

Cette ressource fait partie du dossier « Physique et Ingénierie des Objets » est co-rédigé et co-publié avec le site [Culture Sciences Physique](#) afin de proposer des ressources co-enseignées.

Cette ressource présente le baromètre de la découverte de l'existence de la pression atmosphérique aux différents types de baromètres et leurs fonctionnements. Des expériences simples sont proposées.

1 – Mesurer la pression atmosphérique

La pression atmosphérique est la pression exercée par la colonne d'air sur une surface en contact avec elle. Dépendante des conditions météorologiques la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Elle est couramment mesurée en hectopascals [hPa] (centaines de pascal) et vaut en moyenne 1 013,25 hPa, soit 101 325 Pa, au niveau de la mer (autrefois 1,013 bar) [1 Pa = 1N/m²].

La pression atmosphérique est mesurée à l'aide de baromètres, mais aussi d'un hypsomètre¹ ou d'un altimètre².

2 – Petite histoire de la mesure de la pression atmosphérique

À la fin des années 1630, Galilée³ se voit soumettre une question liée aux installations hydrauliques des fontaines installées dans les jardins des palais florentins : pourquoi les pompes aspirantes ne fonctionnent pas lorsque l'eau est située au-delà de 10 mètres ? Il songe que l'air doit avoir un poids, mais ne peut aller plus loin et meurt en 1642. La constatation que l'eau s'élève dans des tubes se justifie par le fait que « la nature a horreur du vide », on ne s'imagine pas que l'eau puisse être refoulée vers les pompes par l'effet de la pression.

Le premier baromètre connu date de 1643 et est du fait d'Evangelista Torricelli⁴, élève de Galilée à Florence, il lui succède comme mathématicien à la cour du Grand-Duc de Toscane. Sur la base des notes de Galilée, il prouve avec des expériences que la montée de l'eau dans un espace vide est due à la pression atmosphérique. Afin d'éviter d'utiliser des colonnes d'eau d'une dizaine de mètres d'eau, il réalise ses essais avec un liquide très dense : le mercure (vif-argent). 13,6 fois plus dense que l'eau, il remplit un tube de verre qu'il retourne dans un bassin de mercure : le tube ne se vide que partiellement, créant un vide au sommet du tube. Il reste environ 76 cm de mercure dans le tube quelle que soit l'immersion du tube. Torricelli en déduit que la pression de l'air

¹ Hypsomètre : Instrument utilisé pour la mesure de l'altitude à partir de l'observation de la température d'ébullition d'un liquide (souvent de l'eau), celle-ci diminuant avec la pression et donc l'altitude

² Altimètre : Instrument de bord des avions utilisé pour la mesure de la distance verticale entre un point et une surface de référence (mer, sol localement, ou surface isobare)

³ Galileo Galilei (1564-1642), mathématicien, géomètre, physicien, astronome italien

⁴ Evangelista Torricelli (1608-1647), physicien et mathématicien italien

compense le poids du mercure ainsi l'eau de l'Arno ne pouvait être aspirée par les fontainiers de Florence à plus de 10 mètres de par la pression atmosphérique trop faible [1].



Figure 1 : Portrait d'Evangelista Torricelli vers 1647 par Lorenzo Lippi (1606-1665) et représentation de l'expérience de Torricelli, le baromètre à cuvette, sources [2] [3]

René Descartes⁵ améliore le système de Torricelli en ajoutant une graduation en papier, il est le premier à formuler l'hypothèse que la pression atmosphérique diminue avec l'altitude [4]. Au cours des années 1640, l'expérience de Torricelli arrivant aux oreilles de Blaise Pascal⁶, celui-ci pense, comme Descartes, que si la hauteur du mercure est liée à la pression de l'air, la hauteur du mercure devrait être plus petite en altitude. Résident à Paris, il réalise l'expérience au sommet de la Tour Saint-Jacques (52m). Les résultats sont insuffisamment précis et des expériences sont renouvelées au Puy-de-Dôme, en Auvergne d'où il est originaire, en septembre 1648 à différentes altitudes. Les résultats sont clairs : la hauteur de remontée du mercure diminue avec l'altitude. Par son nom, l'unité de mesure de la pression rend hommage aux travaux de Blaise Pascal [1].



Figure 2 : Portrait de Blaise Pascal et la Tour Saint-Jacques, sources [5][6]

⁵ René Descartes (1596-1650), mathématicien, physicien et philosophe français

⁶ Blaise Pascal (1623-1662), mathématicien, physicien, philosophe français

Robert Boyle⁷ a l'idée de replier le tube barométrique vers le haut créant ainsi le « tube siphon » encore utilisé aujourd'hui. Il est aussi le premier à utiliser le terme de baromètre dès 1665, du grec *baros* qui signifie poids, pesanteur. En 1665, Robert Hooke⁸ invente le premier baromètre à cadran (figure 3). Son invention a ensuite été perfectionnée par Jean-Nicolas Fortin⁹, qui met au point un baromètre à mercure transportable (figure 4) [4].

