



Apprendre sans en avoir l'air

L'aérothèque

Quelques notions de physique pour les enseignants

*Céline Demierbe, Stéphanie Malaise,
Soizic Mélin, Fanny Merchez
Pr. Marc Demeuse, Pr. Pierre Gillis, Dr. Francesco Lo Bue*

Institut d'Administration Scolaire, Carré des Sciences

Dossier théorique pour l'enseignant

Table des matières

Chapitre 1 – L'histoire des aéronefs.....	2
1. Du XVII ^e siècle à nos jours.....	2
2. Les montgolfières actuelles.....	5
2.1. L'enveloppe.....	5
2.2. Le brûleur.....	6
2.3. La nacelle.....	7
3. Ballons solaires de petite taille.....	7
3.1. Comment les reconnaître ?.....	7
3.2. Avantages et inconvénients.....	7
3.3. L'enveloppe.....	8
3.4. La charge utile.....	8
4. Ballons gonflés avec de l'hélium.....	9
4.1. Comment les reconnaître ?.....	9
4.2. Pourquoi utiliser de l'hélium ?.....	10
4.3. Les rozières.....	10
Chapitre 2 – L'air, ce gaz dans lequel nous baignons quotidiennement.....	11
1. Introduction.....	11
2. L'atmosphère terrestre.....	11
3. L'air est un gaz.....	13
3.1. L'air est compressible.....	13
3.2. L'air est expansible.....	13
3.3. L'air est pesant.....	13
4. La pression atmosphérique.....	14
4.1. Qu'est-ce qu'une pression ?.....	14
4.2. La pression atmosphérique.....	15
4.3. Comment approcher cette notion avec les élèves ?.....	16

4.4.	Le parfum qui se répand dans une pièce.....	17
5.	La mesure de la pression atmosphérique.....	18
5.1.	Un peu d'histoire.....	18
5.2.	Le baromètre à mercure	19
5.3.	Le baromètre anéroïde.....	19
5.4.	Les appareils électroniques.....	20
6.	Unités de pression dans les gaz	20
7.	Influence de la température sur la pression atmosphérique.....	20
8.	Influence de l'altitude sur la pression atmosphérique.....	21
9.	La respiration.....	22
	Un modèle très simple du système respiratoire.....	22
	Quelques litres d'air par jour !.....	25
Chapitre 3 - La poussée d'Archimède.....		27
1.	Introduction.....	27
2.	Enoncé du principe d'Archimède.....	27
3.	Dans les liquides	27
3.1.	Un ballon dans l'eau.....	27
3.2.	Coulera, coulera pas ?.....	28
3.3.	Les bateaux.....	29
3.4.	Les sous-marins.....	29
3.5.	Le thermomètre de Galilée.....	30
4.	Dans l'air.....	31
4.1.	Pourquoi les montgolfières s'élèvent-elles dans le ciel ?	31
Chapitre 4 - Correction des fiches d'aide.....		32
1.	Correction des fiches « concept ».....	32
2.	Correction des fiches « organisation ».....	32
3.	Correction des fiches « mesures »	32
4.	Correction des fiches « pannes ».....	34

5. Correction des fiches « aller plus loin ».....	34
6. Correction des fiches « expériences ».....	39
Bibliographie.....	48
Annexes.....	50
Annexe n°1 – Quelques notions importantes de physique	50
1. Introduction.....	50
2. Qu'est-ce qu'une force en physique ?.....	50
2.1. Quelques exemples.....	50
2.2. Caractéristiques des forces.....	52
2.3. Unité de force.....	52
2.4. Appareil de mesure des forces : le dynamomètre	52
2.5. Exemple.....	53
2.6. Principe des actions réciproques (appelé encore parfois « principe de l'action et la réaction »).....	53
3. Masse et poids, deux grandeurs différentes ?.....	55
3.1. La masse	55
3.2. Le poids	55
3.3. D'où vient cette confusion entre les notions de masse et poids ?.....	56
4. Masse volumique et densité.....	56
4.1. Masse volumique.....	56
4.2. Qu'est-ce que la densité ?.....	57
4.3. La masse volumique et la densité d'un matériau sont-elles des grandeurs différentes ?	57
Annexe n°2 – La poussée d'Archimède	58
1. Exemple du ballon que l'on essaie d'enfoncer dans l'eau	58
2. Les mouvements ascendants et descendants des montgolfières	58
Annexe n°3 – Gabarit pour une montgolfière de 2 m^3	61

Dossier destiné exclusivement aux enseignants

Ce dossier qui reprend les notions spécifiques à la thématique a été élaboré de manière à fournir à l'enseignant(e) un maximum d'informations avant de commencer le projet en classe. Chaque enseignant pourra y puiser les informations qu'il jugera utiles en fonction de ses objectifs personnels. Dans ce but et aussi dans un souci de rendre le texte le plus accessible et le plus lisible possible, les notions plus théoriques ont été volontairement centralisées dans les annexes.

Le premier chapitre retrace, dans les grandes lignes, l'histoire des aéronefs : des premiers essais des frères Montgolfier aux actuels ballons solaires très performants en passant par les zeppelins et les montgolfières sportives.

Le deuxième chapitre répond à quelques questions concernant l'air : quelles sont les principales propriétés des gaz ? Qu'est-ce que la pression atmosphérique ? Avec quels appareils peut-on la mesurer ? ...

Le troisième chapitre illustre le principe de la poussée d'Archimède et explique son rôle lors des vols de montgolfières.

