

L'expérience de Blaise Pascal au puy de Dôme : analyse des difficultés des étudiants de premier cycle universitaire et confrontation historique.

Cécile de Hosson et Bénédicte Caillarec

LDSP, université Paris-Diderot-Paris-7, cecile.dehosson@univ-paris-diderot.fr
collège Jacques Prévert, Gaillard, bcaillarec@gmail.com

Résumé • En 1647, Blaise Pascal suggère d'élever le dispositif barométrique de Torricelli au sommet du puy de Dôme afin d'éprouver l'hypothèse de la « pesanteur de la masse de l'air », forme primitive de ce qui deviendra la pression atmosphérique. Cette expérience, réalisée en 1648, s'inscrit sur fond de polémique autour de l'existence du vide et va faire l'objet d'interprétations variées. Ainsi, l'hypothèse de la pesanteur de la masse de l'air comme cause des variations observées au cours de l'ascension du puy de Dôme est loin de faire l'unanimité parmi les savants du XVII^e siècle. Nous retrouvons une difficulté analogue chez des étudiants ayant pourtant reçu un enseignement de statique des fluides. L'enquête que nous présentons dans cet article montre que ces derniers peinent à considérer le dispositif torricellien comme un dispositif en interaction avec l'air atmosphérique.

Mots clés • Pression atmosphérique, histoire des sciences, expérience du puy de Dôme, baromètre.

Introduction

La question des interactions entre histoire des sciences et recherche en didactique a largement été discutée par les didacticiens au cours des quatre dernières décennies. L'attention portée aux grandes tendances de raisonnement à partir des années soixante-dix a ouvert la voix à une réactivation, certes sous une forme quelque peu édulcorée, de la thèse du parallélisme onto-psychogénétique (Langevin 1964, Piaget & Garcia 1989). Si certaines

conceptions d'élèves trouvent un écho troublant dans l'histoire des sciences (Carey 1985, Nersessian 1989), l'utilité de telles similitudes pour la recherche et pour l'enseignement demeure limitée et leur pertinence débattue (Saltiel & Viennot 1985, Matthews 1994). Pourtant, les errances et les polémiques dont l'histoire des sciences est témoin, apparaissent souvent comme des indicateurs plutôt performants des notions qui risquent de poser certaines difficultés d'apprentissage (Saltiel & Malgrange 1980, Galili 1996, Laugier & Dumon 2000, Monk & Osborne 1997, Hosson (de) & Kaminski 2007).

L'expérience barométrique de Torricelli (figure 1) et son utilisation par Blaise Pascal au milieu du XVII^e siècle jouent un rôle déterminant dans la genèse du concept de pression atmosphérique. Un tel poids historique amène à considérer cette expérience d'un point de vue didactique. De fait, elle apparaît dans plusieurs manuels scolaires de seconde pour illustrer la partie du programme consacrée à l'étude de l'air atmosphérique (Bordas 2004, p. 251 et 258, Hachette Collection Durandeu 2004, p. 165) et reste présente dans la plupart des cours de statique des fluides des ouvrages de physique du supérieur (Kane & Sternheim 2006 p. 309, Hecht 1999 p. 399). L'exploitation de l'expérience de Torricelli en contexte universitaire se fait souvent dans un but purement calculatoire : il s'agit de donner une équivalence de la valeur de la pression atmosphérique en millimètres de mercure en appliquant la loi $\Delta p = -\rho g \Delta h$. Cette égalité mathématique traduit l'état d'équilibre du mercure : la différence de pression Δp entre deux points est proportionnelle à la différence d'altitude Δh entre ces mêmes points¹. La cause même de la suspension du mercure dans le tube de verre est, elle, rarement discutée, l'expérience étant présentée comme *preuve* de l'existence de la pression atmosphérique. Pourtant, l'hypothèse du « poids de l'atmosphère » (forme primitive du concept de pression atmosphérique) formulée par Torricelli puis par Pascal pour expliquer l'expérience barométrique n'emporte pas l'adhésion immédiate d'une communauté savante encore dominée par l'autorité de l'*horror vacui* (l'horreur du vide) prônée par Aristote depuis le IV^e siècle avant J.-C.

Cette difficulté historique sonne comme une alerte et nous conduit à interroger la façon dont les étudiants d'aujourd'hui comprennent l'expérience barométrique de Torricelli. Pour cela, nous avons réalisé deux enquêtes, l'une

(1) De façon plus qualitative, le poids de la colonne de mercure ($P = m_{\text{Hg}} g$) est équilibré par le poids de l'air qui appuie sur la totalité de la surface libre du mercure dans la cuve. En rapportant ces deux forces à une même unité de surface, on peut écrire que la pression qui s'exerce sur la surface du mercure contenu dans la cuve (qui est la pression atmosphérique du lieu où se fait l'expérience) est égale à la pression dans le mercure au niveau de l'ouverture du tube. Dans le haut du tube, le mercure liquide est en équilibre avec sa vapeur. La pression régnant dans l'espace en haut du tube est donc la pression de vapeur saturante du mercure à la température considérée comme constante (à 20°C, $p^*_{(\text{Hg})} = 0,16012 \text{ Pa}$). Cette valeur étant négligeable au regard de la pression atmosphérique (même au sommet du puy de Dôme), on peut admettre que l'espace laissé libre en haut du tube est vide de matière.

historique centrée sur la genèse du concept de pression, l'autre didactique. Cette dernière vise l'analyse des explications proposées par des étudiants de premier cycle universitaire scientifique (après enseignement d'hydrostatique) à qui l'on présente l'expérience barométrique de Torricelli. Notre recherche vise à utiliser des éléments de l'histoire de la statique des fluides afin d'éclairer certains raisonnements d'étudiants. Nous souhaitons ainsi discuter la place de l'expérience de Torricelli dans l'enseignement (secondaire et universitaire) : peut-elle, à elle seule, suffire à construire et à utiliser le concept de pression atmosphérique ? Est-elle une preuve de l'existence du vide ? Ce faisant, et dans la mesure où certaines similitudes apparaîtraient entre les idées des savants d'hier et celles des étudiants d'aujourd'hui, nous espérons, à terme, utiliser l'histoire des sciences comme un outil d'exposition à visée didactique (mais ceci ne sera pas présenté ici).

1. L'idée de pression atmosphérique : éléments historiques

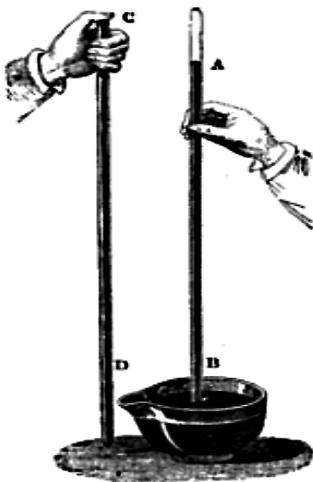
La naissance du concept de pression atmosphérique s'inscrit au sein de la société savante du XVII^e siècle sur fond de polémique à propos de l'existence du vide. Cette polémique, héritée de la science grecque, est réactivée par Galilée en 1638. Dans son *Discours concernant les deux sciences nouvelles*, Galilée rapporte que les fontainiers du parc du Grand Duc de Florence ne parviennent pas à pomper l'eau d'un puits par aspiration au-delà d'une profondeur de dix mètres :

« Il m'arriva un jour d'observer une citerne à laquelle on avait adapté une pompe dans la conviction qu'on en pourrait tirer de l'eau à moindre peine ; l'eau montait par aspiration et non sous une poussée. Tant que l'eau atteignait un niveau déterminé dans la citerne, la pompe la tirait en abondance, mais elle cessait d'opérer en deçà d'une certaine hauteur. Je crus que l'appareil était détérioré, mais l'artisan que j'avais trouvé pour faire la réparation me dit qu'il n'y avait aucun défaut, sinon du côté de l'eau qui, étant trop basse, ne souffrait plus d'être élevée aussi haut. Et il ajouta qu'aucune pompe, qu'aucune machine agissant par aspiration n'avait le pouvoir de la faire monter d'un cheveu au-delà de dix-huit coudées, ce chiffre représentant la hauteur maximale, quelle que soit la largeur des pompes. » (Galilée 1638, p. 18-19).

