

## *La pression*

Vous allez découvrir dans ce magazine ce qu'est la notion de **pression** en Sciences, concept rattaché à la notion de **force** et aux incontournables **lois de Newton** présentées dans le magazine numéro 1

Vous allez donc voir dans ce numéro comment la pression se manifeste dans la vie courante, en vous causant des tracasseries, pour ouvrir un pot de confiture par exemple, ou bien en martyrisant vos tympanes quand vous piquez votre plongeur favori à quatre mètres au fond de la piscine.

Vous verrez encore comment elle fait voler les avions, monter les ballons-sondes et si elle disparaissait d'un coup de baguette magique, vous exploseriez tout bonnement, beurk ! Du coup ce ne serait plus Mars mais la Terre qu'il faudrait qualifier de planète rouge.

Alors, une petite pression sur le bouton, et c'est parti ! Je vous emmène dans un monde contraignant avec mes deux fidèles assistants Dédé et Stevie, qu'il n'est plus besoin de présenter, sinon dépêchez vous d'aller découvrir leurs nombreuses frasques dans les magazines précédents.

## CHAPITRE I : Les manifestations de la pression

La pression est partout, dans l'air, dans l'eau, dans l'huile, dans les études et dans le travail. Ça fait une bonne raison de s'y intéresser pour apprendre à s'y accommoder puisqu'elle est inévitable.

Un bon conseil, ne mettez jamais la pression sur Dédé, car un Dédé est incompressible comme l'eau ou l'huile et cette pression finirait par vous rejaillir dessus avec un coefficient d'amplification.

Commençons donc par l'air, ça semble moins risqué, encore que, vous allez voir ce que vous allez voir ! Alors en avant !

Rien qu'en sentant un petit vent caresser fraîchement vos joues un matin de printemps, vous êtes amenés à croire, à part si vous êtes Saint Thomas, que l'air, c'est quelque chose, même si vous ne le voyez pas.

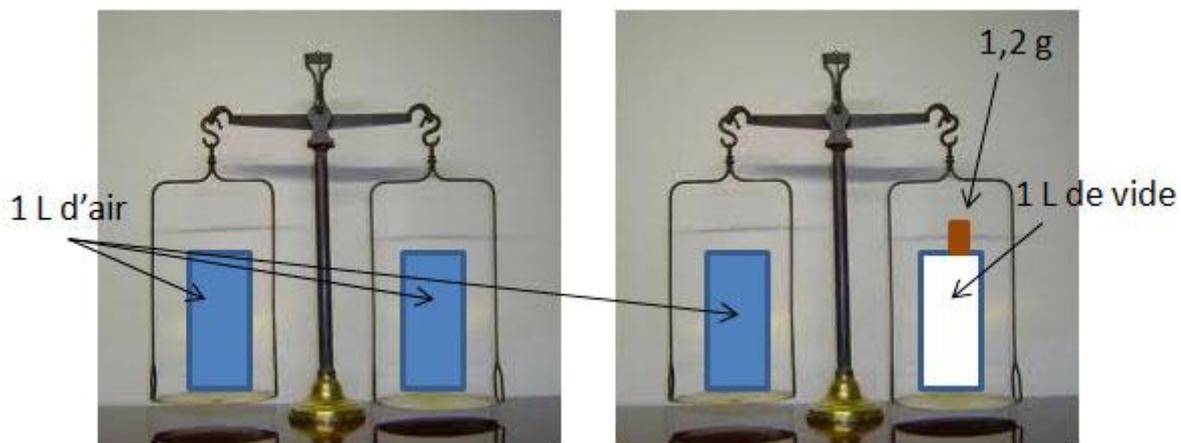


Une autre manière de vous en convaincre est de passer la main bien à plat par la fenêtre d'une voiture lancée à vive allure, 100 Km/h par exemple (voir l'anecdote à ce sujet dans le magazine numéro 1). S'il n'y avait rien, vous ne sentiriez pas cette « pression » de l'air sur votre main.

Donc, si l'air c'est quelque chose, ça doit bien peser, non ? Je devrais dire d'ailleurs plutôt, avoir une **masse**. Eh bien oui, ça en a une et l'expérience est simple à faire. Nombreuses sont les vidéos sur internet qui la décrivent à l'aide d'un simple ballon, d'une bouteille d'eau et d'une balance précise au décigramme. Je vous y renvoie.

Je vais plutôt vous décrire une expérience imaginaire qui me paraît plus convaincante mais un peu plus compliquée à mettre en œuvre, encore que, car il faut disposer d'une pompe à vide comme ils en ont au Palais de la Découverte. Allez y faire un tour c'est passionnant, ils pèsent d'ailleurs l'air avec ce principe :

Imaginez deux récipients en verre de 1L que vous mettez en équilibre sur les plateaux d'une balance. Réalisez alors un vide poussé dans l'un des récipients grâce à une pompe à vide et la balance se trouvera déséquilibrée.



Vous constaterez alors qu'il vous faut ajouter une masse d'environ 1,2 g (soit  $1,2 \text{ cm}^3$  d'eau) sur le plateau du récipient vidé de son air pour rééquilibrer la balance. Vous formulerez alors cette idée :

**1L d'air pris dans les conditions de températures ( $20^\circ \text{C}$ ) et de pression de votre pièce a une masse de 1,2 g environ**

Une valeur plus précise donnée pour un air dépourvu d'humidité est 1,204 g et pour aller à une mesure encore plus précise, il faut un dispositif expérimental complexe, mais l'ultra-précision, inutile pour la compréhension des concepts, est un luxe que je ne m'offrirai pas et que je laisserai aux chercheurs météorologues.

Notez que si vous aviez fait l'expérience dans une pièce à  $0^\circ \text{C}$  et à la même pression, la valeur aurait peu changé et serait de 1,3 g environ (1,292 g plus précisément pour de l'air sec).

Ce qui est important c'est de noter la différence de **masse volumique** entre l'air (de 1,2 à 1,3 g/L, soit environ 1 g/L pour faire simple aux températures usuelles et à la pression ambiante) et l'eau (1 kg/L). Retenez :

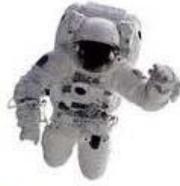
**Pour un volume donné, 1 L par exemple, et dans les conditions de pression atmosphériques dans lesquelles nous vivons, l'eau a une masse de l'ordre de mille fois celle de l'air.**

Ainsi, et cela permettra de comprendre comment naît la pression :

**Une colonne de 10 m d'eau reposant sur un mètre carré de surface a environ la même masse qu'une colonne d'air homogène de 10 000 m reposant sur la même surface et de masse volumique 1 g/L**

Or comme chacun sait, l'air se raréfie en prenant de l'altitude. On considère d'ailleurs, à partir de calculs savants, que 75% de l'air de l'atmosphère se trouve en dessous de 10 000 m d'altitude et 50% en dessous de 5 000 m.

Georges (800 Km)

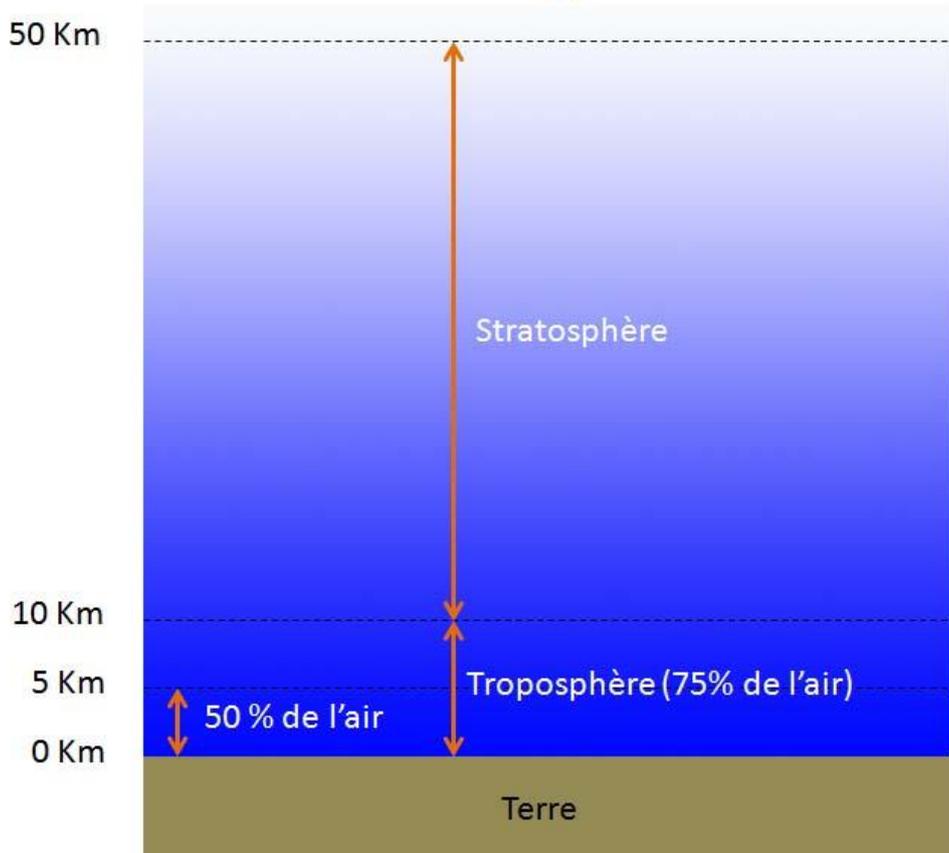


What else ?

