



HAL
open science

Une reconstruction historique du concept macroscopique de pression atmosphérique pour la préparation d'un dossier documentaire utilisable en classe de sciences physiques

C. de Hosson, Nicolas Décamp

► To cite this version:

C. de Hosson, Nicolas Décamp. 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 (1907-2003), 2015. hal-01663263

HAL Id: hal-01663263

<https://hal.science/hal-01663263>

Submitted on 18 Dec 2017

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.

Une reconstruction historique du concept macroscopique de pression atmosphérique pour la préparation d'un dossier documentaire utilisable en classe de sciences physiques

par Cécile de HOSSON et Nicolas DÉCAMP

Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)

Université Paris Diderot-Paris 7 - 75013 Paris

cecile.dehossou@univ-paris-diderot.fr

nicolas.decamp@univ-paris-diderot.fr

LE CONCEPT de pression atmosphérique traverse les programmes de sciences physiques du primaire et du secondaire sans faire l'objet d'un enseignement spécifique. De manière sans doute corrélative, les études portant sur les difficultés des étudiants des premiers cycles universitaires scientifiques indiquent que ceux-ci peinent à expliquer certaines expériences (telles que celle de Torricelli, ou de Pascal au Puy-de-Dôme) en des termes scientifiquement acceptables, c'est-à-dire, en donnant au concept de pression sa juste place. La mise à jour de ces difficultés (à laquelle s'ajoute une volonté d'y remédier) est à l'origine d'une exploration historique de ce concept d'où nous extrayons un dossier documentaire regroupant quelques sources historiques chronologiquement organisées, à destination des enseignants de sciences physiques de collège et de lycée.

1. INTRODUCTION : LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE DANS LES PROGRAMMES DE SCIENCES PHYSIQUES FRANÇAIS

Si l'étude de l'air atmosphérique apparaît comme une thématique privilégiée des programmes de sciences de l'école primaire, l'étude de la pression atmosphérique se voit, elle, plutôt délaissée et ce, quel que soit le niveau scolaire considéré. De manière plus spécifique, à un niveau élémentaire d'enseignement, l'objectif des programmes français 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 dont certaines sont comparables à celles des liquides et des solides : comme eux, l'air résiste à la compression⁽¹⁾, 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 [24]. Cette description macroscopique de l'air atmosphérique est complétée par une approche microscopique au collège où l'étude de la pression apparaît dans la partie «de l'air qui nous entoure à

(1) Il convient cependant de préciser que la compressibilité isotherme de l'air à température ordinaire est très supérieure (de plusieurs ordres de grandeur) à celle de l'eau qui elle, est très souvent considérée comme incompressible.

la molécule» (BOEN spécial n° 6 du 28 août 2008, p. 17). La « pression » y est présentée comme une grandeur macroscopique « qui se mesure avec un manomètre », et se voit associée à l'enseignement de la compressibilité des gaz⁽²⁾. Le thème de convergence n° 4 dédié à l'étude des phénomènes météorologiques semble l'occasion d'aborder le concept de pression atmosphérique, mais là encore, il sera dit aux élèves qu'il s'agit d'une « grandeur mesurable », les questions relatives à sa nature n'étant pas abordées⁽³⁾. Depuis la rentrée 2010, les programmes de physique de la classe de seconde s'organisent autour de trois thématiques : la santé, le sport et l'univers. L'étude du concept de pression est proposée dans la partie thématique « sport » (BOEN spécial n° 4 du 29 avril 2010, p. 8). Il s'agit d'aborder les propriétés macroscopiques (en termes de pression, volume et température) et microscopiques (associées au comportement moyen d'une population de molécules) d'un gaz contenu dans une enceinte close. Cette partie du programme n'inclut pas explicitement l'étude de la pression atmosphérique. En outre, on attend des élèves qu'ils sachent que la différence de pression entre deux points d'un liquide a quelque chose à voir avec la différence de hauteur entre ces deux points. Cette même connaissance pourrait être attendue dans le cas de l'air⁽⁴⁾, ce qui n'est pas le cas, la pression dans un gaz étant approchée, comme nous le disions, par l'étude des propriétés du mouvement des particules constituant ce gaz. Cette spécificité des programmes peut laisser entendre que la relation macroscopique $dp = -\rho g dh$ est propre aux liquides et que la modélisation microscopique concerne elle uniquement les gaz⁽⁵⁾. Au regard de ces choix, la préparation (en vue d'une exploitation en classe) d'un dossier documentaire constitué de textes anciens associés à l'histoire du concept de pression atmosphérique peut sembler relativement inappropriée. Pourtant, la connaissance que nous avons des difficultés associées à la compréhension et à l'usage du concept de pression (celui de pression atmosphérique, en particulier – voir paragraphe suivant) nous encourage à penser qu'une approche historique en contexte scolaire pourrait non seulement produire une meilleure intelligibilité de ces concepts, mais également offrir aux élèves (et à leurs enseignants) quelques éléments liés à la nature de la science et de l'activité de création du savoir en sciences.

(2) On pourrait d'ailleurs voir une forme de contradiction entre les programmes de primaire et ceux de collège (cf. note 1).

(3) Cela dit, le fait que le concept de « pression » soit abordé par sa mesure n'est pas une singularité du programme de collège ; d'autres concepts font l'objet d'un choix didactique identique : l'intensité, la tension...

(4) Certes, la loi serait un peu différente car dépendante du profil de densité atmosphérique.

(5) Cela dit, le comportement microscopique des liquides est loin d'être abordable au niveau du secondaire.

2. LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE : QUELQUES DIFFICULTÉS D'ÉLÈVES ET D'ÉTUDIANTS

Il y a quelques années, nous avons cherché à comprendre la façon dont des étudiants, issus de premier cycle universitaire scientifique, s'étaient approprié l'enseignement d'hydrostatique qu'ils avaient reçu quelques mois auparavant [11]. Spécifiquement, nous avons voulu mesurer l'impact de cet enseignement sur les difficultés liées à l'apprentissage du concept de pression telles qu'elles ont pu être identifiées par la recherche en didactique, en France et à l'étranger⁽⁶⁾. Pour cela, nous avons analysé les raisonnements mis en œuvre par cent vingt-huit étudiants issus de trois universités différentes pour expliquer le résultat de l'expérience dite « du Puy-de-Dôme »⁽⁷⁾. L'un des résultats les plus marquants de cette recherche est 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 ; les raisonnements mis en œuvre reposent pour la plupart sur des actions engageant, par paires, des sous-parties du dispositif (mercure du tube / mercure de la cuve, espace « vide » / mercure du tube...), mais le dispositif n'est pas compris comme interagissant avec son milieu d'immersion : l'air. Par voie de conséquences, l'action de l'air n'est pas envisagée par les élèves. Ce résultat est à rapprocher de ceux obtenus par Marie-Geneviève Séré il y a plus de vingt ans avec des élèves des classes secondaires. Pour la plupart d'entre eux, la pression atmosphérique n'existe que lorsque l'air est comprimé ou lorsqu'il est en mouvement [26].

De manière générale, le sens commun peine à considérer l'air comme un fluide partageant, avec l'eau, des propriétés semblables du point de vue de l'immersion. Si la plupart des étudiants affirment avec raison que la pression augmente avec la profondeur dans les liquides [5, 17], nombreux sont ceux qui pensent, à tort, que la pression atmosphérique augmente lorsque l'altitude augmente [31]. 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 [17], elle est souvent associée au volume de fluide entourant un solide immergé et pas uniquement à la profondeur (ou à l'altitude) d'immersion, son action est couramment perçue verticalement et vers le bas [6, 12, 17] et l'isotropie des forces pressantes n'est que très rarement envisagée. En outre, les travaux de S. Rozier [22] ont montré que les étudiants associent

- (6) Nous précisons qu'il s'agissait d'un enseignement standard sur lequel nous n'avons pas agi.
- (7) En 1648, Florin Périer réalise, à la demande de son beau-frère Blaise Pascal, l'expérience suivante : 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. Le dispositif ainsi réalisé est élevé depuis la ville de Clermont-Ferrand (moins de 400 m d'altitude) jusqu'au sommet du Puy-de-Dôme (1 400 m). A mesure que le dispositif s'élève, on observe une diminution du niveau du mercure contenu dans le tube (et une augmentation du niveau du mercure dans la cuve).

préférentiellement pression et densité de gaz⁽⁸⁾ : la pression va, pour ces étudiants, avec l'idée géométrique de tassement, en excluant l'aspect microscopique cinétique [22]. Le « vide » est parfois conçu comme une entité dotée de certaines propriétés mécaniques comme l'aspiration [12]. Les plus jeunes peinent à admettre son existence et il n'est pas exclu que cette difficulté perdure, y compris à l'université.