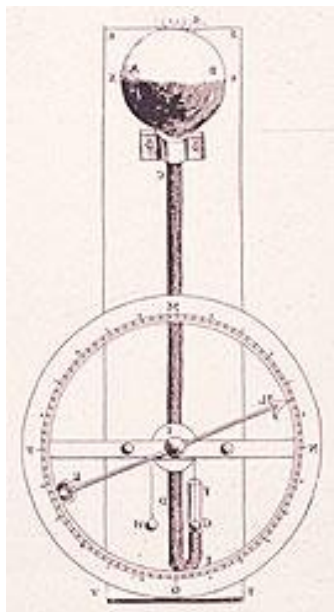


Figure 3 : Baromètre de Hooke, source [7]

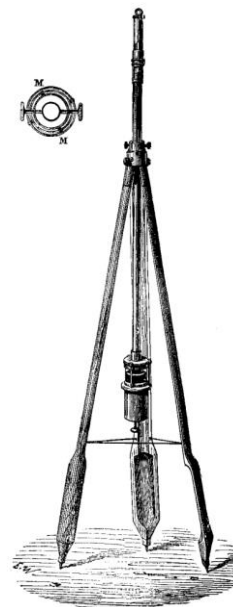


Figure 4 : Baromètre Fortin, source [8]

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, les baromètres étaient des objets rares seulement disponibles pour les scientifiques ou les gens aisés. À cette période, les artisans italiens, réputés pour leur art du soufflage du verre, sont arrivés en France et en Angleterre apportant avec eux les baromètres.

C'est en 1844 que Lucien Vidie¹⁰ a créé le premier baromètre anéroïde commercialement viable en France [9]. Les indications « Pluie - Variable - Beau » placées sur certains baromètres sont indicatif, en effet l'évolution de la pression importe plus que sa valeur stricte. Autrement dit, une pression qui monte est signe de beau temps, même si elle est basse en valeur absolue. Et une pression haute mais en baisse est annonciatrice de dégradation de la situation météorologique.

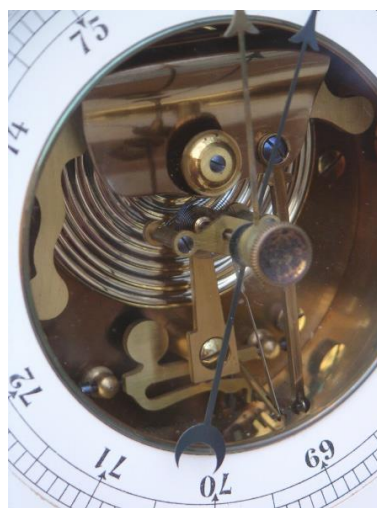


Figure 5 : Baromètre anéroïde du début du XX^e siècle, source [10][11]

⁷ Robert Boyle (1627-1691), physicien et chimiste irlandais

⁸ Rober Hooke (1635-1703), scientifique pluridisciplinaire anglais

⁹ Jean-Nicolas-Fortin (1750-1831), ingénieur et fabricant français d'instruments scientifiques

¹⁰ Lucien Vidie (1805-1866), physicien français

Le baromètre enregistreur, également appelé barographe, a été inventé à la fin du XVIIIe siècle. Il a ensuite été perfectionné avec le système de Vidie au XXe siècle [4]. La variation de pression est amplifiée avant d'obtenir un tracé sur le rouleau.

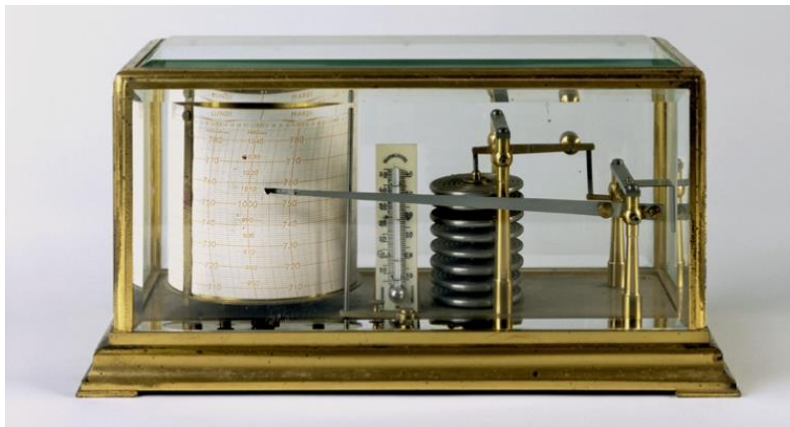


Figure 6 : Barographe, 1^{er} quart du XXe siècle, source [12]

3 – Les différents types de baromètres et leurs fonctionnements

3.1 - Le baromètre à mercure

Descendant du tube de Torricelli (figure 1), le baromètre à mercure est un tube en U fermé à une extrémité. Rempli de mercure, il est renversé avec l'extrémité ouverte plongée dans une réserve de mercure. La réserve est à la pression atmosphérique, la hauteur de la colonne de mercure dans le tube varie selon la pression extérieure. Une graduation peut être reliée à la surface du mercure dans le tube pour obtenir une mesure.

Robert Hooke propose en 1663, un baromètre à cadran à l'aide d'un flotteur posé sur le mercure qui suit les variations du niveau et qui, relié à une aiguille, indique la valeur de la pression sur un cadran (figure 7). Le baromètre à siphon imaginé par Joseph Louis Gay-Lussac¹¹ interdit à l'air d'entrer dans la chambre à vide par le tube très fin qui sépare les deux branches, une petite ouverture (O) laisse passer l'air mais interdit au mercure de s'échapper (figure 8).

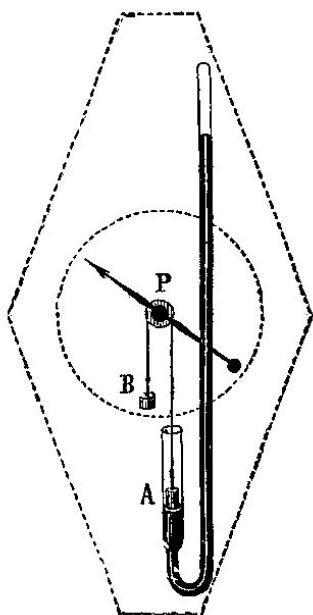


Figure 7 : Baromètre à mercure à cadran, source [13]



Figure 8 : Baromètre à siphon, source [14]

¹¹ Joseph Louis Gay-Lussac (1778,1850), Chimiste et physicien français

Le transport de ces baromètres n'est pas facile, même si Jean Nicolas Fortin vers 1800 proposa un baromètre à mercure transportable qui reste connu comme le baromètre Fortin. Le baromètre repose sur un trépied repliable (figure 4). Le volume de mercure transporté dans la réserve est limité par un système réglable, vis et membrane de cuir, permettant d'amener la surface libre du mercure au niveau d'un repère du tube (figure 9).