Espace

Thermosphère

Mésosphère



Ceci fait qu'il est raisonnable de penser que, si l'atmosphère était homogène et occupé par un air de même masse volumique qu'au sol soit arrondi 1 g/L, il aurait une épaisseur de 10 000 m environ (Rappelons que 10 000 m est le début de la **stratosphère** et qu'en dessous c'est la **troposphère**)

Une colonne d'air de 1 mètre carré de base et de 10 000 m de hauteur aurait alors un volume de 10 000  $m^3$ , donc une masse 10 000 kg (Rappelez vous, 1 L d'air ça fait 1 g environ et dans 1  $m^3$  il y a 1 000 L, donc 1  $m^3$  d'air au sol ça fait 1 000 g soit 1 kg) et un poids de 100 000 N environ.

Elle appuierait ainsi avec cette même force sur toute surface de 1 mètre carré située sur le sol.

Or, homogène ou pas, d'une hauteur de 10 Km ou de 50 Km, la colonne d'air devrait exercer la même force de 100 000 N sur 1 mètre carré de sol terrestre, liée à son poids uniquement (voir magazine numéro 1 et la formule  $P = m g$ ).

Et cette force par mètre carré, c'est précisément le concept que l'on veut définir sous le vocabulaire de **pression**.

Revenons maintenant sur l'eau, car vous découvrirez aussi la pression dans l'eau et avec elle, ça rigole pas, et oui ! Vous verrez que, bien qu'ayant l'air de rien en nous invitant à la faveur d'un rayon de soleil et d'un temps clément à batifoler dans son élément entre amis, elle peut être redoutable, par justement, la masse considérable qu'elle peut représenter.

Et qui dit masse en mouvement, dit forces, loi de Newton oblige, et donc tout le lot de catastrophes qui va avec : tsunamis dévastateurs, énormes bateaux aux coques d'acier cassés en deux par des vagues scélérates, etc...

Et comprendre un peu ce qui anime les redoutables forces de la Nature, c'est déjà les apprivoiser, encore que, la force la plus redoutable qui soit dans la Nature, c'est peut être l'Homme et je me demande s'il pourra être un jour, comme mon Dédé, apprivoisé.

Mais pour l'instant, avant d'aborder cette force redoutable de l'eau même quand elle ne bouge pas, de là peut être le fameux adage « il faut se méfier de l'eau qui dort », mais non je blague, vous gobez tout aussi, restons dans l'air, dont nous avons vu qu'il pesait sur la balance.

Si l'air a une masse donc, elle doit être attirée, comme n'importe quelle masse, par la Terre suivant la **loi d'attraction gravitationnelle** vue au second magazine.

Or, si vous mettez une pile de livres sur votre tête, ça appuie, non ? Preuve de la loi d'attraction gravitationnelle. Essayez avec les manuels de règlementation fiscale, vous ne paierez pas moins d'impôts mais vous expérimenterez la pression exercée par les manuels sur votre tête en plus

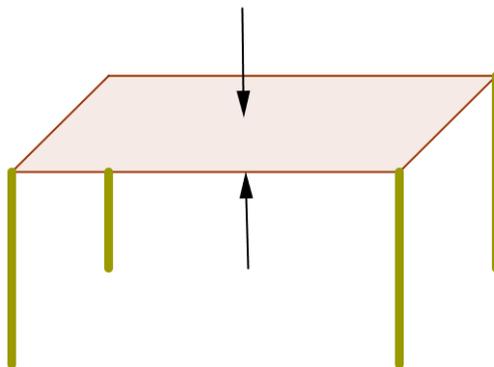
de celle exercée par leur contenu sur votre porte monnaie. En revanche le fait que l'argent ait tendance à tomber de votre compte en banque est un phénomène similaire qualifié de loi d'attraction fiscale. Mais non Bénéêt, je l'ai pas mis en gras celle-là, donc c'est du flan. Faut bien rire un peu !

Donc l'air qui est au dessus de votre tête, il doit bien appuyer comme les manuels fiscaux et exercer cette fameuse pression. Pourtant, on ne sent rien. Mais ce n'est pas pour cela qu'il ne se passe rien. Alors comment le mettre en évidence.

« Grat, grat, grat » Je précise, pour ceux qui n'ont pas encore acheté les magazines précédents, qu'à l'instar de tout savant qui se respecte, je suis pris d'une démangeaison du cuir chevelu, chaque fois qu'une nouvelle question surgit et c'est un véritable miracle que je ne sois pas encore chauve.

« Illuminatia » Si je pose une mince feuille de balsa (c'est un bois utilisé en modélisme et dont on peut tirer des plaques tellement minces qu'on peut les qualifier de feuilles) sur quatre pieds comme pour faire une table, je ne vois pas la feuille plier (ou à peine sous son propre poids, merci Grincheux !).

Forces dues à la pression atmosphérique



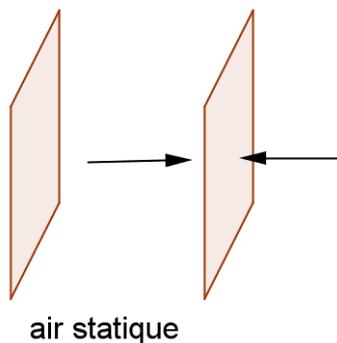
Pourtant, l'air est censé appuyer par-dessus de tout son poids (penser à la colonne d'air qui est au dessus de ma feuille et qui se perd dans l'espace une cinquantaine de kilomètres plus haut et qui doit faire une dizaine de

tonnes !). C'est donc que l'air appuie également en dessous. Mais alors, je forme l'idée suivante :

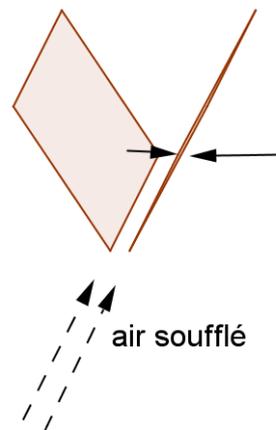
**L'air appuie sur une surface, quelque soit sa direction, cette action est appelée pression, elle agit perpendiculairement à la surface, tendant à la pousser.**

Je vous propose une petite expérience simple pour le vérifier. Prenez deux feuilles de papier. Tenez-les verticalement et parallèlement, distantes d'une vingtaine de centimètres. Soufflez alors l'air situé entre les deux feuilles. Que voyez-vous ?

égalité des forces  
de chaque côté de la feuille



Déséquilibre des forces  
de chaque côté de la feuille

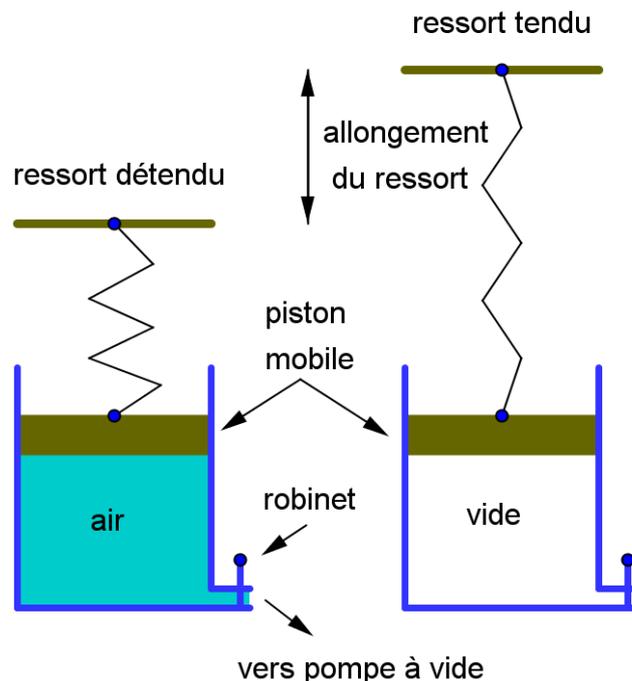


Quand vous soufflez, les feuilles se rapprochent, non ? C'est parce que vous relâchez la pression que l'air situé entre les feuilles exerce sur leurs faces intérieures, alors que la pression exercée par l'air sur les faces extérieures reste la même. Un déséquilibre apparaît de ce fait, qui rapproche les feuilles.

Mais alors, comment mesurer cette fameuse pression ? Il faudrait enlever l'air d'un côté d'une surface et le laisser agir de l'autre comme dans le cas des feuilles. Mais il n'est pas commode d'enlever l'air en permanence entre deux feuilles, même avec l'énorme coffre de Dédé qui peut souffler 50 bougies en une seule expiration.

Aidez-moi ! Ah oui ! Tiens, vous avez raison. Il faudrait un récipient fermé. On pourrait alors enlever l'air à l'intérieur, mais comment mesurer une pression ?

« Grat, grat, grat » Et si on prenait un récipient cylindrique avec un piston mobile. En faisant un vide poussé dans le récipient, il faudrait une certaine force, mesurable avec un dynamomètre, pour maintenir le piston à sa place initiale après l'évacuation de l'air.



On devrait alors constater que le rapport de la force à la surface du piston est toujours le même. Sa valeur pour une surface imaginaire de 1 mètre carré serait alors appelée pression.

On mesurerait probablement une valeur d'environ 100 000 Newtons (N) et on dirait que la pression est de 100 000 Pascals (Pa) en hommage à l'illustre savant dont vous trouverez le pedigree sur le fameux Wikipédia.

Mais l'histoire en a décidé autrement et le fait marquant ayant mis en évidence la valeur insoupçonnable et énorme de la pression atmosphérique est l'expérience des sphères de Magdebourg faite en 1654 par **Otto von Guericke** et qui s'inspire de l'idée précédente, c'est-à-dire la possibilité grâce à une machine appelée **pompe à air**, d'évacuer l'air d'un container fermé

J'en rappelle brièvement le contenu.

