 Euh...

41 :19 → 41 :21 Tac, tac, tac.

41 :21 → 41 :23 Je vais rajouter les questions.

41 :41 → 41 :42 Ah oui, zut, j'ai...

41 :42 → 41 :44 Je viens d'y penser, mais...

41 :53 → 41 :54 Euh...

41 :54 → 41 :56 Je viens d'y penser, mais en fait, il y a aussi les compétences à indiquer.

41 :56 → 41 :58 Donc en fait, ça peut tomber comme ça.

42 :00 → 42 :04 En fait, les compétences, ça va quand même genre prendre ça comme place.

42 :04 → 42 :09 Donc soit on réduira du coup la taille du texte, soit on réduira l'espace, soit...

42 :09 → 42 :11 Soit ça va dépasser.

42 :11 → 42 :12 Voilà.

42 :12 → 42 :13 Et je pense que ça va dépasser.

42 :13 → 42 :15 Du coup, on prend cette photo-là, par exemple ?

42 :15 → 42 :16 Par exemple.

42 :16 → 42 :17 Ou euh...

42 :17 → 42 :18 Dans le texte, c'est quoi ?

42 :18 → 42 :22 Sinon, tu peux la prendre en photo et me l'envoyer, comme ça, je la prends en direct et je la prends en photo.

42 :22 → 42 :24 Tu veux que je te la scanne ou juste je la prends en photo ?

42 :24 → 42 :26 Juste tu la prends en photo.

42 :26 → 42 :28 Remarque, ouais, scanne-la.

42 :28 → 42 :30 Il n'y aura pas l'espèce de fond...

42 :31 → 42 :33 Il n'y aura pas l'espèce de fond jaune.

42 :53 → 42 :56 Ah oui, parce qu'il faut aussi qu'on introduise en fait la loi.

42 :57 → 43 :00 Bah la loi, on n'a pas dit qu'on l'avait vue avant dans le cours.

43 :22 → 43 :23 Vas-y, continue en attendant.

43 :23 → 43 :25 Parce que là, ça marche.

43 :54 → 43 :55 Euh...

43 :55 → 43 :59 Du coup, Torricelli et Ricci, il faut quand même qu'il y ait un intérêt d'avoir mis Ricci.

44 :00 → 44 :04 Parce que du coup, tu vois, Ricci, il contredit ce qu'a dit Torricelli.

44 :12 → 44 :13 Donc il faut qu'il y ait un...

44 :13 → 44 :15 Comme je le disais, il faudrait qu'il y ait un intérêt.

44 :17 → 44 :20 Alors, nous aussi, récemment, on se confirme par expérience, en fait.

44 :21 → 44 :22 Mona.

44 :23 → 44 :24 Mona.

44 :25 → 44 :26 Afi.

44 :27 → 44 :28 Arobase.

44 :30 → 44 :31 Hotmail.fr.

44 :35 → 44 :36 C'est ça.

44 :36 → 44 :37 Nickel.

44 :37 → 44 :41 Tu sais, je me disais un jour, tous ceux qui avaient hotmail sont morts.

44 :43 → 44 :44 Et j'ai hotmail aussi.

44 :45 → 44 :46 Comment ?

44 :46 → 44 :47 J'ai hotmail aussi.

44 :47 → 44 :48 C'est vrai ?

44 :48 → 44 :49 J'ai hotmail aussi.

44 :49 → 44 :50 C'est vrai ?

44 :50 → 44 :51 Mais pas fr ?

44 :52 → 44 :53 C'est .fr.

44 :53 → 44 :54 C'est vrai ?
 44 :54 → 44 :55 C'est les vieux, ça.
 44 :55 → 44 :57 Mais justement, c'est ça, c'est vrai que tu l'as.
 44 :57 → 44 :58 Si, si, je l'ai.
 44 :58 → 45 :00 C'est ...
 45 :02 → 45 :03 C'est mon adresse perso.
 45 :03 → 45 :04 Ouais, ouais.
 45 :04 → 45 :05 Mais...
 45 :05 → 45 :06 woouuah
 45 :06 → 45 :07 Ouais je sais.
 45 :07 → 45 :08 Quand j'avais fait mon mail...
 45 :08 → 45 :09 C'était les premières.
 45 :09 → 45 :11 Moi, quand j'avais fait mon mail, j'étais en 6ème.
 45 :12 → 45 :13 Et j'étais en...
 45 :14 → 45 :15 Enfin, j'avais 12 ans...
 45 :16 → 45 :17 C'est ma tante qui me l'avait fait.
 45 :17 → 45 :19 Ah, c'était dans les vidéos des années 2000, en fait.
 45 :19 → 45 :20 C'est ça ?
 45 :21 → 45 :23 Parce que du coup, ça veut dire...
 45 :27 → 45 :28 12 ans, en fait.
 45 :28 → 45 :31 Dans 12 ans, du coup, ça fait 2005.
 45 :32 → 45 :33 Waouh !
 45 :34 → 45 :36 Et ça me paraît tellement pas loin.
 45 :37 → 45 :38 Mais c'est très très loin, en vrai.
 45 :38 → 45 :39 Non, étonnement.
 45 :39 → 45 :41 Elle a plusieurs années, quand même.
 45 :42 → 45 :43 Bon, vas-y, viens.
 45 :44 → 45 :45 Il nous reste 40 minutes.
 45 :45 → 45 :46 Ouais, c'est vrai.
 45 :47 → 45 :48 Alors, donc...
 45 :48 → 45 :49 Donc, oui, j'ai des idées.
 45 :49 → 45 :52 Donc là, il faudrait qu'on ait un intérêt à l'avoir mis Ricci.
 45 :53 → 45 :54 Ouais.
 45 :54 → 45 :56 Alors, je m'en rappelle même plus ce qu'il dit dans son truc.
 45 :57 → 46 :00 Alors, en gros, dans le premier,
 46 :00 → 46 :02 t'as Torricelli qui dit que...
 46 :02 → 46 :03 Non, lui, je m'en rappelle.
 46 :03 → 46 :05 C'est le poids de l'air qui joue sur ça.
 46 :05 → 46 :06 C'est ça.
 46 :06 → 46 :09 Et Ricci, il dit que si on met un couvercle,

46 :09 → 46 :11 le poids de l'air, il joue plus dessus.
46 :12 → 46 :14 En se basant sur la loi de l'hydrostatique,
46 :14 → 46 :16 est-ce que l'air...
46 :16 → 46 :17 Est-ce qu'il a raison ?
46 :19 → 46 :20 Est-ce que le poids de l'air intervient ?
46 :20 → 46 :21 Ouais.
46 :21 → 46 :22 Parce qu'en soi, ici...
46 :22 → 46 :24 Mais quel intérêt, du coup, de faire l'activité, tu vois ?
46 :26 → 46 :27 Quel intérêt de faire l'activité,
46 :27 → 46 :29 parce qu'ils ont déjà les lois et tout avant ?
46 :31 → 46 :33 Alors, si on considère, tu vois,
46 :33 → 46 :36 que ça, c'est un truc qui fait découvrir la loi,
46 :36 → 46 :37 on peut mettre, ensuite,
46 :37 → 46 :39 qu'en gros, telle loi a été découverte,
46 :39 → 46 :41 en gros, en 1651, par exemple.
46 :41 → 46 :42 Genre, ici ?
46 :42 → 46 :43 En vous servant...
46 :43 → 46 :45 Ouais, par exemple, je la mets à la suite du corpus,
46 :45 → 46 :47 et on dit, à partir...
46 :47 → 46 :51 Donc, en vous servant de la loi présentée
46 :51 → 46 :53 et des informations indiquées
46 :53 → 46 :56 dans chacune des lettres que nous avons utilisées ici,
46 :56 → 46 :59 lequel d'entre eux a raison.
46 :59 → 47 :00 Ouais.
47 :00 → 47 :01 Ouais.
47 :01 → 47 :02 Ça te va, comme ça ?
47 :02 → 47 :03 C'est un peu...
47 :03 → 47 :04 C'est un peu...
47 :04 → 47 :05 Ouais.
47 :05 → 47 :06 Ouais ?
47 :06 → 47 :07 Ça te va, comme ça ?
47 :07 → 47 :09 C'est un document et ça fait un peu introductif.
47 :09 → 47 :11 Parce que, si t'as fait tout le cours avant,
47 :11 → 47 :13 t'as deux activités qui suivent.
47 :13 → 47 :15 Tu sais, y a pas...
47 :15 → 47 :17 Moi, j'aurais pas fait une première activité,
47 :17 → 47 :19 j'aurais juste introduit la loi, tu vois ?
47 :19 → 47 :21 Genre, par exemple, tu parles d'autre chose,
47 :21 → 47 :22 t'introduis la loi, et après...
47 :22 → 47 :23 Ouais, mais généralement, ils aiment pas

47 :23 → 47 :24 quand tu fais ça dans ce sens-là,
47 :24 → 47 :25 tu donnes pas la loi,
47 :25 → 47 :26 et ensuite, tu fais l'activité.
47 :26 → 47 :28 Il vaut mieux que tu fasses l'activité...
47 :28 → 47 :29 Non, non, mais ça fait bien.
47 :29 → 47 :31 Donc, rajouter et dire qu'elle a été...
47 :31 → 47 :33 Elle a été décrite par Pascal, normalement.
47 :34 → 47 :35 Pascal, sûr.
47 :35 → 47 :37 C'est Pascal, normalement.
47 :37 → 47 :38 Je vais vérifier ça.
47 :45 → 47 :47 Pour l'instant, je vais mettre dans un encadré.
47 :47 → 47 :49 En tout cas, je vais garder mon encadré.
47 :54 → 47 :55 C'est Pascal.
47 :55 → 47 :56 OK.
47 :56 → 47 :58 Tu sais quoi que je vais mettre à la suite du corpus, en fait ?
47 :58 → 47 :59 Pas mal, c'est mieux.
47 :59 → 48 :00 Donc...
48 :01 → 48 :02 Ce n'est qu'en...
48 :05 → 48 :06 Crotte de bique...
48 :09 → 48 :10 Ce n'est...
48 :10 → 48 :11 Qu'en...
48 :13 → 48 :15 Oui, ce n'est que vers...
48 :15 → 48 :16 Regarde.
48 :16 → 48 :17 Principe de Pascal,
48 :17 → 48 :20 dans un liquide en équilibre de masse volumique uniforme,
48 :20 → 48 :22 la pression est la même en tous points du liquide,
48 :22 → 48 :24 et aussi dans le cadre de l'activité.
48 :24 → 48 :26 La pression est la même en tous points du liquide,
48 :26 → 48 :29 et aussi longtemps que ces points sont à la même profondeur.
48 :29 → 48 :30 OK.
48 :30 → 48 :32 Alors, ça, c'est le principe...
48 :32 → 48 :33 Le théorème ?
48 :33 → 48 :34 Principe de Pascal,
48 :34 → 48 :36 qui, du coup, aborde ça.
48 :36 → 48 :37 D'accord.
48 :37 → 48 :39 Donc, ce n'est que vers 1651
48 :39 → 48 :43 que Pascal énonce le principe suivant.
48 :43 → 48 :45 Tu peux me dire quel principe c'est ?
48 :45 → 48 :46 Attends...
48 :49 → 48 :51 J'essaie de regarder, mais...