On pensait jusqu'alors que l'eau aspirée par les pompes remontait dans le tuyau de façon à empêcher le vide de s'installer, la nature ayant « horreur du vide », selon l'aphorisme aristotélicien (Aristote, *Physique*, livre 4, chapitre 11). Or, au-delà de dix mètres, un espace libre se forme que l'eau refuse de combler. Jusqu'au XVII^e siècle, ce fait est expliqué par une idée largement

soutenue par les autorités scolastiques : la répugnance de la nature pour le vide a (pour l'eau) une limite fixée à 10 mètres environ. En 1644, Evangelista Torricelli propose une interprétation inédite du phénomène : la limite d'aspiration de l'eau est à rechercher dans les effets du poids de l'air. Afin d'éprouver ce qu'il sera convenu d'appeler « l'hypothèse du poids de l'atmosphère » (Roux 2007, p. 6), Torricelli imagine l'expérience suivante : un tube de verre contenant du mercure est retourné sur un récipient lui-même rempli de mercure. Une partie du mercure contenu dans le tube s'écoule dans le récipient, laissant un espace vide en apparence en haut du tube de verre (espace que nous appellerons désormais « espace torricellien », voir figure 1).

Figure 1 • Expérience de Torricelli dite « expérience donnant à voir le vide ».



On remplit un tube de mercure, on obture son extrémité, puis on le retourne verticalement sur une cuve remplie du même liquide. Une fois le tube en place, son ouverture plongée dans le mercure de la cuve, on retire ce qui l'obture et l'on constate que le mercure baisse dans le tube pour se stabiliser à une hauteur de 76 cm.

Pour Torricelli, la limite atteinte par la colonne de mercure dans le tube correspond à une situation d'équilibre entre le poids de cette colonne et le poids de l'air situé au-dessus de la surface du mercure du récipient :

« La force qui empêche le mercure de tomber, comme cela devrait normalement être le cas, est extérieure à l'espace laissé libre au-dessus du mercure [...]. Le poids d'une colonne de cinquante milles d'air repose sur la surface du mercure contenu dans le récipient. [...]. La colonne de mercure est assez haute pour équilibrer le poids de l'air extérieur qui la retient vers le haut. » (Torricelli 1644, *traduction des auteurs*).

Avec cette expérience, Torricelli établit un *lien causal* entre l'action de l'air et la suspension du mercure dans le tube. D'un raisonnement fondé sur un objet local, intrinsèque au dispositif (l'espace torricellien) dont il perçoit le caractère stérile, Torricelli passe à un objet extrinsèque : l'air atmosphérique.

Ce déplacement s'accompagne d'une nouvelle approche du dispositif dans laquelle le tube à mercure devient un instrument de mesure : un baromètre, capable de rendre compte de certaines propriétés de l'air, notamment son caractère pesant. L'explication proposée par Torricelli repose sur une analogie entre l'eau et l'air. Pour lui, l'eau et l'air se comportent pareillement lorsque l'on y plonge des objets parce qu'ils possèdent, l'un comme l'autre, une masse non nulle.

« Nous vivons immergés au fond d'un océan de l'élément air dont on sait, par des expériences indubitables, qu'il est pesant et qu'il est si dense à la surface de la Terre qu'il pèse à peu près le quatre-centième du poids de l'eau [...]. » (Torricelli 1644, *traduction des auteurs*).

L'expérience « donnant à voir le vide » soulève deux questions : l'une relative à la nature de l'espace laissé libre au-dessus du mercure, l'autre relative à la suspension du mercure dans le tube. La réponse à ces deux questions opposent deux positions largement déterminées par l'attachement (ou non) des savants de l'époque à l'autorité de *l'horror vacui* : d'une part celle de la physique aristotélicienne, arguant que c'est l'horreur de la nature pour le vide qui maintient le mercure en suspension et que le sommet du tube est occupé par une matière indécélable mais effective ; d'autre part celle de la physique en voie de constitution, considérant que le sommet du tube ne peut être que vide et qu'une raison mécanique extérieure explique la suspension du mercure. De fait, l'expérience de Torricelli n'apporte pas la preuve de l'existence du vide mais l'interprétation que propose le savant italien donne au principe de causalité un sens novateur, et à l'expérience un statut inédit, dans ce qui apparaît comme l'un des premiers raisonnements hypothético-déductifs (Blanché 1969, p. 30-31 ; Roux 2007, p. 5). Cette interprétation est reprise par Blaise Pascal pour qui l'hypothèse du poids de l'atmosphère devient le pivot d'un programme expérimental original fondé sur la méthode dite des « variations » (Massignat 1998). La question n'est plus ici de savoir si le vide existe, mais de mettre à l'épreuve l'hypothèse du poids de l'air en faisant varier les propriétés du milieu extérieur au dispositif barométrique : si la hauteur de la colonne de mercure est fonction du poids de l'air, alors celui-ci étant plus faible à mesure que l'on s'élève, la hauteur de mercure baissera au sommet d'une montagne :

« La grande expérience de l'équilibre des liqueurs est la plus démonstrative de toutes celles qui peuvent être faites sur ce sujet, en ce qu'elle fait voir l'équilibre de l'air avec le vif-argent [...]. S'il arrive que la hauteur du vif-argent soit moindre au haut qu'au bas de la montagne, il s'ensuivra nécessairement que la pesanteur de l'air est la seule cause de cette suspension, et non pas l'horreur du vide, puisqu'il est 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 1648, p. 222)

Pascal souscrit à l'idée de traiter l'air comme un fluide et de considérer que ce qui se produit dans l'air se produit pareillement dans l'eau (Pascal 1663a). L'expérience du puy de Dôme (1648), mais également celle du « vide dans le vide » réalisée par Boyle en 1660 s'inscrivent dans cette perspective.

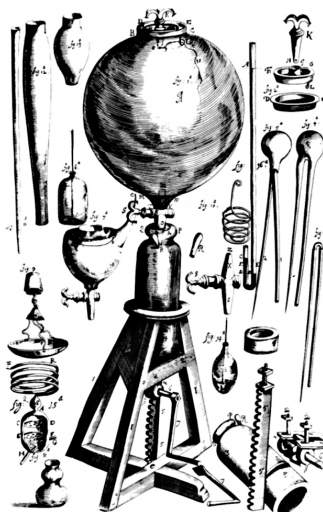
Dans une lettre adressée à Blaise Pascal le 22 septembre 1648, Florin Périer, beau-frère de celui-ci, mène le récit de *la grande expérience de l'équilibre des liqueurs*. Le dispositif barométrique de Torricelli est élevé au sommet du puy de Dôme, en Auvergne (France). Conformément aux prévisions formulées par Torricelli en 1644, puis par Pascal en 1648, la colonne de mercure diminue au cours de l'ascension (Pascal 1648, p. 221-225). Pour Pascal, il ne fait aucun doute que la variation du poids de l'atmosphère (que Pascal nomme « pesanteur de la masse de l'air ») est la cause de la variation de la colonne de mercure dans le tube. Mais contrairement à ce qui a pu être écrit, *la grande expérience de l'équilibre des liqueurs* n'est pas une expérience « cruciale » (Humbert 1948). L'interprétation proposée par Pascal dans son *Traité sur l'équilibre des liqueurs* ne clôt pas la controverse autour de l'existence du vide (Berthelot 2002) ; et l'hypothèse de la pesanteur de l'atmosphère se voit rejetée par des savants tels que l'abbé Noël, Hobbes ou encore Linus, persuadé que l'air n'est pas assez lourd pour contrebalancer le poids d'une colonne de 76 cm de mercure.

Douze ans après l'expérience du puy de Dôme, le physicien anglais Robert Boyle publie son ouvrage *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air* (1660) dans lequel il présente une machine capable de purger l'air d'un récipient clos. Cette machine est constituée de deux parties principales : un globe de verre renfermant l'air atmosphérique à évacuer et un dispositif de pompage (un piston actionné de haut en bas, voir figure 2). Elle avait pour but essentiel la réalisation de l'expérience du « vide dans le vide » qui devait donner une analogie visible des conditions de l'expérience du puy de Dôme si celle-ci était réalisée au-delà de l'atmosphère. Le dispositif barométrique de Torricelli est introduit dans le globe de verre. À ce moment de l'expérience, le mercure du tube reste au même niveau que lorsqu'il se trouve à l'air libre. Cela signifie que l'action de l'air dans le globe sur le mercure ne se réduit pas à son poids (dans le globe celui-ci est inférieur). À l'effet du poids de l'air s'ajoute une action dynamique dans toutes les directions que Boyle appelle « ressort » de l'air (Boyle 1660). Ensuite, lorsque le pompage commence, le niveau du mercure contenu dans le tube diminue jusqu'à atteindre un niveau très proche de celui du mercure de la cuve. La contribution de Boyle vient confirmer l'hypothèse de l'action de l'air atmos-

phérique et complète de manière ingénieuse la conception de Blaise Pascal concernant la pression. Quelques années plus tard, c'est un raisonnement fondé sur l'analogie entre l'air et l'eau qui conduit Edme Mariotte à réaffirmer l'hypothèse de la pression atmosphérique. Dans son *Discours sur la nature de l'air*, il suggère de plonger le dispositif barométrique de Torricelli dans l'eau à différentes profondeurs (Mariotte 1676, p. 150). Les variations de la colonne de mercure consécutives à cette immersion confirment les effets de l'action de l'air puisqu'elles sont de même nature que celles constatées par Pascal et Boyle dans l'air.