La persistance de plusieurs difficultés relatives au concept de pression atmosphérique nous conduit à nous tourner vers l'histoire de ce concept. Nous pensons en effet que l'exposition historique d'un concept offre des clés de compréhension transférables à un contexte de classe, et que cela peut également normaliser les erreurs et leur persistance si l'on admet que le temps (souvent long) mis par la science pour aboutir aux constructions actuelles est un bon révélateur de la difficulté qui risque d'accompagner l'enseignement et l'apprentissage d'un concept donné.

3. UNE EXPOSITION HISTORIQUE DU CONCEPT DE PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

L'exposition proposée ici s'appuie pour l'essentiel sur des écrits originaux (textes de première main dans leur traduction française pour autant qu'elles soient disponibles) et privilégie une approche internaliste⁽⁹⁾. Il s'agit du résultat d'un travail d'exploration et de tri sous-tendu par un projet didactique spécifique : l'élaboration d'un matériau pour l'enseignement. Par voie de conséquence, la synthèse qui suit n'est évidemment pas exhaustive, mais apparaît, comme tout projet de reconstruction, contrainte : *Il n'y a donc pas de lecture neutre [de l'histoire des sciences NDLR] ou de lecture n'impliquant pas de décision préalable, dans la définition de l'aire des événements retenus ou dans celle des matériaux, des entités, des mécanismes reconnus comme pertinents. À chaque fois, un principe de sélection s'applique, relevant, en dernière analyse, du programme adopté* [4].

Toutefois, nous nous préserverons au mieux des abus d'interprétation qu'une lecture non experte pourrait engendrer en appuyant notre exploration sur quelques exégèses philosophiques et historiques faisant autorité⁽¹⁰⁾. Notons également que les relations, les échanges entre les personnes ne seront pas étudiés ni relatés ici.

(8) Notons que ceci est assez vrai pour un modèle d'atmosphère isotherme (ie : pour le profil vertical de l'atmosphère sur les premiers km au-dessus de la croûte terrestre).

(9) Dans une approche internaliste la logique d'évolution des idées scientifiques, de découverte en découverte, est étudiée un peu indépendamment du monde extérieur. Dans une telle approche les éléments économiques, sociologiques ou de contexte culturel sont ainsi provisoirement mis de côté.

(10) Sadoun-Goupil [23], Shapin & Schaeffer [28], Roux [21], Koyré (1966), Massignat [19], Berthelot [4].

3.1. *L'horror vacui* comme cause de l'élévation de l'eau dans les pompes aspirantes

La création du concept de pression et plus spécifiquement celui de pression atmosphérique est indissociable de l'histoire des pompes aspirantes et de la genèse de l'idée de vide. En effet, l'hypothèse de la pression atmosphérique dans son acception restrictive de « poids de l'air » naît au milieu du XVII^e siècle de la tentative de résoudre un problème qui, jusqu'alors pouvait être considéré comme technique : celui de la limite d'élévation de l'eau par l'utilisation des pompes aspirantes.

Les premières pompes aspirantes dont on ait une trace claire sont décrites par Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle apr. J.-C.) dans *Les Pneumatiques* (une représentation d'une pompe aspirante du type de celles décrites par Héron d'Alexandrie et datant du XIX^e siècle se trouve dans le document 3 en annexe). Il s'agit de pompes à incendie qui fonctionnent de la façon suivante : un bras de levier $\alpha\pi$ entretient un mouvement de va-et-vient de deux pistons M et K à l'intérieur de deux cylindres A et E. À chaque élévation de l'un des pistons, une soupape τ s'ouvre, laissant monter l'eau à l'intérieur du cylindre dans lequel il se trouve. Simultanément, l'autre piston d'abaisse, la soupape située à la base du cylindre contenant ce piston se ferme, l'eau est éjectée par l'ouverture H. La cause de l'élévation de l'eau dans les cylindres est attribuée à ce que Héron d'Alexandrie nomme la « force du vide ». Selon lui, « le vide n'existe point naturellement d'une façon continue, mais se trouve réparti en particules ténues à travers l'air, l'eau, le feu, et les autres corps » [15]. L'existence du vide de façon continue nécessite « l'intervention d'une certaine force » (cf. document 2 en annexe) : *Ainsi, que l'on prenne un vase léger à ouverture étroite et qu'on l'applique contre les lèvres en aspirant l'air, ce qui le raréfie, le vase restera suspendu aux lèvres, car le vide attirera la chair dans le vase afin de remplir le vide. Il est donc clair que la portion de l'espace compris dans le vase était devenue vide en partie* [15].

Cette conception apparaît quelque peu distincte de celle d'Aristote pour qui le vide, n'étant la cause de rien, n'existe pas, ni par lui-même et indépendamment des choses, ni dans les choses elles-mêmes, ni en tant que chose [1] (cf. document 1 en annexe). La pensée scolastique médiévale reprendra à son compte la conception aristotélicienne du vide (*l'horror vacui*) et l'élévation de l'eau dans les pompes aspirantes sera posée comme une façon pour la nature d'agir pour éviter l'installation du vide sous le piston. Or, ce comportement de la nature semble « limité », pour l'eau, à une dizaine de mètres. En effet, depuis Héron d'Alexandrie, les pompes aspirantes permettent d'élever de l'eau jusqu'à une hauteur de dix mètres. Au-delà, l'élévation cesse et un espace vide en apparence s'installe entre la surface de l'eau et le bas du piston. Jusqu'au XVII^e siècle, ce problème sera considéré comme un problème technique lié au fonctionnement intrinsèque de la pompe, et des solutions (techniques) seront recherchées pour augmenter la hauteur d'élévation de l'eau. L'une des réussites les plus remarquables issues de cette recherche demeure sans doute la pompe aspirante-foulante d'al-Jazari (1136-1206), cf. document 4 en annexe.

Héritier des travaux de Héron (il reprend les dessins des dispositifs des *Pneumatiques* dans son ouvrage consacré aux machines aspirantes), Abū al-'Iz Ibn Ismā'il ibn al-Razāz al-Jazarī imagine une machine permettant d'aspirer puis de refouler l'eau d'une rivière en entretenant un mouvement de va-et-vient de deux pistons grâce à l'invention du premier système bielle-manivelle.

La pompe d'al-Jazari est constituée de deux pompes, l'une aspirante, l'autre foulante qui agissent de manière alternative. Dans cette double pompe, une roue hydraulique fait tourner une roue dentée verticale qui à son tour entraîne une roue horizontale. Cette dernière provoque l'oscillation des deux pistons opposés (cf. figures 1 et 2). Les cylindres des pistons sont reliés à des tuyaux d'aspiration et de refoulement qui sont équipés de soupapes s'ouvrant uniquement vers le haut. L'eau monte par les tuyaux d'aspiration ; les tuyaux de refoulement se chargent ensuite de la décharger dans le système d'évacuation situé plusieurs mètres au-dessus de l'installation⁽¹¹⁾.



Figure 1 - Le mouvement de va-et-vient des pistons à l'intérieur des deux cylindres horizontaux est obtenu par un système de bielle manivelle entraîné par une succession de roues dentées engrenées. La roue verticale est entraînée par le courant de l'eau qui est puisée pour être élevée.



Figure 2 - Lorsque la bielle part vers l'arrière, la soupape du tuyau d'aspiration (en bas sur l'image) s'ouvre, l'eau monte. Le mouvement vers l'avant de la bielle repousse l'eau, la soupape du bas se referme, celle du tuyau d'élévation s'ouvre et laisse passer l'eau.