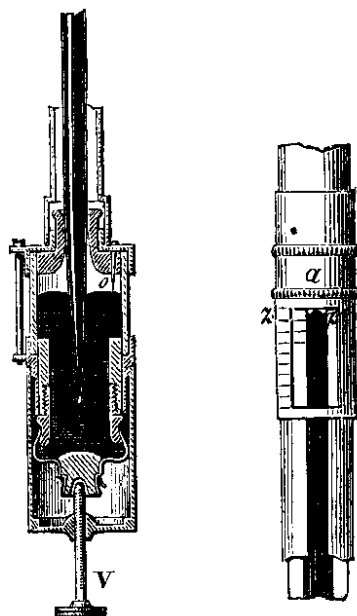


Fig. 277. — Cuvette du baromètre de Fortin.

Fig. 278. — Courseur du baromètre de Fortin.

Figure 9 : Détails du baromètre Fortin, volume réglable de la cuvette et curseur de lecture, source [15]

Le mercure est un métal onéreux et très toxique, il est de nos jours interdit pour de nombreuses utilisations courantes.

3.2 - Les baromètres anéroïdes

Moins précis que le baromètre à mercure, l'intérêt du baromètre anéroïde est d'être robuste, compact et transportable. La mesure repose sur la présence d'une capsule vide d'air visible sur le détail figure 5. La pression atmosphérique agit sur la capsule, qui, par un système mécanique de précision, fait tourner l'aiguille sur le cadran (figure 10).



Figure 10 : Fonctionnement du baromètre anéroïde, image extraite de source [16]

3.3 - Les barographes

Le fonctionnement des barographes actuels repose sur la capsule inventée par Lucien Vidie pour le baromètre anéroïde. Pour amplifier le déplacement, des capsules sont empilées, en général cinq (figure 11). La pression atmosphérique agit sur les capsules, qui, par un système mécanique de précision, font déplacer l'aiguille du traceur sur un rouleau, lui-même en rotation en fonction du temps.



Figure 11 : Système des cinq capsules superposées, source [17]

3.4 - Les baromètres électroniques

Comme pour tous les systèmes actuels, le passage à l'électronique est logique.

Les barographes actuels voient le système de capsule remplacé par un capteur de pression piézorésistif et le rouleau de tracé par un écran. On trouve également des baromètres dans les montres multifonctions, donc largement miniaturisé par rapport aux premiers modèles !

L'élément de mesure des capteurs de pression piézorésistif est une puce en silicium qui, subissant une extension sous l'effet de la tension, modifie sa résistance électrique. La pression à mesurer est transmise à la puce en silicium via une membrane et une huile de silicone incompressible. La puce est traversée par un courant électrique. La sortie du signal est exprimée en millivolts [mV], il est ensuite compensé en température [18].

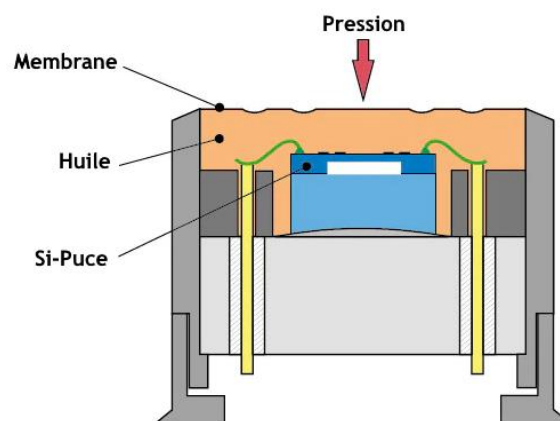


Figure 12 : Schéma du capteur de pression piézorésistif à puce en silicium source [18]

Exemple d'une chaîne de mesure d'un capteur de pression

(Extrait de « MEMS : contexte et applications » publié sur le site Culture Sciences de l'Ingénieur [19]).

Nous présentons ici un capteur qui utilise une membrane déformable comme corps d'épreuve. Dans le cadre des MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems), cette membrane est gravée dans un substrat de silicium.

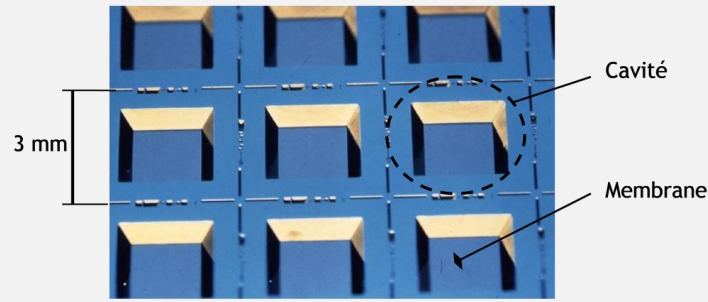


Figure A : Production collective de MEMS qui seront séparés en toute fin du procédé
Visualisation de la cavité réalisée pour obtenir la membrane en silicium

La membrane du capteur de pression subit une déformation en présence d'une différence de pression :