Historiquement, la genèse du concept de pression atmosphérique procède de l'étude des propriétés de l'air et, plus particulièrement, de la mise en évidence de son caractère pesant. Malgré tout, même si tous les savants du XVII^e siècle admettent que l'air a une masse, certains d'entre eux ne voient pas dans cette propriété la cause de la suspension du mercure dans le tube. Pour ces derniers, le mercure contenu dans le tube de verre est retenu par une matière invisible située dans l'espace torricellien. La méthode des variations initiée par Pascal et utilisée par Boyle finira par mettre un terme à la polémique suscitée par l'interprétation de l'expérience barométrique et permettra, dès la fin du XVII^e siècle, avec les travaux de Mariotte, d'amorcer une construction macroscopique complète du concept de « pression » (Shapin & Schaffer 1993). Celle-ci se verra complétée par une première approche microscopique au milieu du XVIII^e siècle grâce, notamment, aux travaux de Bernoulli.

Figure 2 • La première « pompe à air » de Boyle. Figure extraite de Shapin & Schaffer, 1993, cahier central



2. Contexte de l'étude

2.1 Les propriétés de l'air et l'idée de pression atmosphérique dans les programmes scolaires et universitaires français

L'étude des propriétés physiques de l'air apparaît de façon récurrente dans les programmes de sciences physiques depuis l'école primaire jusqu'à l'université.

À un niveau élémentaire d'enseignement, l'objectif est de faire prendre conscience aux plus jeunes que l'air gazeux présent dans l'atmosphère est une matière à part entière dotée de propriétés comparables à celles des liquides et des solides : comme eux, l'air résiste à la compression, il peut être transvasé d'un contenant à l'autre, il est susceptible de transporter certains objets, il occupe un certain volume et il possède une masse non nulle (Saltiel & Hartmann 2005).

Cette description macroscopique de l'air atmosphérique est complétée par une approche microscopique dès la classe de quatrième. À ce niveau d'enseignement, les élèves sont invités à interpréter l'état gazeux comme la manifestation globale d'une organisation moléculaire locale dispersée et désordonnée (*BOEN* hors-série n° 6 du 19 avril 2007, p. 16-17).

L'appréhension de l'état gazeux à deux niveaux distincts (macroscopique et microscopique) se poursuit en classe de seconde avec la présentation du modèle du gaz parfait. La notion de pression est abordée comme l'une des grandeurs macroscopiques caractéristiques de l'état gazeux en général. Elle est associée aux forces pressantes d'intensité F exercées par un gaz sur une surface donnée S et sa valeur p est exprimée sous la forme $p=F/S$. À l'échelle microscopique, ces forces sont associées à l'agitation des molécules constitutives de ce gaz (*BOEN* hors-série n° 2 du 30 août 2001, p. 25)².

Au niveau universitaire, la statique des fluides est abordée à partir de la loi fondamentale de l'hydrostatique formalisée sous la forme : $\Delta p = -\rho g \Delta h$. L'approche statistique microscopique pour l'étude de la théorie cinétique des gaz vient compléter une approche macroscopique (Valentin 1995).

Confrontées aux prémisses historiques ayant permis l'émergence du concept de pression atmosphérique, les connaissances dont disposent des étudiants de premier cycle universitaire devraient leur permettre d'interpréter l'expérience de Torricelli et son utilisation par Pascal de façon correcte, c'est-à-dire de considérer le dispositif torricellien comme un baromètre. Mais nous savons que la statique des fluides est un domaine qui cristallise beaucoup de difficultés chez les apprenants et ce, quel que soit leur niveau.

(2) L'étude de la pression atmosphérique à proprement parler n'est pas mentionnée par les programmes de seconde, y compris dans la partie intitulée « l'air qui nous entoure ».

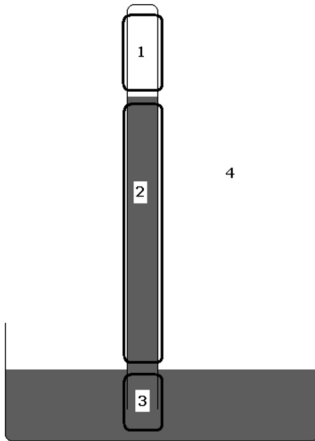
2.2 La pression dans les fluides : difficultés des étudiants

Notre enquête se situe dans un champ qui a d'ores et déjà fait l'objet de plusieurs explorations didactiques dont certains résultats viennent structurer le cadre de notre questionnement. Tout en gardant à l'esprit les travaux concernant les idées des plus jeunes sur l'air et son action sur les objets (Séré 1986, Engel Clough & Driver 1985 et 1986), nous résumons ici ceux qui s'intéressent plus spécifiquement aux raisonnements des étudiants à propos du concept de pression.

Le caractère unificateur du concept de « fluide » ne semble pas toujours opérationnel pour les étudiants : si la plupart d'entre eux affirme avec raison que la pression augmente avec la profondeur dans les liquides (Kariotoglou & Psillos 1993, Besson 2004), nombreux sont ceux qui pensent, à tort, que la pression atmosphérique augmente lorsque l'altitude augmente (Tytler 1998). En revanche, des difficultés apparaissent pareillement pour les liquides et pour les gaz : la pression dans un fluide est généralement confondue avec les forces pressantes exercées par ce liquide (Kariotoglou *et al.* 1990), elle est souvent associée au volume de fluide entourant un solide immergé et pas uniquement à la profondeur (ou à l'altitude) d'immersion (Kariotoglou *et al.* 1990, Besson & Viennot 2004), son action est couramment perçue verticalement et vers le bas (Engel Clough & Driver 1985, Kariotoglou *et al.* 1990, Besson & Viennot 2004) et l'isotropie n'est que très rarement envisagée. En outre, les travaux de Rozier ont montré que les étudiants associent préférentiellement pression et densité de gaz : la pression va, pour ces étudiants, avec l'idée géométrique de tassement, en excluant l'aspect microscopique cinétique (Rozier & Viennot 1991). Le « vide » est parfois conçu comme une entité dotée de certaines propriétés mécaniques comme l'aspiration (De Berg 1992). Les plus jeunes peinent à admettre son existence (Brehelin & Guedj 2007) et il n'est pas exclu que cette difficulté perdure, y compris à l'université, où une étude récente a montré que l'aphorisme aristotélicien « la nature a horreur du vide » est utilisé comme justification par certains étudiants (Caillarec 2007).

Concernant l'interprétation de l'expérience barométrique de Torricelli, une étude préliminaire réalisée en 2006, auprès d'une vingtaine d'étudiants de troisième année de licence, a permis de mettre en lumière des explications faisant interagir entre elles des sous-parties du dispositif torricellien (Caillarec 2007, voir définitions des sous-parties sur la figure 3). Il apparaît en effet que peu d'étudiants considèrent le dispositif torricellien comme un système en interaction avec l'air extérieur.

Figure 3 • Sous-parties du dispositif torricellien utilisées par certains étudiants dans leurs explications de l'expérience barométrique, après enseignement de statique des fluides (Caillarec 2007).



Sous-partie n° 1 : espace torricellien (Torr), sous-partie n° 2 : mercure du tube (Hg tube), sous-partie n° 3 : mercure de la cuve (Hg cuve), sous-partie n° 4 : Atmosphère (Air).

3. Analyse des raisonnements d'étudiants de L3 à propos de l'expérience de Blaise Pascal au puy de Dôme

3.1 Problématique et questions de recherche

L'invention de *la grande expérience de l'équilibre des liqueurs* par Blaise Pascal et l'interprétation de l'expérience de Torricelli reposent sur l'établissement d'un lien causal entre l'action de l'air extérieur et la suspension du mercure dans le tube de verre. Ce lien implique une connaissance des propriétés de l'air (notamment son caractère pesant) et du concept de pression. C'est l'établissement de ce lien causal par les étudiants que nous interrogeons ici. Plus spécifiquement, nous nous demandons si des étudiants ayant reçu un enseignement de statique des fluides perçoivent le dispositif torricellien comme un baromètre. Pour cela, nous cherchons à répondre aux trois questions suivantes :

- Les étudiants interrogés reconnaissent-ils l'existence d'un lien causal entre la pression atmosphérique et la suspension du mercure dans le tube ?
- Si tel est le cas, associent-ils l'action de l'air extérieur et la vacuité de l'espace torricellien ?