La conception de cette pompe repose sur une prouesse essentiellement technique (notamment sur l'invention du système bielle-manivelle qui permet la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation), mais n'est soutenue, à notre connaissance, d'aucun discours justifiant la raison pour laquelle l'eau s'élève

(11) Copies d'écran de l'animation du fonctionnement de la pompe d'al-Jazari disponible sur le site : <http://www.veoh.com/collection/HistoireTechnologie/watch/v299449kx4Ztb7>

À noter, une séquence d'enseignement conçue à partir des travaux d'al-Jazari est disponible dans l'ouvrage de A. Djebbar, C. de Hosson et D. Jasmin, *Les découvertes en pays d'Islam*, Paris : Le Pommier (2009) et accessible en ligne à l'adresse :

<http://www.fondation-lamap.org/fr/page/9776/la-pompe-%C3%A0-eau-dal-jazari>

lorsque le piston du cylindre horizontal se déplace vers la droite (ou vers la gauche selon que l'on s'intéresse au cylindre d'aspiration de droite ou de gauche).

Le système mis au point par al-Jazari se généralise en Europe à partir de la Renaissance. L'amélioration des techniques conduit les ingénieurs du ^{xvi}e siècle à concevoir des paliers intermédiaires qui permettent d'obtenir une hauteur d'élévation de l'eau supérieure à dix mètres. Cette hauteur correspond en fait à la somme des hauteurs d'eau à chaque palier, chacune prise individuellement ne pouvant évidemment pas dépasser dix mètres. La pompe créée par Georgius Agricola en 1556 est à ce titre tout à fait exemplaire (cf. document 5 en annexe). Elle inspirera Renkin Sualem pour la réalisation en 1685 de la Machine de Marly qui alimentera en eau le Château de Versailles jusqu'en 1817 grâce à soixante-quatre pompes capables d'élever l'eau jusqu'à une hauteur de cent soixante mètres. Malgré tout, dix mètres restent une limite infranchissable pour une aspiration par un unique piston dans un unique cylindre, et ce, quelle que soit la largeur du cylindre. Cet obstacle ayant été contourné par des voies de résolution techniques (les paliers intermédiaires), la cause de la limite d'élévation est demeurée soumise à l'autorité scolastique de l'*horror vacui* jusqu'au milieu du ^{xvii}e siècle.

3.2. Le problème de l'élévation de l'eau dans les pompes aspirantes devient un problème scientifique

En 1638 paraît le *Discours concernant les deux sciences nouvelles*, dans lequel Galilée reprend cette question de la limite de l'élévation de l'eau par aspiration (cf. document 6 en annexe) :

Sagredo : 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 [14].

À partir de ce récit Galilée va remettre en cause l'inexistence du vide. Cette remise en cause émerge dans le contexte de la création d'une science nouvelle, celle de la résistance des corps à la rupture. Pour Galilée, la limite d'élévation de l'eau par aspiration n'est pas à rechercher dans l'objet « pompe » lui-même, mais dans la « résistance due au vide pour tous les cylindres pleins » :

Sagredo : Ce qui est attiré dans la pompe, n'est-il pas, en somme, un cylindre d'eau qui, attaché

par en haut, s'allonge de plus en plus, atteignant finalement ce point au-delà duquel, tiré par son propre poids devenu excessif, il se rompt exactement comme une corde ?

Salviate : C'est bien ainsi que les choses se passent ; et comme cette hauteur de dix-huit coudées fixe par avance la limite jusqu'à laquelle peut se maintenir une quantité d'eau quelconque [...] chaque fois où nous pèserons l'eau contenue dans un tube de dix-huit coudées [...] nous obtiendrons la valeur de la résistance due au vide pour tous les cylindres pleins [14].

Galilée souscrit à l'idée qu'il y a bien un espace « vide de toute matière » au-dessus du piston lorsque celui-ci atteint une hauteur supérieure à dix mètres et explique la limite de la colonne d'eau par « la résistance à la rupture due au vide » [14]. L'explication de Galilée peut se traduire comme suite : la colonne d'eau est écartelée entre le vide qui l'aspire d'un côté, et la pesanteur terrestre qui la tire de l'autre ; la hauteur maximale s'explique par la résistance de l'eau à cet écartèlement. C'est cela qui conduit Galilée à rechercher des propriétés internes à l'eau pour expliquer cette limite (comme la densité). Si l'explication proposée par Galilée n'est pas conforme à celle de la physique d'aujourd'hui, elle place la cause de la limite de l'aspiration de l'eau dans une propriété spécifique des colonnes de matière et non plus dans la technique même de l'aspiration (ou de la pompe aspirante). Ce déplacement va ouvrir la voie à une recherche scientifique des causes de la suspension limitée d'une colonne d'eau dans un cylindre à dix mètres de hauteur, et relancer la polémique autour de l'existence du vide. D'une question initialement technique (*i.e.* : étant donnée la limite d'élévation de l'eau, comment concevoir des machines permettant de dépasser les dix mètres de dénivellation ?), on passe avec Galilée à un problème scientifique (*i.e.* : quelle est la cause de la limitation de cette élévation ?). Ce fait n'est pas rare dans l'histoire des idées. Ainsi, « *avant de venir féconder les techniques, les sciences leur ont dû souvent le terrain de leur naissance* » [27].

Quelques années avant la parution des *Discours*, dans une lettre datée de 1630, Jean-Baptiste Baliani interpelle Galilée et lui suggère de considérer la suspension de l'eau comme le résultat d'un équilibre avec le poids de l'air atmosphérique⁽¹²⁾. Son raisonnement est sous-tendu par l'idée que l'air et l'eau ne diffèrent que par leurs poids respectifs : « *si l'air est pesant, il n'y a entre l'eau et l'air qu'une différence de plus ou moins* » [2]. Baliani, et Galilée à sa suite, transforment donc le problème technique de la limite d'aspiration des pompes en une question véritablement scientifique. Cette mutation va conduire les savants du début du XVII^e siècle à former des colonnes de liquides afin de mettre à l'épreuve l'hypothèse du poids de l'air. L'une des expériences les plus révélatrices de cette transformation demeure sans doute celle imaginée par Berti et Magiotti en 1641 (cf. document 7 en annexe).

(12) Dans une lettre de Galilée à Baliani datant du 27 juillet 1630, Galilée explique la façon dont il trouve expérimentalement que la densité de l'air est quatre cent soixante fois plus faible que celle de l'eau.

De l'eau est versée par l'ouverture G (située à la fenêtre) jusqu'à ce que le dispositif en soit entièrement rempli, le robinet R (au bas du tube plongé dans la cuve) étant fermé. On ouvre le robinet R , l'eau s'écoule dans la cuve et se stabilise à une hauteur environ égale à dix mètres. Cette expérience incarne de façon remarquable le passage que nous évoquions précédemment d'une question initialement technique (la limite des pompes aspirantes) et une question scientifique. Ici, il n'est plus question de pompe, ni même d'aspiration. Le dispositif imaginé par Berti et Magiotti est un dispositif scientifique conçu pour éprouver l'hypothèse de Baliani concernant l'action de l'air extérieur. La colonne d'eau n'est pas créée par élévation (mouvement vertical ascendant, de bas en haut) pour des besoins humains, mais créée par remplissage (mouvement vertical descendant, de haut en bas) pour les besoins de la science. Le caractère admirable de cette expérience, c'est que ces deux modes opératoires sont considérés par Berti et Magiotti comme strictement équivalents, ce qui est loin d'aller de soi.

Dans un cas, la colonne est formée par aspiration, dans l'autre, par déversement. Ce qui guide les savants, c'est l'hypothèse sous-jacente à la formation et à la hauteur de la colonne d'eau qui est identique dans les deux cas. Cette hypothèse pose la limite d'aspiration des pompes des citerniers de Galilée équivalente à la limite de la chute de l'eau dans la colonne de Berti et de Magiotti⁽¹³⁾. Dans ce contexte, le débat sur l'existence du vide se voit relancé et la doctrine scolastique de l'horror vacui largement remise en cause.

3.3. L'expérience barométrique

En 1644, Evangelista Torricelli reprend l'interprétation suggérée par Baliani : la limite d'aspiration de l'eau est bien à rechercher dans les effets du poids de l'air. Il adapte l'expérience de Berti en remplaçant l'eau par du mercure (vif-argent) de façon à obtenir une hauteur de liquide inférieure à dix mètres. Selon lui, « *pour deux liquides différents, les hauteurs sont dans le rapport des masses volumiques* » (Torricelli 1644). Afin d'éprouver ce qu'il sera désormais convenu d'appeler « l'hypothèse du poids de l'atmosphère » [21], 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 »⁽¹⁴⁾, cf. document 10 en annexe). Pour Torricelli (comme pour Baliani ;

(13) Il semble qu'il y a à cette époque une transformation profonde de la compréhension de l'équilibre de la hauteur d'eau : on passe d'une résistance à l'étirement (explication proposée par Galilée), à une vision de résistance (de la colonne d'eau) à la compression (celle de l'air extérieur), défendue d'abord par Baliani, puis par Berti et Magiotti.