48 :51 → 48 :53 En fait, quand tu regardes la loi en elle-même,
48 :53 → 48 :54 tu trouves rien
48 :54 → 48 :55 même sur Wikipédia.
48 :55 → 48 :56 OK.
48 :56 → 48 :58 Donc, ça ne fait pas beaucoup de doc au final ?
48 :58 → 49 :00 En vrai, comment ça ?
49 :00 → 49 :02 Ça ne fait pas beaucoup de documents, au final ?
49 :02 → 49 :03 Ah, non, non, du tout.
49 :03 → 49 :04 Je t'assure, vraiment.
49 :04 → 49 :05 Enfin, ce n'est pas des cinquièmes,
49 :05 → 49 :06 c'est des premières.
49 :06 → 49 :08 Oui, oui, ils ont 16, 17 ans.
49 :08 → 49 :12 Dans un liquide en équilibre de masse volumique uniforme...
49 :12 → 49 :14 Dans un liquide...
49 :14 → 49 :15 Dans un liquide...
49 :15 → 49 :19 En équilibre de masse volumique uniforme...
49 :20 → 49 :22 Virgule.
49 :22 → 49 :26 La pression est la même en tous points du liquide.
49 :26 → 49 :28 En tous points du liquide, pardon.
49 :28 → 49 :32 La pression est la même en tous points du liquide.
49 :33 → 49 :36 Elle est la même en tous points du liquide.
49 :37 → 49 :46 Et cela aussi longtemps que ses points sont à la même profondeur.
49 :50 → 49 :52 Et là, tu peux dire, genre,
49 :52 → 49 :56 qui en découlera la loi suivante de l'hydrostatique ?
49 :56 → 49 :58 Ceci permettra de...
50 :03 → 50 :08 La loi de l'hydrostatique découlera de ce principe.
50 :08 → 50 :10 De ce principe.
50 :10 → 50 :11 Oui, c'est bien ça.
50 :11 → 50 :12 La loi de l'hydrostatique découlera.
50 :12 → 50 :14 La loi de l'hydrostatique, et là...
50 :19 → 50 :26 La loi de l'hydrostatique découlera de ce principe.
50 :26 → 50 :28 Et du coup...
50 :28 → 50 :31 P_2 moins P_1 qui est égal à...
50 :31 → 50 :34 Mais le truc, c'est qu'on ne sait jamais si...
50 :34 → 50 :35 On n'a pas de point...
50 :35 → 50 :38 En plus, on n'a pas indiqué les points 1, 2...
50 :38 → 50 :41 Tu dis pour deux points...
50 :41 → 50 :43 Deux états distincts.
50 :43 → 50 :44 Ou...
50 :45 → 50 :47 Ou...

- 50 :47 → 50 :48 Là, ils disent P2, P1.
- 50 :48 → 50 :50 P2, P1. Dans le B.O.
- 50 :50 → 50 :51 Ok, bon, vas-y.
- 50 :51 → 50 :54 P2, P1 égale...
- 50 :56 → 50 :58 Rho g entre parenthèses...
- 50 :58 → 51 :00 Ça fait toujours rire.
- 51 :00 → 51 :01 Comme une teubé, oui.
- 51 :01 → 51 :05 Rho g H2 moins H1.
- 51 :05 → 51 :06 Pourquoi tu as mis R ?
- 51 :06 → 51 :07 Pourquoi ?
- 51 :07 → 51 :10 Parce qu'après, je voulais changer en symbole pour mettre le rho.
- 51 :10 → 51 :11 T'inquiète.
- 51 :11 → 51 :14 Rho g parenthèses Z1 et Z2.
- 51 :14 → 51 :16 Z1 moins Z2, pardon.
- 51 :16 → 51 :17 Ok.
- 51 :17 → 51 :19 Z1 moins Z2.
- 51 :19 → 51 :23 Et tu précises peut-être avec P, la pression...
- 51 :23 → 51 :24 Et...
- 51 :24 → 51 :25 Non, bien sûr.
- 51 :25 → 51 :26 Il est ça ?
- 51 :26 → 51 :27 Non, je vais l'indiquer.
- 51 :27 → 51 :30 Alors, donc, on a le symbole...
- 51 :30 → 51 :32 Voilà, tu vois, il y a un beau rho.
- 51 :32 → 51 :33 Un beau rho.
- 51 :33 → 51 :34 Je suis fière de toi.
- 51 :34 → 51 :35 Merci.
- 51 :35 → 51 :37 C'est vrai, mais ce n'était pas à la fin.
- 51 :37 → 51 :40 C'est bon, c'est bon...
- 51 :40 → 51 :43 Je déteste le B.O.
- 51 :43 → 51 :46 Je déteste le B.O.
- 51 :46 → 51 :49 Peut-être que c'est aussi, en fait...
- 51 :49 → 51 :50 Non ?
- 51 :50 → 51 :51 Peut-être tellement...
- 51 :51 → 51 :54 Je veux dire, c'est peut-être aussi le fait que j'ai mes règles qui fait que je me sens pas bien.
- 51 :54 → 51 :55 C'est fort probable.
- 51 :55 → 51 :56 C'est possible.
- 51 :56 → 51 :59 Sauf qu'en fait, là, généralement, à la fin, je me sens bien, tu vois.
- 51 :59 → 52 :02 Oui, mais il suffit qu'aujourd'hui, ce soit différent, tu sais quoi.
- 52 :02 → 52 :03 Oui, c'est ça, ça se trouve.

- 52 :03 → 52 :04 C'est pour ça...
- 52 :04 → 52 :07 Je préfère quand même faire le test, je ne sais jamais, mais...
- 52 :07 → 52 :09 Mais en vrai, je pense que ça va.
- 52 :09 → 52 :12 Avec P, deux...
- 52 :12 → 52 :13 Et...
- 52 :14 → 52 :16 Oui, avec P.
- 52 :17 → 52 :18 La pression.
- 52 :18 → 52 :19 Oui.
- 52 :19 → 52 :20 La pression.
- 52 :24 → 52 :27 La pression, Pascal.
- 52 :27 → 52 :28 Voilà.
- 52 :28 → 52 :32 Et Z, la profondeur.
- 52 :32 → 52 :40 La profondeur, c'est profondeur ou c'est hauteur ?
- 52 :40 → 52 :43 Non, c'est profondeur normalement.
- 52 :43 → 52 :44 Attends.
- 52 :44 → 52 :46 Peut-être altitude, comme ça, ça marche pour les deux.
- 52 :46 → 52 :48 Que ce soit machin...
- 52 :48 → 52 :50 Oui, oui, si tu veux.
- 52 :50 → 52 :51 OK.
- 53 :01 → 53 :04 Bon, alors, question préliminaire, blablabla.
- 53 :04 → 53 :07 Donc, on avait dit, pour la question préliminaire, on avait...
- 53 :07 → 53 :09 Alors, en se basant sur...
- 53 :09 → 53 :10 En conservant des documents.
- 53 :10 → 53 :11 On peut juste indiquer les documents.
- 53 :11 → 53 :13 Lequel du deux raisons.
- 53 :13 → 53 :14 Le...
- 53 :15 → 53 :16 Le...
- 53 :17 → 53 :20 De Torricelli, lequel...
- 53 :20 → 53 :22 Oui, lequel a raison.
- 53 :22 → 53 :23 Lequel a raison.
- 53 :25 → 53 :28 On va préciser, mais avant ça, plus explicitement.
- 53 :28 → 53 :31 En vous servant de la loi de l'hydrostatique.
- 53 :31 → 53 :33 En vous servant de la loi de l'hydrostatique.
- 53 :33 → 53 :36 Quelle théorie est valable à l'heure actuelle ?
- 53 :36 → 53 :38 Parce que le truc de qui a raison, en soi...
- 53 :38 → 53 :40 Non, ça marche pas, tu peux pas dire ça.
- 53 :40 → 53 :42 Ils avaient pas tort, en soi.
- 53 :42 → 53 :44 En vous servant de la loi...
- 53 :45 → 53 :48 Quelle théorie est vérifiée à l'heure actuelle du hydrostatique ?
- 53 :51 → 53 :53 Alors, en vous servant de...

53 :56 → 53 :57 Non, c'était bien.

53 :57 → 53 :58 Non, c'est ce que j'allais dire.

54 :02 → 54 :03 De...

54 :04 → 54 :07 Parmi les théories présentées par Torricelli et Ricci,

54 :07 → 54 :11 laquelle est vérifiée par la loi de l'hydrostatique ?

54 :11 → 54 :13 Comme ça on parle pas de vrai-faux, tu vois.

54 :15 → 54 :17 La densité de l'air...

54 :20 → 54 :21 Attends.

54 :24 → 54 :28 Plutôt entre la théorie de Torricelli et celle de Ricci,

54 :28 → 54 :29 laquelle des deux...

54 :32 → 54 :33 Les théories...

54 :33 → 54 :34 Non.

54 :49 → 54 :52 Laquelle vérifie la loi de l'hydrostatique ?

54 :52 → 54 :53 Elle vérifie...

54 :54 → 54 :55 Euh, ouais.

54 :56 → 54 :58 Entre les deux, non, laquelle vérifie ?

54 :59 → 55 :00 Laquelle...

55 :01 → 55 :02 Laquelle confirme ?

55 :03 → 55 :04 Euh, soutient ?

55 :05 → 55 :07 Laquelle est soutenue par la loi de l'hydrostatique ?

55 :07 → 55 :08 Ouais, c'est bon.

55 :08 → 55 :10 Laquelle est soutenue par la loi de l'hydrostatique ?

55 :10 → 55 :12 Ça, c'est du travail d'écriture.

55 :14 → 55 :15 On est un peu à la bour.

55 :15 → 55 :16 Quoi ?

55 :16 → 55 :17 On est un peu à la bour.

55 :17 → 55 :18 Non.

55 :18 → 55 :22 Si, bah, les autres ont fini, c'est la demi-heure qu'on a pris pour écrire les textes.

55 :22 → 55 :23 Je vois pas de quoi tu parles.

55 :23 → 55 :25 Euh, laquelle est vérifiée ?

55 :26 → 55 :27 Statique.

55 :27 → 55 :31 Ok, donc, pour les questions préliminaires, je pense que c'est bon.

55 :31 → 55 :32 C'est bon.

55 :33 → 55 :34 Ensuite...

55 :35 → 55 :38 Et ensuite, pour les questions suivantes, on peut reprendre celles-là, en fait.

55 :38 → 55 :39 Ouais.

55 :40 → 55 :41 Je suis d'accord.

55 :41 → 55 :42 Euh...

55 :43 → 55 :45 Donc, on a questions préliminaires et applications.

55 :45 → 55 :46 Non ?

55 :46 → 55 :49 Moi, j'aurais mis partie documentaire ou...

55 :49 → 55 :52 Du coup, c'est plutôt ça la partie documentaire, en fait.

55 :54 → 55 :55 Question pratique.

55 :57 → 55 :58 Application.

55 :58 → 55 :59 C'est ce que je viens de te dire, ouais.

55 :59 → 56 :00 Application.

56 :02 → 56 :03 Euh...

56 :03 → 56 :04 Ouais.

56 :04 → 56 :05 On pouvait dire ça comme ça.

56 :05 → 56 :06 Bon.

56 :06 → 56 :07 Ensuite, on y est, du coup.

56 :10 → 56 :12 Donc, on a fait trois.

56 :14 → 56 :19 C'était expliquer pourquoi le mercure du tube ne coule pas totalement dans le réservoir.

56 :19 → 56 :20 Exactement.

56 :32 → 56 :33 Là, il y a ce que c'est.

56 :33 → 56 :34 Là, il y a ce que c'est.

56 :36 → 56 :37 Qu'est-ce qu'il se passe ?

56 :42 → 56 :45 Attends, il faut préciser que c'est dans l'expérience de Torricelli.

56 :45 → 56 :46 Ah, je sais !

56 :46 → 56 :50 Alors, là, on va mettre, pas application, mais on va mettre interprétation.

56 :51 → 56 :52 De Torricelli.

56 :52 → 56 :55 Interprétation de l'expérience de Torricelli.

56 :55 → 56 :57 Ouais, pour dire que Ricci...

56 :57 → 56 :58 On s'en fout.

56 :58 → 56 :59 On l'envoie à la poubelle.

56 :59 → 57 :00 C'est ça.

57 :00 → 57 :01 Alors, non.

57 :01 → 57 :02 On va mettre là, du coup, entre gnagna.

57 :02 → 57 :03 Justifier.

57 :03 → 57 :04 Parce que sinon, ce serait facile.

57 :04 → 57 :05 Ils vont regarder en dessous et ils vont dire, bah, Torricelli, là.

57 :07 → 57 :09 Bah, en plus, c'est faux.

57 :09 → 57 :11 Parce que c'est Ricci.

57 :11 → 57 :14 Parce que Ricci, il dit qu'en gros, le poids de l'air, on s'en fout.

57 :15 → 57 :16 Bah, en fait, pas vraiment.

57 :16 → 57 :20 Parce que si tu veux la pression, c'est une manifestation, effectivement, du poids.

57 :21 → 57 :24 Du poids appliqué par chacune des particules d'air.

57 :24 → 57 :25 Oui, oui.

57 :25 → 57 :29 Donc, qui maintient le niveau de mercure.

57 :30 → 57 :31 Et nous, c'est combien ?

57 :31 → 57 :34 C'est une 74,6 mètres, c'est ça ?

57 :34 → 57 :36 Neuf centimètres.

57 :36 → 57 :37 Neuf centimètres.