- Si tel n'est pas le cas, appuient-ils leurs raisonnements sur une (ou plusieurs) sous-partie(s) du dispositif. Lesquelles ? Quels sont ces raisonnements ? Sont-ils identiques pour chaque sous-partie considérée ?

Afin de répondre à ces questions, nous avons élaboré un questionnaire papier-crayon structuré autour du récit de *la grande expérience de l'équilibre des liqueurs*. Le questionnaire est présenté en annexe. Dans la première question (Q1) les étudiants sont invités à expliquer l'expérience de Torricelli. Cette demande d'explication est complétée par une question relative à la nature de l'espace torricellien (question Q2). On demande enfin aux étudiants d'interpréter le résultat de l'expérience réalisée au sommet du puy de Dôme (question Q3). Nous avons proposé notre questionnaire à 128 étudiants de troisième année de licence pluridisciplinaire scientifique au cours des années universitaires 2006-2007 et 2007-2008³. Ces étudiants, répartis sur trois universités différentes⁴, ont tous reçu un enseignement d'hydrostatique selon les orientations définies plus haut. Les réponses au questionnaire seront exploitées dans une perspective essentiellement heuristique.

3.2 Analyse des réponses au questionnaire

À la lecture des réponses obtenues lors de notre enquête préliminaire, et selon les principes inductifs de la *grounded theory* (Strauss & Corbin 1994), nous avons pu dégager cinq rubriques d'analyse auxquelles nous allons confronter les réponses aux questions Q1 et Q3. Ces rubriques sont définies comme suit :

- Réponses qui établissent explicitement un lien causal entre l'action de l'air au niveau de la surface du mercure de la cuve et la descente (ou la suspension) partielle du mercure dans le tube. Dans ces réponses, l'air extérieur est cité, le mercure du tube également. Le vocabulaire utilisé par les étudiants décrit une situation d'équilibre entre les deux. Ces réponses seront désignées sous l'appellation « Air/Hg(tube) ».
- Réponses qui laissent apparaître un raisonnement s'appuyant sur une sous-partie du dispositif torricellien. On cherche à déterminer de manière lexicale les sous-parties citées par les étudiants, en particulier : l'espace torricellien, le mercure du tube, le mercure de la cuve (voir figure 3) et à caractériser les liens éventuels que les étudiants établissent entre ces sous-parties : lien entre le mercure de la cuve et celui du tube ou lien entre

(3) Les étudiants qui suivent ce cursus sont tous titulaires d'un L2 scientifique et d'un bac S.

(4) Université de Montpellier-2, de Lille-1 et de Paris Diderot-Paris 7. Le questionnaire est présenté aux étudiants comme un questionnaire d'enquête qui n'entre pas dans le contrôle des connaissances. Les étudiants répondent façon anonyme.

la matière contenue dans l'espace torricellien et le mercure du tube par exemple. Les critères retenus pour la catégorisation de ces réponses sont précisés dans le tableau 1 ci-après. Dans ces réponses, la colonne de mercure apparaît comme un élément central du raisonnement de l'étudiant. Sa suspension et sa variation sont associées explicitement à l'action d'une autre sous-partie du système (qui peut être soit l'espace torricellien, soit le mercure de la cuve) ou à la variation d'un paramètre expérimental. Ces réponses seront désignées sous l'appellation « loc » pour « local », ces réponses excluent donc l'air extérieur.

Tableau 1 • Présentation des critères de classement des réponses des étudiants aux questions Q1 et Q3 en fonction de la sous-partie du système considéré. Réponses de type « loc ».

Sous partie	Désignation et description	Critères de classement retenus
1	Action à l'interface entre l'espace torricellien et le mercure du tube : Torr/Hg(tube)	L'espace torricellien agit sur le mercure du tube. Cette action est repérée par l'utilisation d'expressions du type : « quelque chose pousse/attire/retient... le mercure du tube ».
2	Mercure du tube : Hg (tube)	La diminution de la colonne de mercure est associée à une diminution de volume pour une quantité identique de mercure dans le tube. Dans ces réponses, on repère l'influence de paramètres tels que la « pression », la « température », la « gravité », etc.
3	Action à l'interface entre le mercure du tube et le mercure de la cuve : Hg(tube)/Hg(cuve)	La colonne de mercure est « retenue » par le mercure de la cuve. Dans ces réponses, « les mercures » des deux récipients sont distingués et interagissent de manière explicite.

- Réponses qui se réduisent à l'utilisation du mot « pression », celui-ci ayant valeur, pour l'étudiant, d'explication, mais qui ne renseignent pas le chercheur sur le processus de raisonnement sous-jacent. Exemple : « c'est à cause de la pression ». Ces réponses s'avèrent difficilement exploitables : elles ne feront l'objet d'aucune analyse particulière et ne sont donc pas nommées spécifiquement.
- Absence de réponse ou réponses du type « je ne sais pas ». Ces réponses sont regroupées sous l'appellation « NSP ».
- Réponses qui n'entrent dans aucune des rubriques précédentes, regroupées sous l'appellation « Autre ».

Si l'on considère le questionnaire dans son ensemble, seul un quart des étudiants interrogés (21 sur 128 soit 27 %) répond en mettant en œuvre des raisonnements causaux qui associent l'action de l'air extérieur et la suspension du mercure du tube. Il sera intéressant d'étudier la persévérance des étudiants dans ce type de raisonnement pour Q1 et Q3, et son lien avec la nature de

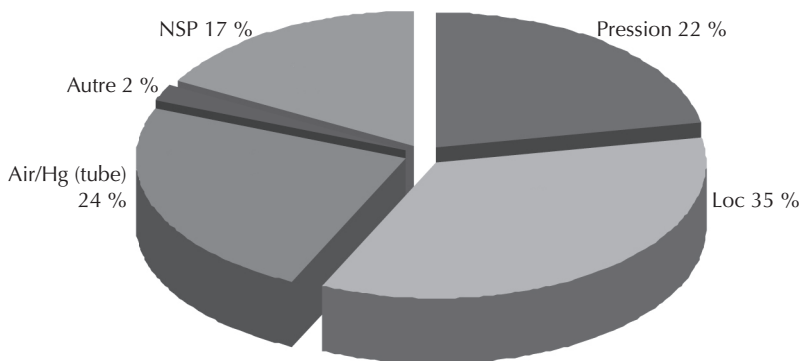
l'espace torricellien en réponse à Q2. Nous procédons maintenant à l'analyse des réponses question par question. Des éléments visant à caractériser la cohérence des réponses des étudiants aux trois questions sont présentés en fin d'analyse.

3.2.1 Analyse des réponses à la question Q1

La figure 4 rend compte de la répartition des réponses à la question Q1.

Moins d'un quart des étudiants interrogés (25 sur 128, soit 24 % de la totalité des réponses) explique l'expérience 1 en associant l'action de l'air extérieur et la suspension du mercure du tube (rubrique Air/Hg(tube)). Les réponses complètes et précises du type : « La pression au niveau de la surface libre du mercure est la pression atmosphérique. Le mercure est attiré par la Terre et la pression atmosphérique le repousse dans le tube mais jusqu'à une certaine hauteur » sont donc minoritaires. Dans toutes ces réponses, l'action de l'air extérieur est explicitement mise en relation avec l'action du mercure dans le tube, même si des confusions entre « pression » et « force pressante » apparaissent (10 sur 25) : « Le mercure est un métal lourd ; h [Note des auteurs : hauteur de vide au-dessus de la colonne de mercure] correspond à l'équilibre entre le *poids* du mercure (force dirigée vers le bas) et la *pression atmosphérique* qui, en appuyant sur la cuve doit compenser le poids ».

Figure 4 • Répartition des réponses à Q1 (N = 128)



Vingt-deux pourcent des étudiants (28 sur 128) proposent le terme « pression » comme seule explication dans des phrases laconiques telles que « c'est à cause de la pression ». On ignore dans ces réponses s'il s'agit de la pression atmosphérique et, surtout, nous n'avons aucune explication réelle du phénomène présenté. Ces réponses ne nous permettent donc pas de conclure à une compréhension de l'expérience par les étudiants qui en sont les auteurs.

On distingue ensuite des explications de type « loc » (45 sur 128 soit 35 % des réponses) mettant en jeu une (ou plusieurs) sous-partie(s) du dispositif.