Deux demi-sphères de cinquante centimètres de diamètre environ (voir figure ci-dessous) ont été accolées et vidées de leur air intérieur. Deux attelages de huit chevaux ne parvinrent pourtant pas à les séparer prouvant par là même la force incroyable de l'air exerçant une pression sur toute la surface des sphères (encore une fois, merci wiki pour les illustrations)



D'autres manifestations plus courantes de la pression se font sentir à tout un chacun. N'avez-vous jamais éprouvé une sensation étrange au niveau de vos tympans, comme un assourdissement pour certains qui se résorbe partiellement à la déglutition, lorsque vous changez rapidement d'altitude, en descendant ou en remontant en voiture un col à la montagne ?

C'est précisément la variation de la pression de l'air sur la face externe de vos tympans, tandis que l'air de la face interne n'a pas eu le temps de s'adapter, qui en est la cause. Nous reverrons ce point au chapitre sur la plongée, puisqu'il s'agit du même phénomène en beaucoup plus accentué.

Il y a aussi ces fichus pots de confiture, qui rendent ces dames si pitoyables (à moins de disposer d'un instrument spécial offrant un bras de levier mais il y a plus efficace) et permettent à des hommes comme Dédé de montrer encore leur avantage adaptatif en faisant pivoter le couvercle d'un quart de tour d'une poigne velue de maçon méditerranéen.



Bien sûr, la femme éduquée ne manque alors pas de redorer son blason en montrant qu'elle peut également ouvrir le pot sans forcer, en glissant simplement le bord arrondi d'une pointe de couteau entre le pot et le couvercle, pour faire entrer dans un superbe « Pschitt » l'air manquant à l'intérieur afin d'équilibrer les pressions entre face externe et face interne du couvercle, prouvant par là même la supériorité du neurone sur le nerf.

Je nuance cependant ce dernier propos dont les conséquences pourraient être fâcheuses pour son tenant, car face à un Dédé, je conseille fortement au neurone de faire preuve d'une grande humilité face au nerf.

## CHAPITRE II : Définition et mesure

Maintenant que j'ai vu avec vous les manifestations les plus courantes de la pression, il me reste à la définir proprement et à inventer les instruments permettant de la mesurer, les **manomètres**.

Le premier point a été partiellement abordé au premier chapitre, en vidant un récipient cylindrique de son air et en mesurant, à l'aide d'un dynamomètre, la force nécessaire à maintenir un piston le rendant étanche dans sa position de départ.

Le rapport de la force ainsi mesurée à la surface du piston, dont vous verriez qu'il ne dépend pas de la surface du piston sur laquelle l'atmosphère agit, est la pression. Ce dernier point sera cependant facile à vérifier en s'inspirant de la démarche de Torricelli (voir plus loin) et en disposant d'un peu de mercure.

Avec mon dispositif imaginaire, j'ai ainsi réalisé un manomètre, pas très pratique d'utilisation, mais dont le fonctionnement est simple à comprendre et qui pourrait être utilisé aussi bien dans l'air que dans l'eau.

Voilà toutefois à quoi ressemble un manomètre de plongeur servant à mesurer la pression dans l'eau, étalonné entre 0 et 330 bars.



Je ne vais vous détailler cependant tous les types de manomètres, l'objectif de ce magazine étant de faire comprendre les concepts, en espérant amener nombre d'entre vous à s'intéresser aux technologies qui en sont issues.

Lorsqu'un manomètre sert à mesurer la pression atmosphérique, on l'appelle **baromètre** (littéralement, qui mesure des bars, je reviendrai sur le concept)

Il me semble alors intéressant de présenter le premier baromètre de l'histoire, celui qui permet de mesurer la pression atmosphérique et qui est dû à un brillant savant du nom de **Torricelli** (voir Wikipédia pour le pedigree du bonhomme car il n'est pas question de faire du copier-coller dans ce magazine).

La photo du dispositif qui circule sur la toile est la suivante.

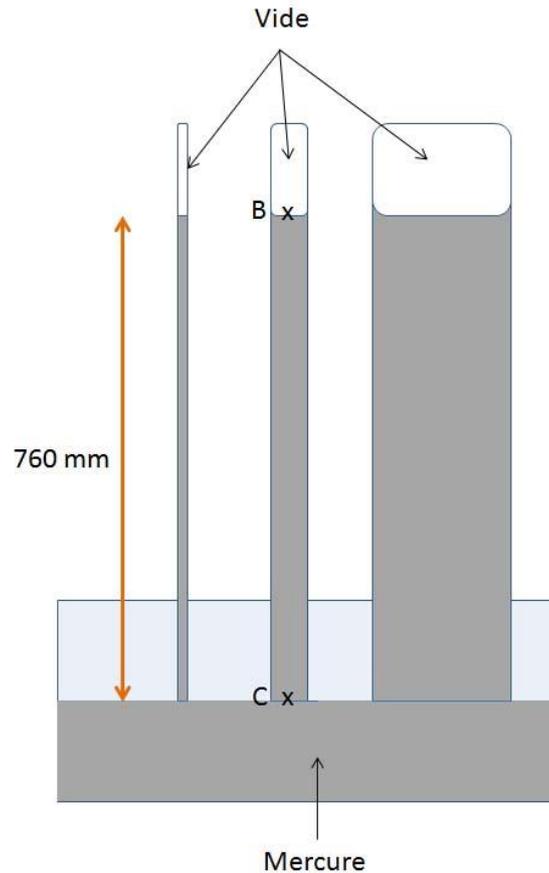


Le principe est simple. Torricelli, que vous voyez sur la photo ci-dessous, a rempli à ras bord un tube de verre de **mercure**, qui rappelons le est un métal argenté à l'état liquide dans les conditions ambiantes (on l'appelait pour cela le **vif argent**), et en l'obturant de son doigt, il l'a plongé dans un récipient rempli également de mercure comme dans la figure ci-dessus.



Le niveau du mercure en haut du tube est alors descendu faisant apparaître un vide (partie située entre A et C sur la figure). Il a alors constaté que, selon les jours, la hauteur de mercure située au dessus de la surface du récipient (portion entre B et C sur la figure) oscillait autour de 760 mm et cette hauteur ne dépendait pas de la section du tube.

Je vous propose la petite expérience suivante : Remplissez un récipient de mercure ainsi que trois tubes de 1 m de hauteur et de diamètres différents et en bouchant les tubes de votre doigt, retournez les dans le récipient. Vous devriez constater que le mercure dépasse la surface du récipient dans chaque tube d'une hauteur d'environ 76 cm.



Voyons maintenant comment vous pourriez déduire de l'expérience comme Torricelli, la valeur de la pression atmosphérique grâce à la **première loi de Newton** abordée dans mon premier magazine.

La colonne de mercure entre B et C est en équilibre, donc les forces qui agissent dessus, se compensent.

Or, dans la direction verticale, il n'y a que deux forces. La première est le poids, dirigée vers le bas et d'intensité :

$$P = m g$$

où  $g$  vaut  $9,81 \text{ m s}^{-2}$  et  $m$  est la masse de la colonne de mercure de masse volumique  $\rho = 13\,500 \text{ kg m}^{-3}$  (Eh oui, 1 mètre cube de mercure ça fait quand même pas loin de 14 tonnes, ça vous étonne ? Pensez à 1 mètre cube d'eau qui fait déjà 1 tonne et dites vous que le mercure ca paraît plus dense) et de volume  $V = S h$ , donc de valeur :

$$m = \rho S h$$

Donc finalement :

$$P = \rho S h g$$

La seconde force, est liée à la pression  $p$  exercée par le mercure du récipient sur la colonne, est dirigée vers le haut et d'intensité :

$$F = p S$$

La compensation des forces se traduit par l'égalité de leurs intensités :

$$p S = \rho S h g$$

Soit, après simplification par  $S$  qui n'intervient pas :

$$p = \rho h g$$

Je vous vois, bavant comme des chiens impatients attendant leur pitance. Oui, vous allez la découvrir cette valeur de la pression atmosphérique, avec cette expérience toute simple que vous pouvez faire chez vous, mais attention, le mercure c'est toxique par ingestion et par inhalation.

Alors, prêts, partez ! Lancez les calculs (attention : 760 mm = 0,760 m !):

$$p = 13\,500 \times 0,760 \times 9,81 = 101\,000 \text{ Pascals}$$

Pour les amateurs, comme Grincheux, de valeurs précises, la valeur qui sert de référence pour la pression atmosphérique au niveau de la mer et qui représente une pression moyenne à la latitude de Paris, des fluctuations apparaissant selon les conditions climatiques (anticyclones = pression plus forte, dépression = pression moins forte) est :

$$p_{\text{réf}} = 101\,325 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ hPa} = 1 \text{ atm}$$

Mais alors, si on faisait la même expérience en remplaçant le mercure par l'eau, il faudrait une colonne de quelle hauteur ? Pour tout avouer,

l'expérience avec le mercure est partie de là, car les puisatiers constataient avec une impuissance désespérante, qu'ils ne pouvaient pomper l'eau à plus de 10 m de profondeur. Vous allez comprendre pourquoi.