57 :37 → 57 :38 Neuf centimètres.

57 :40 → 57 :41 Centimètres.

57 :41 → 57 :42 D'ailleurs, je l'avais mis au centimètre.

57 :42 → 57 :45 Maintenant, c'est donc centimètres, centimètres.

57 :45 → 57 :46 C'est parfait.

57 :46 → 57 :48 Alors, donc, très bien.

57 :48 → 57 :50 Et en fait, la réponse c'est.

57 :51 → 57 :57 Car la surface du mercure est soumise à la force de la pression de l'air.

57 :58 → 58 :01 Il est soumis à la pression de l'air, donc c'est pour ça que ça ne coule pas plus.

58 :01 → 58 :05 Après, question suivante.

58 :05 → 58 :09 Expliquez quelle est la force qui permet de pomper l'eau des mines.

58 :09 → 58 :12 Mais ça, on n'en a pas parlé, nous, de l'eau des mines.

58 :12 → 58 :15 J'ai parlé juste au-dessus, en fait, en disant que...

58 :15 → 58 :16 On en parlait gnagnagna

58 :16 → 58 :18 Minière européenne.

58 :19 → 58 :21 Quelle est la force...

58 :21 → 58 :23 Procédé d'aspiration, ils disent.

58 :23 → 58 :25 Mais ça, on l'avait mis dans l'introduction, je crois de Galilée

58 :25 → 58 :26 Oui, c'est ça.

58 :27 → 58 :30 C'est le procédé d'aspiration...

58 :32 → 58 :34 ...qui permet de pomper.

58 :35 → 58 :41 Je n'aurais pas mis la force parce que, regarde là, dans la réponse, ce qu'ils nous proposent, c'est que c'est un procédé d'aspiration.

58 :41 → 58 :45 J'aurais plutôt expliqué le procédé qui permet de pomper.

58 :46 → 58 :48 C'est le fait d'aspirer, tu vois.

58 :51 → 58 :52 C'est quel...

58 :54 → 58 :55 Q-U-E-L.

58 :56 → 58 :58 C'est quel procédé...

59 :00 → 59 :01 Sans le deux L.

59 :01 → 59 :02 C'est un procédé.

59 :02 → 59 :03 Oui, t'as raison, merci.

59 :04 → 59 :08 Expliquez quel est le procédé qui permet de pomper l'eau...

59 :09 → 59 :10 ...des mines.

59 :10 → 59 :11 ...des mines.

59 :21 → 59 :25 Sachant que l'on ne peut jamais pomper l'eau à une hauteur supérieure...

59 :25 → 59 :26 Nous, on a mis 12 mètres.

59 :28 → 59 :29 T'es trop intelligente.

59 :34 → 59 :36 Je me laisse complètement aller, là.

59 :37 → 59 :40 À une hauteur supérieure à 12 mètres.

59 :49 → 59 :50 En déduire...

59 :51 → 59 :52 ...la valeur...

59 :53 → 59 :55 Surtout la différence de pression.

01 :00 :00 → 01 :00 :02 Ça marche pour moi, la différence de pression.

01 :00 :03 → 01 :00 :07 Parce qu'en soi, là, tu vois, ils n'explicitent pas forcément la pression de l'atmosphère.

01 :00 :07 → 01 :00 :09 Donc, j'ai envie plutôt d'en déduire la différence de...

01 :00 :09 → 01 :00 :10 La variation de pression.

01 :00 :11 → 01 :00 :12 La différence de pression.

01 :00 :17 → 01 :00 :20 Qu'établit la colonne d'air de l'atmosphère.

01 :00 :20 → 01 :00 :22 Donc, entre la colonne d'air et l'atmosphère.

01 :00 :28 → 01 :00 :29 L'air et l'atmosphère.

01 :00 :30 → 01 :00 :32 Moi, je ferais de ma vie qu'on ne leur donne pas g , ni ρ de l'eau.

01 :00 :32 → 01 :00 :35 Parce que ρ de l'eau, ils sont censés le connaître depuis le 5ème.

01 :00 :36 → 01 :00 :38 Et g , ils la connaissent aussi.

01 :00 :38 → 01 :00 :40 En seconde aussi, ils sont censés la connaître.

01 :00 :42 → 01 :00 :45 Entre la colonne d'air et l'atmosphère.

01 :00 :50 → 01 :00 :51 Ok.

01 :00 :54 → 01 :00 :55 Juste un truc...

01 :00 :56 → 01 :00 :57 Ok, donc d'accord.

01 :00 :59 → 01 :01 :01 Faire le même calcul avec la colonne d'air.

01 :01 :16 → 01 :01 :17 Juste un truc.

01 :01 :17 → 01 :01 :20 Dans la question 5, je trouve que ce n'est pas très clair.

01 :01 :20 → 01 :01 :22 Dans le sens qu'on ne sait pas que c'est avec l'eau qu'il faut le faire.

01 :01 :25 → 01 :01 :28 Alors, sachant que l'on ne peut jamais pomper de l'eau à une hauteur,

01 :01 :28 → 01 :01 :34 bah ça on précise, on précise en déduire la variation de la pression entre la colonne d'air et la surface de l'eau.

01 :01 :34 → 01 :01 :36 Tu vois, là, il y a...

01 :01 :37 → 01 :01 :39 Faire le même calcul avec la colonne de mercure.

01 :01 :39 → 01 :01 :41 Pourquoi on ne mettra pas la colonne d'eau et l'atmosphère ?

01 :01 :42 → 01 :01 :43 Tu vois ce que je veux dire ?

01 :01 :43 → 01 :01 :45 Ah oui, je vois ce que tu veux dire.

01 :01 :46 → 01 :01 :48 Pour faire vraiment le parallèle entre les deux questions.

01 :01 :50 → 01 :01 :52 Entre la colonne d'eau et l'atmosphère.

01 :01 :52 → 01 :01 :53 Ok.

01 :01 :54 → 01 :01 :57 Je peux voir la correction du machin ?

01 :01 :59 → 01 :02 :00 Ah oui.

01 :02 :04 → 01 :02 :05 Regarde, c'est ça.

01 :02 :06 → 01 :02 :08 La colonne d'air vraiment, qu'ils disent.

01 :02 :10 → 01 :02 :11 La colonne d'air qu'ils disent, hein.

01 :02 :13 → 01 :02 :14 La colonne d'air qu'ils disent.

01 :02 :14 → 01 :02 :16 Et là, ils mettent colonne d'eau.

01 :02 :17 → 01 :02 :19 C'est vrai que c'est bizarre.

01 :02 :19 → 01 :02 :21 Tu vois, moi j'aurais mis colonne d'eau partout.

01 :02 :21 → 01 :02 :24 Parce que sinon, ça peut faire une confusion.

01 :02 :24 → 01 :02 :25 Oui, non, je suis d'accord.

01 :02 :25 → 01 :02 :28 Alors du coup, ça fait juste là, tu vois.

01 :02 :28 → 01 :02 :30 Colonne d'eau et ensuite, en bas colonne d'air.

01 :02 :31 → 01 :02 :32 Et du coup...

01 :02 :34 → 01 :02 :35 Ça marche.

01 :02 :35 → 01 :02 :38 Alors du coup, on retourne sur les éléments d'objectifs.

01 :02 :39 → 01 :02 :41 Les objectifs de la situation d'apprentissage.

01 :02 :45 → 01 :02 :46 T'as mis la dernière question ou pas ?

01 :02 :46 → 01 :02 :47 Oui, j'ai mis.

01 :02 :48 → 01 :02 :50 Genre la question où...

01 :02 :50 → 01 :02 :52 Pourquoi Torricelli, je sais pas quoi, là.

01 :02 :52 → 01 :02 :53 Tu t'es arrêtée à quelle question ?

01 :02 :53 → 01 :02 :54 Sur le mercure, toi ?

01 :02 :54 → 01 :02 :57 Ouais, ou comparer, ouais, avec la colonne de mercure.

01 :02 :57 → 01 :02 :59 Il y avait une question encore.

01 :03 :01 → 01 :03 :03 Genre, je sais pas trop quoi en penser.

01 :03 :03 → 01 :03 :06 Torricelli indique que la hauteur du mercure dans le tube

01 :03 :06 → 01 :03 :09 apparaît comme une mesure directe de la pression atmosphé-

rique

01 :03 :09 → 01 :03 :11 justifier cette assertion.

01 :03 :12 → 01 :03 :15 Et en fait, c'est le fait que se soit aussi directement proportionnel.

01 :03 :15 → 01 :03 :17 Mais je trouve que c'est peut-être pas très pertinent.

01 :03 :22 → 01 :03 :25 Alors Torricelli indique que la hauteur du mercure

01 :03 :25 → 01 :03 :29 apparaît comme une mesure directe de la pression atmosphérique.

01 :03 :32 → 01 :03 :33 Mais c'est pas...

01 :03 :35 → 01 :03 :37 Parce qu'on a même pas le même document, tu vois.

01 :03 :37 → 01 :03 :39 Moi, je l'aurais pas mis, cette question.

01 :03 :39 → 01 :03 :40 Pour précaution.

01 :03 :40 → 01 :03 :41 Moi, je suis d'accord.

01 :03 :41 → 01 :03 :44 Donc, partie documentaire finie.

01 :03 :46 → 01 :03 :47 En soi, je comprends.

01 :03 :47 → 01 :03 :49 C'est parce que du coup, il a dit que

01 :03 :49 → 01 :03 :52 ici, que l'air pèse directement sur gnagnagna

01 :03 :52 → 01 :03 :54 et que c'est ça qui explique la hauteur.

01 :03 :55 → 01 :03 :57 Donc, en soi, si l'air pèse dessus...

01 :03 :57 → 01 :03 :59 Moi, je pense que le texte est assez compliqué

01 :03 :59 → 01 :04 :01 pour ne pas leur poser des questions.

01 :04 :01 → 01 :04 :03 Parce que là, le texte est simplifié, tu vois.

01 :04 :03 → 01 :04 :04 Oui, c'est vrai, c'est vrai.

01 :04 :04 → 01 :04 :06 Moi, je l'aurais pas mis.

01 :04 :06 → 01 :04 :08 Et juste, après, rajouter la partie expérimentale

01 :04 :08 → 01 :04 :11 vérifiée par l'expérience,

01 :04 :11 → 01 :04 :13 la loi de l'hydrostatique.

01 :04 :13 → 01 :04 :14 C'est tout.

01 :04 :14 → 01 :04 :17 On va commencer à mettre en ouverture, du coup, d'un truc.

01 :04 :17 → 01 :04 :19 Alors, du coup, s'approprier...

01 :04 :19 → 01 :04 :20 Compétences.

01 :04 :20 → 01 :04 :22 Donc, compétences, compétences.

01 :04 :22 → 01 :04 :23 S'approprier...

01 :04 :23 → 01 :04 :24 Tu les as sous le nez ?

01 :04 :24 → 01 :04 :25 Euh, non.

01 :04 :25 → 01 :04 :26 Mais attends, je vais aller chercher.

01 :04 :26 → 01 :04 :28 Donc, du coup, en priorité, s'approprier...

01 :04 :28 → 01 :04 :29 Il y a énoncer une problématique.

01 :04 :29 → 01 :04 :31 Non, rechercher et organiser l'information

01 :04 :31 → 01 :04 :33 en lien avec la problématique étudiée.

01 :04 :33 → 01 :04 :34 Donc, c'est pas ça.

01 :04 :34 → 01 :04 :36 Mais je vais mettre du coup, s'approprier...