Les raisonnements ainsi mis en évidence s'appuient non sur le système entier, mais sur une partie de celui-ci, ce qui contrarie une approche globale incluant l'air extérieur. La répartition des réponses « loc » est présentée dans tableau 2 ci-dessous. Ainsi, 12 % des étudiants interrogés (15 sur 128) expliquent l'expérience 1 en établissant un lien explicite entre le mercure de la cuve et le mercure du tube comme s'il existait, entre ces « deux » mercures, une limite physique en soi : « Le mercure ne coule pas car il est retenu par le mercure de la cuve »⁵ ou encore « Il y a un rapport entre le poids de la colonne de mercure et la force exercée par le mercure de la bassine sur la colonne. La force exercée par le poids est plus forte, c'est pourquoi la hauteur diminue jusqu'à égalité ». Sur un registre identique, certains étudiants convoquent « la poussée d'Archimède », qui empêcherait le mercure du tube de couler dans celle de la cuve : « le mercure descend car il est attiré par la Terre, mais pas complètement car le mercure de la cuve exerce une poussée d'Archimède vers le haut ». D'autres encore raisonnent sur la pression du mercure dans les deux récipients, à l'interface : « Il y a équilibre entre la pression du mercure du tube qui veut sortir par gravité et la pression du mercure de la cuve qui veut monter ».

Tableau 2 • Répartition des explications de type « loc » à la question Q1

Liens et sous-parties sur lesquels s'appuient les raisonnements des étudiants dont les explications ne font pas intervenir l'air extérieur (45 sur 128).	N = 45
Lien Hg(cuve)/Hg(tube)	15
Lien Hg(tube)/Torr	13
Mercury du tube/conditions d'expérimentation	17
Analogie avec le thermomètre	5
Compression due à la pression	6
Changement d'état	6

Parmi les raisonnements partiels, certains portent sur la surface du mercure du tube et suggèrent une action entre le mercure du tube et l'espace torricellien. Ainsi, pour 10 % des étudiants interrogés (13 sur 128), si le mercure descend dans le tube c'est que « quelque chose » contenu dans l'espace libre le pousse vers le bas : « Ce phénomène est dû à la pression exercée, dans le tube, sur la colonne de mercure » ou encore « Il y a une pression dans le haut du tube qui pousse le mercure vers le bas ». Si la notion de pression est évoquée (dans 5 cas sur 13), il ne s'agit en aucun cas de la pression atmosphérique mais de celle du « quelque chose » contenu dans l'espace torricellien.

(5) De fait, si l'on considère un petit élément de volume situé à l'entrée du tube de verre (fig. 3), il est exact de dire que les forces exercées par le mercure du tube sont compensées par celles exercées par le mercure de la cuve. Mais, localement, ceci est vrai même lorsque le mercure descend dans le tube.

En effet, ces mêmes étudiants affirment que l'espace torricellien contient soit du gaz, soit de l'air en réponse à la question Q2. Si ces raisonnements apparaissent minoritaires, nous verrons qu'ils conduisent à une interprétation de l'expérience du puy de Dôme aussi cohérente qu'erronée.

13 % des étudiants interrogés (17 sur 128) interprètent l'expérience 1 en focalisant leur raisonnement sur le mercure du tube. On repère trois types de raisonnements distincts :

1. Une analogie avec le fonctionnement d'un thermomètre (5 sur 17) : « Le mercure était souvent utilisé pour donner la température ».
2. La convocation de la pression en tant que responsable de la compression des volumes (6 sur 17) : « Le volume de mercure diminue à cause de la pression, laissant place à du vide ».
3. L'évocation d'un changement d'état (6 sur 17) : « Il y a évaporation d'une petite quantité de mercure d'où la diminution du volume de mercure dans le tube » (il n'est pas évoqué par les étudiants auteurs de ces réponses le phénomène de vaporisation due à l'établissement de l'équilibre entre le liquide et la vapeur saturante mais seulement un changement d'état non justifié).

Les réponses des étudiants à Q1 indiquent que l'expérience de Torricelli demeure difficile d'accès y compris pour ceux qui ont reçu un enseignement d'hydrostatique au cours de leur cursus universitaire. D'ailleurs, 17 % des étudiants interrogés affirment ne pas savoir répondre à la question posée. La pression atmosphérique, responsable de la suspension partielle du mercure dans le tube, n'est évoquée que dans 25 des réponses sur les 128 questionnaires, celles-ci font apparaître un lien explicite entre l'action de l'air extérieur et la suspension du mercure du tube. En revanche, dans 35 % des cas, les raisonnements sont partiels, focalisés sur une partie du système. Ces raisonnements conduisent à des réponses non conformes à celle que l'on pourrait attendre.

3.2.2 Analyse des réponses à la question Q2

Le tableau 3 ci-dessous présente la répartition des réponses à la question Q2. Le nombre d'étudiants répondant « du vide » (60 sur 128) ou « du mercure gazeux » (8 sur 128) à cette question sont majoritaires (68 sur 128 soit 53 %). Pour quelques étudiants, la présence de vide demeure suspecte. Ainsi, sur les 60 étudiants qui répondent que l'espace est vide (ou ne contient rien), 7 le font en exprimant un doute explicitement appuyé par l'aphorisme aristotélicien de l'*horror vacui* (i.e. : l'horreur du vide) : « J'aurais tendance à dire du vide, mais je sais que la nature a horreur du vide ».

Tableau 3 • Répartition des réponses à la question Q2 (N = 128)

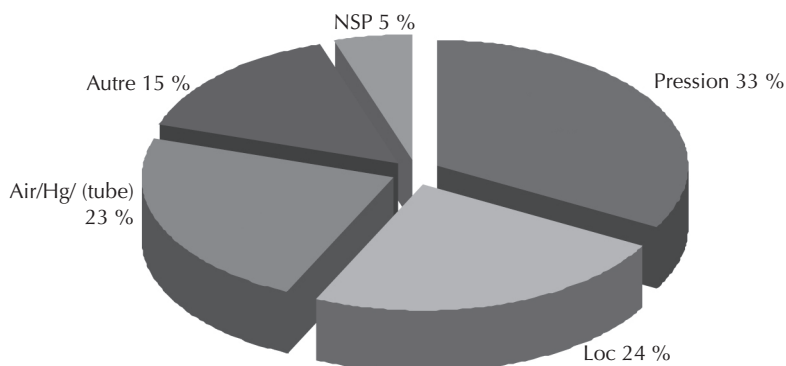
Nature de l'espace torricellien (Question Q2)	N = 128
Réponses correctes :	68
Du vide /Rien	60
Des vapeurs de Hg	8
Réponses incorrectes :	49
Du gaz	12
De l'air	37
Pas de réponse	11

Près de 10 % des étudiants interrogés écrivent qu'ils ne savent pas répondre à la question posée.

Enfin, 40 % des étudiants interrogés affirment que l'espace laissé libre contient soit du « gaz » (dont la nature n'est pas précisée), soit de « l'air ». Comme nous le disions précédemment, tous les étudiants qui appuient leur raisonnement sur une action entre l'espace torricellien et le mercure du tube dans la question Q1 (13 sur 128) affirment que cet espace contient soit de l'air, soit un gaz. Pour ces étudiants, la chute partielle du mercure du tube a été causée par l'action d'une matière présente au-dessus du mercure. Ainsi, la présence d'une matière dans l'espace torricellien leur apparaît compatible avec le résultat de l'expérience. L'expérience de Torricelli n'a donc pas le pouvoir de convaincre de façon immédiate et unanime de l'existence du vide.

3.2.3 Analyse des réponses à la question Q3

La figure 5 rend compte de la répartition des réponses à la question Q3. Moins d'un quart des étudiants interrogés explique la différence entre les hauteurs H [Note des auteurs : H désigne la hauteur laissée libre en haut du tube en haut du puy de Dôme] et h de l'espace torricellien en associant l'action de l'air extérieur et la variation de la suspension du mercure dans le tube (là non plus, nous ne tenons pas compte des confusions entre force pressante et pression) : « La pression atmosphérique repousse moins le mercure dans le tube au sommet du puy de Dôme car elle est moins élevée » ou encore « Car la pression atmosphérique est plus faible en altitude donc elle compense moins le poids du mercure dans le tube ». Tous les étudiants proposant ce type de réponse à Q3 raisonnent de manière identique à Q1

Figure 5 • répartition des réponses à Q3 (N = 128)

Le nombre de non-réponses à cette question est très inférieur au nombre de non-réponses à Q1 puisqu'il est de 7 alors que 22 étudiants ne répondaient pas à Q1. Parmi les étudiants qui ne répondent pas à Q1 et qui répondent à Q3 (15 sur 22), aucun ne répond correctement à Q3 mais tous utilisent dans leur réponse le terme « pression ». On peut donc supposer que l'expérience de Pascal au puy de Dôme induit un raisonnement centré sur la notion de pression mais on ignore ici ce que sous-tend ce terme : s'agit-il de la pression atmosphérique ? Comment celle-ci influence-t-elle l'expérience ? Toutes ces questions demeurent, à ce stade, sans réponse. Par ailleurs, nous avons relevé huit réponses qui associent (sans autre précision) la variation de h et le changement d'altitude : « C'est lié à la différence d'altitude : plus l'altitude est élevée et plus H est grand » ou « cela est dû à la différence du lieu où se produit l'expérience ». Ces réponses tautologiques, regroupées dans la rubrique « Autre », reprennent simplement les données de l'énoncé. De la même façon que précédemment, nous avons regroupé dans la rubrique « pression » les réponses du type « c'est à cause de la différence de pression » (42 sur 128, soit 33 %). Là encore, on ignore ce que recouvrent réellement ces expressions (sens de variation, nature de la pression évoquée, etc.).