Refaites les mêmes calculs en remplaçant le mercure par l'eau de densité  $\rho = 1\,000\text{ kg m}^{-3}$ , mais cherchez cette fois-ci la hauteur, en prenant pour pression la valeur de 101 000 Pascals trouvée précédemment. Il vient :

$$h = \frac{p}{\rho g}$$

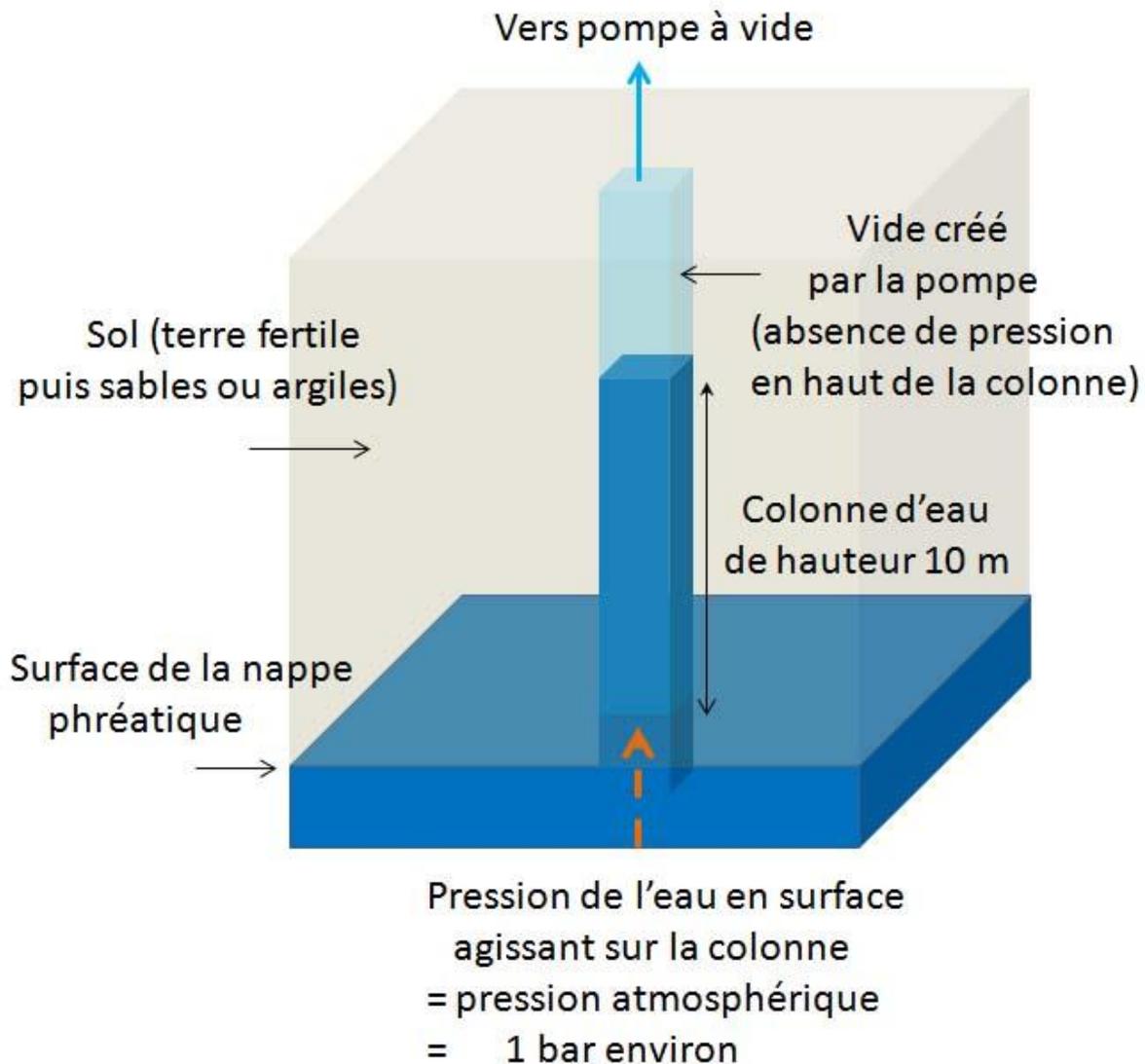
Soit avec les valeurs :

$$h = \frac{101\,000}{1\,000 \times 9,81} = 10,3\text{ m environ}$$

Vous trouvez donc une colonne d'environ 10 m de haut, cela explique la difficulté des puisatiers. Pour pomper l'eau, il faut créer un vide au dessus, enlevant de ce fait la pression atmosphérique qui agit par-dessus sur la colonne d'eau que l'on veut faire monter dans un tube où elle est pompée. Reste la pression qui agit à la base et qui pousse l'eau vers le haut. Or cette pression est égale à la pression atmosphérique.

Si la colonne d'eau fait moins de 10 m, l'effet de cette pression fait plus que compenser l'effet du poids de la colonne et cette dernière remonte.

Si la colonne d'eau fait plus de 10 m, l'effet de cette pression fait moins que compenser l'effet du poids de la colonne et cette dernière ne peut remonter.



Le même problème se produit pour amener l'eau courante en haut d'un immeuble avec en plus une pression à la sortie du robinet. L'astuce consiste à faire entrer l'eau en bas de l'immeuble à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Ainsi, si on veut monter l'eau 10 m plus haut à une pression absolue de 2 atm, il faut l'amener en bas à une pression de 3 atm, l'atmosphère de différence servant à soulever la colonne de 10 m d'eau.

Ah j'en vois qui me regardent bizarrement : « Atmosphère, atmosphère,... » Oui, je la connais celle là, elle n'est plus toute jeune. « A la télé, y parlent d'hectopascals et des fois de bars ».

Bon, une mise au point s'impose avant que tout le monde ne se barre ! Comme aurait pu dire Jean Marc Barr, un spécialiste des plongées hyperbares. Alors barre à droite, toute !

Donc, je disais, **une atmosphère est une unité de pression arbitrairement définie et correspondant à une pression moyenne relevée sur une année à la latitude de Paris** (voir le très complet Wiki à ce sujet).

Comme cette valeur est voisine de 100 000 Pascals, il est commode de définir également cette dernière comme une unité de référence qu'on appelle le **bar** (rien à voir avec le poisson du même nom ni avec Jean Marc) et donc :

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 10^5 \text{ Pa}$$

Mais cette unité ne fait pas partie du sacro-saint système international d'unités (le fameux S.I empreint de tant de mystères auprès de nombreux étudiants) qui a mis du temps à accoucher (autour de deux siècles) et qui met tout le monde d'accord aujourd'hui, sauf peut être les extra-terrestres, mais nous n'avons pas encore eu l'occasion de les rencontrer.

Ca ne devrait pas tarder, avec tout le raffut qu'on fait dans l'univers. Entre les ondes radio qu'on balance dans l'espace et les explosions atomiques émettrices de rayons gamma, on devrait bien finir pas se faire repérer, si ce n'est déjà fait.

Maintenant que nous savons mesurer la pression de l'air n'importe où, au niveau de la mer, en haut de l'Everest, dans la haute atmosphère grâce à un ballon sonde, mais ne comptez plus sur moi pour y remettre les pieds (voir ma mésaventure dans le premier numéro), il semble naturel de s'intéresser à la pression de divers gaz pour que le tableau soit parfait. Vous attendrez encore un peu pour comprendre le jeu de mot.

Oh ! Je vois Peter, pas la peine de me sortir vos gaz intestinaux, je me contenterai d'un gaz inodore, facile à produire, constitué de l'élément primitif de toute matière et donc le plus abondant dans tout l'univers que nous connaissons. « Alors tu le craches, oui ou m... » pense tout haut Peter, prêt à la récidive gazeuse.

Eh bien, ce gaz aux vertus innombrables, cher public, ce gaz encore gaz à  $-259^{\circ}\text{C}$ , ce gaz qui « pète » à la sortie de l'éprouvette quand on allume une allumette mais qui ne prend pas son c... pour une trompette (tiens, c'est marrant, ça rime, comme quoi sciences et poésie ne sont pas ennemies), ce gaz qui forme de l'eau quand on le brûle en présence d'air, ce gaz c'est :

### **L'hydrogène (appelé de nos jours dihydrogène)**

(Littéralement, hydro = eau, gène = qui produit)

Nous verrons que ce gaz a des propriétés amusantes, si, si, c'est très amusant la Science et notamment qu'il vérifie admirablement une loi, dite loi de Mariotte, qui sera le point de départ à la réalisation d'un thermomètre permettant de mesurer de très basses températures, puisqu' à  $-259^{\circ}\text{C}$  l'hydrogène est encore gazeux, et de très hautes températures, mais pour cela, il faudra remiser vos vieux thermomètres à mercure à échelle centésimale.

Ce point fera l'objet d'une étude approfondie dans un magazine à venir, consacré au concept de température et développant le concept de **gaz parfait**. Là, vous l'avez compris le jeu de mot précédent.

Auparavant, nous allons donc présenter cette fameuse loi de Mariotte.

## CHAPITRE III : La loi de Mariotte

Tout d'abord **Mariotte** n'est pas le surnom d'un Mario qui serait d'un genre plutôt féminin. C'est le nom d'un grand savant souvent associé à un autre Boyle, ce qui donne la **loi de Boyle-Mariotte**.

Mais il paraîtrait que, quand on est français, il vaut mieux dire loi de Mariotte, car ce gars est de chez nous, abbé de surcroît, alors que Boyle était un buveur de thé. Je vous conseille d'aller wikipédier sur ce sujet, ça m'évitera de copier-coller.

Alors qu'a vu l'abbé pour laisser ainsi son nom dans l'histoire ?

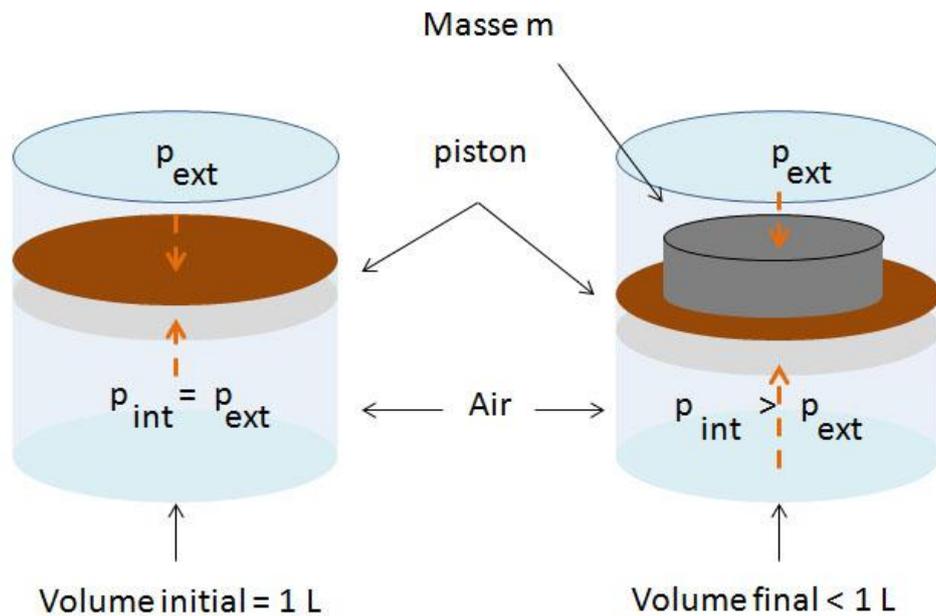
Tout d'abord, il a travaillé sur l'air et non l'hydrogène, il en aurait bien été incapable car on attribue la découverte de ce dernier en 1766 à **Henry Cavendish** autre grande figure de la découverte scientifique.

