

Amelycor

(Association pour la mémoire du Lycée et du Collège de Rennes)

et l'atelier scientifique et technique

« nos instruments anciens »

du Lycée Emile Zola

présentent leur

Cahier n°1 :

***quelques histoires
de la pression
atmosphérique
et du vide***

*agrémentées d'expériences et de
présentations d'appareils et documents de
nos collections*

Présentation et bibliographie

A l'origine de ce cahier.

un exposé lors d'un "jeudi d'Amelycor" en novembre 96 (B. Wolff). Cet exposé devait beaucoup à :

- N. Chezeau : quelques considérations sur l'évolution des idées concernant le vide (article, in : bulletin de l'union des physiciens n° 733, avril 91)
- K. Fadel : l'air et le vide (exposé : revue du palais de la découverte, n°214, janv. 94)
- Les Cahiers de Science&Vie n° 27 (juin 95) : "Blaise Pascal, comment a-t-il démontré l'existence de la pression atmosphérique ?"

La création de l'atelier scientifique (1997-98)

a été l'occasion de reprendre dès septembre 97 cet exposé devant les élèves. Ainsi enrichi par les discussions, puis la relecture critique qu'ils ont menée en fin d'année, il constitue la première partie de ce cahier. Entre temps nous avons eu accès à une nouvelle et excellente référence :

- Les énigmes du vide, sciences et avenir hors-série n°112 (nov.-déc. 97)

Les recherches menées alors par les élèves

leur ont permis de refaire et améliorer les expériences, d'en réaliser d'autres et de les présenter au public à l'occasion du premier "lundi de l'atelier" (novembre 98). Une petite partie seulement de ce travail apparaît dans la deuxième partie de ce cahier, et dans la troisième (planches) puisque les photos d'instruments anciens ont été prises dans le cadre de l'atelier. Ces recherches ont largement débordé le domaine de la pression atmosphérique et du vide, seul traité dans ce cahier, pour s'étendre à l'étude générale des pressions dans les fluides, hydrostatique comprise. Une bonne référence de travail a été :

- R. Faucher : cours de 2de C programme 1966 (ed. Hatier)

Les photos, descriptions et interprétations d'appareil des domaines "pression" et "hydrostatique" qui n'apparaissent pas ici et auxquelles ont contribué les élèves pourront être consultées dans le catalogue "nos appareils anciens de sciences physiques" en cours d'édition et bientôt accessible sur un site internet.

Les principales références qu'ils ont utilisées et où ces instruments sont présentés en détail ont été :

- Ganot: traité élémentaire de physique 10^{ème} édition (vers 1880)
- Drion et Fernet (même programme ; édition 1869)

L'atelier a aussi travaillé sur d'autres domaines :

Chaleur et température, optique, électricité statique et dynamique... Ces domaines ont fait l'objet de présentations orales publiques ("lundis de l'atelier") mais pas de "cahiers" spécifiques. En revanche ces recherches ont contribué, sous la responsabilité principale de G. Chapelan, à l'élaboration du catalogue.

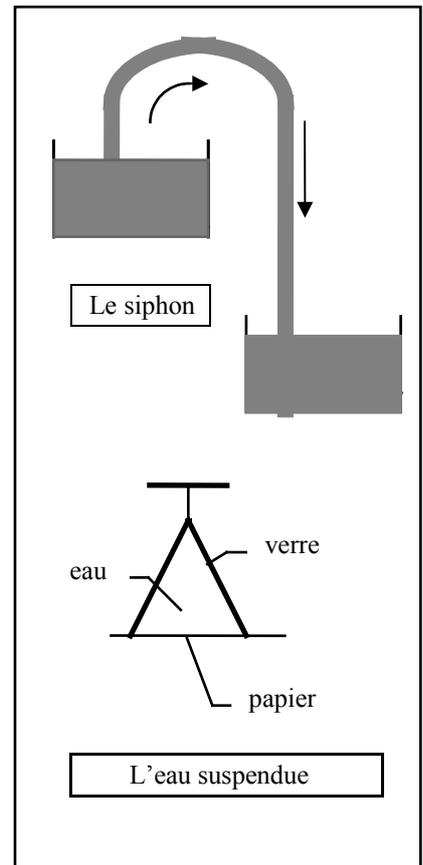
Quelques histoires de la pression atmosphérique et du vide

1. L'exposé

Moment expérimental n°1:

« Aspirons » de l'eau dans une paille, dans une seringue, mieux : faisons fonctionner un siphon ou « suspendons » l'eau d'un verre renversé.

Pourquoi l'eau monte-t-elle ? Pourquoi la colonne d'eau ne se rompt-elle pas dans le siphon et ne tombe-t-elle pas du verre ?



L'antiquité grecque et le vide :

Pour **Aristote** (-384, -322), le **vide n'existe pas**, et la matière est divisible à l'infini. Pour les «**atomistes**» grecs, au contraire : « convention que le doux, convention que l'amer, convention que le chaud, convention que la couleur, **en réalité les atomes et le vide** »¹

Dans les deux cas les positions concernant le vide sont largement liées aux théories respectives sur le mouvement. Pour Aristote «*tout ce qui occupe de l'espace est un corps*» et parler d'espace vide est donc un non-sens, mais surtout sa théorie du mouvement suppose des directions et des lieux privilégiés (un corps tend à se mouvoir vers son «*lieu naturel*», ainsi les «*graves*» vers le bas, etc.). Or le vide est homogène et la chute des corps n'aurait donc pas de raison de s'y produire dans une direction plutôt qu'une autre³. Par ailleurs la théorie d'Aristote sur la vitesse de chute des corps «*montre*» que dans le vide elle serait infinie pour tous les corps : infinie et dans toutes les directions à la fois ! Bref le vide est impossible.

Voilà donc la réponse aristotélicienne à nos questions : si la colonne d'eau du siphon ou de la seringue se brisait, elle laisserait un vide, or : **le vide, ça n'existe pas !**

Le Moyen Age chrétien :

La vision d'Aristote y est largement dominante, puisque c'est seulement au 17^{ème} siècle qu'un philosophe comme Gassendi réhabilitera l'atomisme antique (Galilée avant lui fut assez certainement, mais secrètement, atomiste), et ce contre Descartes, résolument convaincu de la divisibilité infinie de la matière, et en même temps de l'impossibilité du vide.

12^{ème} siècle : début de la traduction en latin des traités d'Aristote. Au 13^{ème} ils deviennent la base de l'enseignement des nouvelles « Universités » (Paris : la Sorbonne, Bologne...) jusqu'au 17^{ème}.

Mais les scolastiques du 14^{ème} siècle innovent par rapport à Aristote :

— si le vide n'existe pas dans l'univers matériel, il n'en est pas moins dans le pouvoir absolu de Dieu de le créer. L'idée émerge d'un espace vide infini qui serait rempli par l'esprit de Dieu⁴. C'est la nature qui a « horreur du vide » au point que les corps peuvent aller à l'inverse de leur «*inclinaison naturelle*», dans l'expérience du siphon par exemple!

— la réflexion sur ce que serait alors le mouvement dans le vide rompt souvent avec Aristote et préfigure parfois même Galilée.

Voilà donc une réponse un peu différente à nos questions : si l'eau monte dans la seringue, c'est que :
« la nature a horreur du vide » !

¹ Citation attribuée à Démocrite (env. -460, -370)

² si le substantif «grave» n'est plus utilisé pour désigner les corps «attirés vers le bas», il a donné en revanche dans la même acception «gravité» et gravitation

³ Pour mieux comprendre l'univers d'Aristote et comment tout mouvement y a pour condition un monde empli de matière, voir l'article de E. Grant dans le "Cahier de Science&Vie" cité dans la bibliographie.

⁴ Et se développera notamment, du 14^{ème} au 17^{ème} siècle, dans les grandes polémiques sur la structure de l'univers. Newton sera très proche de cette conception.

Moment expérimental n°2:

... du point de vue historique, en avance sur le cours de l'exposé !

Notre «tube de Newton» (instrument ancien) contient divers petits objets : papier, plume, liège, grain métallique, gravier...

On le retourne brutalement à la verticale, de sorte que ces objets partent simultanément du haut et on constate que plume et liège, par exemple, arrivent en bas bien après le gravier.

Mais si on recommence l'expérience après avoir relié à une pompe à vide (électrique dans notre cas - donc très anachronique !) et fermé le robinet, on constate que tous arrivent en bas presque en même temps.