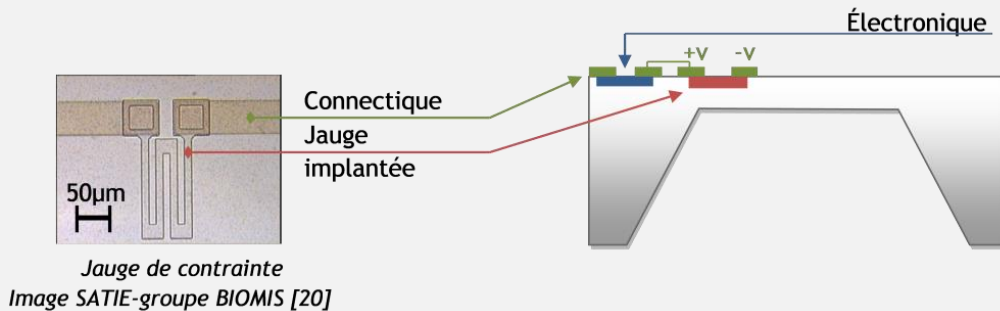


Figure B : Schéma de la déformation de la membrane d'un capteur de pression

Afin d'avoir une mesure de déformation, les micro-technologies permettent l'intégration de jauges piézorésistives directement implantées dans la structure des MEMS au cours de la production (figure C). La jauge de contraintes voit sa longueur relative ($\Delta l / l$) varier lors de la déformation, entraînant la variation relative de sa résistance ($\Delta R / R$) :

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right] = K \left[\frac{\Delta l}{l} \right]$$

avec K : facteur de jauge.



Jauge de contrainte

Image SATIE-groupe BIOMIS [20]

Figure C : Schéma de l'implantation intégrée d'une jauge piézorésistive

L'électronique de mesure associée est le pont de Wheatstone (figure D). Une variation de valeur d'une des résistances (jauge piézorésistive) du montage en pont, fait varier la mesure de sortie de la tension. La piézorésistivité des matériaux constituant les jauges de contrainte est la propriété de variation de conductivité sous l'effet d'une déformation mécanique.

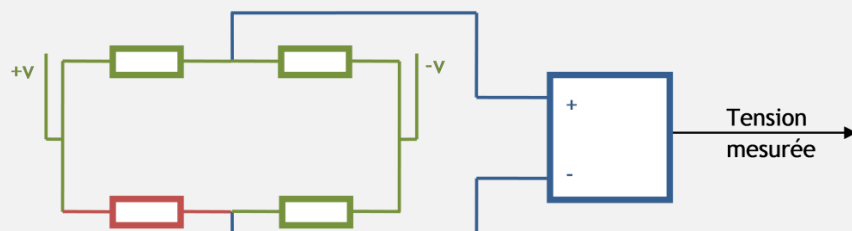
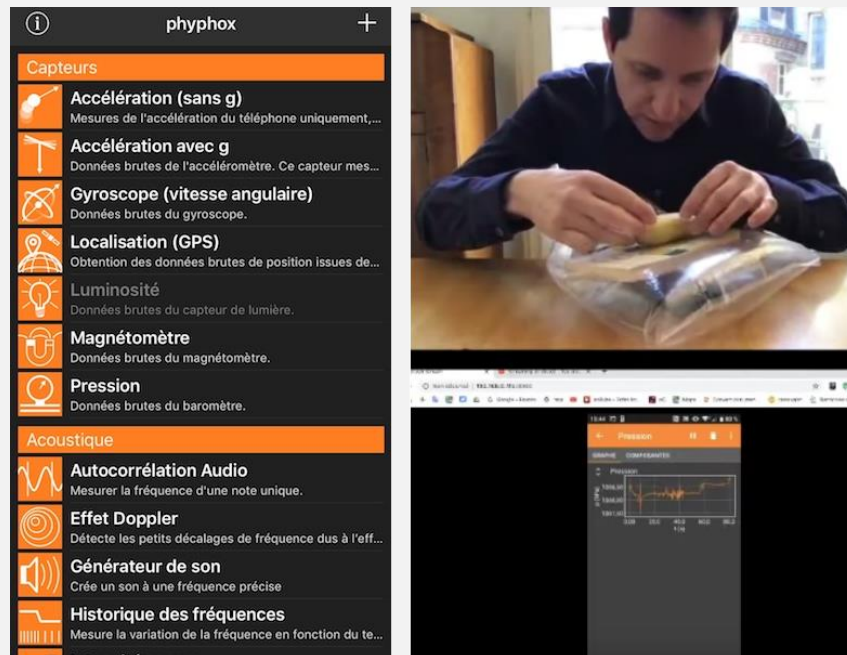


Figure D : Schéma du pont de Wheatstone

Pour l'utilisation du capteur de pression présent dans les smartphones, on pourra par exemple utiliser la boîte à outils [Phyphox](#) pour recueillir des données brutes issues du baromètre intégré, les tracer et les exporter simplement.

On pourra par exemple consulter la vidéo « [Comment mesurer une masse avec la pression](#) » par Julien Bobroff.



Il existe aussi de nombreuses applications de baromètre téléchargeables (gratuites ou payantes) proposant des altimètres barométriques.

3.5 - Les baromètres à eau et à gaz

Les baromètres à eau et à gaz se basent sur la compressibilité d'un volume de gaz enfermé qui se contracte ou se dilate selon la pression. Dans les deux cas, la mesure de la pression doit être ajustée en fonction de la température ambiante. Ces baromètres enferment un volume d'air ou de gaz qui évolue avec la pression, la variation du niveau de la colonne d'eau permet de mesurer les variations de pression. Leur précision très relative fait que ces baromètres ne sont exploités que décorativement actuellement, mais nous en proposons une réalisation dans le paragraphe 5 [4].