(14) Nous savons aujourd'hui que cet espace n'est, en réalité, par vide de toute matière mais qu'il contient des vapeurs de la substance formant la colonne en équilibre.

Berti ou Magiotti), 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 : *On peut supposer que la force qui empêche le vif-argent de tomber en dépit de sa nature, a sa force à l'intérieur du vase, soit qu'elle provienne du vide, soit qu'elle ait pour cause quelque matière extrêmement raréfiée. Mais je prétends que cette force est extérieure et qu'elle vient du dehors. Sur la face du liquide contenu dans la cuvette, pèse une colonne d'air haute de 50 milles. Ce n'est donc point merveille si le vif-argent entre dans le tube de verre et s'y élève jusqu'à faire équilibre à la gravité de l'air extérieur qui le pousse. En un vase semblable, mais beaucoup plus long, l'eau montera à peu près à 18 brasses ; elle s'élèvera plus haut que le vif-argent dans le rapport où celui-ci est plus lourd que l'eau afin de faire équilibre à la même cause qui pousse également l'eau et le vif-argent* [30].

Avec cette expérience, Torricelli établit donc 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. Autrement dit, ce qui retient le mercure n'est pas à rechercher dans une attraction qui aurait son origine dans le tube, mais au contraire à l'extérieur. 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 à nouveau 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 sont l'un et l'autre pesants.

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 [...] [30].

L'expérience « donnant à voir le vide » soulève, dans la communauté savante du XVII^e siècle, 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 oppose 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 indécelable, mais effective (cf. document 9⁽¹⁵⁾ en annexe) ; 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 rai-

(15) Dans ce document, le P. Noël évoque un air « épuré » qui après avoir traversé les pores du verre occuperait le haut du baromètre torricellien. Si une telle hypothèse paraît aujourd'hui farfelue, il n'est pas si facile de la réfuter. On notera d'ailleurs que le verre, s'il n'est pas poreux pour l'air, peut l'être dans certaines conditions, pour l'hydrogène...

son 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 [7, 20]. Vraisemblablement informé de l'expérience barométrique par le R.P. Marin Mersenne qui entretenait des liens étroits avec la communauté savante italienne [29], Blaise Pascal souscrit à l'hypothèse du poids de l'air (cf. document 8 en annexe) et affirme que le vide n'est pas une chose impossible dans la nature et « qu'elle ne le fuit pas avec tant d'horreur que plusieurs se l'imaginent » [20] : *Aucune des matières qui tombent sous nos sens, et dont nous avons connaissance, ne remplit cet espace vide en apparence. Mon sentiment sera, jusqu'à ce qu'on m'ait montré l'existence de quelle matière qui le remplit, qu'il est véritablement vide, et déstitué de toute matière* [20].

Selon lui, la cause de la suspension du vif-argent dans le tube n'est pas à rechercher dans la contrainte imposée par la nature d'empêcher le vide de se former, il est par conséquent possible que l'espace torricellien soit exempt de toute matière, et l'unique façon de le prouver est de faire varier l'action de l'air autour du récipient rempli de vif-argent.

3.4. Blaise Pascal, Robert Boyle et la méthode des variations

Blaise Pascal crée un programme expérimental original fondé sur la méthode dite des « variations » [19]. 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. L'expérience du Puy-de-Dôme (1648), mais également celle du « vide dans le vide » réalisée par Robert Boyle en 1660 s'inscrivent dans cette perspective.

Le projet que fit Pascal de l'expérience du Puy-de-Dôme nous est connu par sa lettre du 15 novembre 1647 qu'il écrit à son beau-frère Florin Périer et qui débute par un rappel de son expérience du « vide dans le vide » : *Je ne saurai mieux vous témoigner la circonspection que j'apporte, avant que de m'éloigner des anciennes maximes, que je vous remette dans la mémoire l'expérience que je fis ces jours-ci avec deux tuyaux l'un dans l'autre, qui montre apparemment le vide dans le vide. Vous vîtes que le vif-argent du tuyau intérieur demeura suspendu à la hauteur où il se tient d'ordinaire, quand il était contrebalancé et pressé par la pesanteur de la masse extérieure de l'air et qu'au contraire, il tomba entièrement, sans qu'il lui restât aucune hauteur ni suspension, lorsque par le moyen du vide dont il fut environné, il ne fut plus du tout pressé ni contrebalancé d'aucun air, en ayant été déstitué de tout côté.*

Le principe de l'expérience du « vide dans le vide » peut être résumé comme suit : Un tube de la forme indiquée par la figure 3 (page ci-après), dont les parties AC et EG mesurent un peu plus de 76 cm contient dans la partie recourbée en forme de S

une ouverture E que l'on peut obstruer hermétiquement. Cette ouverture étant fermée, on remplit le tube entièrement de mercure par l'orifice G et on le retourne sur une cuve de mercure après avoir bouché l'orifice. Quand le doigt est retiré, le mercure se dispose comme l'indique la figure ; les parties AB et DEF sont vides d'air. La hauteur FG mesure la pression atmosphérique. On débouche alors l'ouverture E ; l'air pénètre entre les deux parties du mercure contenu dans le tube ; le niveau B monte dans la partie supérieure et si la partie CE est assez large et contient suffisamment de mercure, elle constitue la cuve d'un baromètre dont le tube est AB. Le niveau F descend jusq' en G.

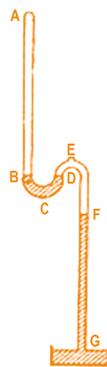


Figure 3

Cet ingénieux dispositif montre nettement la relation qui lie la pression atmosphérique et l'ascension du mercure, puisque celle-ci apparaît avec celle-là, ou disparaît si la pression atmosphérique s'exerce à la fois sur la cuve et à l'intérieur du tube. C'est sur ce principe qu'est construite l'expérience du Puy-de-Dôme : si la hauteur de la colonne de mercure est fonction du poids de l'air, alors celle-ci étant plus faible à mesure que l'on s'élève, la hauteur de mercure baissera au sommet d'une montagne⁽¹⁶⁾ : *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* [20].

Dans une lettre adressée à Blaise Pascal le 22 septembre 1648, Florin Périer 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 Evangelista Torricelli en 1644, puis par Blaise Pascal en 1648, la colonne de mercure diminue au cours de l'ascension [20]. Pour Blaise 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⁽¹⁷⁾. Cependant, l'interprétation qu'il expose dans son *Traité* sur

(16) La lettre de Blaise Pascal à Florin Périer décrivant l'expérience du Puy-de-Dôme, et la réponse de Florin Périer (1648) relatant l'expérience sont reproduits dans le *Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs* disponible par exemple sur Gallica à l'adresse suivante : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k105083f>

(17) La quantification de l'action de l'air sur la surface du mercure est proposée par Blaise Pascal dans le *Traité de l'équilibre des liqueurs*. L'expérience dite « des vaisseaux » (cf. document 11 en annexe) illustre le fait que la force exercée par l'eau sur chacun des tampons placés sous l'ouverture de chacun des récipients est identique et ne dépend (pour une même surface

l'équilibre des liqueurs ne clôt pas la controverse autour de l'existence du vide [4] et l'hypothèse de la pesanteur de l'atmosphère se voit rejetée par des savants tels que l'abbé Noël (cf. document 9 en annexe), 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* [9] dans lequel il présente une machine capable de purger l'air d'un récipient clos (cf. document 12 en annexe). 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). Cette pompe 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 que l'on ferme hermétiquement. À ce moment de l'expérience (avant le début du pompage), 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 au poids de l'air. En effet, une fois le globe fermé hermétiquement le poids de l'intégralité de la colonne d'air située au-dessus de la surface du baromètre ne s'exerce plus directement sur celui-ci, et la quantité d'air contenu dans le globe est très petite. Pour expliquer que le niveau du baromètre n'a pas varié, Robert Boyle évoque l'idée que l'air agit comme un ressort [9], explication que l'on remplacerait aujourd'hui par le passage d'une interprétation statique macroscopique à une interprétation dynamique microscopique de la pression. 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 atmosphérique et complète de manière ingénieuse la conception de 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 [18]. 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.

d'ouverture) que de la hauteur de la colonne d'eau contenue dans les récipients ; la hauteur étant identique pour chaque récipient, la pression est elle aussi identique. À partir de cette expérience, Blaise Pascal énonce que la pression atmosphérique ne dépend que de la hauteur de la colonne d'air ; cette affirmation est soutenue par le fait qu'il rapproche air et eau en admettant que ce sont deux «fluides» identiques du point de vue de l'immersion.