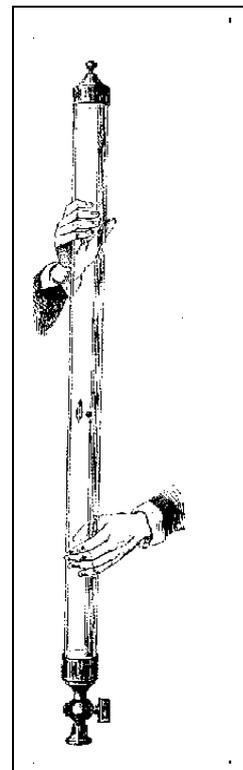


Figure du Ganot⁷.

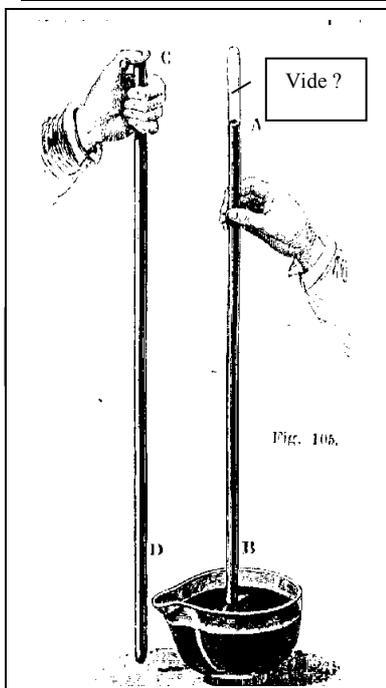
En pages "planches couleur", on trouvera la photographie de notre tube (n°1)

L'époque de Galilée (1564-1642) :

Galilée avait «deviné» que «dans le vide tous les corps ont même mouvement de chute», avant que l'expérience ci-dessus soit possible ! Des corps différents (mais de densité suffisante pour que la résistance de l'air soit toujours assez faible par rapport à leur poids) lâchés du haut de la tour de Pise arrivaient en effet pratiquement ensemble au sol. Et dans ses «discours sur deux sciences nouvelles»⁵ Galilée réfute toute la théorie d'Aristote sur le mouvement et sur l'impossibilité du vide.

Depuis longtemps déjà à cette époque existe la pompe aspirante (le principe est celui de la seringue). Mais les fontainiers florentins ne peuvent par ce moyen élever l'eau de plus d'une dizaine de mètres⁶ ! Pour Galilée c'est que «l'horreur du vide» est limitée : il y a une «force» exercée par le vide qui est en quelque sorte mesurée par le poids d'un cylindre d'eau de cette hauteur.

« La nature a horreur du vide »... mais cette horreur est limitée ?



Pourtant Isaac Beckman considérait dès 1618 que c'était la pesanteur de l'air qui «poussait» l'eau dans le corps de pompe, et non le vide qui l'aspirait, et c'est ce que Baliani écrivait avec une argumentation très précise, en 1630, à Galilée. Ce dernier sait que l'air est pesant et exerce des pressions, mais n'en maintient pas moins son idée en 1638, dans les «discorsi»⁵ !

L'expérience « de Torricelli » (1643)

Disciple de Galilée, Torricelli a l'idée, peu après la mort de son maître, de remplacer l'eau par des liquides plus denses, et propose notamment à son ami Viviani de réaliser l'expérience avec le mercure. Plus besoin de pompe, un tube d'un mètre suffit ! Et le mercure « refuse » de monter à plus de 76 cm (le mercure étant 13,6 fois plus dense que l'eau, 76 cm de mercure équivalent à 10,33 m d'eau) !

Moment expérimental n°3 : On réalise l'expérience de Torricelli, comme présentée ci-contre (figure du Ganot⁷) : le tube D rempli de mercure est retourné sur la cuve à mercure B ; le niveau de mercure s'abaisse jusqu'en A. La dénivellation entre A et B ne dépend pas de la forme du tube.

Pour Torricelli, ce n'est pas «l'horreur du vide» qui fait monter l'eau ou le mercure :

c'est la pression exercée par l'atmosphère sur la surface libre du liquide !

⁵ «discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali»

⁶ « 18 coudées »

⁷ Ganot. Traité élémentaire de physique, X^{ème} édition (vers 1880)

Pascal : Premières expériences et objections des adversaires du vide.

La description de l'expérience de Torricelli, et les discussions à son sujet se propagent très vite dans le monde savant européen, notamment grâce au moine Marin Mersenne, grand défenseur par ailleurs des thèses de Galilée en mécanique et en astronomie, et fondateur en 1635 de l'Académie parisienne. Après avoir assisté à une démonstration de l'expérience par Torricelli en personne, il tente d'ailleurs en 1645 de la reproduire à Paris, mais ses tubes de verre ne résistent pas au poids du mercure !

Pierre Petit (commissaire provincial de l'artillerie à Paris), qui fréquente assidûment le cercle du père Mersenne, se rend à Rouen à l'automne de 1646 : les «gentilshommes verriers» de cette ville sont célèbres pour la qualité et la résistance de leurs verres. C'est là aussi que réside le jeune Blaise Pascal⁸. Petit et Pascal réussissent l'expérience, avec un tube de plus de 1,20m ce qui rend encore plus spectaculaire la «hauteur de vide» qui s'y fait.

Mais les aristotéliens de Rouen objectent : le soi-disant vide peut être rempli de vapeur de mercure (et étant raréfiée, cette vapeur cherche à se contracter et «tire» le liquide vers le haut) !

C'est alors que Pascal imagine de réaliser l'expérience avec des tubes remplis l'un d'eau et l'autre de vin. Il utilise pour cela des tubes de verre incroyablement longs (une douzaine de mètres) et un dispositif permettant de les soutenir, les dresser et varier leur inclinaison. Si l'interprétation de ses adversaires est juste l'alcool, plus volatil que l'eau, dégagera plus de vapeur, et le vin descendra plus que l'eau. Au contraire, dans l'interprétation où le poids de l'atmosphère sur la surface libre équilibre celui de la colonne de liquide, le vin, un peu plus léger que l'eau, doit s'élever un peu plus haut !

Et c'est ce qu'on observe, lors de cette expérience spectaculaire ! (Fin 1646 ? Début 1647 ?)

Le moment expérimental... qui n'a pas eu lieu !

L'expérience, dans les conditions de l'époque, était un exploit extraordinaire (réalisation de tels tubes de verre, les remplir puis les retourner et dresser progressivement sur des cuves sans qu'ils ne se brisent). Pourquoi ne pas utiliser les progrès techniques pour en faire à Rennes un grand spectacle public, en utilisant des tubes en polymères de synthèse (pub garantie pour le fabricant !) et les étais, palans, grue... d'une entreprise de travaux publics ?

Nous n'avons pas pris les contacts nécessaires mais pourquoi pas en 1999 si l'atelier scientifique continue ?

Mais les objections persistent, après la publication en 1647 des «expériences nouvelles touchant le vide» : un «air» particulièrement subtil ne serait-il pas rentré par les «pores du verre» dans le mystérieux espace torricellien ?

Et c'est l'expérience du «vide dans le vide» réalisée entre la fin 1647 et le début 1648 par Pascal mais aussi Roberval et Auzout. L'idée est de voir si, en plaçant un 2^{ème} tube de Torricelli à l'intérieur du «vide» créé dans le 1^{er}, l'ascension du mercure a toujours lieu. Mais la réalisation pratique est impossible sous cette forme. Aussi Pascal imagine-t-il le dispositif de la page ci-contre :