Mais s'il avait travaillé avec du dihydrogène et sur un éventail plus large de températures, les résultats n'en auraient été que plus flagrants.

Enfermons donc de l'air dans un récipient cylindrique de volume maximal 1L par exemple et fermé par un piston mobile étanche. Plaçons également un thermomètre à mercure à travers le piston afin de s'assurer de la température du gaz à l'intérieur du récipient.

Le piston étant simplement posé, l'air enfermé dans le récipient et l'air extérieur sont quasiment dans le même état, donc à la même pression car le poids du piston, environ 10 N pour un piston de 0,1 kg, est négligeable devant la force due à la pression, de l'ordre de 1000 N pour une surface de piston de  $1 \text{ dm}^2$  ( $100\,000 \times 0,01$ ). Le volume d'air enfermé est alors de 1 L.

Plaçons alors une masse  $m$  sur la face extérieure du piston. Le volume du gaz diminue alors et sa pression  $p_{int}$ , qui s'exerce sur la face intérieure du piston, augmente, tandis que la pression de l'air qui s'exerce sur la face extérieure du piston  $p_{ext}$  reste la même, égale à la pression atmosphérique.



La première loi de Newton, appliquée au piston immobile permet d'écrire que la force exercée par l'air sur la face extérieure du piston, ajoutée au poids de la masse et du piston, compensent la force exercée par l'air comprimé sur la face intérieure du piston. Cela s'écrit, pour un piston de surface  $S$  et de masse  $m'$  :

$$(m + m') g + p_{ext} S = p_{int} S$$

Autrement dit, après un traitement mathématique qui continue de laisser Dédé pantois :

$$p_{int} = p_{ext} + \frac{(m + m')g}{S}$$

Si on veut que la pression du gaz  $p_{int}$  soit le double de sa valeur initiale  $p_{ext}$ , il faut donc prendre une masse telle que :

$$\frac{(m + m') g}{S} = p_{ext}$$

Soit, de manière évidente, sauf pour Dédé :

$$m = \frac{p_{ext} S}{g} - m'$$

Soit numériquement, en supposant un piston de surface  $1 \text{ dm}^2 = 0,01 \text{ m}^2$  et de masse  $0,1 \text{ kg}$  (notez au passage que la masse du piston peut être largement négligée dans un calcul où on ne conserve que les trois chiffres de plus grand poids dits **chiffres significatifs**) :

$$m = \frac{101\,000 \times 0,01}{9,81} - 0,1 = 103 - 0,1 = 103 \text{ kg environ}$$

Vous qui êtes savant maintenant, vous avez noté que cela revient à poser une colonne d'eau de  $1 \text{ dm}^2$  de surface à la base et de hauteur  $10 \text{ m}$  environ. C'est normal, rappelez vous que la pression atmosphérique peut « supporter » une colonne d'eau de  $10 \text{ m}$ .

Ca fait déjà de la bonne colonne ! L'expérience ne va pas être facile à faire. Alors remplacez la colonne d'eau par une colonne de mercure, et vous savez qu'il suffit d'une colonne de  $760 \text{ mm}$  soit  $76 \text{ cm}$ .

L'avantage du mercure, c'est qu'on peut régler la hauteur de la colonne facilement alors qu'avec des poids standards, il est moins facile d'obtenir une masse précise. Mais on pourrait tout aussi bien remplir une colonne de sable fin (autour de  $2 \text{ tonnes}$  par mètre cube de masse volumique) mais on gagnerait beaucoup moins en hauteur.

Le mercure c'est donc le pied, et comme il est conducteur d'électricité en temps que métal, on le retrouve à toutes les sauces dans l'histoire des Sciences. Dommage qu'il soit aussi toxique. A croire que la Création n'aime pas qu'on fourre son nez dans ses rouages ! Regardez la radioactivité et la pauvre Marie Curie qui y a laissé sa santé.

Donc, revenons à nos moutons, comme dit une ménagère qui a un peu laissé l'entretien de son salon pendant plusieurs semaines.

Nous sommes capables de comprimer notre gaz, l'air en l'occurrence, à deux fois sa pression, trois fois sa pression, etc... Que constate-t-on alors ?

Eh bien, croyez moi si vous le voulez, ou refaites l'expérience, lorsque la pression du gaz est doublée ( $p_{int} = 2 p_{ext}$ ), le volume du gaz est divisé

par 2, lorsqu'elle est triplée, le volume est divisé par 3, etc.. de telle sorte que le produit de la pression par le volume ( $p V$ ) reste inchangé.

C'est la fameuse loi de Mariotte :

**Pour un gaz pris à une température donnée, le produit de sa pression par son volume est une constante.**

Soit, pour les matheux :

$$P V = \text{constante} \text{ (à } t^\circ \text{ fixée)}$$

Cette loi, en fait valable pour une classe de gaz qu'on appellera parfaits, n'est que le prélude à la définition d'une nouvelle échelle de température, **l'échelle de température des gaz parfaits**. Mais ce point sera étudié en détail dans un prochain magazine.

Vous allez alors découvrir la manifestation de cette loi dans un domaine qui fait rêver nombre d'êtres humains et frémir d'autres à juste titre : la plongée sous marine, activité que j'ai eu la joie d'expérimenter dans ma jeunesse pour mon plus grand bonheur (oui, je ne suis plus tout jeune, mais pour être Maître, il ne faut pas moins que quelques cheveux grisonnants).

## CHAPITRE IV : La plongée sous marine

S'il est un domaine où la pression manifeste pour les bipèdes que nous sommes, le plus ses effets, notamment indésirables, c'est bien la plongée sous marine.

Qui n'a pas eu ses tympans un jour martyrisés par cette pression des profondeurs, à part votre chat, à qui il ne viendrait jamais l'idée d'aller choper un poisson au fond de l'eau. Faudrait pas le prendre pour un canard tout de même !

Alors que l'homme, ça le dérange pas, canard, oiseau, serpent, aigle, chatte, chienne, tout lui va, il se prend pour le roi des animaux et peut donc s'offrir le luxe de se prendre pour l'un d'eux temporairement du moins. Pour ceux qui s'y prendraient de manière définitive, j'ai l'adresse d'un bon psy et je peux éventuellement servir d'oreille attentive et compatissante, soucieux que je suis d'aider mon prochain (vous avez mes coordonnées sur mon site).

Le tigre lui, ça ne lui viendrait jamais à l'esprit de se prendre pour un homme. Il préfère se délecter des grimaces stupides de ce bipède inachevé derrière des barreaux sécurisants, avec un service d'hôtellerie assuré sept jours sur sept sans autre contrepartie qu'exhiber sa paresse : Le pied non !

Pendant ce temps là, ça rigole encore et encore là haut, tellement que ça finirait par agacer la créature d'en bas.

Personnellement, mais c'est un point de vue très partial et très masculin, je préfère la créature d'en bas quand elle est en bas (nylons de préférence). Mais comprenez qui veut ! Et qui peut ! Comme quoi, les dessous de la création ne sont pas si laids que cela.

Mais nous sommes dans un cours de sciences ici, et si la libido en est aussi une manifestation, laissons là de côté pour le moment afin de ne pas altérer notre jugement, si on en croît un certain Freud pour qui elle s'immisce partout (partouze devrais-je dire, mais là ça va un peu loin et la censure n'est pas bonne pour mes affaires).