01 :04 :36 → 01 :04 :37 Représenter.
 01 :04 :37 → 01 :04 :39 Rechercher et extraire...
 01 :04 :41 → 01 :04 :43 Des informations.
 01 :04 :43 → 01 :04 :44 Tout simplement.
 01 :04 :44 → 01 :04 :45 Ouais.
 01 :04 :45 → 01 :04 :46 Ensuite.
 01 :04 :46 → 01 :04 :48 Il y a formuler une hypothèse,
 01 :04 :48 → 01 :04 :50 proposer une stratégie de résolution,
 01 :04 :50 → 01 :04 :53 planifier des tâches, évaluer des ordres de grandeur,
 01 :04 :53 → 01 :04 :56 choisir un modèle ou des lois pertinentes.
 01 :04 :56 → 01 :04 :57 Non.
 01 :04 :57 → 01 :05 :00 Choisir, élaborer, justifier un protocole
 01 :05 :00 → 01 :05 :02 pour la partie expérimentale, oui.
 01 :05 :02 → 01 :05 :03 Mais pas ça.
 01 :05 :03 → 01 :05 :04 Euh, non.
 01 :05 :04 → 01 :05 :06 Déjà, il y a la partie s'approprier,
 01 :05 :06 → 01 :05 :08 mais il y a la partie analyser
 01 :05 :08 → 01 :05 :11 pour, justement, pour savoir
 01 :05 :11 → 01 :05 :13 justement laquelle des deux théories
 01 :05 :13 → 01 :05 :15 correspond à la loi.
 01 :05 :15 → 01 :05 :17 Il y a beaucoup de choses derrière, en fait.
 01 :05 :17 → 01 :05 :19 Ouais, mais du coup, tu la mettrais dans quoi ?
 01 :05 :19 → 01 :05 :21 Donc, celle-là, je la mettrais...
 01 :05 :21 → 01 :05 :23 Alors, il y a s'approprier et analyser dedans.
 01 :05 :23 → 01 :05 :24 Il y a les deux, tu vois.
 01 :05 :24 → 01 :05 :26 Donc, on mettrait du coup aussi analyser.
 01 :05 :27 → 01 :05 :29 Analyser, euh...
 01 :05 :29 → 01 :05 :31 Donc, euh...
 01 :05 :32 → 01 :05 :33 Non, non, non.
 01 :05 :33 → 01 :05 :35 Parce que les stratégies de résolution...
 01 :05 :39 → 01 :05 :40 Non.
 01 :05 :40 → 01 :05 :41 Alors, du coup, pour analyser,
 01 :05 :41 → 01 :05 :43 moi, je dirais juste, euh...
 01 :05 :46 → 01 :05 :47 Ça, du coup...
 01 :05 :47 → 01 :05 :49 Comparer des modèles...
 01 :05 :51 → 01 :05 :53 Confronter des modèles, plutôt, peut-être.
 01 :05 :54 → 01 :05 :56 Ah, en fait, genre, tu mets pas une partie...
 01 :05 :56 → 01 :05 :57 T'es pas obligée de mettre...
 01 :05 :57 → 01 :06 :00 En fait, y a pas tout dedans, tu vois, ça.
 01 :06 :00 → 01 :06 :01 T'as plein de trucs qui...

- 01 :06 :01 → 01 :06 :03 Tu vois, ça s'applique plus au truc de TP.
- 01 :06 :03 → 01 :06 :06 Mais les compétences, elles s'appliquent...
- 01 :06 :06 → 01 :06 :08 Par exemple, pour s'approprier,
- 01 :06 :08 → 01 :06 :09 y a aussi le cours dedans.
- 01 :06 :09 → 01 :06 :11 Pour savoir, euh...
- 01 :06 :11 → 01 :06 :12 Retranscrire.
- 01 :06 :12 → 01 :06 :14 C'est ça, redonner son...
- 01 :06 :14 → 01 :06 :16 Utiliser, en fait, les notions vues en classe.
- 01 :06 :16 → 01 :06 :17 C'est dans cette formule, par exemple.
- 01 :06 :17 → 01 :06 :20 Donc, analyser, toi, tu dirais, du coup...
- 01 :06 :20 → 01 :06 :22 Tu veux confronter des modèles historiques.
- 01 :06 :22 → 01 :06 :24 Ouais, c'est ça, confronter des modèles.
- 01 :06 :26 → 01 :06 :28 Alors, je vais mettre, je sais.
- 01 :06 :30 → 01 :06 :31 Je sais.
- 01 :06 :31 → 01 :06 :33 Rechercher et extraire des informations.
- 01 :06 :33 → 01 :06 :34 Je sais.
- 01 :06 :37 → 01 :06 :38 Comparer.
- 01 :06 :38 → 01 :06 :40 C'est ce que j'allais dire, en plus.
- 01 :06 :41 → 01 :06 :42 Comparer.
- 01 :06 :42 → 01 :06 :43 Après...
- 01 :06 :44 → 01 :06 :45 Des modèles.
- 01 :06 :47 → 01 :06 :48 Tu peux mettre...
- 01 :06 :48 → 01 :06 :50 Je sais pas si tu veux mettre encore un truc dans analyser,
- 01 :06 :50 → 01 :06 :52 mais sinon, tu peux mettre dans réaliser,
- 01 :06 :52 → 01 :06 :54 effectuer des...
- 01 :06 :54 → 01 :06 :55 Calculs.
- 01 :06 :55 → 01 :06 :56 Des procédures courantes.
- 01 :06 :56 → 01 :06 :57 Ouais.
- 01 :06 :57 → 01 :06 :58 Donc, on peut mettre...
- 01 :06 :58 → 01 :07 :00 Moi, généralement, je mets tout dans effectuer des procédures courantes.
- 01 :07 :00 → 01 :07 :02 pour les calculs, comme ça.
- 01 :07 :02 → 01 :07 :03 Ça case tout.
- 01 :07 :04 → 01 :07 :06 Mais tu précises, entre parenthèses,
- 01 :07 :06 → 01 :07 :08 calculs, collecte de données.
- 01 :07 :08 → 01 :07 :09 Généralement, ouais.
- 01 :07 :09 → 01 :07 :10 Je mets, du coup...
- 01 :07 :10 → 01 :07 :12 Là, tu peux mettre calculs et collecte de données.
- 01 :07 :12 → 01 :07 :13 Vas-y.
- 01 :07 :13 → 01 :07 :14 Fonce.

01 :07 :15 → 01 :07 :16 Effectuer.
01 :07 :16 → 01 :07 :18 Je sais effectuer, mais je sais pas comment tu veux.
01 :07 :18 → 01 :07 :19 Ouais.
01 :07 :20 → 01 :07 :22 Des procédures courantes.
01 :07 :22 → 01 :07 :24 Des procédures courantes.
01 :07 :24 → 01 :07 :25 Ouais.
01 :07 :27 → 01 :07 :29 Il faut qu'il y en ait un peu.
01 :07 :30 → 01 :07 :35 Un, deux, trois, quatre, cinq, six, sept, huit, neuf, dix.
01 :07 :36 → 01 :07 :40 Un, deux, trois, quatre, cinq, six, sept, huit, neuf, dix.
01 :07 :41 → 01 :07 :43 Collecte avec un s c'est bon de réponse.
01 :07 :43 → 01 :07 :45 Et je sais...
01 :07 :47 → 01 :07 :48 OK.
01 :07 :48 → 01 :07 :49 Et valider.
01 :07 :49 → 01 :07 :51 Il y a faire preuve d'esprit critique.
01 :07 :51 → 01 :07 :53 Je pense que ça pourrait être pas trop mal, en fait.
01 :07 :53 → 01 :07 :54 Ouais.
01 :07 :54 → 01 :07 :55 Et en vrai, dans la...
01 :07 :55 → 01 :07 :56 Alors...
01 :07 :57 → 01 :07 :58 Euh...
01 :07 :58 → 01 :08 :00 Un regard confronter
01 :08 :00 → 01 :08 :02 Un modèle à des résultats expérimentaux.
01 :08 :02 → 01 :08 :03 D'accord.
01 :08 :03 → 01 :08 :04 C'est ça, très bien.
01 :08 :04 → 01 :08 :05 Ça sera pour la suite.
01 :08 :05 → 01 :08 :06 Ouais.
01 :08 :06 → 01 :08 :07 Ah mais non, attends.
01 :08 :07 → 01 :08 :08 Du coup, tu sais quoi ?
01 :08 :08 → 01 :08 :09 Pour...
01 :08 :09 → 01 :08 :10 Non, en fait...
01 :08 :10 → 01 :08 :11 Ça, c'est vraiment...
01 :08 :11 → 01 :08 :12 C'est vraiment une communication complexe.
01 :08 :12 → 01 :08 :14 Enfin, il va vraiment falloir que...
01 :08 :15 → 01 :08 :16 Euh...
01 :08 :16 → 01 :08 :17 Qu'on...
01 :08 :17 → 01 :08 :18 Enfin, si on fait, du coup, cette activité-là,
01 :08 :18 → 01 :08 :19 il faut vraiment qu'on pense...
01 :08 :19 → 01 :08 :21 Les questions-là, c'est des petits coups de pouce.
01 :08 :21 → 01 :08 :22 Ouais, ouais, ouais.
01 :08 :22 → 01 :08 :23 Parce qu'en fait, dedans, il y a vraiment plein de trucs.
01 :08 :23 → 01 :08 :25 Il faut qu'ils extraient les bonnes informations.

- 01 :08 :25 → 01 :08 :26 Il faut qu'ils...
- 01 :08 :27 → 01 :08 :30 Ils analysent, en fait, les tâches à faire.
- 01 :08 :30 → 01 :08 :32 Du coup, pour pouvoir les comparer.
- 01 :08 :32 → 01 :08 :34 En plus, il faut qu'ils valident à la fin
- 01 :08 :34 → 01 :08 :36 pour dire laquelle correspond plus à...
- 01 :08 :36 → 01 :08 :37 Donc, euh...
- 01 :08 :37 → 01 :08 :39 Alors, du coup, j'arrive à valider.
- 01 :08 :40 → 01 :08 :42 Donc, je sais...
- 01 :08 :45 → 01 :08 :46 C'est quoi ?
- 01 :08 :46 → 01 :08 :48 Faire preuve d'esprit critique ?
- 01 :08 :48 → 01 :08 :50 Oui, déjà, et confronter à un modèle...
- 01 :08 :50 → 01 :08 :52 Confronter à un modèle à des résultats expérimentaux.
- 01 :08 :53 → 01 :08 :55 Je sais confronter un modèle...
- 01 :08 :56 → 01 :09 :01 À des résultats expérimentaux.
- 01 :09 :02 → 01 :09 :03 OK.
- 01 :09 :03 → 01 :09 :05 Et du coup, toujours pour valider.
- 01 :09 :06 → 01 :09 :07 Faire preuve d'un esprit créatif.
- 01 :09 :08 → 01 :09 :09 Juste...
- 01 :09 :10 → 01 :09 :11 Pour checker...
- 01 :09 :12 → 01 :09 :13 La forme de la situation...
- 01 :09 :13 → 01 :09 :17 Il faut peut-être faire une première page avant l'activité
- 01 :09 :17 → 01 :09 :20 en disant les objectifs de la situation d'apprentissage.
- 01 :09 :20 → 01 :09 :21 C'est quoi ?
- 01 :09 :21 → 01 :09 :22 C'est ça, ben...
- 01 :09 :22 → 01 :09 :24 C'est introduire la loi de l'hydrostatique.
- 01 :09 :24 → 01 :09 :25 C'est ça.
- 01 :09 :25 → 01 :09 :26 Pour moi, c'est ça.
- 01 :09 :26 → 01 :09 :27 Et la vérifier.
- 01 :09 :28 → 01 :09 :29 Oui, et en même temps...
- 01 :09 :29 → 01 :09 :30 Alors, ça, c'est pour les...
- 01 :09 :31 → 01 :09 :34 Est-ce qu'on fait vraiment un doc expérimental dans la même séance ?
- 01 :09 :34 → 01 :09 :36 Ou on fait vraiment une expérimentale dans une autre séance
- 01 :09 :36 → 01 :09 :37 parce que celle-ci, elle sera trop longue ?
- 01 :09 :37 → 01 :09 :38 Non, non.
- 01 :09 :38 → 01 :09 :39 Pour moi, ça, c'est une seule séance.
- 01 :09 :39 → 01 :09 :41 On ne peut pas faire l'expérimentale avec.
- 01 :09 :41 → 01 :09 :44 T'as vu, les docs, ils ne sont vraiment pas faciles du tout.
- 01 :09 :44 → 01 :09 :45 Il faut qu'ils prennent le temps.

01 :09 :45 → 01 :09 :49 Si on veut, en plus, qu'ils comprennent bien la loi et tous les côtés historiques.

01 :09 :49 → 01 :09 :50 Donc...

01 :09 :50 → 01 :09 :51 J'ai juste...

01 :09 :51 → 01 :09 :52 Je sais...

01 :09 :53 → 01 :09 :54 Faire preuve d'esprit critique.

01 :09 :54 → 01 :09 :55 D'esprit critique.

01 :09 :57 → 01 :09 :58 OK.

01 :09 :58 → 01 :09 :59 Alors...

01 :09 :59 → 01 :10 :00 Donc, on est bon ?