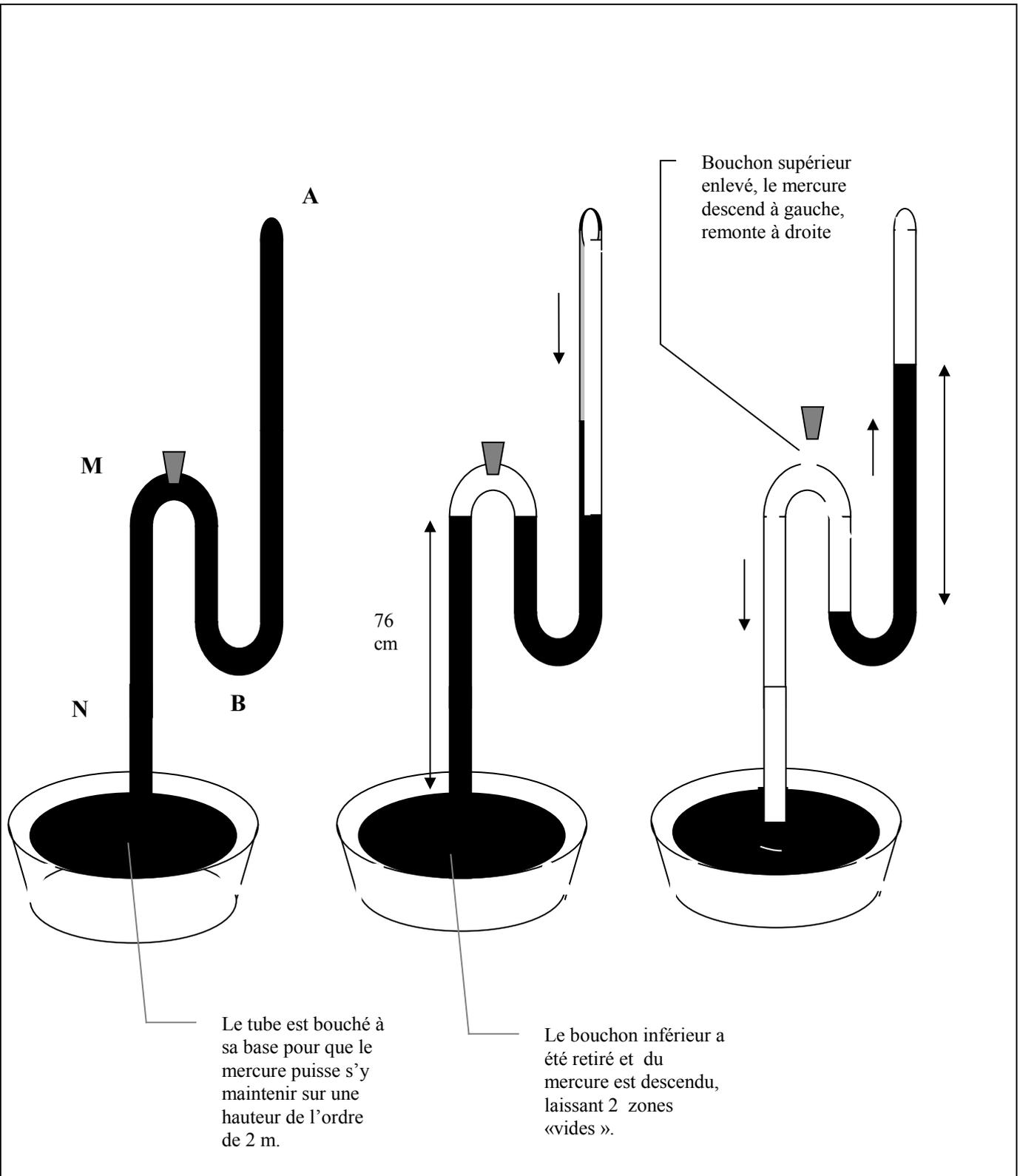
AB jouera le rôle du 2^{ème} tube, MN celui du tube principal. Le bouchon en M était à l'époque, d'après le texte de Pascal, une vessie de porc. La 2^{ème} figure montre comme l'attendait Pascal qu'une fois le mercure descendu au niveau fatidique de 76 cm dans MN, on n'observe plus aucune dénivellation dans le tube recourbé MBA ! (MBA joue bien le rôle de tube de Torricelli «dans le vide», l'atmosphère n'agit pas du côté MB). Puis lorsqu'on enlève le bouchon en M et que l'air rentre (3^{ème} figure) le liquide descend à gauche et prend à droite la dénivellation de 76 cm : c'est à nouveau un tube de Torricelli «normal». Tout cela s'explique particulièrement simplement en admettant comme causes pesanteur et pression de l'air.

⁸ Blaise Pascal (1623-1662) : voir brève notice biographique dans la 2^{ème} partie de cette brochure

L'expérience du «vide dans le vide» :

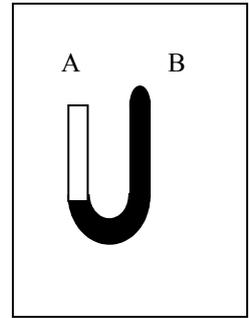
(figure inspirée de celle des «Cahiers de Science&Vie» n°27, Juin 95, sur Blaise Pascal)

D'après les «Cahiers de science et vie», la réalisation de l'expérience selon le protocole relaté par Pascal pose problème, et des chercheurs ayant tenté de l'imiter en 1978 n'ont pu la réaliser qu'en remplaçant les vessies par des bouchons modernes de caoutchouc !



Moment expérimental n°4 : *L'expérience du «vide dans le vide», modernisée !*

*Grâce à une pompe à vide (la nôtre est hélas une pompe électrique moderne, mais les pompes pneumatiques à main, mises au point peu après l'expérience de Pascal, permettaient la même expérience⁹) nous faisons le vide sous une cloche de verre à l'intérieur de laquelle est placé un manomètre (**appareil ancien**, voir planches couleur, n°6) du type figuré ci-contre : du côté droit le mercure remplit totalement le tube (fermé) tant que l'extrémité ouverte A est dans l'air, mais dès qu'on pompe on voit le mercure s'abaisser du côté B et monter du côté A jusqu'à ce que la dénivellation soit pratiquement nulle.*



Mais Pascal pense n'avoir pas assez de toutes ces expériences pour révoquer totalement l'explication par l'horreur du vide, d'où une nouvelle idée : si la hauteur du mercure s'explique par le poids de l'atmosphère, alors elle sera moindre si l'on fait l'expérience de Torricelli au sommet d'une montagne !

L'expérience du Puy-de-Dôme :

Pascal choisit le Puy-de-Dôme : montagne accessible même avec du matériel (dont une dizaine de kilogrammes de mercure), et située près d'une grande ville, Clermont-Ferrand. Le beau-frère de Pascal, Florin Périer, déjà expert de la question, y habite, et l'on pourra y trouver aussi le public de notables ecclésiastiques et séculiers dont le témoignage aura valeur de légitimation des résultats (des érudits pour la compétence, des gentilshommes parce que leur parole fait foi).

Périer et ses témoins effectuent leur ascension le 19 septembre 1648, et les résultats sont éloquents. Au sommet, la hauteur de mercure dans le tube de Torricelli n'est plus que de «23 pouces et 2 lignes» alors qu'elle était à mi-parcours de 25 pouces et au départ du jardin des pères minimes (en ville) de «26 pouces et 3 lignes $\frac{1}{2}$ » (un 2^d tube y a été laissé comme témoin et il a bien continué pendant toute la durée de l'expédition à indiquer cette même hauteur). Le lendemain Périer constatera une différence de 2 «lignes» simplement entre haut et bas de la cathédrale !

Pascal, dès qu'il reçoit le compte-rendu de Périer¹⁰, récidive à Paris à la tour St-Jacques.

C'est le triomphe de l'interprétation par la pression atmosphérique !

En effet, si l'expérience montrait au sommet de la montagne une hauteur de mercure plus faible qu'à son pied, Pascal annonçait par avance¹¹:

« Il s'ensuivra que la pesanteur et pression de l'air est la seule cause de suspension du vif-argent, et non pas l'horreur du vide, puisqu'il est bien certain qu'il y a beaucoup plus d'air qui pèse sur le pied de la montagne que non pas sur son sommet, au lieu que l'on ne saurait pas dire que la nature abhorre le vide au pied de la montagne plus que sur son sommet » !

L'expérience et son statut : quelques remarques philosophiques.

On se gausse parfois un peu trop vite des résistances que les adversaires de Pascal, comme ceux de Galilée opposaient à «l'évidence» expérimentale. C'est oublier que pour les aristotéliens et beaucoup plus généralement pour la mentalité commune jusqu'au 17^{ème} siècle, le sens commun et le comportement ordinaire (naturel !) de la nature comptent beaucoup plus que l'expérience artificielle.

Pour eux, l'expérience, c'est l'énoncé universel d'un fait éprouvé par tous. Au contraire l'expérience au sens de Torricelli, de Pascal ou de Galilée, semble en contradiction avec l'observation commune, et peu l'ont faite ou y ont assisté...

⁹ Dans Sciences et Avenir hors-série n°112 sur « les énigmes du vide » on en retrouve le schéma proposé par Huygens (Œuvres, 1661)

¹⁰ Ce compte-rendu mérite d'être lu en entier ! Il est reproduit p 68 et 69 du « cahier de Science et Vie » déjà cité.

¹¹ Lettre à Monsieur Périer du 15 novembre 1647 (Œuvres complètes de Pascal, page 222. Seuil 1963).

L'idée qu'il y ait des lois de la nature (comme la régularité de la hauteur barométrique dans les tubes de Torricelli) derrière la singularité des phénomènes d'observation, et qu'on puisse «forcer» la nature à révéler ces lois par des expériences construites ad hoc, est au début du 17^{ème} siècle une idée encore neuve, même si l'engouement pour l'expérience, considérée comme préalable au raisonnement, voire même «supérieure» à lui, connaît un essor rapide dans la 2^{de} moitié du 17^{ème} siècle.

La météo, déjà !