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 possède une certaine densité⁽¹⁸⁾, 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 » [28]. Celle-ci se verra complétée par une première approche microscopique au milieu du XVIII^e siècle grâce, notamment, aux travaux de Bernoulli [3]. C'est cette approche qui permettra de concilier l'idée d'isotropie des forces pressantes avec l'idée que la valeur de la pression dépend directement du « poids » de la colonne située au-dessus de ce point, autrement dit, de concilier ce qui pourrait paraître comme une action verticale et vers le bas (le « poids » de la colonne de fluide) avec une action en un point du fluide, dans toutes les directions, conciliation qui apparaît comme un obstacle didactique majeur.

4. QUELQUES CONSÉQUENCES DIDACTIQUES DE L'EXPLORATION HISTORIQUE DU CONCEPT DE PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

Nous laissons l'enseignant intéressé libre de sélectionner et d'organiser les éléments du dossier documentaire présenté ci-après (éléments qui ne sont évidemment pas tous adaptés à un usage avec les élèves). Signalons toutefois que certaines avancées et/ou propositions historiques sont susceptibles de générer quelques difficultés de compréhension. Aussi, les pistes d'utilisation suivantes nous paraissent constituer de bons leviers pour aider au dépassement de ces difficultés :

- ◆ proposer aux élèves d'émettre des hypothèses sur les raisons qui empêchent que de l'eau soit aspirée au-delà d'une certaine hauteur ,
- ◆ travailler l'équivalence « déversement » / « aspiration », et montrer que la question n'est pas de savoir pourquoi on ne peut pas aspirer de l'eau au-delà d'une hauteur de dix mètres, mais pourquoi on ne peut pas former des colonnes d'eau de plus de dix mètres de hauteur⁽¹⁹⁾ ,

(18) ...ou un certain « poids » (le concept de masse n'étant, à cette époque, pas encore construit, voir à ce sujet, [16].

(19) Plusieurs expériences peuvent, de ce point de vue, s'avérer utiles. On peut, par exemple, réaliser l'expérience de Torricelli avec de l'eau, une petite cuvette, et des tubes à essais de plus en plus grands ; les élèves constatent que l'eau ne « tombe » pas dans la cuvette et peuvent prévoir, à tort, que ceci sera vrai quelle que soit la hauteur d'eau [25]. Il est alors possible de présenter l'expérience de Berti (l'expérience est d'ailleurs facilement réalisable

- ◆ amener les élèves à considérer également l'air et l'eau du point de vue de leurs propriétés «immergeantes». Les lignes qui suivent visent à expliciter ce dernier point.

L'exploration historique, mise en regard des éléments susceptibles de faire obstacle à une compréhension opératoire (et durable) du concept de pression atmosphérique, nous incite à promouvoir une valorisation scolaire précoce de l'idée que l'eau (les liquides) et l'air (les gaz) peuvent se comporter de manière identique lorsque des solides (ou des liquides) y sont immergés. En effet, la construction du concept de fluide (en tant que milieu d'immersion) réalisé par Blaise Pascal au XVII^e siècle est un des éléments clés de la naissance du concept de pression atmosphérique⁽²⁰⁾. Avec Blaise Pascal, l'air devient un milieu doté des mêmes propriétés que l'eau du point de l'immersion : un solide immergé dans l'air va être se trouver soumis à des forces pressantes qui, en un point de la surface du solide, vont dépendre du poids de la colonne d'air surplombant ce point.

Une des conséquences de cette avancée conceptuelle est le fait qu'un solide immergé dans l'air va se voir soumis à la poussée d'Archimède. Montrer la manifestation de la poussée d'Archimède dans l'air apparaît alors comme un moyen de construire l'idée que l'air agit sur les corps qui y sont immergés (de la même manière que l'eau). Or, on montre rarement la poussée d'Archimède dans l'air, et de manière plus générale, d'ailleurs, les expériences de statique des fluides sont réalisées le plus souvent dans l'eau tandis que les expériences de dynamique (des fluides) sont, elles, réalisées plutôt dans l'air⁽²¹⁾. Afin de briser cette tendance usuelle de l'enseignement, nous avons

en classe si l'on dispose d'un tuyau de plastique et d'une hauteur de onze mètres environ). On constate alors que la hauteur à laquelle l'eau du tuyau se trouve suspendue est identique à celle que l'on obtient par aspiration.

- (20) Nous appelons ici à une certaine prudence. Certes, le rapprochement de l'air et de l'eau du point de vue en tant que fluides présente un avantage didactique certain. Mais il y a cependant des différences fondamentales entre les liquides et les gaz que le rapprochement opéré par Pascal ne doit pas faire oublier. Par exemple, si les gaz emplissent naturellement le vide, les liquides se vaporisent à son contact et le remplissent de gaz à la pression de vapeur saturante. En outre, du point de vue de la compressibilité, les liquides et les gaz sont très différents : nous l'avons signalé plus haut, un liquide n'est pratiquement pas compressible, à l'inverse d'un gaz qui offre une résistance à la compressibilité relativement faible (tant que sa pression est faible).
- (21) À ce sujet il est intéressant de noter que les auteurs du rapport du jury pour la session 2011 du concours du CAPES de physique-chimie signalent «qu'il faut veiller à ne pas cantonner les expériences de statique des fluides à l'utilisation d'un liquide (de l'eau en général) et les expériences de dynamique à des gaz (de l'air en général)» (p. 21). Rapport accessible à l'adresse : http://cache.media.education.gouv.fr/file/capesext/35/1/scphyschim_186351.pdf (vérifié le 17 septembre 2014).

réalisé l'expérience suivante (accessible en libre accès sur internet⁽²²⁾) : une boule de polystyrène est posée sur une balance électronique ; l'ensemble du dispositif est placé sous une cloche à vide à l'intérieur de laquelle la valeur de la pression est celle de la pression extérieure. La balance indique une certaine valeur de la masse m . On demande aux élèves de prédire l'évolution de la masse de la boule après aspiration de l'air situé à l'intérieur de la cloche. Le résultat ($m_{\text{après aspiration}} > m$) présente un caractère contre-intuitif qui permet selon nous de travailler la conception des élèves selon laquelle l'air nous « écrase » (action dirigée uniquement vers le bas). Ici, on a plutôt l'impression que l'air nous « porte »... À noter : les élèves n'ont pas de difficultés à prédire qu'une boule immergée dans l'eau paraît moins lourde qu'une boule immergée dans l'air.

Ce passage par la poussée d'Archimède (largement inspiré par la démarche de Pascal) peut se poser comme un préalable à une autre expérience que nous avons réalisée il y a quelques années et qui visait à montrer la variation de la pression de l'air situé à l'intérieur de la cabine d'ascenseur de la tour Montparnasse au fil de son ascension vers le sommet de la Tour⁽²³⁾, ceci, à l'aide d'un baromètre à aiguille. Là encore, l'inspiration est largement historique et les élèves n'auront pas de mal à reconnaître les traces de l'expérience du Puy-de-Dôme conduite par Florin Périer.

Enfin, en complément de notre travail, nous recommandons également au lecteur les pistes documentaires et les activités pédagogiques proposées par notre arpenteur du web Guy Bouyrie [8] dans sa belle exploration de la toile relative à la « pression d'un fluide ».

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aristote, *Physique*, trad. P. Pellegrin, Paris : Flammarion, 1999.
- [2] J.B. Baliani, "Letter to Galileo, 27 July 1630", *Opere di Galileo*, XIV, p. 125, 1630.
- [3] D. Bernoulli, *Hydrodynamique*, 1738, trad. J. Peyroux, Paris : Blanchard, 2004.
- [4] J.-M. Berthelot, « Pour un programme sociologique non réductionniste en étude des sciences », *Revue Européenne des sciences sociales*, 40 (124), p. 233-252, 2002.
- [5] U. Besson, "Students' conceptions of fluids", *International Journal of Science Education*, vol. 26, n° 14, p. 1683-1714, 2004.
- [6] U. Besson et L. Viennot, "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, 2004.