01 :10 :01 → 01 :10 :02 Alors, du coup...

01 :10 :02 → 01 :10 :04 On retourne à ce qu'on disait.

01 :10 :05 → 01 :10 :06 Donc...

01 :10 :08 → 01 :10 :09 Donc, effectivement...

01 :10 :09 → 01 :10 :10 Je vais juste finir.

01 :10 :10 → 01 :10 :11 Et je te laisse.

01 :10 :11 → 01 :10 :12 Et je nous laisse, du coup.

01 :10 :13 → 01 :10 :15 J'allais dire, en soi, on peut mettre...

01 :10 :16 → 01 :10 :17 Oui.

01 :10 :17 → 01 :10 :18 Objectif, du coup.

01 :10 :18 → 01 :10 :21 Objectif, c'est introduire la loi de l'hydrostatique.

01 :10 :22 → 01 :10 :23 Ça marche.

01 :10 :24 → 01 :10 :30 Donc introduire la loi de l'hydrostatique.

01 :10 :32 → 01 :10 :34 Tu sais, un truc par rapport à l'histoire des sciences.

01 :10 :34 → 01 :10 :36 Juste de voir ce que je voulais dire.

01 :10 :36 → 01 :10 :40 Alors, déjà, même au niveau méthode pour les élèves...

01 :10 :42 → 01 :10 :44 Développer l'analyse.

01 :10 :44 → 01 :10 :45 C'est ça.

01 :10 :45 → 01 :10 :47 Développer leur capacité d'analyse.

01 :10 :47 → 01 :10 :48 Oui.

01 :10 :49 → 01 :10 :53 Leur capacité d'analyse.

01 :10 :55 → 01 :10 :59 Et peut-être étoffer leur culture d'histoire des sciences.

01 :10 :59 → 01 :11 :00 Oui.

01 :11 :00 → 01 :11 :02 Culture scientifique, je pense que ça devrait aller.

01 :11 :02 → 01 :11 :03 Donc, attends.

01 :11 :03 → 01 :11 :04 Analyse documentaire.

01 :11 :04 → 01 :11 :05 Je vais préciser.

01 :11 :05 → 01 :11 :06 Oui, oui.

01 :11 :06 → 01 :11 :07 Documentaire.

01 :11 :09 → 01 :11 :10 OK.

- 01 :11 :10 → 01 :11 :11 Et on a dit, donc...
- 01 :11 :14 → 01 :11 :15 Et on a dit, ensuite...
- 01 :11 :15 → 01 :11 :17 J'avais dit étoffer leur capacité d'analyse.
- 01 :11 :17 → 01 :11 :18 Et ensuite...
- 01 :11 :18 → 01 :11 :20 J'avais dit étoffer, mais c'est peut-être pas le bon mot.
- 01 :11 :20 → 01 :11 :21 Développer.
- 01 :11 :21 → 01 :11 :22 Oui, aussi.
- 01 :11 :22 → 01 :11 :23 Ça fait redondant.
- 01 :11 :23 → 01 :11 :24 Oui.
- 01 :11 :25 → 01 :11 :27 Développer leur... étendre.
- 01 :11 :27 → 01 :11 :28 Non, ça c'est pas...
- 01 :11 :28 → 01 :11 :30 Développer, on va garder aussi.
- 01 :11 :31 → 01 :11 :33 Alimenter leur culture scientifique ?
- 01 :11 :33 → 01 :11 :34 Oui.
- 01 :11 :34 → 01 :11 :35 Oui, c'est marrant.
- 01 :11 :35 → 01 :11 :36 Ça fait un peu bizarre, mais...
- 01 :11 :38 → 01 :11 :39 C'est genre...
- 01 :11 :39 → 01 :11 :40 Tiens.
- 01 :11 :40 → 01 :11 :41 C'est ça.
- 01 :11 :41 → 01 :11 :42 Tiens.
- 01 :11 :43 → 01 :11 :44 Leur culture.
- 01 :11 :44 → 01 :11 :45 Leur culte.
- 01 :11 :45 → 01 :11 :46 Leur culture.
- 01 :11 :47 → 01 :11 :48 Scientifique.
- 01 :11 :48 → 01 :11 :50 Donc, je pense que là, on est bon sur les...
- 01 :11 :50 → 01 :11 :51 Après.
- 01 :11 :51 → 01 :11 :54 Après, il disait la forme de situation d'apprentissage.
- 01 :11 :54 → 01 :11 :56 Donc, première séance, activité documentaire,
- 01 :11 :56 → 01 :11 :58 qui sera suivie par une séance expérimentale.
- 01 :11 :58 → 01 :12 :01 Oui, du coup, la forme de situation d'apprentissage.
- 01 :12 :01 → 01 :12 :02 Oui, OK, d'accord.
- 01 :12 :02 → 01 :12 :04 Donc, tu peux mettre genre...
- 01 :12 :04 → 01 :12 :05 Je vais renoter, en fait.
- 01 :12 :06 → 01 :12 :07 De situation d'apprentissage.
- 01 :12 :10 → 01 :12 :11 D'apprentissage.
- 01 :12 :11 → 01 :12 :13 J viens de faire un truc super dangereux, en fait.
- 01 :12 :13 → 01 :12 :14 Quoi ?
- 01 :12 :14 → 01 :12 :16 J'ai pas sauvegardé depuis le début.
- 01 :12 :18 → 01 :12 :21 Alors, je vais t'appeler A.A. juste pour...
- 01 :12 :22 → 01 :12 :24 T'as regardé où tu l'as sauvegardé, au moins ?

01 :12 :24 → 01 :12 :25 T'inquiètes.

01 :12 :25 → 01 :12 :26 Il s'appelle A.A.

01 :12 :26 → 01 :12 :28 Rien d'autre qu'il s'appelle A.A. sur un PC.

01 :12 :29 → 01 :12 :31 Donc, la situation...

01 :12 :31 → 01 :12 :33 Donc, du coup, c'est...

01 :12 :33 → 01 :12 :34 D'apprentissage.

01 :12 :34 → 01 :12 :35 D'apprentissage.

01 :12 :36 → 01 :12 :40 Donc, c'est une activité documentaire sur une séance.

01 :12 :40 → 01 :12 :41 Ils disent aussi...

01 :12 :41 → 01 :12 :42 Ah, la durée.

01 :12 :43 → 01 :12 :45 Mais la durée, on la met en même temps que là, non ?

01 :12 :45 → 01 :12 :46 Hein ?

01 :12 :46 → 01 :12 :49 La durée, c'est dans le point suivant, mais on la met en même temps.

01 :12 :49 → 01 :12 :52 Donc, activité documentaire, entre parenthèses, le temps.

01 :12 :53 → 01 :12 :54 Et durée.

01 :12 :54 → 01 :12 :55 Ouais.

01 :12 :56 → 01 :12 :57 Documentaire...

01 :12 :58 → 01 :12 :59 Une heure, tu crois que ça suffit ?

01 :12 :59 → 01 :13 :00 Ça suffit d'une heure.

01 :13 :00 → 01 :13 :01 Tu crois que ça suffit d'une heure ?

01 :13 :01 → 01 :13 :02 Oui.

01 :13 :02 → 01 :13 :03 Oui, oui.

01 :13 :03 → 01 :13 :04 Fais pas exagérer non plus.

01 :13 :05 → 01 :13 :07 Je reprends, c'est les premières, tu vois.

01 :13 :07 → 01 :13 :08 Oui, mais...

01 :13 :08 → 01 :13 :09 Tu me rencontreras pas.

01 :13 :11 → 01 :13 :12 Suivi.

01 :13 :12 → 01 :13 :13 Voilà, suivi.

01 :13 :13 → 01 :13 :17 D'une activité expérimentale avec vérification de la loi.

01 :13 :28 → 01 :13 :31 Le déroulement des différentes phases de la situation d'apprentissage.

01 :13 :31 → 01 :13 :32 Je sais pas ce qu'ils veulent dire par là.

01 :13 :32 → 01 :13 :35 Alors, déroulement des différentes phases de la situation d'apprentissage.

01 :13 :36 → 01 :13 :40 Alors, peut-être qu'ils veulent parler du découpage...

01 :13 :41 → 01 :13 :44 En mode, est-ce que tu laisses les élèves en autonomie ?

01 :13 :44 → 01 :13 :45 Ou est-ce que...

01 :13 :46 → 01 :13 :47 Ouais.

01 :13 :49 → 01 :13 :51 Tu veux bien l'appeler, pendant ce temps-là, je mets juste le titre.

01 :13 :52 → 01 :13 :53 Non, mais vraiment.

01 :13 :53 → 01 :13 :56 Non, mais ce que je veux dire, c'est que tu l'appelle

01 :13 :56 → 01 :13 :58 et en même temps, comme ça, je mets juste le titre.

01 :13 :59 → 01 :14 :00 Voilà.

01 :14 :12 → 01 :14 :13 Je crois qu'il m'a...

01 :14 :13 → 01 :14 :14 Je suis pas sûre.

01 :14 :14 → 01 :14 :15 Je crois qu'il m'a pas vue.

01 :14 :18 → 01 :14 :19 Je le prends très mal

01 :14 :20 → 01 :14 :21 Je le prends très mal

01 :14 :21 → 01 :14 :22 Mais non, mais non.

01 :14 :22 → 01 :14 :23 Ah, il arrive

01 :14 :26 → 01 :14 :28 En fait, on a fini à peu près notre activité.

01 :14 :28 → 01 :14 :29 Sara sans H.

01 :14 :29 → 01 :14 :30 Sara sans H, exactement.

01 :14 :31 → 01 :14 :32 On a fini à peu près notre activité.

01 :14 :32 → 01 :14 :34 Juste, on explicitait un peu chaque point ici.

01 :14 :35 → 01 :14 :38 Et dans déroulement des différentes phases de la situation d'apprentissage,

01 :14 :38 → 01 :14 :40 on n'était pas sûres de ce qui était attendu.

01 :14 :40 → 01 :14 :43 Ça veut dire, comment est-ce qu'on va articuler la dynamique de la séance ?

01 :14 :44 → 01 :14 :47 Est-ce que c'est, en fait, le temps de réflexion qu'on laisse aux élèves,

01 :14 :47 → 01 :14 :49 ou le temps d'échange, etc. ?

01 :14 :50 → 01 :14 :52 Le déroulement des différentes phases.

01 :14 :56 → 01 :14 :59 Oui, c'est ce que vous attendez dans chaque phase.

01 :15 :06 → 01 :15 :08 Je ne sais pas à quoi vous répondre.

01 :15 :09 → 01 :15 :11 Parce qu'en soi, nous, c'est une activité documentaire.

01 :15 :11 → 01 :15 :12 Vu que c'est une première.

01 :15 :13 → 01 :15 :15 On attend une forme d'autonomie de leur part.

01 :15 :15 → 01 :15 :16 Oui, c'est ça.

01 :15 :16 → 01 :15 :17 Vous mettez ça.

01 :15 :17 → 01 :15 :19 On attend qu'ils le fassent en autonomie.

01 :15 :19 → 01 :15 :21 Vous mettez que pour chaque phase, si c'est en autonomie,

01 :15 :21 → 01 :15 :23 si c'est une mise en commun,

01 :15 :23 → 01 :15 :25 si c'est vous qui parlez.

01 :15 :26 → 01 :15 :27 D'accord.

01 :15 :27 → 01 :15 :29 Donc, on faut peut-être une première phase de consigne.

01 :15 :29 → 01 :15 :31 On leur donne l'activité.

01 :15 :32 → 01 :15 :36 On les laisse répondre aux questions préliminaires d'abord.

01 :15 :36 → 01 :15 :38 On fait un plan sur les questions préliminaires.

01 :15 :38 → 01 :15 :42 Une fois que c'est fait, et qu'on a vérifié que les textes étaient bien compris,

01 :15 :42 → 01 :15 :44 que les notions étaient bien comprises.

01 :15 :44 → 01 :15 :46 Passage aux questions d'application.

01 :15 :46 → 01 :15 :47 C'est ça.

01 :15 :47 → 01 :15 :49 Et une fois que c'est fini, on fait un bilan.

01 :15 :49 → 01 :15 :51 Du coup, la séance est valable.

01 :15 :52 → 01 :15 :54 Maintenant, il n'y a plus qu'à synthétiser ça.

01 :15 :57 → 01 :15 :59 Et après, je regarde les trucs suivants.

01 :15 :59 → 01 :16 :01 Après, l'activité des élèves.