Le fait qu'à une altitude fixe, la hauteur barométrique (appelons maintenant ainsi la dénivellation dans le tube de Torricelli) dépende des phénomènes climatiques n'échappe pas à Pascal, et il suggère à Périer de poursuivre de 1649 à 1650 des relevés quotidiens. Cependant, c'est Otto Von Guericke qui construira en 1663 le premier **baromètre**¹², instrument spécialement destiné à la mesure des **variations** de la pression atmosphérique en vue de prédire la pluie ou le beau temps.

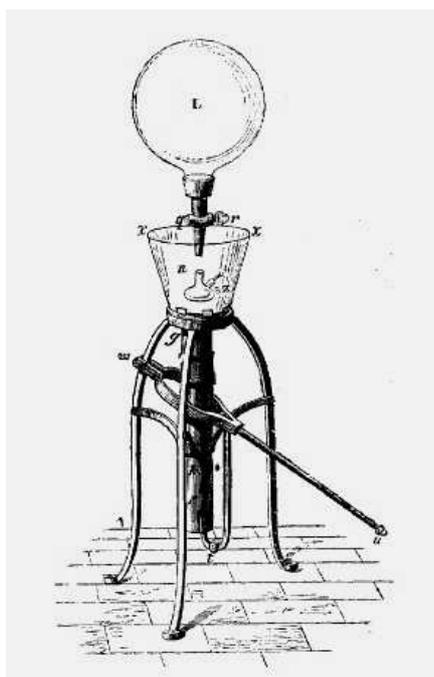
Les variations barométriques sont faibles, et il faut pouvoir les déceler même lorsqu'elles sont de l'ordre du dixième de millimètre. Von Guericke et d'autres associent donc au tube de Torricelli des dispositifs permettant d'évaluer avec une grande précision la dénivellation du mercure.

*Moment expérimental n°5 : présentation de nos **baromètres anciens**.*

Nous disposons de plusieurs modèles de baromètres à mercure, mais le plus élaboré, et en état de marche satisfaisant, est le "baromètre de Fortin"¹³ (voir planches couleur, photos 2 et 3).

Les machines pneumatiques

Otto Von Guericke (1602-1686), bourgmestre de Magdebourg, et expérimentateur remarquable, passionné de physique et de philosophie, avant même d'avoir connaissance de l'expérience de Torricelli, menait de façon indépendante des recherches sur le vide. Il cherchait notamment à faire le vide dans un volume beaucoup plus important que celui apparaissant dans les tubes barométriques. C'est ainsi qu'il construit en 1650 la première pompe pneumatique, sorte de grosse seringue ou de pompe de bicyclette inversée. Tirer le piston revient, lorsque le vide se fait dans le récipient, à lutter contre la pression atmosphérique, et dans ses premières expériences, il y fallait quatre hommes. Les premiers perfectionnements consisteront à démultiplier l'effort : leviers, puis système à crémaillère comme dans la pompe réalisée à son tour par l'aristocrate anglais Boyle (1660).



A gauche :
Machine de
Otto Von Guericke

A droite :
Machine de
Robert Boyle

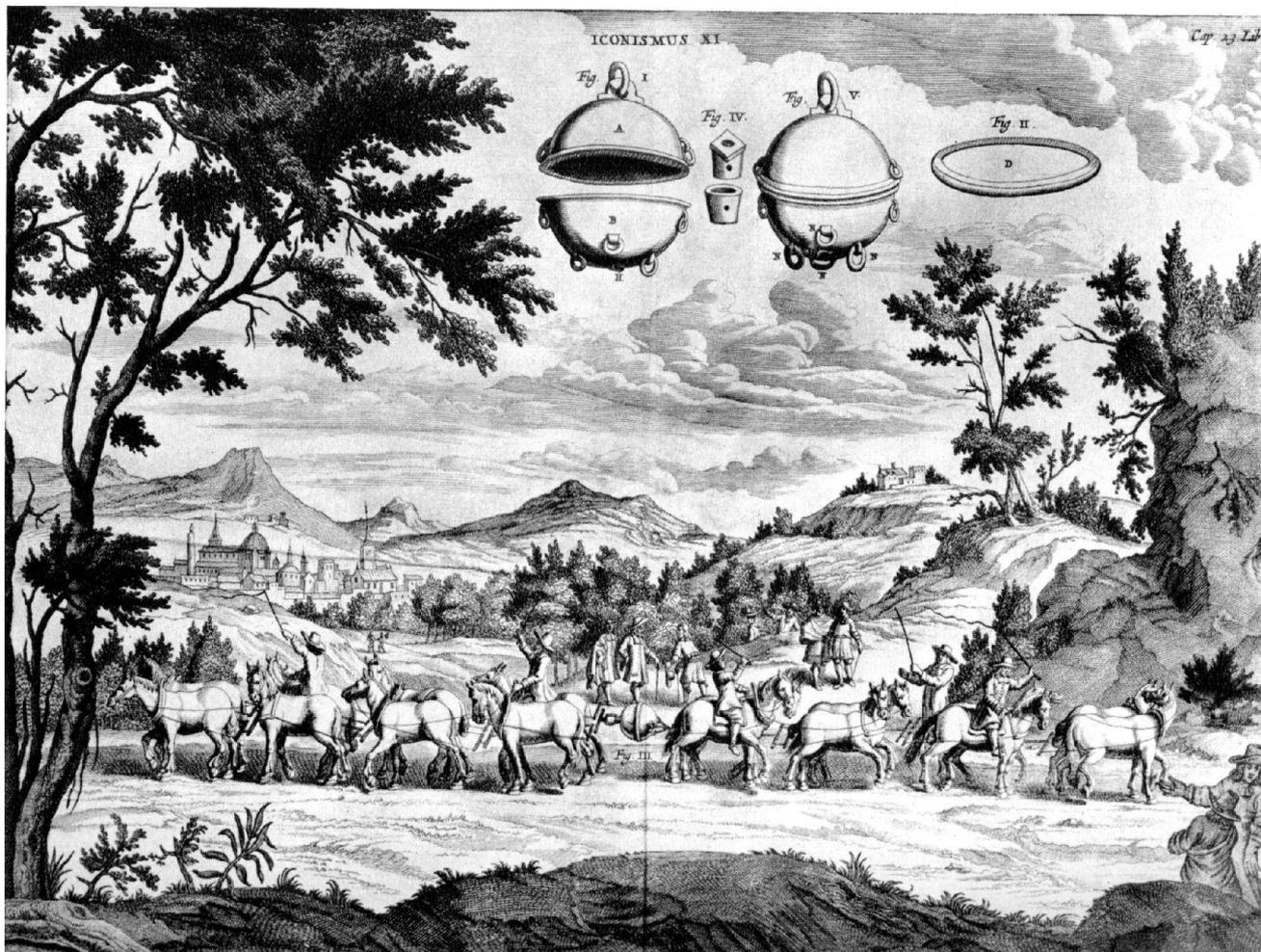


¹² Cette dénomination est en fait plus tardive (1676)

¹³ Son étude et son utilisation par l'atelier sont présentées dans la deuxième partie. Fortin (1750-1831) est loin d'être un contemporain de Pascal. Outre son baromètre, il fut un très habile constructeur d'instruments de mesures.

Les expériences sur les propriétés du "vide" et sur "la force de l'air"

Ces machines les rendent possibles et Otto Von Guericke réalise la célèbre expérience des "hémisphères de Magdebourg" : deux hémisphères creux et parfaitement jointifs sont appliqués l'un contre l'autre et l'on pompe l'air de la sphère (de plus d'un mètre de diamètre) ainsi formée. Alors 8 chevaux attelés de chaque côté ne réussissent pas à séparer les hémisphères !

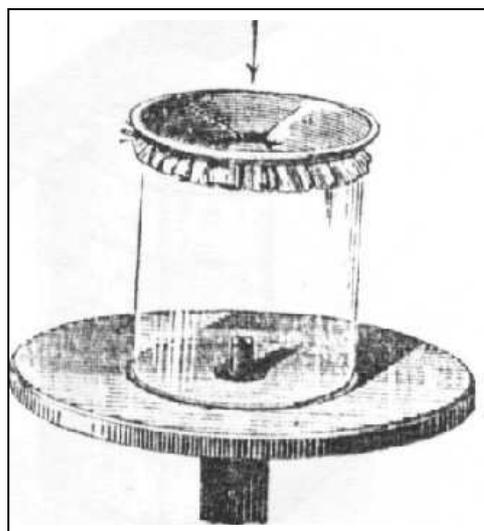


Moment expérimental n°6 :

Deux expériences spectaculaires sur la "force de l'air" : les hémisphères (*instrument ancien*¹⁴) et le "crève-vessie" (la membrane - autrefois vessie de porc - se rompt avec un bruit violent lorsqu'on pompe et que la pression de l'air ne s'exerce donc que sur une seule face). La représentation ci-contre du crève-vessie est tirée de Drion-Fernet (édition 1869)

Von Guericke mène bien d'autres études :
Comportements biologiques dans l'air raréfié : un oiseau et d'autres animaux meurent (nous n'avons pas reproduit l'expérience), mais une grappe de raisin reste fraîche plusieurs mois...