(22) Vidéo disponible sur le site de l'UdPPC (vidéo 1).

(23) Vidéo réalisée par Elsa Godet (2008), disponible sur le site de l'UdPPC (vidéo 2).

- [7] R. Blanché, *La méthode expérimentale et la philosophie de la physique*, Paris : Colin, 1969.
- [8] G. Bouyrie, « L'arpenteur du web : la pression d'un fluide », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 108, n° 966, p. 1171-1207, juillet-août-septembre 2014.
- [9] R. Boyle, *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air and its effects*. Londres, 1660.
- [10] K.C. de Berg, "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, 1992.
- [11] C. de Hosson et B. Caillarec, « L'expérience de Blaise Pascal au Puy-de-Dôme : Analyse des difficultés des étudiants de premier cycle universitaire et confrontation historique », *Didaskalia*, n° 34, p. 105-130, 2009.
- [12] E. Engel Clough et R. Driver, "What do children understand about pressure in fluids ?", *Research in Science and Technological Education*, vol. 3, n° 2, p. 133-144, 1985.
- [13] G. Galileo, « Lettre à Baliani », *Bibl. Braidense in Milano*. Cassetta A. F. XIII, 13, I. – Autografan, 1614.
Disponible à l'adresse :
<http://moro.imss.fi.it/lettura/LetturaWEB.DLL?AZIONE=UNITA&TESTO=Ea0&PARAM=21-18679-1370&VOL=12>
- [14] G. Galileo, *Discours concernant les deux sciences nouvelles*, 1638. Traduction M. Clavelin, Paris : Armand Colin, 1970.
- [15] Héron d'Alexandrie, *Les pneumatiques*, trad. J.Y. Guillaumin et G. Argoud, Presses Universitaires de Saint-Étienne, 1997.
- [16] M. Jammer, *Concepts of mass in contemporary physics and philosophy*, Princeton University Press, 2000.
- [17] P. Kariotoglou et D. Psillos, "Pupils' pressure models and their implication for instruction", *Research in science and technological Education*, vol. 11, n° 1, p. 95-108, 1993.
- [18] E. Mariotte, Discours de la nature de l'air (1676), Œuvres de M. Mariotte, de l'Académie Royale des sciences, Tome I (1717), Pierre Vander (éd.) : Leyde, p. 149-182.
- [19] C. Massignat, « Vide et matière dans la première moitié du XVII^e siècle : phénoménologie d'une polémique décisive ». Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1998.
- [20] B. Pascal, *Œuvres complètes* (1647), Paris : Seuil, 1963.
- [21] S. Roux, « 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, 2007.
Disponible à l'adresse : http://disoama.free.fr/L1_05_ep_5.pdf
- [22] S. Rozier et L. Viennot, "Students' reasoning in thermodynamics", *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 2, p. 159-170, 1991.
- [23] M. Sadoun-Goupil, « L'œuvre de Pascal et la physique moderne, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, vol. 16, p. 23-52, 1963.
- [24] E. Saltiel et M. Hartmann, *L'air est-il de la matière ?*, 2005.
Disponible à l'adresse : http://www.fondation-lamap.org/sites/default/files/upload/media/ressources/pedago/14236/1125_Lair11b.pdf
- [25] P. Sauvage et C. de Hosson, "Approaching the concept of atmospheric pressure: an interview based on Torricelli's barometer. Proceedings of the GIREP-ICPE-MPTL international conference", august 22nd -27th 2010, Reims (France), 2010.
Disponible à l'adresse : http://www.univ-reims.fr/site/evenement/girep-icpe-mptl-2010-reims-international-conference/gallery_files/site/1/90/4401/22908/29321/29408.pdf
- [26] M.-G. Séré, "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, 1986.
- [27] J.-P. Séris, *La technique*, Paris : PUF, 1994.
- [28] S. Shapin et S. Schaffer, *Léviathan et la pompe à air*, Paris : La Découverte, 1993.
- [29] R. Taton, *L'histoire générale des sciences*, Paris : PUF, 1963.
- [30] E. Torricelli, *Letter to Michelangelo Ricci concerning the barometer* (1644), *Collected Works*, vol. 3, New York, 1919.
- [31] R.T. Tytler, "Children's conceptions of air pressure : Exploring the nature of conceptual change", *International Journal of Science Education*, vol. 20, n° 8, p. 929-958, 1998.

Compléments de l'article

Cet article comporte des compléments nommés :

- ◆ *video_1.mp4*
- ◆ *video_2.mp4*

L'ensemble est disponible sous la forme d'un fichier zippé 09781369.

Annexe

Dossier documentaire : éléments d'histoire de la pression atmosphérique

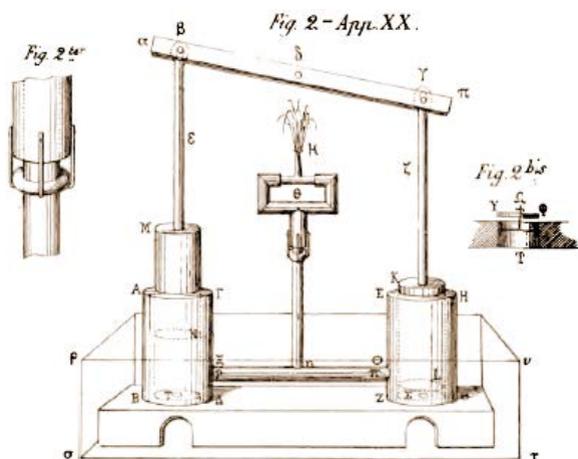
Si pour chacun des corps simples il y a une tendance naturelle qui les porte, par exemple, le feu en haut, et la terre en bas et vers le centre, il est clair que le vide ne peut pas être cause de cette tendance. De quoi le vide sera-t-il donc cause ? [...]. De plus, on peut observer que les projectiles continuent à se mouvoir, sans que le moteur qui les a jetés continue à les toucher, soit à cause de la réaction environnante, comme on le dit parfois, soit par l'action de l'air qui, chassé, chasse à son tour, en produisant un mouvement plus rapide que ne l'est la tendance naturelle du corps vers le lieu qui lui est propre. Mais, dans le vide, rien de tout cela ne peut se passer; et nul corps ne peut y avoir un mouvement que si ce corps y est sans cesse soutenu et transporté, comme le fardeau que porte un char.

Document 1 - Aristote (384-322 av. J.-C.), *Physique*, trad. J. Barthélémy Saint Hilaire, Paris : Ladrangé, 1862.

Ainsi, que l'on prenne un vase léger à ouverture étroite et qu'on l'applique contre les lèvres en aspirant l'air, ce qui le raréfie, le vase restera suspendu aux lèvres, car le vide attirera la chair dans le vase afin de remplir le vide. Il est donc clair que la portion de l'espace compris dans le vase était devenue vide en partie. On peut démontrer la même chose à l'aide de ces ampoules de verre à ouverture étroite dont se servent les médecins. Quand ils veulent les remplir d'un liquide, ils aspirent l'air, puis mettent le doigt sur l'orifice et renversent le vase dans ce liquide; ils ôtent alors leur doigt et le liquide s'élève dans l'espace rendu vide, bien que ce mouvement de bas en haut soit contraire à la nature. C'est encore le cas des ventouses qui, appliquées sur le corps, non seulement ne tombent pas malgré leur poids, mais encore attirent dans leur intérieur les matières voisines à travers les ouvertures de la peau. Le feu que l'on y place consume et détruit en effet l'air qui y est contenu, comme il consume les autres corps, l'eau ou la terre, et les transforme en substances plus ténues.

Document 2 - Héron d'Alexandrie (10-70 apr. J.-C.), *Les pneumatiques*, trad. A. de Rochas, Paris : Masson⁽²⁴⁾, 1882

(24) Également accessible à : <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/heron/pneumatiques.htm>

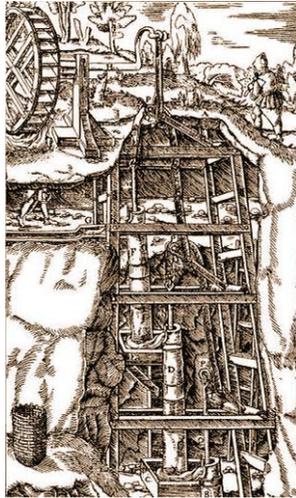


Document 3 - « Pompe dont on se sert dans les incendies », Héron, *Les Pneumatiques*, chapitre XX.