On trouve 30 explications mettant en jeu une (ou plusieurs) sous-partie(s) du système. Cela représente 24 % de la totalité des réponses (N = 128). La répartition de ces réponses est présentée dans le tableau 4 ci-dessous. Ce pourcentage est en nette diminution par rapport à Q1. En particulier, la part des étudiants dont les raisonnements s'appuient sur une association entre le mercure de la cuve et celui du tube n'est plus que de 3 % (4 étudiants sur 128). À titre d'exemple, nous pouvons citer : « En altitude la force exercée par la colonne de mercure sur le mercure dans la cuve change ». Nous retrouvons ici 4 des 15 étudiants qui situaient leur explication à cette même interface en réponse à Q1. Les 11 autres évoquent le changement de « pression », sans

autre précision. On remarque que le nombre d'étudiants qui établissent un lien entre le mercure du tube et l'espace torricellien demeure quasi-inchangé. Ce sont d'ailleurs les mêmes qui raisonnent de cette façon pour Q1.

Tableau 4 • Répartition des explications de type « loc » à la question Q3

Liens et sous-parties sur lesquels s'appuient les raisonnements des étudiants dont les explications ne font pas intervenir l'air extérieur (30 sur 128).	N = 30
Lien Hg(cuve)/Hg(tube)	4
Lien Hg(tube)/Espace Torr	12
Mercury du tube	14
- Analogie avec le thermomètre	5
- Compression due à la pression	6
- Changement d'état	3

En outre, les étudiants qui, à Q1, raisonnent sur le mercure du tube en assimilant le dispositif expérimental présenté à un thermomètre, utilisent un raisonnement identique pour répondre à Q3 (6 % des étudiants interrogés). Dans ces réponses, la diminution de température explique la diminution de la hauteur de mercure dans le tube : « À 1400 m, il fait plus froid qu'à 400 m donc le mercure se rétracte davantage et prend moins de place » ou encore : « Ceci s'explique car en altitude la température est plus basse donc le volume du mercure se rétracte davantage ».

Mais le résultat le plus surprenant concerne le sens de variation de la pression. En effet, pour un tiers des étudiants interrogés (31 sur 128), le résultat de l'expérience 2 s'explique par le fait que « la pression augmente avec l'altitude ». Nous avons identifié trois types de raisonnements fondés sur cette *pseudo-hypothèse*⁶. Le tableau 5 en présente la répartition quantitative.

Tableau 5 • Répartition des réponses du type « p augmente avec l'altitude » à Q3 (N = 31)

Catégorisation des réponses du type « p augmente avec l'altitude »	N = 31
Raisonnement centré sur le mercure du tube dont...	6
- La pression augmente donc le volume diminue	4
- La pression augmente donc le changement d'état est + important	2
Raisonnement à l'interface Hg(tube)/espace torricellien	12
p augmente (sans autre précision)	13

(6) L'énoncé « p augmente avec l'altitude » est une hypothèse qui permet à 31 étudiants interrogés de fournir une explication cohérente à Q3. Toutefois, le fait que celle-ci soit inexacte au regard de la physique nous conduit à le qualifier de *pseudo-hypothèse*.

L'augmentation de la pression atmosphérique est évoquée comme cause de l'abaissement de la colonne de mercure par 13 étudiants sans autre précision. 6 des 31 étudiants fondant leur explication sur la *pseudo-hypothèse* « p augmente avec l'altitude » raisonnent sur le mercure du tube, soit en utilisant la loi des gaz parfaits « Comme p augmente avec l'altitude, le volume de mercure diminue donc $H > h$ » ou encore « On sait que $pV = nRT$ donc comme p augmente, le volume du mercure diminue », soit en invoquant à nouveau le changement d'état $Hg(l) \rightarrow Hg(g)$ « La pression est plus élevée avec l'altitude donc la quantité de mercure évaporée est plus importante ». Enfin, pour 12 des 31 étudiants, l'augmentation de H est due à l'action d'une matière contenue dans l'espace torricellien. Les explications peuvent se résumer de la façon suivante : si la pression est plus élevée en altitude alors la pression de l'air (ou du gaz) contenue dans l'espace torricellien est plus importante, ainsi l'air (ou le gaz) appuie davantage sur la surface du mercure du tube, ce qui conduit le mercure du tube à se vider davantage dans la cuve : « L'air au-dessus du mercure du tube pousse plus fort » ou « À plus de 1400 m d'altitude, il y a plus de pression qu'à 400 m d'altitude. La pression exercée par le gaz en haut du tube est donc plus importante, d'où la différence de hauteur ».

3.2.4 Bilan de l'analyse des réponses au questionnaire et réponses aux questions de recherche

La grande expérience de l'équilibre des liqueurs dont notre questionnaire est inspiré est l'aboutissement d'un cheminement conceptuel qui, historiquement, prend appui sur l'hypothèse de la pesanteur de la masse de l'air. Cette hypothèse ne semble pas opérationnelle chez des étudiants ayant reçu un enseignement d'hydrostatique au cours de leur scolarité, y compris à l'université. De fait, seul un quart des étudiants que nous avons interrogés fournit une réponse associant l'action de l'air extérieur et la suspension (ou la variation) du mercure dans le tube aux trois questions posées (on inclut ici les réponses dans lesquelles les termes « force » et « pression » apparaissent confondus).

Tous les étudiants qui établissent un lien explicite entre l'action de l'air et la suspension du mercure dans le tube de verre affirment que l'espace laissé libre en haut du tube ne contient aucune matière (25 sur 128). Mais la réciproque n'est pas vraie. Ainsi, tous les étudiants qui répondent « du vide » ou « rien » à la question Q2 (62 sur 128) n'expliquent pas la suspension du mercure dans le tube par l'action de l'air extérieur. Pour 37 d'entre eux, la raison de cette suspension est à rechercher soit dans l'action du mercure de la cuve, soit dans l'action d'un paramètre tel que la pression ou la température.

Une partie non-négligeable des réponses aux questions Q1 et Q3 (45 des 128 réponses à Q1 et 30 des 128 réponses à Q3) témoigne de raisonnements

locaux qui, pour certains, s'appuient sur l'établissement de liens entre deux sous-parties intrinsèques au dispositif, alors même que celui-ci nécessiterait plutôt une approche systémique globale, ou pour le moins, une approche associant un élément extérieur au dispositif (l'air) et le dispositif lui-même. On a ainsi pu distinguer trois grands types d'explications :

- Des explications localisées uniquement sur le mercure du tube. Dans ce cas, les raisonnements mis en œuvre font intervenir les conditions extérieures (température, pression) responsables de la diminution du volume initial de mercure. La variation de la colonne dans le tube au cours de l'ascension n'est pas consécutive à la chute d'une partie de celui-ci dans la cuve, mais à une contraction due au changement de pression ou de température.
- Des explications s'appuyant sur une action entre le mercure de la cuve et celui du tube. Dans ce cas, l'interface entre les deux mercures constitue une limite physique en soi : le mercure de la cuve joue le rôle de support et retient le mercure du tube. Cette explication a du mal à résister au résultat de l'expérience après ascension : les deux tiers des étudiants y ayant recours à Q1 y renoncent à Q3.
- Des explications reposant sur l'établissement d'un lien entre l'action d'une matière contenue dans l'espace torricellien et le mercure du tube. Dans ce dernier cas, la matière contenue dans l'espace torricellien pousse le mercure du tube. Cette action est plus forte en altitude car la pression augmente avec l'altitude. Ces explications sont cohérentes, une fois l'hypothèse de l'augmentation de la pression posée, et ne trouvent pas de contradiction dans le résultat de l'expérience.