La chandelle s'éteint dans le vide, l'air est nécessaire !
La lumière se propage dans le vide, mais non le son.



¹⁴ Voir 2^{ème} partie et planches couleur (photos 7 et 8)

Boyle poursuit ces investigations, étudie notamment l'ébullition de l'eau sous basse pression, s'intéresse à l'expansibilité des gaz (mise en évidence, par exemple, par l'expérience du "ballon de baudruche"), et c'est lui aussi qui imagine le premier l'expérience dite du "tube de Newton"¹⁴

Moment expérimental n°7 : expériences de Boyle

1. En pompant l'air sous une cloche où l'on a enfermé un verre d'eau, on constate que l'eau se met à bouillir, à 20°C, dès que l'air est suffisamment raréfié¹⁵.

2. Expérience de la cloche que l'on n'entend plus après avoir pompé¹⁶

3. L'expérience du ballon de baudruche¹⁶ est représentée ci-contre : le ballon initialement à peine gonflé, grossit lorsqu'on pompe. Cela montre à la fois que l'air contenu dans le ballon exerce sur l'intérieur de la paroi des forces qui ne sont plus compensées à l'extérieur, et que l'air a des propriétés élastiques.

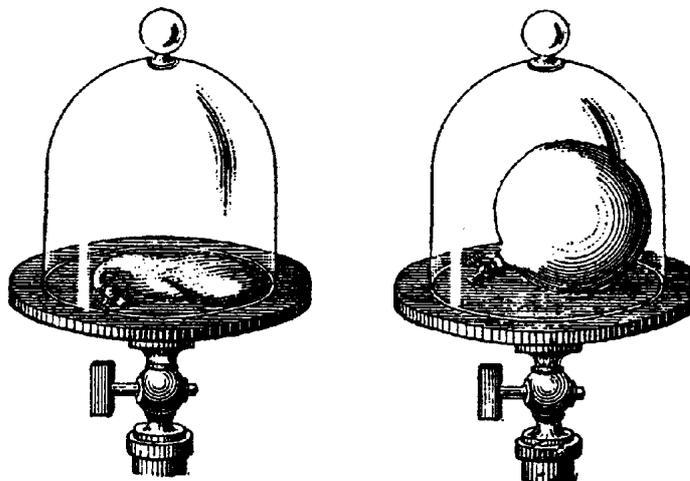
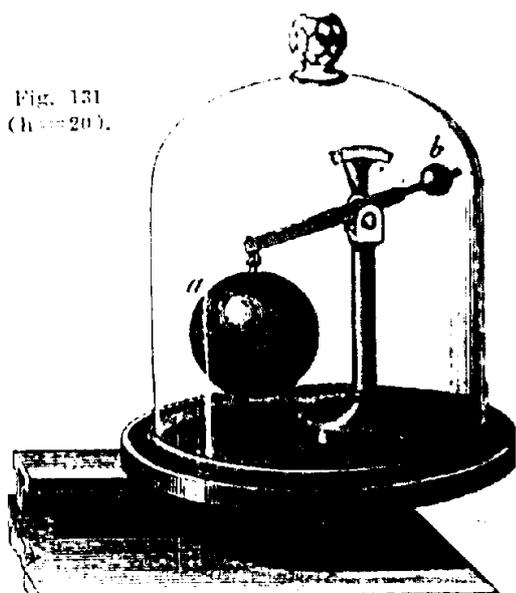


Fig. 131 (H. 20).



Une dernière expérience : le baroscope. (instrument ancien, voir planches, photo n°11).

Dans le dispositif ci-contre (figure du Ganot), le fléau de la balance est horizontal lorsque l'air sous la cloche est à la pression atmosphérique : la grosse sphère creuse (a) équilibre (b).

Si l'on pompe, le fléau s'incline comme sur la figure. Cela met en évidence le rôle de la poussée d'Archimède exercée par l'air. C'est elle qui est responsable sur le gros volume (a) placé dans l'air d'une force ascendante qui l'allège donc en quelque sorte, et c'est cette force qui disparaît quand on pompe (pour le petit corps b la variation est par contre négligeable).

Dans les vieux manuels cette expérience sert d'introduction aux pages consacrées aux aérostats.

Dans tout cela, qu'est devenue notre polémique sur l'existence du vide ?

Boyle et ses contemporains ne se posent plus le problème de l'existence ou non d'un "vrai" vide, le débat s'est déplacé vers le problème pratique de la réalisation d'une "raréfaction" sans cesse meilleure, d'une pression sans cesse plus basse. Mais les meilleurs "vides" réalisés ne sont pas vides ! Dans le "vide" du tube de Torricelli, par exemple, il y a de la vapeur de mercure, et Boyle se contente d'affirmer que l'enceinte de sa machine est "presque" vide d'air. Est-ce à dire comme le suggèrent certains commentateurs actuels que le débat sur l'existence du vide était vaine "spéculation", heureusement remplacée désormais par les saines réalités de l'expérience ? Je ne le crois pas :

¹⁴ Voir "moment expérimental n°2"

¹⁵ Avec nos pompes électriques actuelles il faut arrêter très vite l'expérience ! L'eau ainsi aspirée sous forme de vapeur peut endommager ce type de pompe où de l'huile assure la lubrification et l'étanchéité. Les pompes manuelles de Boyle ne connaissaient pas cet inconvénient. Mais une variante ingénieuse (le "bouillant de Franklin" est présentée en 2^{ème} partie)

¹⁶ Instruments anciens, voir planches couleur (photos 9 et 10).

Sans la notion d'espace vide, la mécanique de Newton, et avec elle la science moderne, n'aurait pu naître. Les lois de la mécanique de Newton ont en effet pour cadre fondamental l'espace vide, dépourvu de matière.

Plus généralement l'impossibilité *pratique* d'un vide "parfait" n'empêche pas que le *concept* de vide soit essentiel à la compréhension du monde physique.

Le vide, aujourd'hui

Le problème technique : pendant deux siècles la pompe à piston est restée le seul moyen de "faire le vide" ; c'est après 1850 seulement que sont apparus d'autres types de pompes. On arrive maintenant, par exemple, à atteindre dans le volume pourtant important où "courent" les particules de l'accélérateur de particules du CERN à Genève, des pressions du 10^{ème} de milliardième de mm de mercure !

Le problème physique... et métaphysique : le vide est partout, dans les espaces intersidéraux¹⁷ et au cœur même de l'atome puisqu'il n'y a "rien" entre le noyau (dont le rayon est 100 000 fois plus petit que celui de l'atome) et les minuscules électrons qui courent autour !

Mais que ce "vide" est étrange ! Celui de l'atome est "intraversable" et l'on ne peut espérer profiter de ce vide pour comprimer l'atome. Celui de l'univers est rempli de "champs" et d'ondes qui, sans support matériel véhiculent interactions à distance (gravitation, entre autres) ou nous informent (ondes électromagnétiques de nos émetteurs radio... ou émises par les étoiles). L'idée que ce "vide" était en fait une **matière** impalpable, dont la lumière et les ondes électromagnétiques auraient été les vibrations, matière à laquelle on avait même donné un nom ("l'éther"), était très en vogue au siècle dernier. Mais cette idée, devenue inconciliable avec les expériences sur la propagation de la lumière, n'a pas résisté à la révolution einsteinienne.

Pour la "mécanique quantique", ce vide est actif, doué de propriétés créatrices. Il grouille littéralement de particules (ou paires particules-antiparticules) "virtuelles" qui n'attendent qu'un peu d'énergie pour se "matérialiser".

Enfin et surtout, à peine démolie "l'éther", Einstein découvre, dans sa théorie de la relativité générale, que l'espace n'a pas d'existence indépendante de la matière qui le remplit ! Contrairement à l'espace de la mécanique newtonienne, l'espace einsteinien est "modélé" par la matière qui l'emplit¹⁸. Ainsi les masses des astres "courbent" notre univers...

Que peut bien signifier alors "espace vide" ?

Bref, la physique n'en a pas terminé avec le problème du vide, et l'expérience, mais aussi heureusement la "spéculation" théorique, ont encore de beaux jours à vivre!

¹⁷ Attention, il n'est jamais parfait non plus, et l'on trouvera bien dans les lieux les plus "vides", quelques atomes par mètre cube...

¹⁸ Qu'est-ce que cela veut dire ? Dans le petit livre "la relativité" (petite bibliothèque Payot) Einstein lui-même l'explique à un public non spécialiste (ayant, dit-il, "des connaissances de bachelier et une bonne dose de patience et de force de volonté")

2.