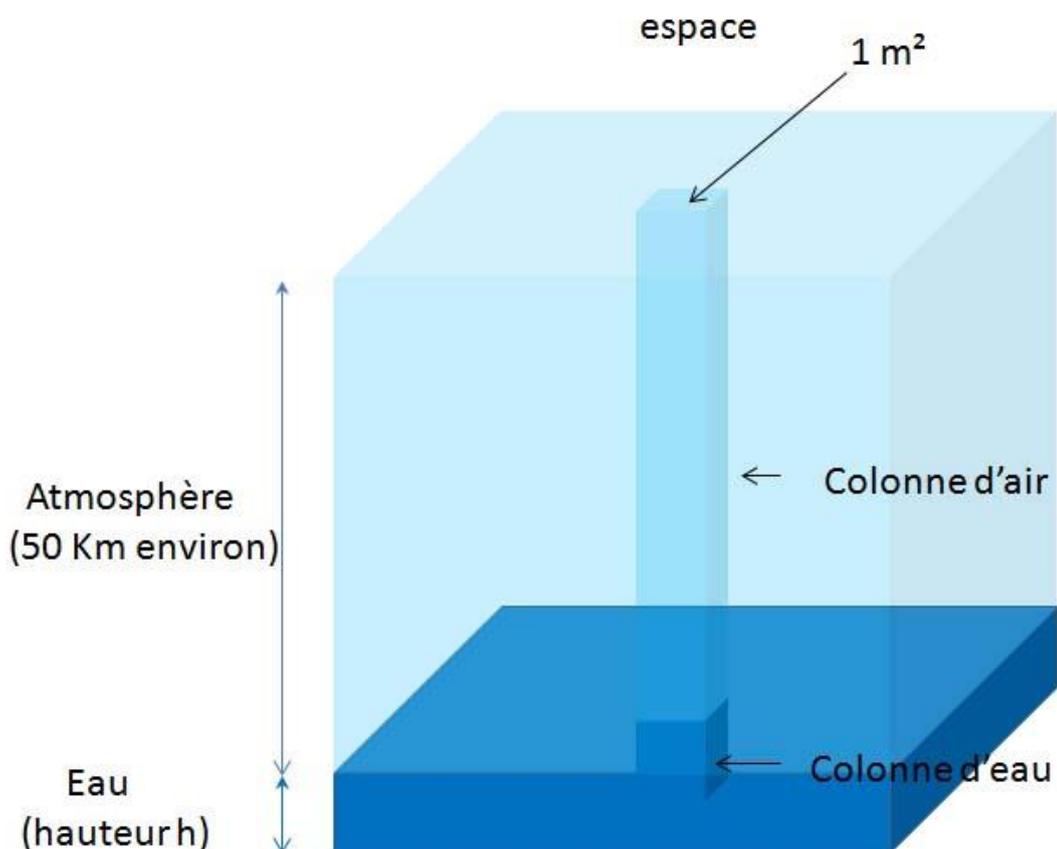
Alors je resserre le col de ma chemise. Qui a donc inventé ce bouton là tout en haut ? Ca donne du maintien, mais qu'est ce que ça étouffe, c'est comme le corset. Encore une affaire de pression me direz-vous !

Donc, revenons à nos moutons, qui commencent à bêler qu'on les délaisse comme cela à la moindre occasion.

Tentons de voir comment varie la pression avec la profondeur, puisque nous avons expérimenté qu'elle augmentait.

Un manomètre permettrait de faire des mesures mais nous allons retrouver les résultats que l'on obtiendrait, par une réflexion théorique (le neurone l'emportant sur le nerf !).

Considérons dans la mer ou l'océan une colonne d'eau de hauteur  $h$  et de 1 mètre carré de surface à la base. Elle est surmontée d'une colonne d'air de même base qui se perd dans l'espace en devenant de moins en moins dense.



Examinons alors les forces qui agissent sur l'ensemble de ces deux colonnes.

Il y a tout d'abord la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre et qui est formée du poids des deux colonnes.

Notons  $P_{air}$  le poids de la colonne d'air. Celui-ci est une force dirigée vers le bas et égale en intensité à la pression atmosphérique au niveau de la mer soit en moyenne :  $p_{air} = 101\ 000\ Pa$ . Donc :

$$P_{air} = 101\ 000\ N$$

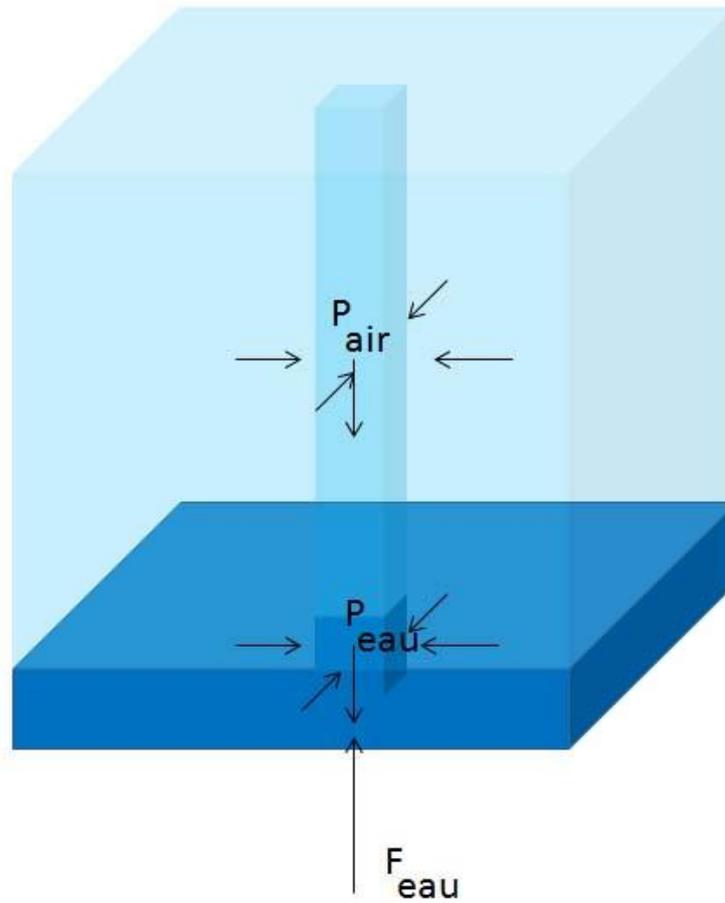
Le poids  $P_{eau}$  de la colonne d'eau de masse volumique  $\rho_{eau} = 1\ 000\ kg/m^3$  et de hauteur  $h$  et de section  $S = 1\ m^2$  est quant à lui :

$P_{eau} = \rho_{eau} S h g = \rho_{eau} g h \text{ (valeur en N)}$
---

Les autres forces exercées sur l'ensemble des deux colonnes sont des forces de pression exercées par le milieu environnant, l'air pour la colonne d'air et l'eau pour la colonne d'eau.

Cependant les actions du milieu environnant sur les parois verticales des colonnes se font dans un plan horizontal où elles se compensent.

La seule action qui ait un effet dans la direction verticale est la force de pression  $F_{eau}$  exercée sur la colonne d'eau par l'eau environnante. Comme elle s'exerce sur une surface de  $1\ m^2$ , son intensité est égale à la pression de l'eau  $p_{eau}$  à cette profondeur. Seule l'unité change, la force en Newton, la pression en Pascal, mais vous ne vous faites plus avoir.



La première loi de Newton conduit donc à écrire par compensation de ces forces (tout ce qui pousse vers le haut = tout ce qui pousse vers le bas) :

$$F_{eau} = P_{air} + P_{eau}$$

Soit :

$$p_{eau} = p_{air} + \rho_{eau} g h$$

Cette formule décrit la manière dont la pression varie dans l'eau avec la profondeur  $h$ .

Voyons d'un peu plus près. La colonne d'eau rajoute en quelque sorte son poids  $\rho_{eau} g h$  à la colonne d'air.

Or pour une colonne de 10 m d'eau, nous avons :

$$\rho_{eau} g h = 1\,000 \times 9,81 \times 10 = 98\,100 \text{ Pa} = 100\,000 \text{ Pa environ} = 1 \text{ bar}$$

Chaque colonne d'eau de 10 m rajoute donc 1 bar de pression environ à la pression atmosphérique qui vaut également environ 1 bar.

**Ainsi, la pression de l'eau à une profondeur de 10 m est de 2 bars, de 20 m de 3 bars, de 30 m de 4 bars et ainsi de suite.**

Il est donc extrêmement pratique de considérer cette échelle de pression par dizaines de mètres de profondeur. Retenons :

**La pression de l'eau augmente de 1 bar tous les dix mètres de profondeur.**

Et quand on parle de profondeur, il y a toujours quelqu'un pour vous sortir « Titanic ». D'autres plus cultivés pourraient mentionner également « Bismarck », le bateau, pas le chancelier évidemment, qui fut envoyé en 1941 à 4 700 m de fond d'une eau glaciale. Brrr !!!

Alors à 4700 m de profondeur, la pression qui règne est de 471 bars puisque  $4700 \text{ m} = 470 \times 10 \text{ m}$ , donc 470 bars dus à l'eau + 1 bar du à l'air (Là Dédé me sourit, il a compris).

Ca ne donne pas envie d'y aller autrement qu'avec des engins spéciaux appelés **bathyscaphes**, avec des coques en acier renforcées (9 à 15 cm d'épais !), des hublots qui doivent être d'épaisseur comparable, car à l'intérieur de l'habitacle, la pression ne doit pas trop s'éloigner de la pression atmosphérique pour ses occupants.



Merci qui, pour la photo, merci kiki, non ! Merci wiki

Reprenons donc le problème de la plongée sous marine mais à une profondeur plus clémente, à savoir entre 0 et 40 m, ce qui forme l'essentiel des plongées de tourisme, 40 m étant une sorte de barrière fatidique au-delà de laquelle risque que rien n'aille plus. Car au-delà de cette profondeur, tout peut aller très vite, surtout le pire.

Alors comme vous rêvez de découvrir le grand bleu, à défaut du grand blond, si vous êtes une fille, encore que les deux puissent être compatibles, allons de ce pas s'enquérir des lois de dame Nature, afin de goûter au mieux à sa merveilleuse création.

Vous prenez donc une grande inspiration, vous relâchez un zeste d'air puis en exécutant votre plus beau canard sous l'œil du blond ou de la blonde, comme vous voulez, vous plongez vers le bleu profond de l'océan. Là, arrivé à 20 m, c'est pas mal pour un débutant, vous êtes soudain pris d'une sensation de manque d'air, plutôt paniquant. Et oui, explorateur inconscient, vous avez oublié le ticket retour !

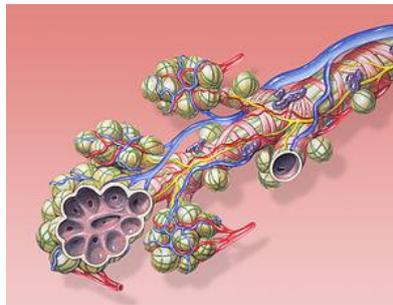
Heureusement, un plongeur à bouteille, on dit plongeur autonome, passait par là, mais lui aussi débutait comme vous. Et comme un bleu, il vous donne, sur votre demande un peu pressante, un peu d'air.