01 :16 :02 → 01 :16 :04 C'est bon, parce que du coup, elle est là.

01 :16 :06 → 01 :16 :08 Le type de production attendu.

01 :16 :08 → 01 :16 :10 On attend qu'ils répondent aux questions.

01 :16 :11 → 01 :16 :13 Le type de production attendu.

01 :16 :13 → 01 :16 :15 On attend qu'ils répondent aux questions.

01 :16 :21 → 01 :16 :23 Je répète les timings après.

01 :16 :23 → 01 :16 :26 Les timings, en soi, ça dépend vachement des...

01 :16 :26 → 01 :16 :27 Oui.

01 :16 :27 → 01 :16 :29 Mais justement, c'est ça.

01 :16 :29 → 01 :16 :32 Qu'ils aient fini ou pas, il faut que dans les 10 minutes, on ait fait un point.

01 :16 :32 → 01 :16 :35 Parce que si tu leur laisses un point infini, tu vois, comme je te disais,

01 :16 :35 → 01 :16 :36 c'est pas possible.

01 :16 :36 → 01 :16 :39 Ce que je veux dire, c'est qu'il y a des fois où tu vas devoir faire ton point

01 :16 :39 → 01 :16 :42 plus vite que prévu parce qu'ils en auront fini bien plus vite que d'autres.

01 :16 :42 → 01 :16 :43 Ah oui, mais c'est rare.

01 :16 :43 → 01 :16 :45 Mais c'est possible.

01 :16 :46 → 01 :16 :48 Donc, l'étude des documents par...

01 :16 :48 → 01 :16 :52 Parce que généralement, moi, ça m'arrive de leur donner 5 minutes pour faire quatre questions.

01 :16 :52 → 01 :16 :55 Pour lire les documents et faire quatre questions, c'est hyper rapide.

01 :16 :55 → 01 :16 :59 Donc, si un élève vient en 2 minutes, c'est qu'il a fait n'importe quoi.

01 :17 :00 → 01 :17 :03 Par exemple, j'ai fait une évaluation.

01 :17 :05 → 01 :17 :08 Du coup, il y avait plusieurs exercices.

01 :17 :08 → 01 :17 :10 Y'avait genre 3, 4 exercices, tu vois.

01 :17 :11 → 01 :17 :16 En fait, les molécules et les modèles atomiques, il faut juste savoir de quelle couleur est la boule.

01 :17 :16 → 01 :17 :19 Une fois que c'est compris, c'est un truc...

01 :17 :19 → 01 :17 :21 Tu le fais en mode machine, tu vois ce que je veux dire ?

01 :17 :21 → 01 :17 :22 Tu réfléchis même plus.

01 :17 :22 → 01 :17 :24 Et bien, j'ai laissé 40 minutes.

01 :17 :24 → 01 :17 :26 Je me suis dit que c'est largement assez.

01 :17 :26 → 01 :17 :29 Je ne veux pas que le temps soit un frein et je veux qu'il me fasse le truc proprement.

01 :17 :29 → 01 :17 :32 Et bien, tu me crois, j'ai une petite qui me l'a fait en 9 minutes.

01 :17 :32 → 01 :17 :34 J'ai regardé l'heure 9 minutes.

01 :17 :34 → 01 :17 :36 Elle a eu 20 sur 20.

01 :17 :36 → 01 :17 :38 Je me suis dit, mais elle, elle a appris.

01 :17 :38 → 01 :17 :39 Mais c'est 9 minutes.

01 :17 :39 → 01 :17 :40 Tu vois ce que je veux dire ?

01 :17 :40 → 01 :17 :44 Si tu passes de 5 minutes à 1 ou 2 minutes, tu ne peux rien faire.

01 :17 :44 → 01 :17 :47 Tu as une 9 minutes comparées à 40 minutes.

01 :17 :47 → 01 :17 :48 Oui, oui.

01 :17 :48 → 01 :17 :51 Après, elle a dû chercher plein de choses.

01 :17 :51 → 01 :17 :52 C'est clair.

01 :17 :52 → 01 :17 :56 Lecture des documents par les élèves et réponses aux questions préliminaires.

01 :17 :56 → 01 :17 :58 Travail et autonomie.

01 :17 :58 → 01 :18 :00 Fasse 3 mises en commun des questions préliminaires.

01 :18 :04 → 01 :18 :05 Oui.

01 :18 :07 → 01 :18 :09 Ça marche, ok.

01 :18 :09 → 01 :18 :12 Du coup, tu vas travailler ?

01 :18 :12 → 01 :18 :14 Ou tu vas la à la pharmacie d'abord ?

01 :18 :14 → 01 :18 :17 C'est vrai, j'hésite.

01 :18 :17 → 01 :18 :21 J'hésite parce qu'en fait, on s'est bloqué juste une demi heure.

01 :18 :21 → 01 :18 :23 Je me suis dit, il faut qu'on finisse dans une demi heure.

01 :18 :23 → 01 :18 :25 Quand on sort, on n'aura pas beaucoup.

01 :18 :25 → 01 :18 :26 Donc, je me dis...

01 :18 :26 → 01 :18 :28 Parce qu'en fait, elle a un gros...

01 :18 :28 → 01 :18 :29 C'est son mémoire.

01 :18 :31 → 01 :18 :33 De toute façon, on finit à 17h.

01 :18 :34 → 01 :18 :36 Donc, on finit à 17h30.

01 :18 :36 → 01 :18 :37 À 17h30, vous finissez ?

01 :18 :37 → 01 :18 :38 Voilà.

01 :18 :38 → 01 :18 :39 Et on y va après ?

01 :18 :39 → 01 :18 :41 Ça me va, j'ai mes copies à corriger.

01 :18 :41 → 01 :18 :42 C'est pour ça.

01 :18 :42 → 01 :18 :43 C'est pour ça que je te dis ça.

01 :18 :43 → 01 :18 :45 Parce que je peux t'attendre, j'ai les copies.

01 :18 :45 → 01 :18 :46 Bon, nickel.

01 :18 :46 → 01 :18 :47 Merci beaucoup.

01 :18 :47 → 01 :18 :49 De toute façon, sinon, je le faisais chez moi.

01 :18 :49 → 01 :18 :51 Mais dans tous les cas, il fallait que je le fasse.

01 :18 :51 → 01 :18 :53 Et j'aurais pas le temps de finir en plus.

01 :18 :54 → 01 :18 :56 Pourtant, j'en ai que 25 là.

01 :18 :56 → 01 :18 :59 25 pour 30 minutes, ça va être un peu chaud quand même.

01 :18 :59 → 01 :19 :02 Ça te fait une petite minute par copie ?

01 :19 :02 → 01 :19 :04 C'est pas comme s'il y avait de la rédaction ?

01 :19 :04 → 01 :19 :05 Non, non, t'inquiète.

01 :19 :05 → 01 :19 :06 De toute façon, t'inquiète.

01 :19 :06 → 01 :19 :07 Franchement, les copies de collège,

01 :19 :07 → 01 :19 :09 elles sont beaucoup plus rapides à corriger que les copies de lycée,

01 :19 :09 → 01 :19 :10 sache-le.

01 :19 :10 → 01 :19 :11 Ah oui, ça, je sais.

01 :19 :11 → 01 :19 :13 Elles sont plus rapides, ça, j'en doute pas.

01 :19 :13 → 01 :19 :15 Parce que les copies de terminale, je retarde.

01 :19 :15 → 01 :19 :16 Il y a du texte.

01 :19 :16 → 01 :19 :17 Une question de rédaction.

01 :19 :17 → 01 :19 :19 Une question, une question de rédaction.

01 :19 :19 → 01 :19 :21 Déjà, j'en ai une question.

01 :19 :21 → 01 :19 :22 C'est quatre pages.

01 :19 :22 → 01 :19 :24 Quatre pages de rédaction.

01 :19 :24 → 01 :19 :26 Et je les connais quand même corrigées en dix minutes par copie.

01 :19 :26 → 01 :19 :28 Mais ça me prenait tellement de temps, c'était horrible.

01 :19 :28 → 01 :19 :30 Dix minutes par copie, mais ils sont en train de parler.

01 :19 :30 → 01 :19 :32 Mais c'est ça, en fait.

01 :19 :32 → 01 :19 :33 Sauf que j'ai trois terminales.

01 :19 :33 → 01 :19 :35 Donc quatre terminales, si tu veux.

01 :19 :36 → 01 :19 :37 Moi, j'ai trois quatrièmes,

01 :19 :37 → 01 :19 :38 mais voilà, comme je t'ai dit,
01 :19 :38 → 01 :19 :40 les quatrièmes, je les fais à la chaîne.
01 :19 :40 → 01 :19 :41 Ouais, je comprends.
01 :19 :41 → 01 :19 :42 T'inquiète.
01 :19 :42 → 01 :19 :43 Même les copies de ce groupe,
01 :19 :43 → 01 :19 :44 c'est un bonheur de les corriger.
01 :19 :44 → 01 :19 :45 Ah, merci.
01 :19 :45 → 01 :19 :47 Des calculs, des trucs tout simples, tu vois.
01 :19 :47 → 01 :19 :49 Tant pis que vous n'avez pas de rédaction.
01 :19 :49 → 01 :19 :50 Vas-y, finis ça.
01 :19 :50 → 01 :19 :51 Si on a le temps, je te montre.
01 :19 :51 → 01 :19 :52 T'as vu, je t'ai montré ?
01 :19 :52 → 01 :19 :53 T'as vu les petites phrases ?
01 :19 :54 → 01 :19 :55 Ça, c'est trop bien.
01 :19 :56 → 01 :20 :00 Lui, j'ai pris à peu près 15 secondes
01 :20 :00 → 01 :20 :01 à corriger sa copie.
01 :20 :01 → 01 :20 :03 C'est juste que j'ai pas écrit dessus
01 :20 :03 → 01 :20 :04 parce que j'avais pas mon stylo.
01 :20 :04 → 01 :20 :05 J'ai regardé sa feuille.
01 :20 :05 → 01 :20 :07 15 secondes, c'était corrigé.
01 :20 :08 → 01 :20 :09 Ouais.
01 :20 :09 → 01 :20 :11 Quand c'est parfait, c'est rapide.
01 :20 :11 → 01 :20 :13 Quand t'as rien, c'est rapide aussi, non ?
01 :20 :13 → 01 :20 :14 Voilà, aussi.
01 :20 :15 → 01 :20 :16 Et retour sur...
01 :20 :17 → 01 :20 :18 Non, c'est bon, voilà.
01 :20 :18 → 01 :20 :19 On prend son texte
01 :20 :20 → 01 :20 :21 Parce que c'est important.
01 :20 :24 → 01 :20 :25 Phase 4.
01 :20 :27 → 01 :20 :30 Réponse aux questions sur l'expérience.
01 :20 :38 → 01 :20 :39 Les élèves...répondent aux questions
01 :20 :48 → 01 :20 :49 Ta grand-mère...
01 :20 :51 → 01 :20 :52 Question...
01 :20 :54 → 01 :20 :55 Cinq à...
01 :20 :56 → 01 :20 :57 Non, c'était quatre.
01 :20 :57 → 01 :20 :58 Je crois, non, c'était trois même.
01 :20 :59 → 01 :21 :00 Trois à six.
01 :21 :00 → 01 :21 :01 Trois à six ?
01 :21 :01 → 01 :21 :02 Trois à six.
01 :21 :07 → 01 :21 :08 Travailler en autonomie.