Document 4 - La pompe d'al-Jazari
(tiré du manuscrit Ahmet III 3472, Bibliothèque Topkapi, Istanbul)⁽²⁵⁾.

(25) Accessible à <http://www.veoh.com/collection/HistoireTechnologie/watch/v299449kx4Ztb7>



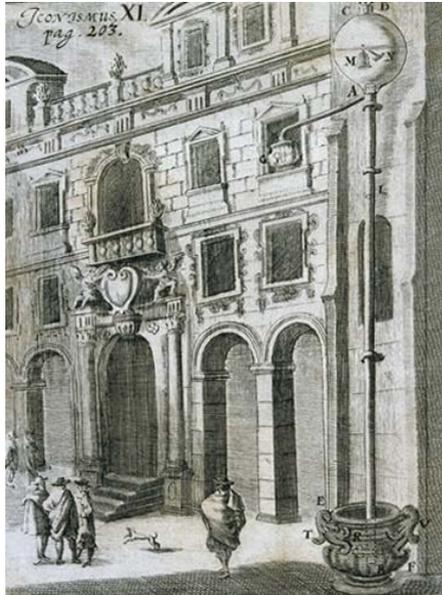
Document 5 - Gravure extraite de G. Agricola, *De re metallica*, trad. de l'ed. originale latine de 1556 par A. France-Lanord, 1992, p. 152.

Sagredo : 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.

Sagredo : Ce qui est attiré dans la pompe, n'est-il pas, en somme, un cylindre d'eau qui, attaché par en haut, s'allonge de plus en plus, atteignant finalement ce point au-delà duquel, tiré par son propre poids devenu excessif, il se rompt exactement comme une corde ?

Salviati : C'est bien ainsi que les choses se passent ; et comme cette hauteur de dix-huit coudées fixe par avance la limite jusqu'à laquelle peut se maintenir une quantité d'eau quelconque [...] chaque fois où nous pèserons l'eau contenue dans un tube de dix-huit coudées [...] nous obtiendrons la valeur de la résistance due au vide pour tous les cylindres pleins.

Document 6 - G. Galilée (1564-1642), *Discours concernant deux sciences nouvelles*, trad. Clavelin, Paris : Colin, p. 18-19, 1970.



Document 7 - Gravure représentant l'expérience de Berti et Magiotti, extraite de *Technica curiosa, sive, Mirabilia artis*, 1664.

cipe mesme. Ensuite en l'an 1643. Toricelli Mathematicien du Duc de Florence, & successeur de Galilée trouva qu'un tuyau de verre de quatre picds ouvert seulement par un bout & fermé par l'autre, estant rempli de vif argent, l'ouverture en estant bouchée avec le doigt ou autrement, & le tuyau dispose perpendiculairement à l'horison, l'ouverture bouchée estant vers le bas, & plongée deux ou trois doigts dans d'autre vif argent contenu en un vaisseau moitié plein de vif argent, & l'autre moitié d'eau; si on le débouche (l'ouverture demeurant enfoncée dans le vif argent du vaisseau) le vif argent du tuyau descend en partie, laissant au haut du tuyau un espace vuide en apparence, le bas du mesme tuyau demeurant plein du mesme vif argent jusqu'à une certaine hauteur : & si on hausse un

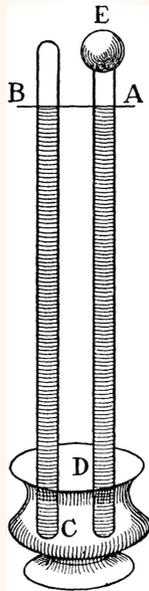
Document 8 - B. Pascal, *Traité de l'équilibre des liqueurs*, 1663 (source : Gallica).

Si donc on me demande quel corps entre, 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.

Document 9 - Première lettre du P. Noël à Blaise Pascal.

Molto Ill.re Sig.re Padron mio Col.mo

Mandai queste settimane passate alcune mie dimostrazioni sopra lo spazio della Cicloide al Sig.r Antonio Nardi, con pregarlo che dopo haverle vedute le inviase a drittura a V. S. o pure al Sig.r Magiotti. Le accennai già che si stava facendo non so che sperienza filosofica intorno al vacuo, non per far semplicemente il vacuo, ma per far uno strumento che mostrasse le mutazioni dell'aria, hora più grave e grossa, et hor più leggiera e sottile. Molti hanno detto che il vacuo non si dia, altri che si dia, ma con repugnanza della natura e con fatica; non so già che alcuno habbia detto che si dia senza fatica e senza resistenza della natura. Io discorreva così: se trovassi una causa manifestissima, dalla quale derivi quella resistenza che si sente nel voler fare il vacuo, indarno mi pare si cercherebbe di attribuire al vacuo quella operazione, che deriva apertamente da altra cagione, anzi che, facendo certi calcoli facilissimi, io trovo che la causa da me addotta (cioè il peso dell'aria) dovrebbe per sé sola far maggior contrasto che ella non fa nel tentarsi il vacuo. Dico ciò perché qualche Filosofo, vedendo di non poter fuggire questa confessione, che la gravità dell'aria cagioni la repugnanza che si sente nel fare il vacuo, non dicesse di concedere l'operazione del peso aereo ma persistesse nell'assequere che anche la natura concorre a repugnare al vacuo. Noi viviamo sommersi nel fondo d'un pelago d'aria elementare, la quale per esperienze indubitate si sa che pesa, e tanto che questa grossissima vicino alla superficie terrena, pesa circa la quattrocentesima parte del peso dell'acqua. Gli Autori poi de' crepuscoli hanno osservato che l'aria vaporosa e visibile si alza sopra di noi intorno a cinquanta, ovvero cinquanta quattro miglia, ma io non credo tanto, perché mostrerei, che il vacuo dovrebbe far molto maggior resistenza che non fa, se bene vi è per loro il ripiego che quel peso scritto dal Galileo s'intenda dell'aria bassissima che ve praticano per l'homini e gli animali, ma che sopra le cime degl' alti monti l'aria cominci ad esser purissima e di molto minor peso che la 1/400 parte del peso dell'acqua. Noi habbiamo fatti molti vasi di vetro et anco come i seguenti, segnati A et B, grossi e di collo lungo due braccia, questi pieni d'argento vivo, poi serratagli con un dito la bocca e rivoltati in un vaso dove era l'argento vivo C, si vedevano votarsi e non succeder niente nel vaso che si votava; il collo però AD restava sempre pieno all'altezza d'un braccio e 1/4, e un dito di più.



Traduction

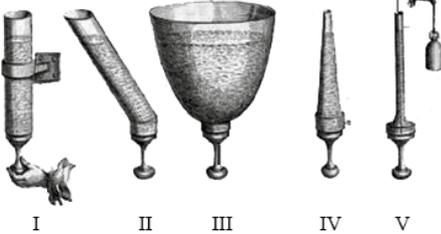
J'ai envoyé, dans le courant de ces dernières semaines, quelques démonstrations de moi sur l'aire de la cycloïde, au seigneur Antonio Nardi, avec prière de les adresser, aussitôt qu'il les aurait vues, à Votre Seigneurie ou au seigneur Magiotti. J'ai déjà annoncé à Votre Seigneurie qu'il se faisait une expérience de physique sur le vide, non pas pour faire simplement le vide, mais pour avoir un instrument qui pût indiquer les changements de l'air, tantôt plus lourd et plus épais, tantôt plus léger et plus subtil. Beaucoup de gens ont dit qu'il ne peut pas se produire de vide, d'autres qu'il peut se produire, mais non sans résistance de la nature ni sans fatigue. Je ne sache pas que personne ait dit qu'il peut se produire du vide sans fatigue et sans résistance aucune de la nature. J'ai raisonné ainsi : si je trouvais une cause manifeste d'où dérive la résistance que l'on sent quand on veut faire le vide, il serait inutile, ce me semble, de chercher à attribuer au vide un effet qui dérive évidemment d'une autre cause. Et même en faisant certains calculs très-faciles, je trouve que la cause dont je parle, à savoir le poids de l'air, devrait à elle seule faire plus d'effet qu'elle ne fait, quand on essaye de faire le vide. Je parle ainsi pour que quelque philosophe, voyant qu'il ne peut éviter d'avouer que la pesanteur de l'air est la cause de la résistance que l'on sent quand on veut faire le vide, ne persiste pas, tout en accordant l'effet du poids de l'air, à affirmer que la nature concourt aussi à cette résistance au vide. Nous vivons submergés au fond d'un océan d'air, et nous savons par des expériences indubitables que l'air est pesant et même que cet air épais qui est près de la surface de la Terre pèse environ le quatre centième du poids de l'eau. D'autre part, les auteurs qui ont parlé du crépuscule ont observé que l'air visible et chargé de vapeurs s'élève au-dessus de nous à près de cinquante ou cinquante-quatre milles : ce que je crois exagéré, parce que je pourrais montrer que le vide devrait faire beaucoup plus de résistance qu'il ne fait; mais ils ont une échappatoire, ils peuvent dire que le poids dont parle Galilée doit s'entendre de la région la plus basse de l'air où vivent les hommes et les animaux, mais que sur la cime des hautes montagnes l'air commence à être très-pur et pèse beaucoup moins que le quatre centième du poids de l'eau. Nous avons fait beaucoup de tubes de verre, comme ceux qui sont désignés par les lettres A et B, gros et longs de deux brasses. Ces tubes, étant remplis de vif argent,