Mince, ça vire au roman photo, c'était pas prévu, mais avec toutes ces images sur le net c'est tentant. Eh ! Non, raté ! C'est pas moi qui fait le zouave en bermuda.

Donc, vous, pris d'un certain sentiment de panique, qui peut aisément se comprendre, même s'il ne résout rien et conduit bien souvent à l'irréparable, vous remontez gaillardement à toutes palmes vers la surface en prenant bien soin de ne pas expirer l'air précieux qu'on vous a offert au fond. Et là en surface, patatras ! Aïe, aïe, aïe !

Ca fait très mal dans les poumons, vous n'allez pas tarder à cracher du sang. Vos petites alvéoles pulmonaires, sortes de sacs chargés d'air où vont se faire les échanges gazeux avec le sang (figure ci-dessous, n'ont pas aimé le traitement de choc.

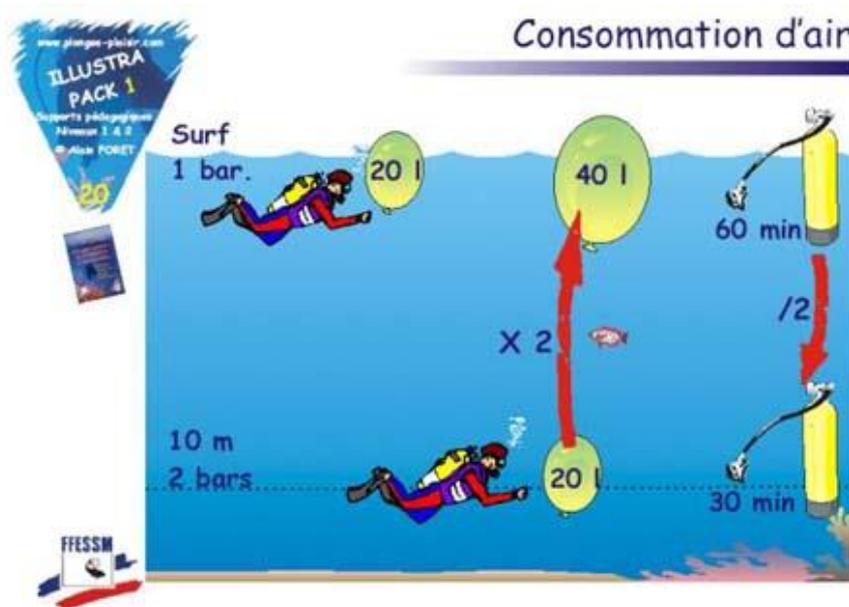


Un séjour à l'hôpital s'impose et d'urgence. Vous venez d'être victime d'un accident de surpression pulmonaire qui pourrait vous coûter tout simplement la vie.



Alors que s'est il passé ? Nous allons refaire l'expérience non pas avec vos poumons et leurs petits sacs d'air mais avec un ballon très élastique.

Descendons le ballon à 10 m de profondeur et demandons à notre plongeur précédent de le gonfler avec l'air de sa bouteille de telle sorte que la membrane du ballon soit tendue mais sans être dilatée.



Tiens encore une image wiki. Cette fois-ci, j'ai eu la flemme ! Ce qui est plutôt rare. Ne me dites pas que ça ne vous arrive jamais ! Du coup, j'ai soudain l'angoisse de devenir comme vous : un copier-colleur. Mais non ! Faut vivre avec son temps et arrêter de faire le vieux bougon ! Et puis, j'ai même laissé la pub dessus et le sigle de la fédération : Honnête le gars !

Je disais donc, avant d'être interrompu par moi-même qu'à cet instant, la pression de l'air à l'intérieur du ballon est

$$P_1 = 2 \text{ bars}$$

Et son volume par exemple :

$$V_1 = 1 \text{ L}$$

Remontons le ballon et constatons qu'il enfle comme les bulles d'air expirées par le plongeur. Arrivé en surface, la membrane étant très élastique, la pression de l'air à l'intérieur du ballon est égale à la pression de l'air à l'extérieur soit :

$$P_2 = 1 \text{ bar}$$

D'après la loi de Mariotte, à condition de considérer comme négligeable la variation de température de l'eau entre la surface et à vingt mètres de fond (vous n'avez qu'à imaginer un courant chaud au fond si ça vous gêne !), le volume  $V_2$  du ballon est devenu tel que :

$$P_2 V_2 = P_1 V_1$$

Donc :

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} V_1 = 2 V_1 = 2 L$$

Ce qui est important, ce n'est pas la valeur du volume mais le fait qu'il ait doublé. On comprend aisément l'effet que cela peut produire sur les sacs alvéolaires des poumons. La pression se relâchant sur la surface extérieure des sacs, l'air comprimé à l'intérieur cherche à relâcher sa pression, ce qui finit par faire exploser le sac, d'où le sang.

Beurk ! Pas drôle la plongée ! Si, si, c'est pour cela qu'il faut que vous lisiez mes magazines, pour faire des choses dangereuses, grisantes mais en toute sécurité.

Donc, que cela ne vous dissuade pas d'aller batifoler dans le bleu profond, encore que l'excès de plongeurs mal règlementé entraîne des dégradations conséquentes de la flore et la faune sous marine.

Pour éviter l'écueil précédent, le sang, la respiration sifflante et tout le tralala, pas la dégradation environnementale, il suffit tout simplement d'expulser l'air de ses poumons progressivement tout en remontant. Pour l'autre, il suffit d'expulser le plongeur mais ça semble moins évident.

Dans le premier cas, c'est tout de même un art et un entraînement, car expulser l'air trop vite, c'est risquer l'accident de surpression, pas assez vite, l'asphyxie. Bienvenue dans le grand bleu. Et il ya pire comme nous allons le voir.

En effet, plus vous descendez profond, plus les fluides, liquides et gaz qui composent votre corps se trouvent à forte pression. La conséquence est de dissoudre dans le sang au niveau des poumons là où se déroulent les échanges gazeux (donc dans les alvéoles si vous avez suivi) une quantité plus importante d'azote contenu à 80% dans l'air que vous respirez.

A la descente, pas de problèmes, vous dissolvez, vous dissolvez !

C'est à la remontée que ça se gâte, car la pression se relâchant, c'est le contraire qui se produit. Dans tous les vaisseaux sanguins où l'azote s'est dissous en quantité supplémentaire, il cherche à revenir à l'état gazeux, ce qui produit plein de petites bulles qui, si elles ne sont pas trop grosses ou

trop nombreuses, vont finir par être évacuées au niveau des poumons puis par l'expiration.

Mais si vous remontez d'un coup, elles peuvent grossir très vite avant leur évacuation et se bloquer quelque part, obturer une artère, c'est l'embolie, la mort n'est pas loin ! Toute une gamme de symptômes intermédiaires peuvent exister, fourmillements, paralysie, demandez à votre médecin, je ne suis pas spécialiste.

Ce que je sais, en vertu des lois physiques, c'est qu'il faut remonter très doucement et ce d'autant plus qu'on a plongé profond.

Comme ce n'est pas pratique de remonter très doucement, on a coupé la poire en deux en faisant des paliers. On remonte d'un coup de 40 m à 9 m par exemple, on attend quelques minutes, on remonte à 6 m, on attend, on peut faire une belotte si on veut, et on recommence à 3 m. Les temps d'attente ont été étudiés dans le sens d'une grande sécurité et sont consignés dans des tables que nombre de plongeurs expérimentés connaissent par cœur (ou devraient).

Ex-plongeur, je me souviens par exemple que je pouvais être exempté de palier si je ne plongeais pas plus de 5 min à 40 m et pas plus de 5 H 30 min à 10 m.

Un autre piège affreux guette le plongeur quand il passe la barrière des 40 m : l'ivresse des profondeurs. Je vois mon Dédé qui se réveille, des bouteilles de bière semblent faire une farandole autour de sa tête.

Non, Dédé, cette ivresse là n'est pas due à l'alcool, mais à la pression, encore que celle de Dédé soit également due à une forme de pression, la bière pression.

En effet, l'excès d'azote dans le sang produit une sensation d'ébriété qui peut conduire un plongeur à la folie, comme se déshabiller sous l'eau, oubliant qu'il n'a pas de branchies. On peut facilement repérer l'amorce de cet état, non pas en se mettant sur une jambe et en faisant un pied de nez comme sur Terre, mais en exécutant des calculs arithmétiques élémentaires comme  $6 + 7 = ?$  Encore que, pour certains, même sur Terre et sans une goutte d'alcool, ça puisse vite les saouler. Passez donc au Sudoku subaquatique !

Dernier point enfin, pour relâcher cette pression qui vous écrase les tympans quand vous plongez, il existe un moyen simple appelée **manœuvre de Valsalva** qui consiste à vous pincer le nez et souffler fortement dedans. Cela renvoie de l'air via la **trompe d'Eustache** dans votre oreille interne augmentant ainsi la pression de l'air sur la face interne de votre tympan. Du coup ce dernier se trouve rééquilibré.

En plus c'est l'occasion d'émettre d'amusants « Pschitt » au niveau de vos oreilles qui prouvent que la manœuvre a réussi. Essayez à la piscine de 4 m vous m'en direz des nouvelles.

Maintenant, la manœuvre est très délicate si vous plongez sans palmes, car pour descendre au fond en vous pinçant le nez, ce n'est pas évident. Il vous faudra exécuter rapidement la manœuvre pour pouvoir vite réutiliser vos bras pour vous propulser au fond. Sinon, reste la solution de vous mettre un pince-nez avant de plonger.

Notez qu'un masque de plongée offre généralement toujours la possibilité de prendre son nez à défaut de prendre son pied !