01 :21 :15 → 01 :21 :16 Et là, tu penses que t'as le temps
01 :21 :16 → 01 :21 :17 de faire une mise en...
01 :21 :17 → 01 :21 :19 On va dire qu'on est dans un monde idéal.
01 :21 :20 → 01 :21 :22 En vrai, c'est une séance d'une heure, ça va.
01 :21 :24 → 01 :21 :26 J'ai du mal un peu à visualiser.
01 :21 :26 → 01 :21 :28 En vrai, là, tu leur laisserais dix minutes.
01 :21 :28 → 01 :21 :29 Regarde.
01 :21 :29 → 01 :21 :30 Donc les consignes, ça prend cinq minutes.
01 :21 :30 → 01 :21 :32 Dix minutes pour la lecture des documents
01 :21 :32 → 01 :21 :35 plus les deux questions préliminaires.
01 :21 :36 → 01 :21 :37 Ça te fait quinze minutes.
01 :21 :37 → 01 :21 :39 Mise en commun, et bien sûr,
01 :21 :39 → 01 :21 :40 la compréhension des textes.
01 :21 :40 → 01 :21 :41 Pareil.
01 :21 :41 → 01 :21 :43 Alors, généralement, t'en prends un peu plus.
01 :21 :43 → 01 :21 :45 Du coup, ça te fait, on va dire, quinze minutes.
01 :21 :45 → 01 :21 :46 Là.
01 :21 :46 → 01 :21 :47 Du coup, là, ça te fait trente.
01 :21 :47 → 01 :21 :49 Et ensuite, les autres questions.
01 :21 :49 → 01 :21 :51 C'est moins compliqué, tu vois,
01 :21 :51 → 01 :21 :53 que les deux premières.
01 :21 :53 → 01 :21 :54 Parce que celle-là, c'est vraiment
01 :21 :54 → 01 :21 :56 une question fat, tu vois.
01 :21 :56 → 01 :21 :57 Alors que celle-ci, du coup,
01 :21 :57 → 01 :21 :59 en vrai, elles prennent moins de temps.
01 :21 :59 → 01 :22 :00 Donc, je pense que tu prends
01 :22 :00 → 01 :22 :01 dix, quinze minutes à les faire.
01 :22 :01 → 01 :22 :02 Ceci.
01 :22 :02 → 01 :22 :03 Hop.
01 :22 :03 → 01 :22 :05 On va dire dix minutes.
01 :22 :05 → 01 :22 :07 Là, du coup, correction des questions.
01 :22 :07 → 01 :22 :08 Dix minutes.
01 :22 :10 → 01 :22 :12 J'ai fini la phase cinq.
01 :22 :12 → 01 :22 :13 Et on va écrire pour pouvoir
01 :22 :13 → 01 :22 :14 calculer tout ça.
01 :22 :14 → 01 :22 :16 Non, mais après, il te reste...
01 :22 :16 → 01 :22 :18 Après, il te reste dix minutes.
01 :22 :18 → 01 :22 :19 Après, il te reste dix minutes.
01 :22 :19 → 01 :22 :20 À la fin.
01 :22 :23 → 01 :22 :26 Correction des questions.

01 :22 :30 → 01 :22 :31 C'est ça.
01 :22 :37 → 01 :22 :38 OK.
01 :22 :38 → 01 :22 :40 Interrogation des élèves.
01 :22 :49 → 01 :22 :51 Phase six.
01 :22 :51 → 01 :22 :53 Bilan oral.
01 :22 :59 → 01 :23 :02 Bilan oral, ça prend deux minutes.
01 :23 :02 → 01 :23 :03 Je vais faire un petit bilan
01 :23 :03 → 01 :23 :04 sur ce qui a été fait.
01 :23 :04 → 01 :23 :05 Donc, les tanks.
01 :23 :05 → 01 :23 :07 Cinq, dix, quinze.
01 :23 :07 → 01 :23 :09 Donc, cinq, dix, dix.
01 :23 :09 → 01 :23 :11 Allez, même si on mettait
01 :23 :11 → 01 :23 :13 dix, quinze.
01 :23 :14 → 01 :23 :16 Et deux minutes.
01 :23 :16 → 01 :23 :18 Mais tu l'écris, vas-y.
01 :23 :20 → 01 :23 :21 Bah, tant qu'on y est.
01 :23 :21 → 01 :23 :24 Après, il nous reste
01 :23 :24 → 01 :23 :26 les types de production.
01 :23 :26 → 01 :23 :29 Les savoirs internationaliser.
01 :23 :29 → 01 :23 :30 Mais ça, c'est quoi ?
01 :23 :30 → 01 :23 :31 C'est pas ça.
01 :23 :36 → 01 :23 :37 Non, c'est pas ça.
01 :23 :37 → 01 :23 :38 C'est que je me dis...
01 :23 :38 → 01 :23 :39 Je pense pas que tout le monde
01 :23 :39 → 01 :23 :40 se soit cassé la tête autant.
01 :23 :40 → 01 :23 :41 Savoir internationalisé,
01 :23 :41 → 01 :23 :42 je pense que c'est peut-être
01 :23 :42 → 01 :23 :43 ce qu'il y a dans le B.O.
01 :23 :43 → 01 :23 :45 Peut-être que sinon, on le met pas.
01 :23 :45 → 01 :23 :46 Ouais.
01 :23 :46 → 01 :23 :47 Et les pré-requis.
01 :23 :47 → 01 :23 :48 Mais en fait, on a pas de pré-requis
01 :23 :48 → 01 :23 :49 comme c'est l'introduction.
01 :23 :51 → 01 :23 :52 Oui, c'est une introduction.
01 :23 :52 → 01 :23 :53 Donc, effectivement,
01 :23 :53 → 01 :23 :54 il y a des pré-requis.
01 :23 :54 → 01 :23 :56 Mais ils auront dû déjà
01 :23 :56 → 01 :23 :58 les trouver ou pas sur...
01 :23 :59 → 01 :24 :00 Vas-y, fini.
01 :24 :00 → 01 :24 :01 Je te dis ça.

01 :24 :08 → 01 :24 :09 Alors, donc...
01 :24 :09 → 01 :24 :10 Pas très bien.
01 :24 :10 → 01 :24 :11 Du coup, on a déjà
01 :24 :11 → 01 :24 :12 une petite heure pile.
01 :24 :14 → 01 :24 :15 Ouais.
01 :24 :15 → 01 :24 :16 Ah, faut les imprimer ?
01 :24 :17 → 01 :24 :18 Non, je crois qu'il faut
01 :24 :18 → 01 :24 :19 les mettre sur sa clé.
01 :24 :19 → 01 :24 :20 Ah, d'accord, ok.
01 :24 :20 → 01 :24 :21 Enregistre aussi.
01 :24 :22 → 01 :24 :23 C'est vrai que j'espère que j'ai pas
01 :24 :23 → 01 :24 :24 des virus
01 :24 :24 → 01 :24 :25 sur mon PC
01 :24 :26 → 01 :24 :28 C'est le cadeau empoisonné.
01 :24 :28 → 01 :24 :29 Horrible.
01 :24 :30 → 01 :24 :31 Honnêtement...
01 :24 :32 → 01 :24 :34 Alors, déroulement de la séance...
01 :24 :34 → 01 :24 :35 Prérequis...
01 :24 :35 → 01 :24 :36 L'activité des élèves,
01 :24 :36 → 01 :24 :37 vous connaissez pas ?
01 :24 :37 → 01 :24 :38 En fait, la...
01 :24 :39 → 01 :24 :40 L'activité des élèves,
01 :24 :40 → 01 :24 :41 déjà, une, c'est dedans,
01 :24 :41 → 01 :24 :43 et en plus, c'est le sujet, quoi.
01 :24 :43 → 01 :24 :44 Ouais, c'est vrai.
01 :24 :44 → 01 :24 :45 Donc, c'est pas la peine
01 :24 :45 → 01 :24 :46 de la rajouter.
01 :24 :46 → 01 :24 :47 Et la production attendue
01 :24 :47 → 01 :24 :48 le cas échéant...
01 :24 :48 → 01 :24 :49 Le cas échéant ?
01 :24 :49 → 01 :24 :50 Y a pas de cas échéant.
01 :24 :50 → 01 :24 :51 Bah, c'est ça.
01 :24 :52 → 01 :24 :53 Y a pas de production à la fin.
01 :24 :53 → 01 :24 :54 Production des élèves,
01 :24 :54 → 01 :24 :55 peut-être...
01 :24 :56 → 01 :24 :57 Non, en fait,
01 :24 :57 → 01 :24 :58 y a pas de production.
01 :24 :58 → 01 :24 :59 Réponse aux questions
01 :24 :59 → 01 :25 :00 dans leur...
01 :25 :00 → 01 :25 :01 Dans le sens où

01 :25 :01 → 01 :25 :02 on le ramasse pas,
01 :25 :02 → 01 :25 :03 c'est ça le truc.
01 :25 :03 → 01 :25 :04 Donc...
01 :25 :05 → 01 :25 :06 Pas ramasser,
01 :25 :06 → 01 :25 :07 activité à répondre
01 :25 :07 → 01 :25 :08 dans leur cours, quoi.
01 :25 :08 → 01 :25 :09 Oui, c'est ça.
01 :25 :09 → 01 :25 :10 Ouais, on va mettre...
01 :25 :11 → 01 :25 :12 Production des élèves.
01 :25 :14 → 01 :25 :15 Travail non ramassé
01 :25 :15 → 01 :25 :17 à rédiger dans leur cours.
01 :25 :19 → 01 :25 :20 Ou dans leur partie exercice,
01 :25 :20 → 01 :25 :21 comme tu veux.
01 :25 :22 → 01 :25 :23 Je sais pas si tu fais
01 :25 :23 → 01 :25 :24 la différence.
01 :25 :24 → 01 :25 :25 Euh, ouais, moi,
01 :25 :25 → 01 :25 :26 je fais la différence.
01 :25 :27 → 01 :25 :28 Moi, en fait,
01 :25 :28 → 01 :25 :29 j'ai des chapitres par chapitre,
01 :25 :29 → 01 :25 :30 t'sais, ils ont des petits dossiers.
01 :25 :30 → 01 :25 :31 Ils font une copie double
01 :25 :31 → 01 :25 :32 où ils mettent tout dedans.
01 :25 :32 → 01 :25 :33 Moi, les activités
01 :25 :33 → 01 :25 :34 qui ont servi
01 :25 :34 → 01 :25 :35 à découvrir le cours
01 :25 :35 → 01 :25 :36 sont la partie cours.
01 :25 :36 → 01 :25 :37 Les exercices d'entraînement
01 :25 :37 → 01 :25 :38 sont la partie exercice.
01 :25 :39 → 01 :25 :40 j'suis contente,
01 :25 :40 → 01 :25 :41 j'étais fière d'eux, tu vois.
01 :25 :41 → 01 :25 :42 Non, mais ça,
01 :25 :42 → 01 :25 :43 c'est n'importe quoi,
01 :25 :43 → 01 :25 :44 c'est tout mélangé,
01 :25 :44 → 01 :25 :45 ça, faut que j'attends.
01 :25 :45 → 01 :25 :46 Je trouve ça trop mignon.
01 :25 :46 → 01 :25 :47 Une production des élèves.
01 :25 :47 → 01 :25 :48 Moi, c'est vraiment
01 :25 :48 → 01 :25 :49 en mode genre, t'sais,
01 :25 :49 → 01 :25 :50 ils ont une copie double
01 :25 :50 → 01 :25 :51 avec le chapitre

01 :25 :51 → 01 :25 :52 et le thème.
01 :25 :52 → 01 :25 :53 Après, dessus,
01 :25 :53 → 01 :25 :54 ils ont le résumé
01 :25 :54 → 01 :25 :55 du chapitre
01 :25 :55 → 01 :25 :56 avec des petites fiches
01 :25 :56 → 01 :25 :57 où je leur mets
01 :25 :57 → 01 :25 :58 tout ce qu'il faut,
01 :25 :58 → 01 :25 :59 se rappeler bien
01 :25 :59 → 01 :26 :00 dans le chapitre et tout,
01 :26 :00 → 01 :26 :01 tu vois.
01 :26 :01 → 01 :26 :02 Et en fait, à l'intérieur,
01 :26 :02 → 01 :26 :03 ils ont une feuille de cours,
01 :26 :04 → 01 :26 :05 souvent une feuille d'exercice,
01 :26 :05 → 01 :26 :06 sinon, les exercices
01 :26 :06 → 01 :26 :07 sont écrits à la fin du cours
01 :26 :07 → 01 :26 :08 pour prendre moins de place
01 :26 :08 → 01 :26 :09 sur les photocopies.
01 :26 :09 → 01 :26 :10 Que déjà,
01 :26 :10 → 01 :26 :11 avec trois feuilles,
01 :26 :11 → 01 :26 :12 ils sont débordés.
01 :26 :12 → 01 :26 :13 Ouais, ils écrivent
01 :26 :13 → 01 :26 :14 tout leur cours à la main.
01 :26 :14 → 01 :26 :15 Y'a pas de...
01 :26 :15 → 01 :26 :16 Ouais, mais les gens
01 :26 :16 → 01 :26 :17 écrivent tout doucement,
01 :26 :17 → 01 :26 :18 du coup,
01 :26 :18 → 01 :26 :19 c'est des textes à trous.
01 :26 :19 → 01 :26 :20 Ouais, après ça,
01 :26 :20 → 01 :26 :21 vaut mieux pas.
01 :26 :21 → 01 :26 :22 Honnêtement,
01 :26 :22 → 01 :26 :23 ça marche bien avec eux.
01 :26 :23 → 01 :26 :24 Non, c'est pas ça
01 :26 :24 → 01 :26 :25 ce que je veux dire,
01 :26 :25 → 01 :26 :26 c'est que ça les entraîne pas
01 :26 :26 → 01 :26 :27 justement à l'écrit,
01 :26 :27 → 01 :26 :28 tu vois.
01 :26 :28 → 01 :26 :29 Ah, non, je veux dire,
01 :26 :30 → 01 :26 :31 les activités,
01 :26 :31 → 01 :26 :32 les comptes rendus et tout,
01 :26 :32 → 01 :26 :33 ils rédigent tout, tout seuls.