**Les
recherches
de l'atelier**

Qui était Pascal ?

Blaise Pascal (1623-1662) est né à Clermont-Ferrand.

Esprit précoce, à 12 ans il démontre la 32^{ème} proposition d'Euclide, à 17 ans, il publie un traité de mathématiques remarquable, à 22 ans, il invente une machine arithmétique.

Mathématicien et physicien, sa principale contribution à la physique a été relatée dans la première partie (la réflexion sur le vide, l'étude de la pesanteur et pression de l'air, avec l'expérience de l'ascension du Puy-de-Dôme...)

Philosophe, moraliste, théologien, à la gloire procurée par ses recherches, il préférera l'humilité, la renonciation à la vie mondaine et l'intimité de Dieu.

Recherche de Hélène Le Cadre

Science et foi religieuse chez Pascal

Etienne Pascal, père de Blaise, et lui-même humaniste érudit et savant mathématicien, séparait strictement les domaines de la science et de la religion : « tout ce qui est l'objet de la foi ne saurait l'être de la raison, et beaucoup moins y être soumis » mais de même la science ne saurait être soumise à un dogme religieux.

Pour Blaise « dans les matières qui (...) ont pour principe, ou le fait simple, ou l'intuition divine ou humaine, (...) c'est l'autorité seule qui peut nous en éclaircir. Il n'en est pas de même des sujets qui tombent sous le sens ou le raisonnement : l'autorité y est inutile ; la raison seule a lieu d'en connaître. (...) C'est ainsi que (...) toutes les sciences qui sont soumises à l'expérience et au raisonnement doivent être augmentées pour devenir parfaites. (...) Les expériences qui nous en donnent l'intelligence multiplient continuellement ; et comme elles sont les seuls principes de la physique, les conséquences multiplient à proportion. »

D'après le cahier de Sciences&Vie déjà cité

L'expérience du Puy-de-Dôme dans les escaliers du Lycée Emile Zola !

Comme nos moyens financiers ne nous permettaient pas de nous rendre au Puy-de-Dôme, nous avons plutôt, comme Pascal à la tour St-Jacques, utilisé le bâtiment dont nous disposions.

Pendant que nous emmenions dans les escaliers notre baromètre de Fortin, le reste de la classe cherchait théoriquement la variation de hauteur de mercure que l'on pouvait espérer :

Si toute l'atmosphère avait la même densité qu'au niveau du sol, son épaisseur serait de l'ordre de 8 km. On peut donc considérer que 8 km de notre air rennais seraient équivalents à 760 mm de mercure, et donc 8 m d'air à 0,8 mm de mercure.

Comme il y a près de 12 m de la cour au 3^{ème} étage de Zola, nos camarades espéraient donc une diminution tout à fait décelable, de l'ordre du mm, lorsque nous monterions les escaliers.

En théorie le baromètre de Fortin permet, grâce à son vernier, d'apprécier le 20^{ème} de mm !

Mais nous avons remarqué que la plus grande difficulté tenait à notre façon d'apprécier la coïncidence du curseur mobile avec le sommet de la colonne de mercure. Aussi avons nous fait deux lectures indépendantes :

	Aline	Virginie
Rez-de-chaussée	758,60 mm	758,00 mm
3 ^{ème} étage	757,35 mm	757,05 mm
Diminution	1,25 mm	0,95 mm

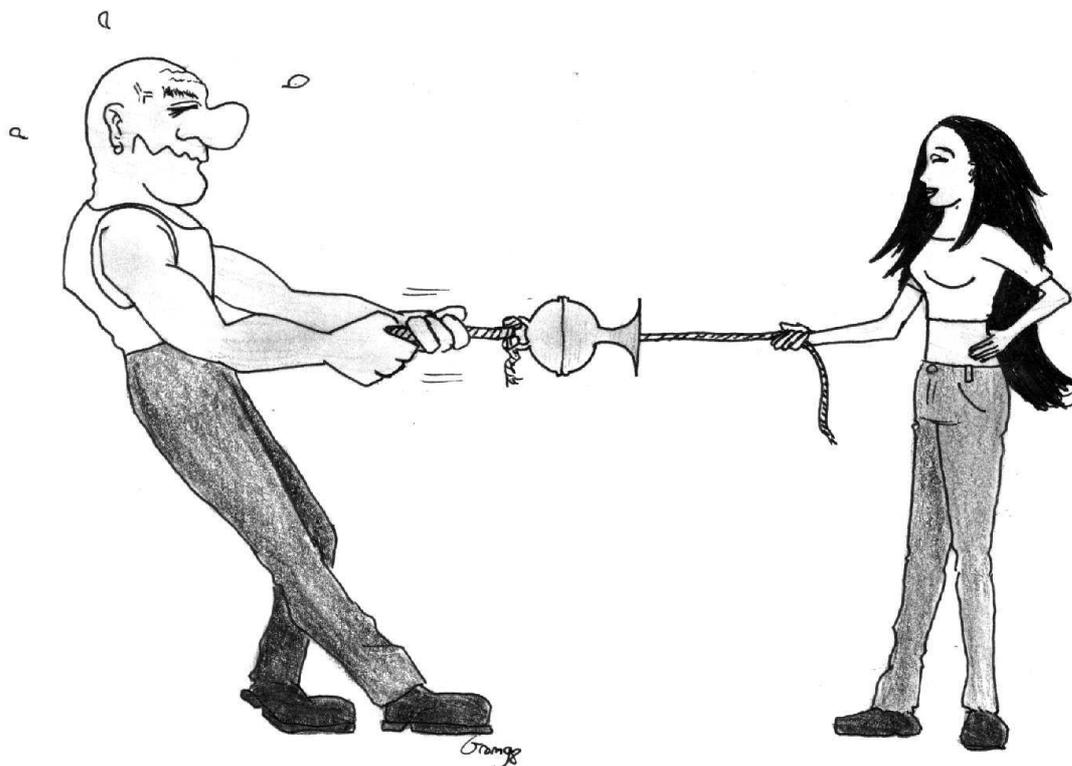
Nous trouvons bien une variation parfaitement décelable, de l'ordre du mm !

Texte de Aline Cavellec et Virginie Izabel

Hommes faibles, s'abstenir !

Faisons le vide dans nos hémisphères de Magdebourg¹⁹, initialement séparables sans effort.

Maintenant, essayez toujours de les détacher ! Pour cela, il vous faudra l'intervention de deux "Hercule" munis de cordes qui, à eux deux, les sépareront... avec difficulté²⁰!



Mais pourquoi ? Hercule (Poirot, cette fois) mène l'enquête... «Quand vous raréfiez l'air dans les hémisphères, nous dit-il, la pression à l'intérieur (celle de l'air raréfié) est beaucoup plus faible que la pression atmosphérique normale. Ainsi les forces s'appliquant sur la paroi extérieure des hémisphères l'emportent de beaucoup sur celles qui s'appliquent sur les parois intérieures et les empêchent de se séparer ». Grâce à la coopération active de l'atelier scientifique, le mystère est donc élucidé... et les hémisphères arrachés l'un à l'autre. Une énigme de plus au palmarès d'Hercule et un succès de plus pour les "Hercule" de l'atelier !

Texte de Delphine Bouttier, Lorraine Banâtre, Hélène Lecadre, illustration de Jérôme Colivet

¹⁹ Voir planches couleur (photos 7 et 8)

²⁰ La "vraie" expérience réalisée à Magdebourg par Von Guericke nécessita la participation de 2 fois 12 chevaux ! C'est qu'il utilisait des hémisphères de 119 cm de diamètre, soit plus de dix fois celui des nôtres. La force pressante étant proportionnelle aux **surfaces** des hémisphères, c'est donc une force plus de 100 fois supérieure qui était nécessaire !

Le bouillant de Franklin.

On peut obtenir l'ébullition de l'eau à température ordinaire, et ce sans utiliser une pompe à vide ! C'est l'expérience du bouillant de Franklin :

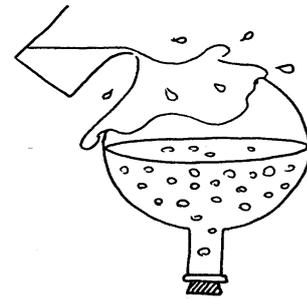
On remplit d'eau, environ au tiers, un ballon à long col. On porte à ébullition et on attend que la vapeur ait complètement chassé l'air. On referme le ballon à l'aide d'un bon bouchon. On retourne alors le ballon, bouchon vers le bas.