Si la perspective d'aller dans le fond ne vous tente pas, ce qui est dommage, car dans le fond, vous n'êtes pas si con, il vous reste celle de vous envoyer en l'air et pour cela voyons ensemble ce qui fait voler les avions, afin de vous rassurer.

## CHAPITRE V : La pression qui fait voler les avions

Vous verrez dans le prochain magazine consacré à la **poussée d'Archimède**, si vous daignez me l'acheter bien sur, que la pression fait s'élever les moins lourds que l'air comme les montgolfières, mais pas Dédé, même si il y ressemble un peu, les aérostats, les ballons-sondes et vous comprendrez entre autre pourquoi elle empêche parfois le remboursement effectué à dame Nature de franchir le siphon des toilettes, le faisant remonter malencontreusement à la surface de l'eau de la cuvette. J'en vois qui connaissent. Eh oui ! Ca arrive à tout le monde mais personne n'en parle, à part Jean Marie (le Bigard !), qui a introduit la notion de « perfect » pour contrarier la satanée poussée.

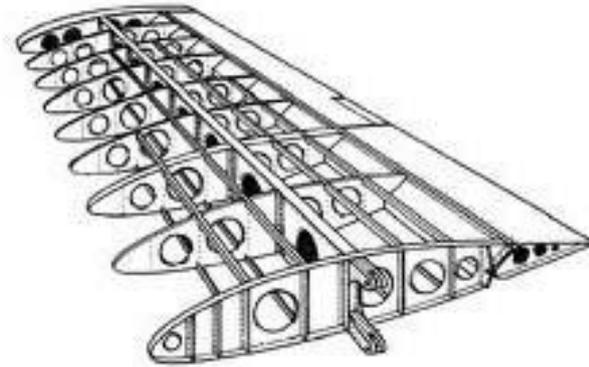
Sans air, sans eau, bref sans fluide, pas de tels effets et donc des parties de rigolade en moins. Je soupçonne le Créateur d'être un farceur et c'est probablement pour cela qu'il a fait sa créature à son image. Faut-il de là penser qu'il se biture allègrement là haut ? Allons, allons ! L'homme ne doit sa déchéance qu'à lui-même. Regardez : mettez une émission de télé-réalité sur une chaîne, une émission scientifique sur une autre, et faites un sondage d'audience.

Raymond Devos l'avait remarquablement illustré dans un sketch où il zappait entre deux films, Emmanuelle et Thérèse Desqueyroux, fâcheux dilemme pour l'homme de choisir entre le sein et le saint ou entre le pieu et le pieux comme le disait si bien Raymond, à une époque où l'humour s'exprimait en belles formules.

Revenons donc à nos chèvres, j'en ai marre des moutons, je n'arrive plus à en dormir la nuit à vouloir les compter. Et puis ça me rappelle trop Stevie qui change de coiffure comme de chemise et la dernière en date, on a l'impression qu'il la volé sur le dos d'un mouton.

Je disais donc, Ah oui ! La pression qui fait voler les avions et dont l'effet s'appelle la **portance**. Il a fallu du temps pour découvrir le mystère de son action, les frères Wright, précurseurs du vol en avion ignorant le mécanisme qui les fit décoller de quelques mètres sur une quarantaine de mètres le 17 décembre 1903.

Voyons d'abord comment c'est fichu, une aile, pour de vrai avec en prime la manière dont c'est construit :



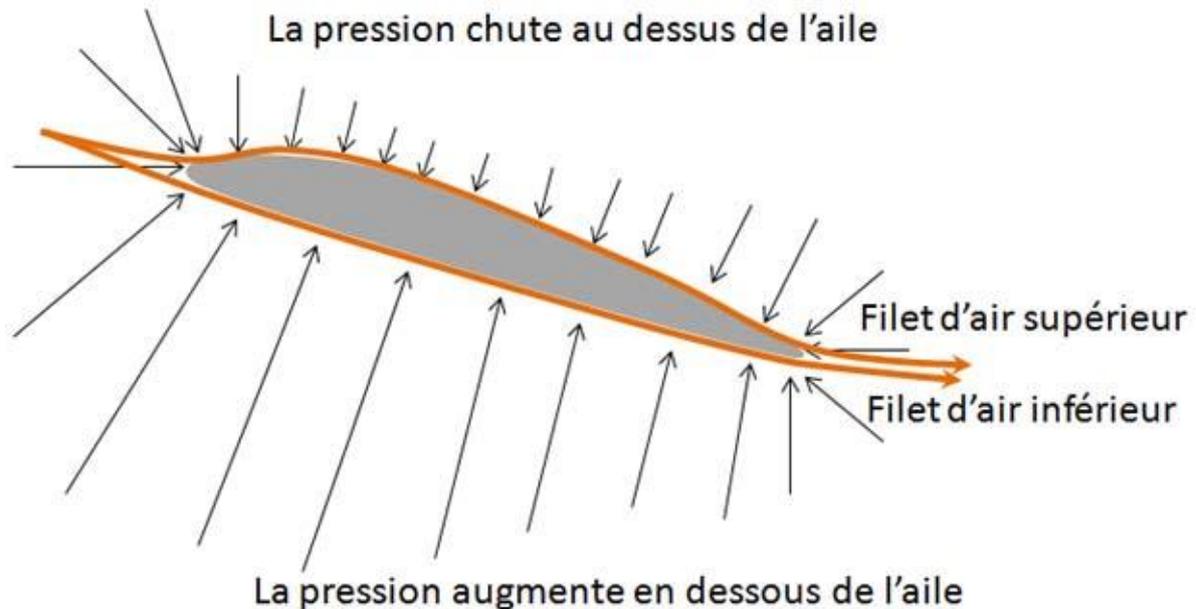
Pour pouvoir raisonner plus aisément, nous la représenterons par ce schéma, qui la représente en vue de profil :



Notez que le plan moyen de l'aile est légèrement incliné par rapport à la surface du sol, afin que de l'air s'engouffre sous l'aile. Ça paraît normal.

Ce qui l'est moins, c'est la forme spéciale de l'aile qui fait qu'une ligne tracée sur la partie supérieure est plus longue que celle qui serait tracée en dessous sur la partie inférieure.

Or les filets d'air venant heurter l'aile vont se séparer sur l'avant de celle-ci, un filet suivant la ligne supérieure et un filet la ligne inférieure pour se reformer à la base de l'aile (voir figure ci-dessous), à moins d'en décrocher avant, mais c'est une autre affaire dont nous parlerons plus loin.

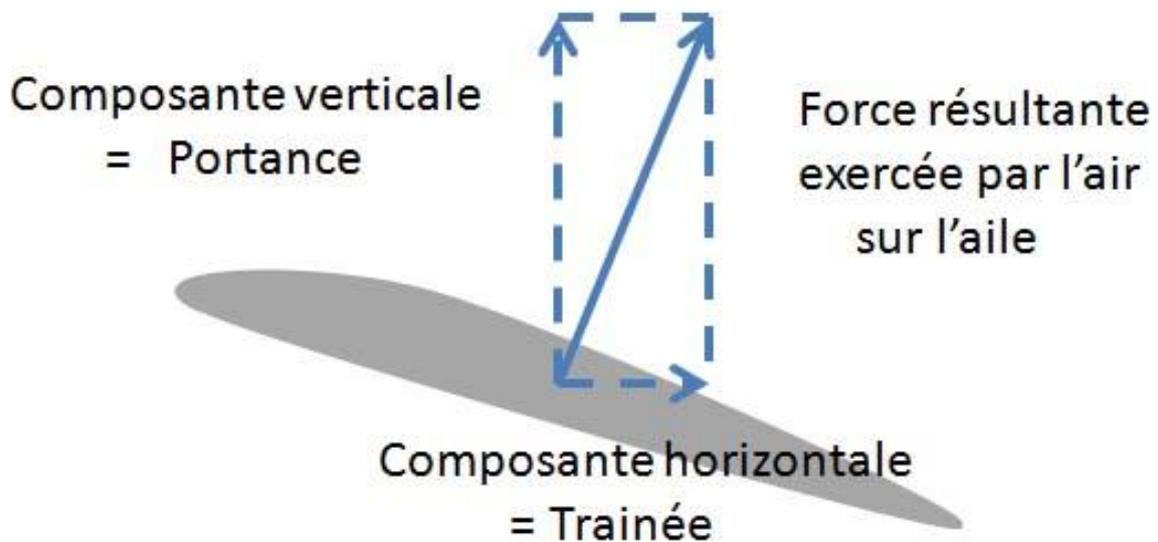


Donc, si les filets se rejoignent bien à l'arrière de l'aile, le filet supérieur a une plus grande distance à parcourir sur l'aile et celui qui est inférieur, une moins grande distance.

Le filet supérieur s'est ainsi détendu, sa pression étant inférieure à la pression atmosphérique et le filet inférieur s'est comprimé, sa pression étant supérieure à la pression atmosphérique.

Il en résulte un différentiel de pression entre face supérieure et face inférieure de l'aile qui fait que l'action globale de l'air sur l'aile est une force verticale légèrement inclinée vers l'arrière.

Si on décompose fictivement cette force en deux, la composante verticale est la **portance**, c'est elle qui doit compenser plus que le poids si on veut que l'avion décolle, et la composante horizontale est une partie de la force globale qui freine l'avion et qu'on appelle la **trainée** et qui doit être compensée par la poussée créée par les hélices en rotation ou les gaz du moteur à réaction.



La portance est d'autant plus importante que le différentiel de pression est grand et cela s'obtient en augmentant la vitesse de l'avion. Voilà pourquoi il ne décolle qu'à partir d'une certaine vitesse et quand il atterrit, est obligé de maintenir une vitesse minimale appelée **vitesse de décrochage** s'il ne veut pas s'écraser comme une pierre.

On peut résumer les quatre forces permettant à un avion de se déplacer dans la 3D atmosphérique.