Figure 13 : Exemple de baromètre à eau décoratif, source [21]

4 – Qu'est-ce que la pression atmosphérique ?

L'air de l'atmosphère crée de la pression dont nous ne prenons souvent conscience que lorsque nous évoquons la météo. Nous allons ici expliquer comment l'air génère de la pression. Considérons l'air qui nous entoure à l'échelle moléculaire. En regardant de très près les molécules d'azote et l'oxygène qui constituent l'air nous les verrions s'agiter sous l'effet de l'agitation thermique. Plus la température de l'air est élevée plus l'agitation est importante. À une température de 20°C, les molécules se déplacent à la vitesse moyenne d'environ 500 m/s.

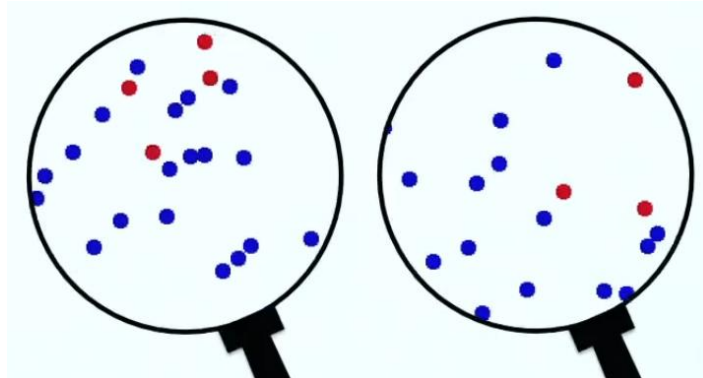


Figure 14 : Visualisation de l'agitation thermique des molécules d'azote (bleu) et d'oxygène (rouge) à deux instants, source [22]

Imaginons maintenant une paroi, représentée figure 15 par une simple droite, qui pourrait être toute surface en contact avec l'air (mur, fenêtre, surface d'un meuble, écran, ...). Les molécules d'air viennent alors frapper la paroi à plus ou moins grande vitesse et selon des angles propres à leurs trajectoires. Les différentes forces d'impact des molécules sur la paroi peuvent être schématisées par une force résultante \vec{F} variable selon le temps, quelques fois nulle lorsqu'aucune molécule n'est en contact avec la paroi. La résultante est cependant perpendiculaire à la surface de la paroi, les composantes tangentes à surface des différents impacts se compensent et s'annulent, alors que les impacts normaux à la surface de paroi s'additionnent.

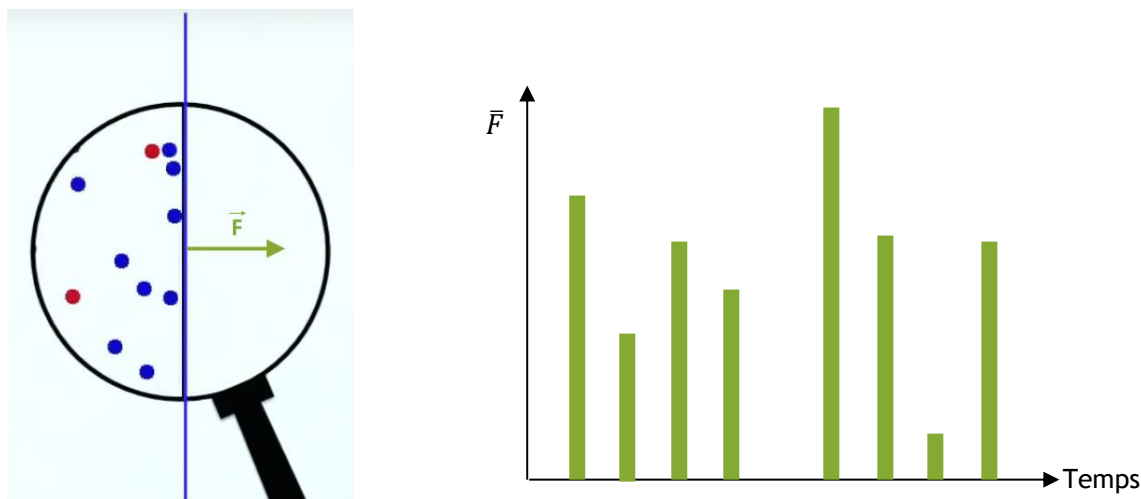


Figure 15 : Schématisation de l'impact des molécules sur une paroi, et de la variation de la force résultante, source [22]

Imaginons maintenant regarder cette agitation thermique et les impacts sur la paroi de plus loin. À tout instant, il y aura des impacts plus ou moins fort, et variant à chaque instant comme schématisé figure 16 à deux instants. La surface étant plus grande, les impacts plus nombreux seront dans leur ensemble plus réguliers, la force résultante de ces impacts aura des variations plus faibles.