Au-dessus du liquide, la vapeur d'eau exerce une pression assez forte pour l'empêcher de bouillir. On fait couler ensuite de l'eau froide sur la partie supérieure du ballon, la vapeur se condense alors en partie et sa pression devient nettement inférieure à la pression atmosphérique. L'eau se met alors à bouillir, à température inférieure à 100°C.

Il est alors possible de faire reprendre à plusieurs reprises l'ébullition en arrosant à nouveau d'eau froide le ballon, ce qui semble paradoxal : on refroidit pour faire bouillir !

Et en effet quand la vapeur est suffisamment raréfiée l'ébullition peut avoir lieu, par exemple, à 20°C.

On peut alors réaliser l'expérience suivante, dite du "marteau d'eau".



Texte et image :
Jérôme Colivet.

Le "marteau d'eau".

Les marteaux d'eau retrouvés au lycée, se présentent comme des tubes de verre de formes diverses terminés en boule à l'une au moins des extrémités²¹.

A l'intérieur se trouve une certaine quantité d'eau qu'on a fait bouillir vivement lors de la fabrication, la vapeur d'eau chassant ainsi tout l'air par la petite ouverture alors laissée dans la boule, puis on a refermé rapidement cette ouverture, en faisant fondre le verre à la flamme, emprisonnant ainsi la vapeur d'eau à 100°C. Lorsque celle-ci s'est condensée lors du retour à la température ordinaire le "vide" (en réalité une très basse pression de vapeur d'eau) s'est fait dans le tube, comme dans le "bouillant" ci-dessus.

Expérience: on pourrait, en chauffant très légèrement, remettre l'eau en ébullition à beaucoup moins de 100°C, mais cette fois-ci ce n'est pas le but recherché. Le tube étant initialement boule vers le bas, on le retourne brutalement à 180°. On entend alors un choc violent, analogue au bruit d'un marteau, lorsque l'eau frappe le fond du tube.

Interprétation: d'une part dans le vide l'eau tombe "en bloc" comme un corps solide (sans se subdiviser en gouttelettes), d'autre part cette chute n'est pas ralentie par la résistance de l'air. C'est une "chute libre" analogue à celle étudiée avec le tube de Newton.

Question ouverte: et comment explique-t-on la séparation d'une colonne d'eau en gouttes lorsqu'un jet rencontre la résistance de l'air ?

Recherche de Arnaud Touchais

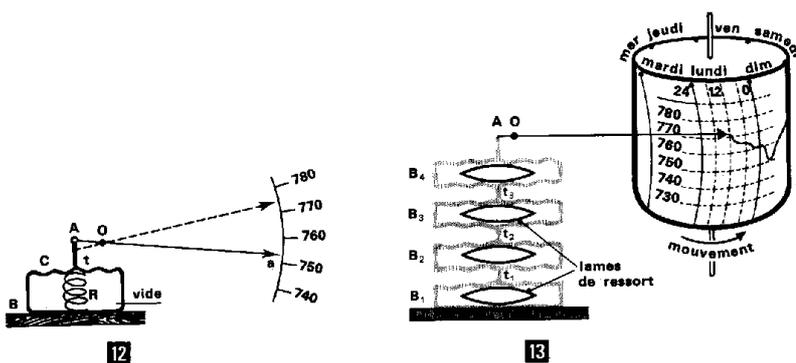
²¹ voir planches photo (n°12)

Les baromètres métalliques

Présentés dans les planches couleur (photos 4 et 5), leur principe est le même qu'il s'agisse du modèle simple ou enregistreur.

Une ou des boîtes déformables, étanches, et vides de gaz, contiennent des ressorts empêchant leur écrasement par la pression atmosphérique.

Selon la valeur de cette dernière le couvercle s'affaisse plus ou moins. Un dispositif amplificateur provoque le mouvement de l'aiguille.



Recherche de Erwan Guyot dans Faucher 2^{de} C programme 1966

"L'œuf électrique"

Comme Otto Von Guericke et l'abbé Nollet (1700-1777) nous avons poussé nos recherches dans un domaine laissé de côté par l'exposé initial : les rapports entre le vide et l'électricité.

Notre "œuf électrique" est représenté dans les planches couleur (n°12). Sa base peut être vissée sur une pompe à vide, la distance entre les deux électrodes peut être réglée en tirant celle du dessus.

On relie les électrodes aux pôles d'une machine de Wimshurst produisant des tensions de l'ordre de 30000 volts. Avant raréfaction de l'air, on n'obtient d'étincelle que si les électrodes ne sont pas éloignées de plus d'un centimètre : l'air n'est pas bon conducteur ! Après raréfaction à l'aide d'une pompe à vide, et même en appliquant une tension moindre, on observe après avoir éloigné les électrodes une "chenille" lumineuse qui peut atteindre 10 cm.

A pression faible, la décharge présente un aspect hétérogène. De la cathode (-) à l'anode (+), on peut observer trois zones :

- lumière violette enveloppant la cathode
- zone obscure
- colonne plus ou moins striée de lumière violet diffus de la zone obscure à l'anode

On peut expliquer la « lumière cathodique » par des collisions entre électrons et ions positifs qui se sont accumulés autour de la cathode. La zone obscure puis celle de lumière diffuse sont dues à une alternance de ralentissements par collisions, puis d'accélération, des électrons arrachés à la cathode.

Etude de Sabine Lecoq et Gaëlle Le Métayer

Le "briquet à air"

Sortant là aussi du cadre de l'exposé, nous nous sommes intéressés à un appareil ancien du lycée, reproduit dans les planches couleur (photo 14), mais hélas hors d'état de fonctionner.

L'appareil se compose d'un cylindre de verre épais contenant de l'air, fermé à l'une des extrémités et dans lequel on peut enfoncer un piston muni d'un cuir assurant une bonne étanchéité. Or si l'on comprime fortement un gaz, il y a une importante élévation de température.

A la base du piston il y a une petite cavité où l'on place un morceau d'amadou. Le tube étant plein d'air, on enfonce brusquement le piston : l'air comprimé s'échauffe jusqu'à enflammer l'amadou.

Grâce au faible diamètre intérieur du tube, une force modérée permet d'obtenir une pression ($p = F/S$) très élevée, de réduire ainsi considérablement le volume d'air et de provoquer une très forte élévation de température. Pour résister à ces pressions très élevées on comprend que le verre soit très épais (malheureusement fissuré, malgré tout, dans notre exemplaire).

Etude de Boris Amoroz

Recherches sur les pompes pneumatiques, dans les vieux manuels...

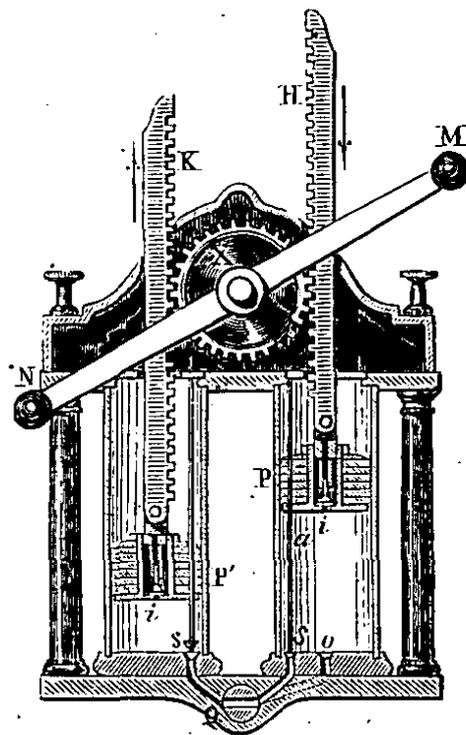
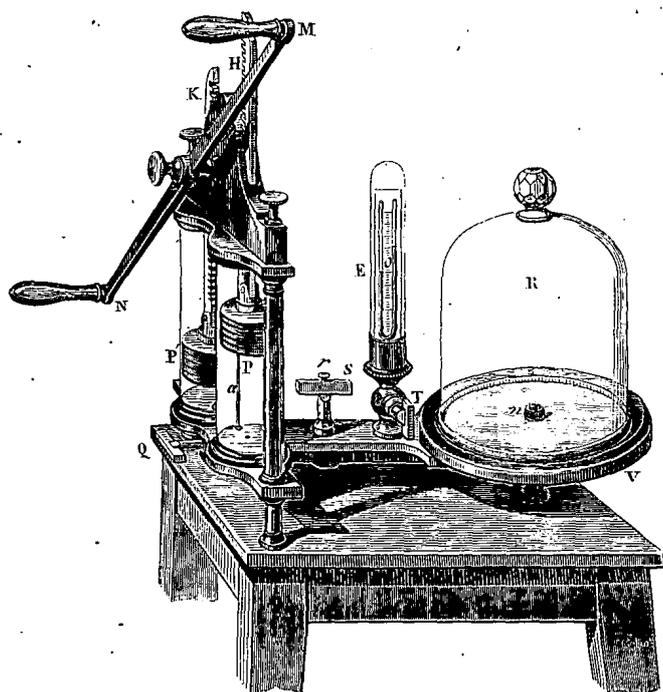
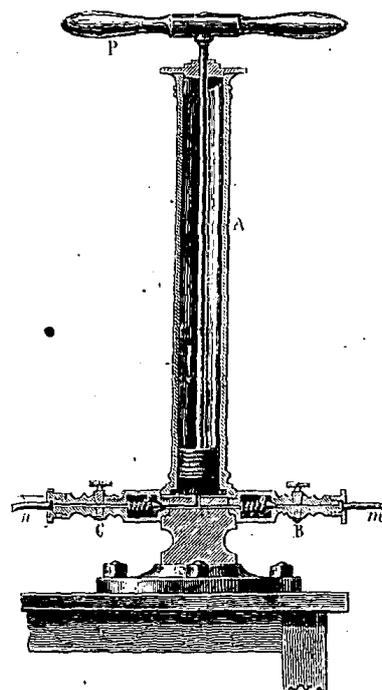
Nous n'avons malheureusement plus au lycée de pompe pneumatique à piston, actionnée par la seule force musculaire. En revanche nos manuels du siècle dernier sont riches en descriptions :