Enfin, si l'on reprend l'ensemble des réponses aux questions Q1 et Q3, il apparaît qu'un nombre significatif d'étudiants persévère dans la tenue de leur raisonnement d'un bout à l'autre du questionnaire. Le tableau 6 ci-dessous rend compte de cette persévérance : il présente la répartition des étudiants qui proposent un certain type de réponse à Q1 (lien Hg(tube)/Torr, par exemple) et le maintiennent à Q3. À la lecture de ce tableau, nous constatons qu'à l'exception du lien Hg(cuve)/Hg(tube), tous les autres types de réponses se révèlent, pour les étudiants qui en sont les auteurs, opérationnels, ce qui explique sans doute leur permanence.

Tableau 6 • Répartition des étudiants qui proposent un certain type de réponse à Q1 et le maintiennent à Q3.

Types de réponses sur lesquels s'appuient les raisonnements des étudiants	Réponse à Q1	Réponse à Q1 ET Q3	
Lien Air/Hg(tube)	25	21	Réponses à Q2 correctes
Lien Hg(cuve)/Hg(tube)	15	4	
Lien Hg(tube)/Espace Torr	13	12	Réponses à Q2 incorrectes
Mercure du tube	17	14	
Pression	28	28	

4. Discussion et perspectives

4.1 Mise en perspective avec l'enseignement

La présentation de l'expérience barométrique qui structure la question Q1 ne fait pas explicitement intervenir le milieu extérieur. Cette question laisse de nombreux étudiants sans réponse et pour beaucoup la difficulté réside dans l'existence de l'espace torricellien et dans l'explication de la chute partielle du mercure dans le tube. Force est donc de constater que cette expérience ne démontre pas l'existence du vide (près de la moitié des effectifs de notre étude affirme que cet espace contient quelque chose), pas plus qu'elle ne prouve l'existence de la pression atmosphérique. La situation présentée à la question Q3 permet à un nombre plus important d'étudiants de mobiliser la notion de « pression » (même si les réponses apparaissent majoritairement peu explicites en termes de lien entre la pression de l'air et la variation de la colonne de mercure). Ceci peut s'expliquer par la nature de l'enseignement dispensé dans le supérieur : la loi fondamentale de l'hydrostatique telle qu'elle apparaît dans la plupart des ouvrages de physique du supérieur associe la variation de l'altitude et celle de la pression. Par ailleurs, la diminution de la hauteur du mercure dans le tube est explicitement liée dans Q3 à l'augmentation de l'altitude. Les étudiants interrogés semblent mobiliser des explications liées à la loi de l'hydrostatique autour de l'expérience du puy de Dôme (sans que celles-ci soient pour autant toutes conformes au modèle scientifique).

4.2 Mise en perspective avec les résultats des recherches antérieures

Les raisonnements mis en œuvre dans les réponses obtenues révèlent des difficultés liées au concept de pression et demeurent empreints de conceptions bien connues des chercheurs. Ainsi, le fait que plus des trois-quarts des étudiants 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. Ce résultat est à rapprocher de ceux obtenus par Séré il y a plus de 20 ans avec des élèves des classes secondaires. Pour la plupart d'entre eux, la pression atmosphérique n'est reconnue que lorsque l'air est comprimé ou lorsqu'il est en mouvement (Séré 1982, 1985). Certaines études concernant les idées des élèves à propos de la pression atmosphérique ont mis à jour une tendance à considérer que cette dernière augmente avec l'altitude (Tytler 1998). Nous retrouvons une tendance analogue chez 10 % des étudiants concernés par notre étude. En revanche, nous n'avons pas trouvé de réponse accordant au vide des propriétés telles que « l'aspiration » comme cela pouvait être le cas dans des recherches menées avec des élèves plus jeunes (De Berg 1992). La persistance de certaines difficultés à propos de la pression atmosphérique révélée par notre questionnaire nous conduit à nous tourner à nouveau vers l'histoire des sciences, en particulier vers la structure des explications des détracteurs de Pascal et de Torricelli.

4.3 Mise en perspective avec certains aspects historiques

La grande expérience de l'équilibre des liqueurs, réalisée en 1648 au puy de Dôme et adaptée de l'expérience barométrique de Torricelli, est conçue pour éprouver l'hypothèse de la pesanteur de la masse de l'air, forme primitive du concept de pression atmosphérique et responsable, selon Pascal, de la suspension du mercure dans le tube torricellien. Inscrit en pleine polémique autour de l'existence du vide, le résultat de l'expérience du puy de Dôme est sujet à des interprétations diverses. Pour les détracteurs de Pascal, la suspension du mercure est à rechercher dans l'horreur de la nature pour le vide : le mercure descend peu pour ne pas laisser le vide s'installer. Hobbes, Noël, Linus établissent ainsi un lien causal entre la matière contenue dans l'espace torricellien et la présence de la colonne de mercure dans le tube de verre, restreignant leur raisonnement au seul dispositif, sans prendre en compte le milieu extérieur dont ils admettent pourtant le caractère pesant. Linus explique par exemple que l'espace laissé libre au-dessus du mercure du tube contient

une sorte d'air raréfié, le « funicule » dont la propriété est de retenir le mercure (Potter 2001, p. 298). La présence de cet air raréfié est expliquée par l'abbé Noël dans l'une de ses lettres à Blaise Pascal. Précisons tout d'abord que dans la tradition aristotélicienne et scolastique, ce que nous respirons (« l'air commun ») est un mélange de feu et d'air. Pour Noël, le verre est une matière poreuse, en ce sens qu'elle est susceptible de laisser passer certains corps, comme le ferait « un linge bien tissu » pour une eau boueuse. C'est cette capacité du verre à filtrer l'air commun qui explique la présence d'un corps dans l'espace laissé libre. Ainsi, lorsque le mercure du tube descend, il entraîne avec lui, par aspiration, l'air, qui se sépare alors de son mélange initial avec le feu, si bien que ne demeure à l'extérieur et dans les pores du verre que la matière grossière et pesante, tandis que l'espace libre du tube est rempli de matière « subtile » sans masse :

« Si donc on me demande quel corps entre [dans] le tube descendant, je dirai que c'est un air épuré qui entre par les petits pores du verre, contraint à cette séparation du grossier par la pesanteur du vif-argent descendant et tirant après soi l'air subtil qui emplissait les pores du verre, et celui-ci tiré par violence, traînant après soi le plus subtil qui lui est joint et congénère, jusqu'à remplir la partie abandonnée par le vif-argent. » (*Première lettre du P. Noël à Pascal*, p. 200).

Si quelques étudiants marquent un attachement particulier à l'horreur du vide, aucun d'eux ne pense que le mercure est maintenu dans le tube pour empêcher une quelconque apparition du vide. Parmi ceux qui considèrent que l'espace torricellien n'est pas vide de matière, certains affirment que le mercure du tube est partiellement poussé vers le bas par cette matière (cette action augmentant avec l'altitude), mais pas un ne pense que le mercure est retenu vers le haut. Quelques étudiants confèrent au mercure de la cuve un rôle de soutien pour le mercure du tube. On trouve ce type de raisonnements chez Noël qui écrit dans sa *Seconde lettre à Blaise Pascal* : « Le vif-argent qui est dans le tube n'a pas assez de pesanteur pour s'égaliser de surface à celui de la cuvette ». (*Seconde lettre du P. Noël à Pascal*, p. 207).

Si on les analyse dans le détail, les raisonnements des étudiants d'aujourd'hui et ceux des savants d'hier présentent assez peu de similitudes. Dans les deux cas, pourtant, les raisonnements apparaissent centrés sur le dispositif torricellien lui-même ; ils s'appuient sur des interactions entre certaines sous-parties d'un système complexe⁷ qui mériterait une analyse plus englobante incluant l'action de l'air extérieur. En outre, dans les deux contextes, l'expérience de Torricelli et son utilisation par Pascal n'apparaissent pas suffisantes pour convaincre de l'existence du vide et de la pression

(7) Le mercure du tube et l'espace torricellien, le mercure du tube et celui de la cuve, par exemple.

atmosphérique. La méthode des variations, imaginée pour la première fois par Pascal et reprise par Boyle, puis par Mariotte a conduit la communauté savante à prendre en compte l'action de l'air pour expliquer l'expérience de Torricelli et à renoncer au principe de l'*horror vacui*. Les résultats obtenus lors de notre enquête nous laissent penser qu'une telle méthode, soutenue par le concept de fluide apparu au milieu du XVII^e siècle, pourrait trouver sa place dans une séquence d'enseignement qui se donnerait pour but la construction du concept de pression atmosphérique.