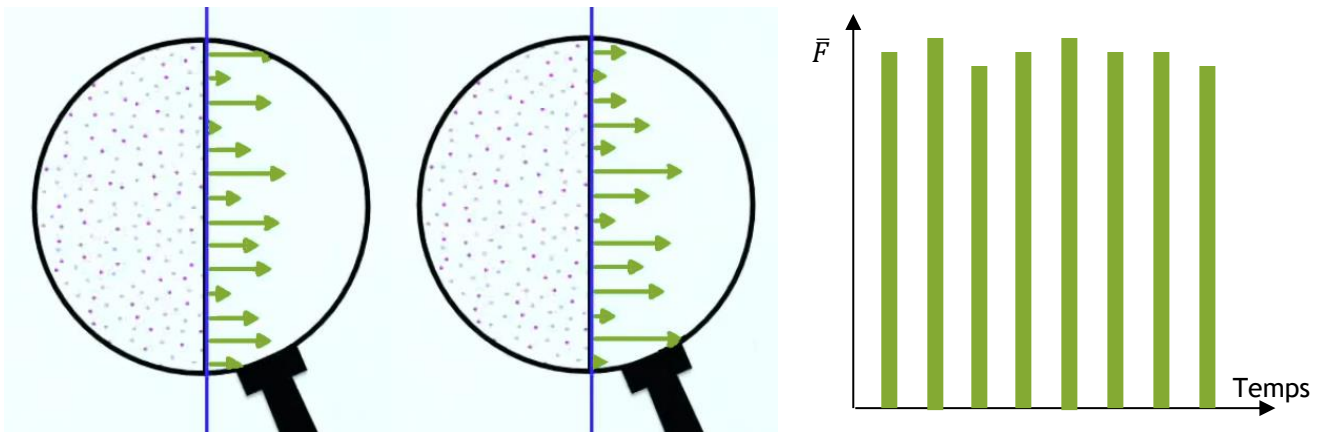


Figure 16 : Schématisation de l'agitation thermique vue de plus loin, des variations des impacts des molécules à deux instants et de la variation de la force résultante, source [22]

Plus on regardera à grande échelle, plus le nombre d'impacts des molécules sur la paroi sera nombreux et les variations de la force résultante seront faibles.

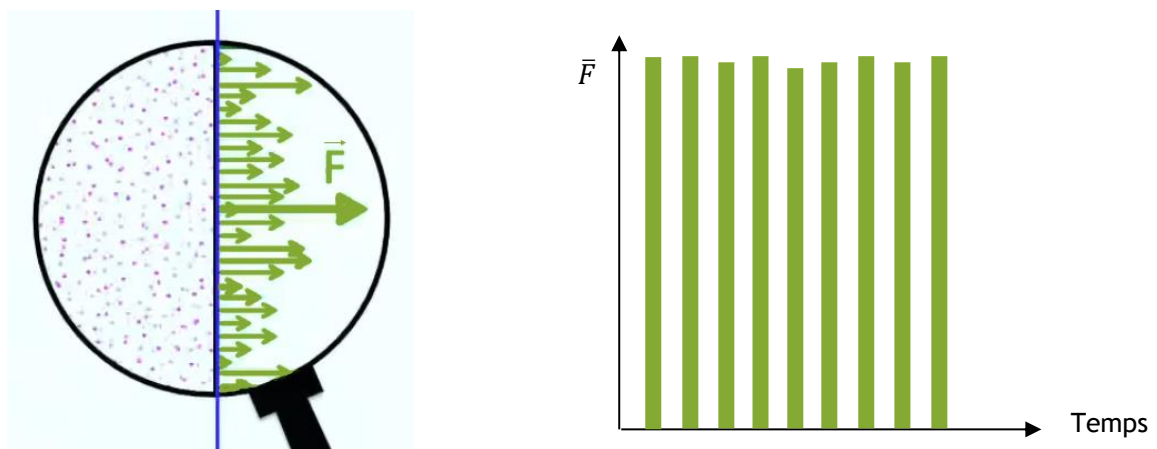


Figure 17 : Schématisation de l'agitation thermique vue de plus loin, des variations des impacts des molécules et de la variation de la force résultante, source [22]

À l'échelle macroscopique, la force résultante est constante. La notion de pression intervient assez logiquement puisque la force résultante est proportionnelle à la surface S de la paroi considérée :

$$F = P.S \quad \text{où } P \text{ est la pression}$$

F est exprimée en [N], S en [m^2], et P en [N/m^2] ou encore [Pa].

La pression caractérise le gaz que l'on considère, pour nous ici, l'air. La pression permet de déterminer l'effort exercé par le gaz sur une surface donnée. Dans un volume de gaz comme l'air, la pression est isotrope, elle est la même dans toutes les directions.

L'atmosphère se termine à environ 100 km au-dessus de la surface de la Terre. La pression atmosphérique est la force exercée par la masse de la colonne d'air de l'atmosphère sur la surface de la Terre. La pression atmosphérique est donc :

$$P = \frac{Mg}{S}$$

Au niveau de la mer, la colonne d'air exerce en moyenne sur une surface de 1 m^2 une force de 101 325 N, soit une pression de 1 013,25 hPa. À la limite de l'atmosphère en haut de la colonne, la pression est nulle. À 9 000 m d'altitude par exemple en montagne (comme au sommet de l'Everest, 8849 m), la densité de l'air est moins importante. Les molécules d'air sont moins nombreuses, il

reste environ un tiers des molécules au-dessus de cette altitude, le poids de l'air est donc réduit d'un facteur trois, comme la pression atmosphérique.