Sur le schéma ci-contre (figure du Ganot) on comprend bien comment en descendant le piston on envoie de l'air par C, la valve se fermant en B, tandis qu'en le remontant, on aspire de l'air par B, la valve se fermant au contraire en C.

Mais si l'on manœuvre le piston d'une telle pompe quand l'air est raréfié dans le récipient relié à B, les efforts deviennent considérables : en effet, lorsqu'on élève le piston, la pression atmosphérique exerce sur la face supérieure une force résistante au mouvement, qui n'est plus compensée par la pression sur la face inférieure. L'effort à fournir est d'autant plus important que le diamètre du corps de pompe est important (ce qui est souhaitable si le volume du récipient à "vider" est grand !).

Pour résoudre ces problèmes de travaux de forces, les premiers constructeurs ont d'abord utilisé leviers et engrenages²². Les figures ci-dessous (Ganot, 13^{ème} édition) présentent un système plus ingénieux, à deux corps de pompe : il y a alors compensation entre les forces pressantes exercées sur les faces supérieures des deux pistons.

Etude de Antoine Dorel, Laurent Lai, Paul François



...puis dans les réserves du musée des arts et métiers

En les visitant lors du voyage de l'atelier à Paris, nous nous sommes bien sûr intéressés aux pompes pneumatiques. Nous n'avons pu hélas ramener qu'en photo (pages couleur: n° 18 et 19) la pompe de l'abbé Nollet, avec son superbe trépied, et la machine à deux corps de pompe (n° 17), que nous aurions tellement souhaité retrouver dans les caves du lycée. Nos recherches dans les caves nous ont tout de même permis de retrouver le grand double bras de laiton qui actionnait autrefois une telle machine !

²² voir 1^{ère} partie de la brochure

3.

**Les planches
couleur**



1. Tube de Newton



2. Baromètres de Fortin



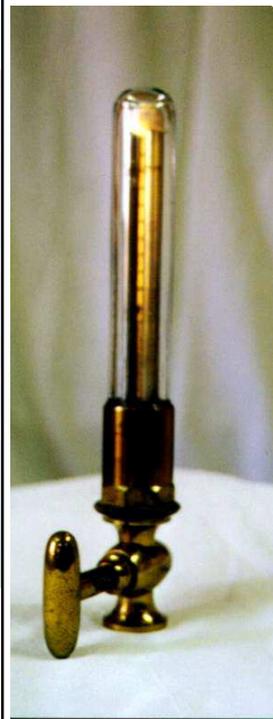
3. Baromètres de Fortin, détails



4. Baromètre métallique



5. Baromètre enregistreur



6. Manomètre à mercure pour mesure de faibles pressions



7. et 8.



Nos hémisphères "de Magdebourg"



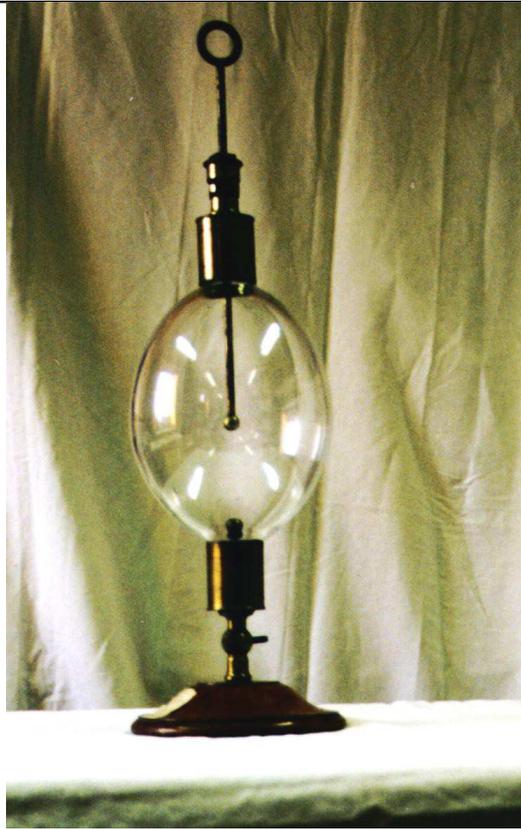
9. Clochette dans une enceinte à relier à la pompe à vide (origine : lycée Brizeux, Quimper)



10. Ballon de baudruche dans une enceinte à relier à la pompe à vide (origine : lycée Brizeux, Quimper)



11. Baroscope



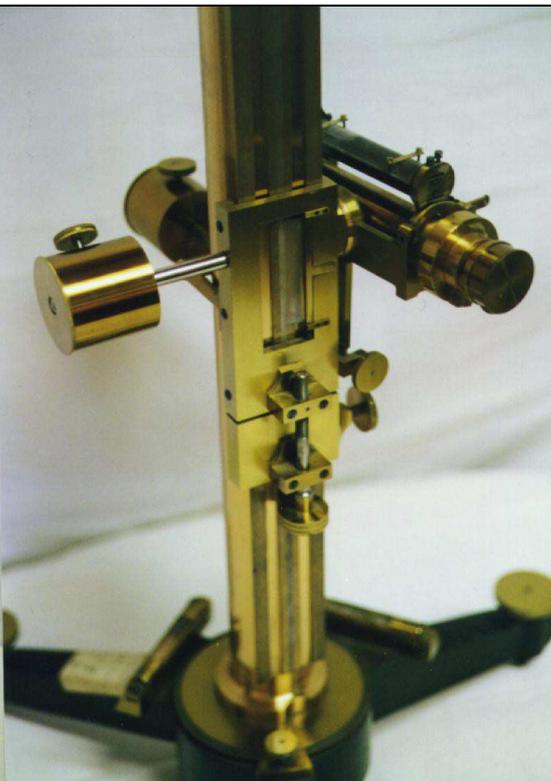
12. Œuf électrique



13. Marteaux d'eau



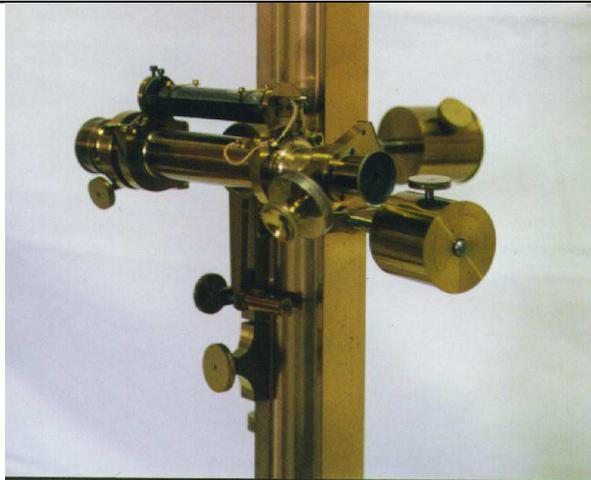
14. Briquet à air



15.
Notre cathétomètre
(vue générale,
détail du vernier).

Cet appareil,
grâce notamment
à son viseur
micrométrique et à son
vernier, est censé
permettre de mesurer
des dénivellations au
50^{ème} de millimètre près.

Il peut donc être associé
à un baromètre à
mercure pour mesurer
les variations de hauteur
barométrique.



16. Viseur du cathétomètre et vis micrométrique.



17. Pompe à double corps du Musée des Arts et Métiers



18 et 19.

La pompe de l'abbé Nollet
(vue d'ensemble et détail)
Musée des Arts et Métiers.