01 :26 :33 → 01 :26 :34 Je mets sinon activité,
01 :26 :34 → 01 :26 :35 sinon rendu,
01 :26 :35 → 01 :26 :36 et c'est tout.
01 :26 :36 → 01 :26 :37 On se prend pas la tête
01 :26 :37 → 01 :26 :38 et on y va.
01 :26 :38 → 01 :26 :39 Ouais, ouais, ouais.
01 :26 :39 → 01 :26 :40 Et après, les prérequis,
01 :26 :40 → 01 :26 :41 juste.
01 :26 :41 → 01 :26 :42 Oui, oui, oui.
01 :26 :42 → 01 :26 :43 Vous estimez ça ?
01 :26 :43 → 01 :26 :44 Bah, les pré-requis,
01 :26 :44 → 01 :26 :46 notion de masse peut-être,
01 :26 :46 → 01 :26 :47 notion de pression peut-être,
01 :26 :47 → 01 :26 :48 parce que même
01 :26 :48 → 01 :26 :49 si on n'a pas de prérequis,
01 :26 :49 → 01 :26 :50 notion de pression,
01 :26 :50 → 01 :26 :51 c'est peut-être pas un luxe
01 :26 :51 → 01 :26 :52 de le mettre.
01 :26 :52 → 01 :26 :53 Ouais, ça marche,
01 :26 :53 → 01 :26 :54 mais ils l'auront dû quand,
01 :26 :54 → 01 :26 :55 du coup, la pression,
01 :26 :55 → 01 :26 :56 s'ils l'ont...
01 :26 :56 → 01 :26 :57 Bah, avant.
01 :26 :57 → 01 :26 :58 D'accord.
01 :26 :58 → 01 :26 :59 Donc, pression,
01 :26 :59 → 01 :27 :00 masse volumique,
01 :27 :00 → 01 :27 :01 température.
01 :27 :01 → 01 :27 :02 D'accord.
01 :27 :02 → 01 :27 :03 Donc, peut-être,
01 :27 :03 → 01 :27 :04 masse volumique et pression,
01 :27 :04 → 01 :27 :05 c'est tout.
01 :27 :05 → 01 :27 :06 Ça marche.
01 :27 :06 → 01 :27 :07 J'ai la nausée.
01 :27 :07 → 01 :27 :08 Vivent les règles.
01 :27 :08 → 01 :27 :09 C'est ça.
01 :27 :09 → 01 :27 :10 Alors, donc,
01 :27 :10 → 01 :27 :11 notion de pression,
01 :27 :11 → 01 :27 :12 de masse volumique.
01 :27 :12 → 01 :27 :13 Parce que là,
01 :27 :13 → 01 :27 :14 la température,

01 :27 :14 → 01 :27 :15 elle intervient pas trop,
 01 :27 :15 → 01 :27 :16 donc c'est peut-être
 01 :27 :16 → 01 :27 :17 pas nécessaire de la mettre.
 01 :27 :17 → 01 :27 :18 D'accord.
 01 :27 :18 → 01 :27 :19 Donc, je vais mettre
 01 :27 :19 → 01 :27 :20 notion de pression
 01 :27 :21 → 01 :27 :22 Et de force,
 01 :27 :22 → 01 :27 :23 on peut rajouter
 01 :27 :23 → 01 :27 :24 masse volumique de l'eau,
 01 :27 :24 → 01 :27 :25 parce qu'ils doivent
 01 :27 :25 → 01 :27 :26 s'en rappeler.
 01 :27 :26 → 01 :27 :27 Et la constante
 01 :27 :27 → 01 :27 :28 de pesanteur.
 01 :27 :28 → 01 :27 :29 C'est des notions...
 01 :27 :29 → 01 :27 :30 C'est des valeurs numériques
 01 :27 :30 → 01 :27 :31 qu'ils doivent se rappeler,
 01 :27 :31 → 01 :27 :32 donc...
 01 :27 :32 → 01 :27 :33 Voilà.
 01 :27 :33 → 01 :27 :34 Et toi,
 01 :27 :34 → 01 :27 :35 t'avais pas compris ça ?
 01 :27 :35 → 01 :27 :36 Voilà.
 01 :27 :36 → 01 :27 :37 J'ai juste mis ça
 01 :27 :39 → 01 :27 :40 C'est ça,
 01 :27 :51 → 01 :27 :52 Donc,
 01 :27 :52 → 01 :27 :53 deux encore.
 01 :27 :53 → 01 :27 :54 D'accord,
 01 :28 :10 → 01 :28 :11 On a une heure de pause ?
 01 :28 :11 → 01 :28 :12 Je sais pas,
 01 :28 :12 → 01 :28 :13 franchement je l'ai pas
 01 :28 :13 → 01 :28 :14 regardé,
 01 :28 :14 → 01 :28 :15 c'est pas normal.
 01 :28 :15 → 01 :28 :19.280 Je sais pas. Franchement, j'ai pas regardé, c'est pas normal.
 01 :28 :19.440 → 01 :28 :20.680 On verra plus tard.
 01 :28 :20 → 01 :28 :23 Alors, du coup, juste pour le titre ici, on met quoi ?
 01 :28 :28.440 → 01 :28 :30.560 Je sais pas. On laisse tomber ça.
 01 :28 :30.720 → 01 :28 :31.720 Tant pis.
 01 :28 :31.880 → 01 :28 :33.680 Situation d'apprentissage.
 01 :28 :33 → 01 :28 :36.120 Ouais, ouais, on peut mettre ça.
 01 :28 :36.280 → 01 :28 :39.480 ...
 01 :28 :39 → 01 :28 :41 Donc, situation d'apprentissage.

01 :28 :41.960 → 01 :28 :44.320 ...
01 :28 :44.440 → 01 :28 :45.440 C'est ça.
01 :28 :45.600 → 01 :28 :46.600 Avec...
01 :28 :46.760 → 01 :28 :48 Le document historique.
01 :28 :48 → 01 :28 :51.920 ...
01 :28 :52 → 01 :28 :53 Historique.
01 :28 :53 → 01 :28 :56 ...
01 :28 :56 → 01 :28 :58 Et du coup, c'est juste...
01 :28 :58 → 01 :29 :00 Description d'un fluide au repos.
01 :29 :00 → 01 :29 :04 ...
01 :29 :05 → 01 :29 :06 Il faut qu'on y aille...
01 :29 :06 → 01 :29 :07 Ouais.
01 :29 :07 → 01 :29 :10 Enfin, c'est pas pour te presser, c'est que même lui...
01 :29 :10 → 01 :29 :12 T'inquiètes, oui, déjà, effectivement...
01 :29 :12 → 01 :29 :13 Oui, c'est tout.
01 :29 :14 → 01 :29 :15 Au revoir.
01 :29 :15 → 01 :29 :20 ...

Table des figures

| | | |
|------|--|-----|
| 1.1 | Transformation d'une particule de fluide pendant δt | 33 |
| 1.2 | Décomposition de la transformation d'une particule de fluide pendant δt | 34 |
| 1.3 | Contraintes surfaciques s'exerçant sur la surface orientée selon e_x | 37 |
| 1.4 | Tube de courant s'appuyant sur les contours fermés \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 | 47 |
| 1.5 | Vue en coupe et vue du dessus d'un volume infiniment fin entourant l'interface | 51 |
| 1.6 | Effet Venturi dans une canalisation horizontale | 54 |
| 1.7 | Schéma d'un siphon | 55 |
| 1.8 | Lignes de courant autour d'une aile d'avion se déplaçant horizontalement | 57 |
| 1.9 | Représentation des molécules de part et d'autre d'une surface élémentaire dS | 63 |
| 1.10 | Potentiel de Lennard-Jones E_p en fonction de la distance r entre deux molécules | 65 |
| 1.11 | Molécules de gaz parfait autour d'une surface dS | 68 |
| 1.12 | Passage de molécules dans le rétrécissement d'une conduite | 71 |
| 2.1 | Extrait du questionnaire diffusé par Besson et al., 2001 | 83 |
| 2.2 | Difficultés ciblées par les différentes propositions didactiques | 97 |
| 4.1 | Effectif répondant pour chacune des questions | 158 |
| 4.2 | Répartition des éléments explicatifs mobilisés pour la situation A | 161 |
| 4.3 | Répartition des éléments explicatifs mobilisés pour la situation B | 162 |
| 5.1 | Représentation synoptique de la façon dont sont conceptuellement reliés les éléments du <i>corpus</i> de correspondances | 218 |
| 6.1 | Représentation schématique de la genèse d'un document (Gueudet & Trouche, 2008) | 224 |
| 6.2 | Données recueillies au cours de l'ensemble de la formation | 228 |
| 6.3 | Degré de transformation du <i>corpus</i> | 229 |
| 6.4 | Probabilité de faire une prévision correcte sous l'hypothèse nulle | 263 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|---|-----|
| 1 | Extrait du B.O. n°31 du 30 juillet 2020 Programme d'enseignement du cycle des apprentissages fondamentaux (cycle2) | 16 |
| 2 | Extrait du B.O. spécial n°1 du 22 janvier 2019 Programme de spécialité physique-chimie de première générale | 17 |
| 3 | Extraits du B.O. spécial n°8 du 25 juillet 2019 Programme de spécialité physique-chimie de première générale | 17 |
| 4.1 | Ruptures et continuités entre les cadres culturels hydrostatique et mécanique . . | 141 |
| 4.2 | Explications de la situation A dans les cadres hydrostatique et mécanique | 146 |
| 4.3 | Explications de la situation B dans les cadres hydrostatique et mécanique | 147 |
| 4.4 | Justifications proposées pour la situation A (objet suspendu) | 154 |
| 4.5 | Justifications proposées pour la situation B (tube retourné) | 155 |
| 4.6 | Analyse des justifications proposées pour la situation A | 156 |
| 4.7 | Validité des justifications proposées à la situation A | 156 |
| 4.8 | Analyse des justifications proposées pour la situation B | 157 |
| 4.9 | Validité des justifications proposées à la situation B | 157 |
| 4.10 | Réponses et types de justifications pour la situation A | 164 |
| 4.11 | Réponses et types de justifications pour la situation B | 164 |
| 4.12 | Cadre(s) choisi(s) pour justifier selon la validité de la réponse | 166 |
| 4.13 | Nombre de cadres mobilisés selon la validité de la réponse (situation A) | 167 |
| 4.14 | Nombre de cadres mobilisés selon la validité de la réponse (situation B) | 167 |
| 4.15 | Nombre moyen de cadres mobilisés selon la validité de la réponse | 167 |
| 5.1 | Extrait du B.O. spécial n°1 du 22 janvier 2019 Programme de spécialité physique-chimie de première générale | 188 |
| 5.2 | Conversions des unités de longueur | 194 |
| 6.1 | Analyse des documents support | 237 |
| 6.2 | Analyse des situations d'apprentissage | 238 |
| 6.3 | Éléments du <i>corpus</i> pris en charge dans les situations d'apprentissage | 238 |
| 6.4 | Évaluation du <i>corpus</i> par les enseignant·e·s | 245 |
| 6.5 | Effectifs sélectionnant chaque question et justification (situation A) | 260 |
| 6.6 | Effectifs sélectionnant chaque question et justification (situation B) | 260 |
| 6.7 | Nombre moyen de justifications choisies selon la validité des réponses | 261 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.8 | Justifications proposées et choisies dans chaque cadre de rationalité | 262 |
| 6.9 | Table de contingence observée | 264 |
| 6.10 | Table de contingence observée | 265 |