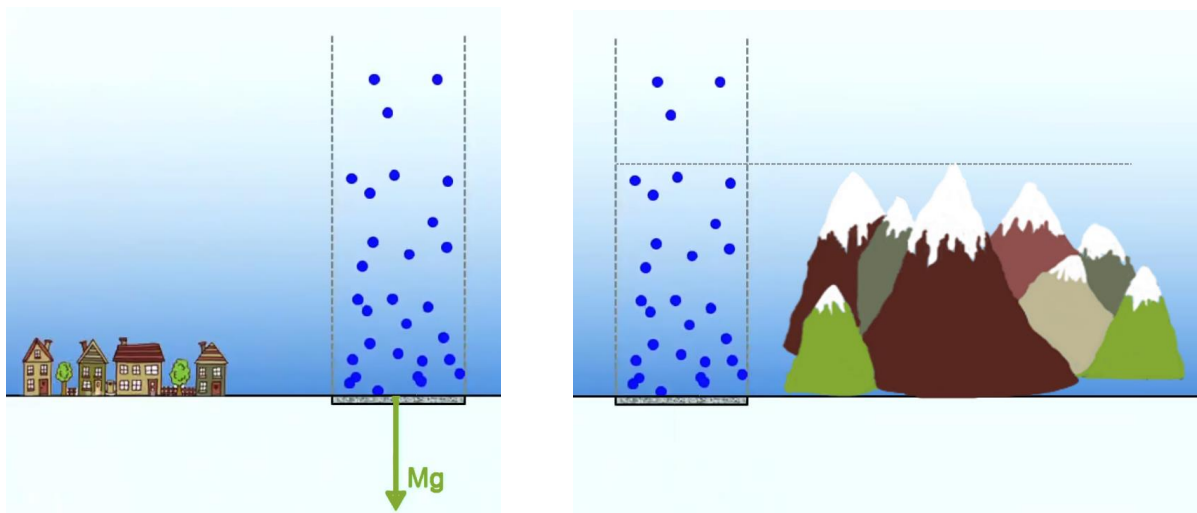


Figure 18 : Schématisation de la force exercée par la masse d'une colonne d'air au niveau de la mer et en montagne, source [22]

5 – Quelques manipulations

L'air exerce une pression sur tout objet. Nous ne prenons pas conscience de la pression de l'air qui nous entoure, mais nous pouvons la visualiser avec quelques systèmes simples que nous proposons ici.

5.1 - Baromètre à air

Matériel nécessaire :

- Un pot en verre ou métal ;
- Un ballon de baudruche ;
- Un ou des élastiques ;
- Une brochette en bois ;
- Un carton ou une feuille ou un réglet ;
- De la colle ;
- Une paire de ciseaux ;
- De quoi écrire ;

Montage du baromètre :

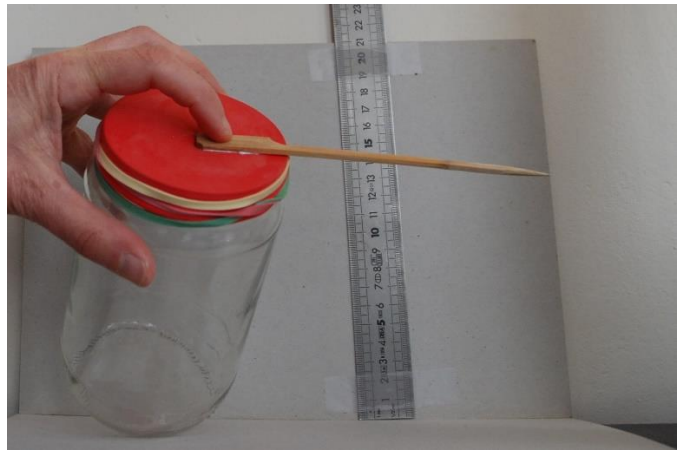
- 1) Couper le ballon de baudruche pour éliminer la partie cylindrique.



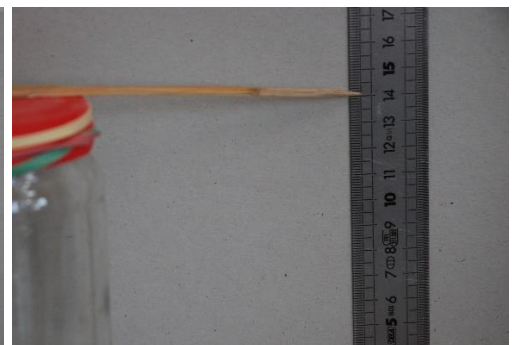
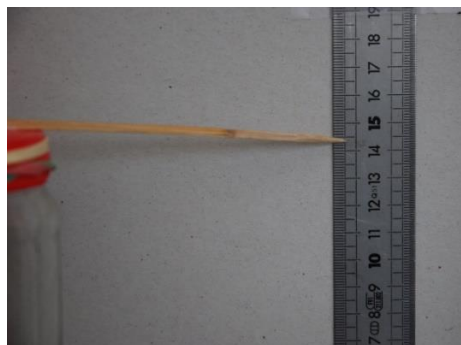
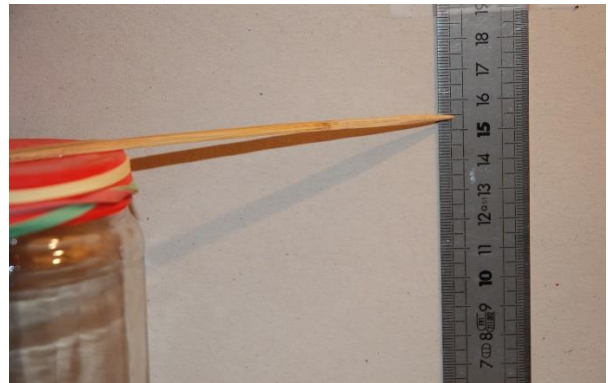
- 2) Tendre le ballon sur le pot de façon à obtenir une surface la plus plane possible.
- 3) Placer le ou les élastiques sur le haut du pot par-dessus le ballon pour assurer la liaison.



- 4) Coller l'extrémité de la brochette sur un rayon du ballon (le bout de la brochette ne dépasse pas le centre).



- 5) Placer ce montage à l'abri du soleil ou d'une source de chaleur.
- 6) Installer au bout de la brochette, et de façon à pouvoir lire facilement, le réglelet ou le carton ou la feuille après avoir y tracé des graduations.



7) Relever la mesure, et continuer les relevés régulièrement.