Bibliographie

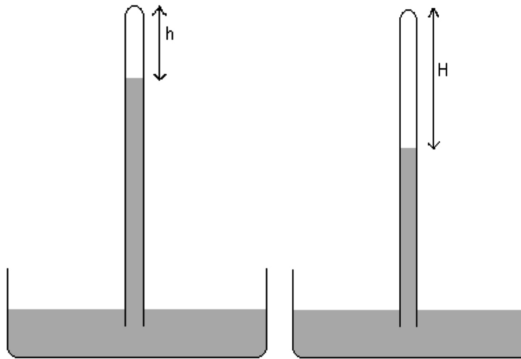
- ARISTOTE, *Physique*, traduction P. Pellegrin (1999). Flammarion.
- BERTHELOT J.-M. (2002). Pour un programme sociologique non réductionniste en étude des sciences. *Revue européenne des sciences sociales*, vol. XL, n° 124, p. 233-252.
- BESSON U. (2004). Students' conceptions of fluids. *International Journal of Science Education*. vol. 26, n° 14, p. 1683-1714.
- BESSON U. & VIENNOT L. (2004). Using models at the mesoscopic scale in teaching physics : two experimental interventions in solid friction and fluid statics. *International Journal of Science Education*. vol. 26, n° 9, p. 1083-1110.
- BLANCHÉ R. (1969). *La Méthode expérimentale et la Philosophie de la physique*, Armand Colin.
- BOYLE R. (1660). *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air and its effects*. Londres.
- BREHELIN D. & GUEDJ M. (2007). Le modèle particulière au collège : fluctuations des programmes et apports de l'histoire des sciences. *Didaskalia* n° 31, p. 129-166.
- CAILLAREC B. (2007). *Raisonnement d'étudiants sur la notion de pression*. Mémoire de tutorat, LDSP, université Paris-Diderot-Paris 7.
- CAREY S. (1985). *Conceptual change in childhood*, MIT press, Cambridge.
- DE BERG K.C. (1992). Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air : The semiquantitative context. *International Journal of Science Education*. vol. 14, n° 3, p. 295-303.
- ENGEL CLOUGH E. & DRIVER R. (1985). What do children understand about pressure in fluids ? *Research in Science and Technological Education*. vol. 3, n° 2, p. 133-144.
- ENGEL CLOUGH E. & DRIVER R. (1986). A study of consistency in the use of students' conceptual framework across different task contexts. *Science Education*. vol. 70, n° 4, p. 473-496.
- GALILÉE G. (1638). *Discours concernant les deux sciences nouvelles*. Traduction M. Clavelin (1970), A. Colin.
- GALILI I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*. vol. 18, n° 7, p. 847-868.
- HECHT E. (1999). *Physique*, De Boeck.
- HOSSON C. (de) et KAMINSKI W. (2007). Historical Controversy as an Educational Tool: Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the text "Dialogue on the Ways that Vision Operates" . *International Journal of Science Education*. vol. 29, n° 5, p. 617-642.
- KANE J. & STERNHEIM M. (2006). *Physique*. Dunod.
- KARIOTOGLOU P. et al. (1990). Understanding pressure : didactical transposition and pupils' conceptions. *Physics Education*. vol. 25, n° 2, p. 92-96.

- KARIOTOGLOU P. & PSILLOS D. (1993). Pupils'pressure models and their implication for instruction. *Research in science and technological Education*. vol. 11, n° 1, p. 95-108.
- LANGEVIN P. (1964). *La pensée et l'action*. Éditions Sociales.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2000). Histoire des sciences et modélisation de la transformation chimique en classe de seconde. *Bulletin de l'union des physiciens*, n° 826, p. 1261-1283.
- MARIOTTE E. (1676). *Discours de la nature de l'air*, Œuvres de M. Mariotte, de l'Académie Royale des sciences, Tome I (1717), Pierre Vander (éd.) : Leyde, p. 149-182.
- MASSIGNAT C. (1998). *Vide et matière dans la première moitié du XVII^e siècle : phénoménologie d'une polémique décisive*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- MATTHEWS M. (1994). *Science teaching. The role of history and philosophy of science*. London / New York : Routledge.
- MONK M. & OSBORNE J. (1997). Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum : a model for the development of pedagogy, *Science Education*. vol. 81, n° 4, p. 405-424.
- NERSESSIAN N. (1989). Conceptual change in science and in science education. *Synthese*. n° 80, p. 163-183.
- NUSSBAUM, J. (1985). The particulate nature of matter in the gaseous phase In R. DRIVER, E. GUESNE & A. TIBERGHEN (eds.) *Children's ideas in science*. London, UK : Open University Press, 124-144.
- PASCAL B.(1647). *Expériences nouvelles touchant le vide*. Œuvres complètes (1963). Seuil.
- PASCAL B (1663b). *Traité de la pesanteur de la masse de l'air*. Œuvres complètes (1963). Seuil.
- PASCAL B. (1648 and 1663). *The Physical Treatises*. New York : Columbia University Press, 1937.
- PASCAL B. (1648). *Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs*. Œuvres complètes (1963). Seuil.
- PASCAL B. (1663a). *Traité de l'équilibre des liqueurs*. Œuvres complètes (1963). Seuil.
- PIAGET J. & GARCIA R. (1989). (H. Feider, Trans.). *Psychogenesis and the history of science*. Cambridge : NY.
- POTTER E. (2001). *Gender and Boyle's Law of Gases*. Bloomington : Indiana University Press.
- BOEN Hors-série n° 2 du 30 août 2001, Programme de la classe de seconde générale et technologique
- BOEN Hors-série n° 6 du 19 avril 2007, Programmes de l'enseignement des mathématiques, de sciences de la vie et de la Terre, de physique-chimie du collège.
- ROUX S. (2007). Deux exemples de raisonnements hypothético-déductifs : l'hypothèse de la pesanteur de l'air chez Torricelli et Pascal. Cours d'épistémologie des sciences physiques. Université Grenoble II disponible sur. http://disoauuma.free.fr/L1_05_ep_5.pdf [NDLR : lien vérifié le 28 avril 2009]
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students'reasoning in thermodynamics. *International Journal of Science Education*. vol. 13, n°2, p. 159-170.
- SALTIEL E. & HARTMANN M. (2005). *L'air est-il de la matière ?*, disponible sur : disponible sur http://lamap.inrp.fr/bdd_image/1125_Lair11b.pdf.pdf [NDLR : lien vérifié le 28 avril 2009]
- SALTIEL E. & MALGRANGE J.-L. (1980). Spontaneous ways of reasoning in elementary mechanics. *European Journal of Physics*. vol. 1, n° 2, p. 73-80.
- SALTIEL E. & VIENNOT L. (1985). *What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students ?* Utrecht : GIREP.
- SÉRÉ M.G. (1986). A study of some frameworks used by pupils aged 11-13 years in the interpretation of air pressure. *European Journal of Science Education*. vol. 4, n° 3, p. 299-309.
- SÉRÉ M.G. (1985). The Gaseous State in R. Driver, E. Guesne & A. Tiberghien (Eds.) *Children's ideas in science*. London, UK : Open University Press, p. 105-123.

- SHAPIN S. & SCHAFFER S. (1993). *Léviathan et la pompe à air*. La découverte.
- STRAUSS A.L., & CORBIN J. (1994). Grounded theory methodology: An overview. In DENZIN, N.K. & LINCOLN Y. S. (Eds.), *Handbook of Qualitative Research* (p. 273-285). Thousand Oaks, CA : Sage.
- TORRICELLI E. (1644). Letter to Michelangelo Ricci concerning the barometer, *Collected Works*, vol. 3 (1919). New York.
- TYTLER R.T. (1998). Children's conceptions of air pressure : Exploring the nature of conceptual change. *International Journal of Science Education*. vol. 20, n° 8, p. 929-958.
- VALENTIN L. (1995). *L'Univers mécanique*. Hermann.

Annexe : Questionnaire « expérience du vide en haut de la montagne »

Blaise Pascal, physicien, mathématicien et philosophe du XVII^e siècle s'est beaucoup intéressé aux phénomènes liés aux fluides, qu'il nomme « liqueurs ». En 1648, pour vérifier une de ses théories, il demande à son beau-frère Florin Périer, qui réside en Auvergne, de réaliser l'expérience suivante à deux endroits différents : on remplit un tube (fermé à une extrémité) de mercure et on le place retourné et vertical sur une cuve qui est elle-même remplie de mercure. La manipulation est réalisée dans la ville de Clermont-Ferrand (moins de 400 m d'altitude, expérience 1 ci-dessous) et au sommet du puy de Dôme (à plus de 1 400 m d'altitude, expérience 2 ci-dessous).



- Q1 : Expliquez le résultat de la première expérience
- Q2 : Qu'y a-t-il selon vous dans l'espace en haut du tube, au-dessus du mercure ?
- Q3 : Comment expliquez-vous la différence de hauteur h et H entre les deux expériences ?

Cet article a été reçu le 14 septembre 2008 et accepté le 1^{er} avril 2009.