Per mostrar che il vaso fusse perfettamente voto, si riempiva la catinella sottoposta d'acqua fino in D et alzando il vaso a poco a poco, si vedeva, quando la bocca del vaso arrivava all'acqua, descender quell'argento vivo dal collo, e riempirsi con impeto orribile d'acqua fino al segno E affatto. Il discorso si faceva mentre il vaso AE stava voto e l'argento vivo si sosteneva benché gravissimamente nel collo AC, questa forza, che regge quell'argento vivo contro la sua naturalezza di ricader giù, si è veduto fino adesso che sia stata interna nel vaso AE, o di vacuo, o di quella roba sommamente rarefatta; ma io pretendo, che la sia esterna e che la forza venga di fuori. Su la superficie del liquore che è nella catinella gravita l'altezza di cinquanta miglia d'aria; però qual meraviglia è se nel vetro CE, dove l'argento vivo non ha inclinazione, nè anco repugnanza per non esservi nulla, entri e vi s'innalzi fin tanto, che si equilibri colla gravità dell'aria esterna, che lo spinge? L'acqua poi in un vaso simile, ma molto più lungo, salirà quasi fino a diciotto braccia, cioè tanto più dell'argento vivo, quanto più l'argento vivo è più grave dell'acqua, per equilibrarsi con la medesima cagione che spinge e l'uno e l'altro. Confermava il discorso l'esperienza fatta nel medesimo tempo col vaso A e colla canna B, ne quali l'argento vivo si fermava sempre nel medesimo orizzonte AB segno quasi certo che la virtù non era dentro; perché più forza averebbe avuto il vaso AE, dove era più roba rarefatta e attraente, e molto più gagliarda per la rarefazione maggiore che quella del pochissimo spatio B.

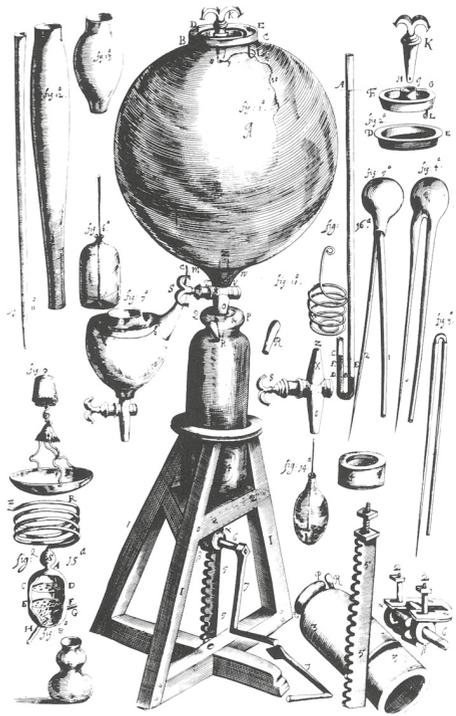
Ho poi cercato di salvar con questo principio tutte le sorte di repugnanze che sentono negli varii effetti attribuiti al vacuo, nè vi ho fin' hora incontrato cosa che non cammini bene. So che a V.S. sovverranno molte obbiezioni, ma spero anche che pensandovi le sopirà. La mia intenzione principale poi non è potuta riuscire, cioè di conoscer quando l'aria fusse più grossa e grave e quando più sottile e leggiera collo strumento EC, perché il livello AB si muta per un'altra causa (che io non credevo mai) cioè per il caldo e freddo e molto sensibilmente, appunto come se il vaso AE fusse pieno d'aria.

se vidaient sans que rien n'y entrât ; et pourtant le tube AD restait plein jusqu'à la hauteur d'une brasses et un quart avec un doigt en sus. Pour montrer que le tube était parfaitement vide, on remplissait d'eau jusqu'en D le bassin inférieur ; et en élevant petit à petit le tube, quand l'extrémité inférieure arrivait à l'eau, on voyait le vif argent descendre du tube, et l'eau le remplir avec une impétuosité effrayante jusqu'en E. Quand la partie AE du tube était vide et que le vif argent se soutenait, bien que fort lourd, dans AC, voici comment on raisonnait : jusqu'ici on a cru que la force qui empêche le vif argent de retomber est intérieure à AE et provient du vide ou de cette matière (~ extrêmement raréfiée; mais je prétends que la matière est extérieure et que la force vient du dehors. Sur la surface du liquide qui est dans le bassin pèse une quantité d'air qui a cinquante mille de hauteur. Est-il étonnant que le vif argent, qui n'a ni inclination, ni répugnance pour le tube CE, y entre et s'y élève jusqu'à ce qu'il fasse équilibre au poids de l'air extérieur qui le pousse? L'eau dans un tube semblable, mais beaucoup plus long, s'élèvera jusqu'à près de dix-huit brasses, c'est-à-dire d'autant plus haut que le vif argent est plus lourd que l'eau, pour faire équilibre à la même cause qui agit sur l'un et sur l'autre. Ce raisonnement a été confirmé par l'expérience faite en même temps au moyen du tube A et du tube B, où le vif argent s'arrêtait toujours à la même ligne horizontale AB; signe presque certain que la force n'est pas intérieure ; car il y aurait eu une force d'attraction plus grande dans le tube AE, où il y avait plus de matière raréfiée et attirante, beaucoup plus énergique, à cause de son degré de raréfaction, que celle qui était enfermée dans le très petit espace B. J'ai cherché à résoudre avec ce principe toutes les difficultés qui se rencontrent dans les différents effets attribués au vide, et je n'ai jusqu'à présent rien rencontré qui ne marchât bien. Il se présentera sans doute beaucoup d'objections à l'esprit de Votre Seigneurie; mais j'espère qu'en y pensant telle les résoudra. Je n'ai pu réussir dans ce qui était mon but principal, à savoir, de connaître au moyen de l'instrument EC quand l'air est plus épais et plus lourd, et quand il est plus subtil et plus léger. Le niveau AB change pour une autre cause à laquelle je ne me serais pas attendu, par le froid et le chaud, et très sensiblement tout comme si le tube AE était rempli d'air, Je présente à Votre Seigneurie mes humbles respects.

Document 10 - E. Torricelli (1608-1647), Lettre à Ricci (11 juin 1644), In *Opere dei discepoli di Galileo*, Carteggio 1642-1648, a cura di P. Galluzzi e M. Torrini, Firenze Giunti-Barbera 1975, vol. I, p. 122-123.

Figures du *Traité de l'équilibre des liqueurs*

Document 11 - B. Pascal, *Expériences nouvelles touchant le vide*, 1663.



Document 12 - R. Boyle, Dessin de la pompe à air, extrait de Robert Boyle publié son ouvrage *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air*, 1660.



Cécile de HOSSON

Professeure des universités

Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)

Université Paris Diderot-Paris 7

Paris



Nicolas DÉCAMP

Maître de conférences

Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)

Université Paris Diderot-Paris 7

Paris