Temps	lundi 9h	Lundi 12h	Lundi 16h	Lundi 19h	Mardi 9h	Mardi 12h	Mardi 16h	Mardi 19h	Mercr 9h	Mercr 12h	Mercr 16h	Mercr 19h
Lecture réglet	15,3 cm	15,5 cm	15,8 cm	15,4 cm	14,9 cm	14,3 cm	14,5 cm	14,9 cm	14,7 cm	14,1 cm	14,4 cm	14,6 cm

Tableau 1 : Exemples de relevés faits sur la maquette présentée

Lorsque l'extrémité remonte sur le réglet (brochette inclinée vers le haut), la pression atmosphérique augmente, ce qui indique en général une amélioration de la météo. A contrario, la mesure sur le réglet diminuant, la pression atmosphérique baisse.

5.2 - Baromètre à eau

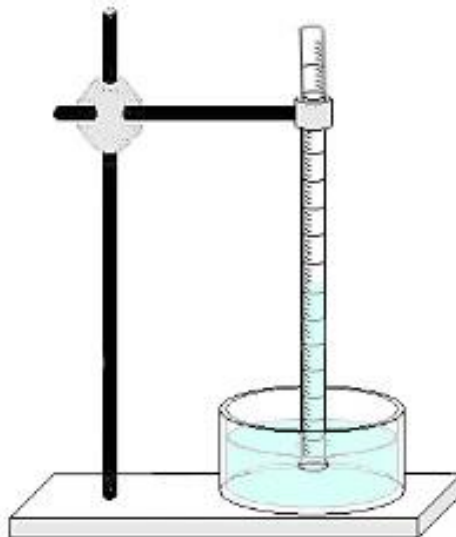
Matériel nécessaire :

- Un tube à essai gradué, ou, à défaut, un tube et un réglet ;
- Une potence, ou, à défaut, une bande de carton rigide assez longue, un élastique et une série de livres épais ;
- Un récipient ;
- De l'eau éventuellement colorée pour une lecture plus aisée (avec du brou de noix par exemple).

Montage du baromètre : Placer le montage à l'abri du soleil ou d'une source de chaleur

- Avec une potence et un tube gradué :

- 1) Installer la potence et le récipient d'eau dessous.
- 2) Remplir le tube à moitié d'eau, boucher le tube avec un doigt.
- 3) Pincer le tube dans la potence ouverture en bas, l'extrémité du tube est immergée dans l'eau du récipient.
- 4) Lire la mesure du niveau d'eau dans le tube.



- Sans potence :

- 1) Réaliser un trou au centre de la bande de carton rigide afin de pouvoir y glisser le tube sans trop de jeu. Glisser le tube dans le carton, si le trou est trop large maintenir avec du ruban adhésif.



- 2) Positionner deux piles de livres épaies sur une hauteur suffisante (ici environ 20 cm) de part et d'autre du récipient contenant de l'eau et installer un réglet pour pouvoir effectuer les futures mesures.



- 3) Remplir le tube à moitié d'eau, boucher le tube avec un doigt.



- 4) Poser le carton sur les piles de livres, l'extrémité du tube est immergée dans l'eau du récipient. Caler le carton en posant deux livres supplémentaires.
- 5) Marquer au feutre le niveau de l'eau dans le tube ou lire sur le réglet.



- 6) Continuer les relevés régulièrement. Attention la variation de niveau est ténue.

Dossier Physique et Ingénierie des Objets

Retrouvez toutes les ressources du dossier « [Dossier Physique et Ingénierie des Objets](#) »

Retrouvez « Physique et Ingénierie des Objets » sur le site [Culture Sciences Physique](#)

Références :

- [1]: la pression, un peu d'histoire ..., Consulté en mars 2021, <http://meteocentre.com/intermet/pression/pression4b.htm>
- [2]: Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24875317>
- [3]: Ruben Castelnuovo (Ub) – Image:Baro_1.png, modified, uploaded by User:Saperaud who in turn uploaded into Commons an image loaded in fr.wiki by Jean-Jacques MILAN, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=741665>
- [4]: Baromètre, Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Barom%C3%A8tre>
- [5]: http://www.thocp.net/biographies/pascal_blaise.html (file), Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=209146>
- [6]: Benh LIEU SONG – Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41749801>
- [7]: Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295947>
- [8]: Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295950>
- [9]: L'histoire du baromètre, Daily Presse, consulté en mars 2021, <http://www.dailypresse.com/lhistoire-du-barometre/>
- [10]: Original uploader was Jean-Jacques MILAN, this image was modified by Frederic.marbach at fr.wikipedia – Transféré de fr.wikipedia à Commons, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1537646>
- [11]: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295957>
- [12]: Baromètre, instrument d'enregistrement (barographe Richard n°2), consulté en mars 2021, <https://inventaire-strasbourg.grandest.fr/gertrude-diffusion/dossier/barometre-instrument-d-enregistrement-barographe-richard-n2/a57465ee-05a0-4f63-a8d5-4e2c4400df81>
- [13]: Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295946>
- [14]: Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295948>
- [15]: Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295949>
- [16]: Le baromètre, vidéo, <https://www.youtube.com/watch?v=ZXAiuR0QINk>
- [17]: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295960>
- [18]: <https://www.kistler.com/fr/glossaire/terme/capteur-de-pression-piezoresistif/>
- [19]: MEMS : Contexte et applications, O. Français, H. Horsin Molinaro, mars 2015, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/les-technologies-mems
- [20]: Laboratoire SATIE, <http://satie.ens-paris-saclay.fr/>
- [21]: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=295955>
- [22]: La pression atmosphérique : introduction, Clipedia, <https://clipedia.be/videos/la-pression-atmospherique-introduction>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>