Le quatrième chapitre reprend les corrections des fiches de remédiation (appelées « fiches d'aide » par les élèves). De nombreuses informations complémentaires sont proposées dans ce chapitre aux enseignants. De nouveau, chaque enseignant entrera dans la compréhension des détails en fonction de ses objectifs et de ses élèves.

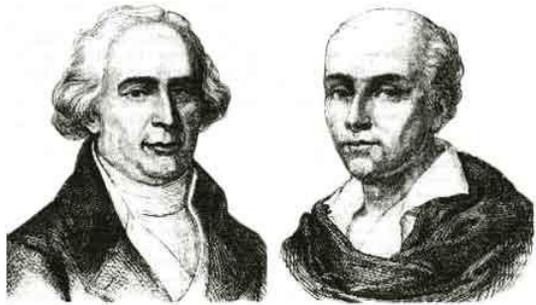
Viennent ensuite la bibliographie ainsi qu'une liste, non exhaustive, de sites internet intéressants.

Enfin, les annexes reprennent d'autres informations complémentaires relatives à certaines notions abordées dans les chapitres précédents mais de manière plus approfondie. Ces notions, bien qu'intéressantes et importantes, ont été regroupées dans l'annexe de manière à ne pas alourdir le cœur du dossier enseignant.

Chapitre 1 – L'histoire des aéronefs

1. Du XVII^e siècle à nos jours

En cet hiver de 1782 Joseph et Etienne Montgolfier férus de sciences, passionnés par l'hydrogène et par toutes les expériences qui lui sont liées ne rêvent que de voler. Un soir assis devant sa cheminée, Joseph qui se réchauffe en regardant la fumée s'élever au-dessus du feu a une idée de génie : il suffit d'emprisonner cette fumée dans un sac en papier et de s'accrocher à ce sac pour partir à la conquête des cieux ! Il prend un morceau de papier, le plie en quatre pour qu'il puisse contenir la fumée et le pose sur le feu. Le sac monte en ondulant dans la cheminée. Le premier aérostat est né ! Les deux frères réitèrent l'expérience avec multitude de ballons en papier, en soie, ou en taffetas très légers. Le 14 décembre 1782, un globe de 3 m³, chauffé à la paille mouillée mélangée à de la laine et du papier, s'élève depuis les jardins de la papeterie familiale.

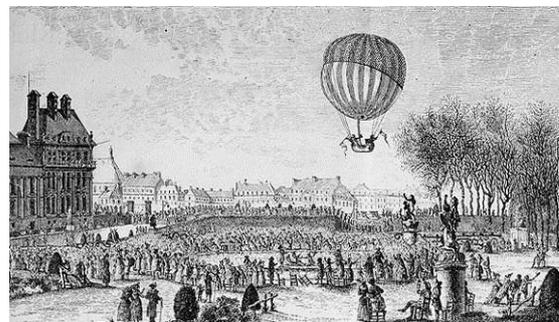


http://www.memo.fr/article.asp?ID=PER_MOD_164

A Annonay, le 4 juin 1783, les frères présentent un ballon de 800 m³, dont les fuseaux sont reliés par 1800 boutonnières, devant un parterre de curieux. Après dix minutes de vol et avoir parcouru un peu plus de deux kilomètres, le ballon tombe, enflammé, dans une prairie.

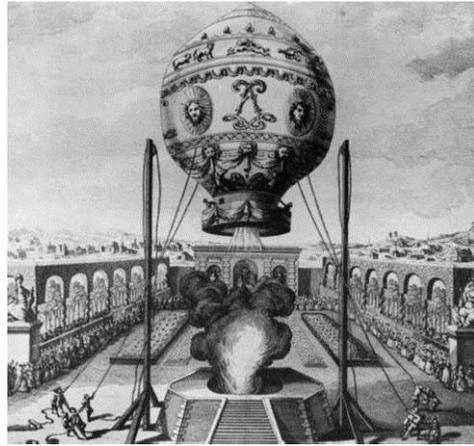
Des crédits sont alloués aux frères Montgolfier pour fabriquer un appareil qui embarquera un coq, un canard et un mouton. L'engin s'envolera, le 19 septembre 1783 devant Louis XVI. Il volera huit minutes et se posera dans les bois voisins de Vaucresson. L'atterrissage sera attesté par deux gardes-chasse.

A la même époque, le physicien Jacques Charles étudie les gaz, leur densité et leur coefficient de dilatation. Il confirme que l'hydrogène est quatorze fois plus léger que l'air et démontre la force portante de celui-ci en gonflant des bulles de savon. Il fait construire, par les frères Robert, un ballon de quatre mètres de diamètre, appelé le Globe, qui s'envolera rempli d'hydrogène. Malheureusement, croyant voir l'œuvre du démon, les paysans des environs déchirèrent l'enveloppe à son atterrissage. A partir de ce jour, des circulaires furent rédigées pour rassurer la population lors des essais ! Une compétition acharnée commence à cette époque entre ballons à air chaud et ballons à hélium pour savoir lequel des deux systèmes serait le plus à même de permettre à l'homme de voler dans les cieux.



<http://www.mairie-annonay.fr/Les-freres-Montgolfier-et-la.html>

Après quelques essais de vols captifs, le premier vol embarquant des humains a lieu le 15 octobre 1783. Pilâtre de Rozier, jeune physicien et le marquis d'Arlandes montent à bord d'un ballon arborant les couleurs des armoiries royales, en coton imbibé d'alun fait 2 400m³ et faisant 21 mètres de longueur et 14 mètres de largeur. Le vol dure vingt-cinq minutes et permet aux passagers de survoler Paris sur une distance d'une dizaine de kilomètres. De nos jours les ballons ne sont guère différents de ce ballon révolutionnaire qui possède déjà toutes les

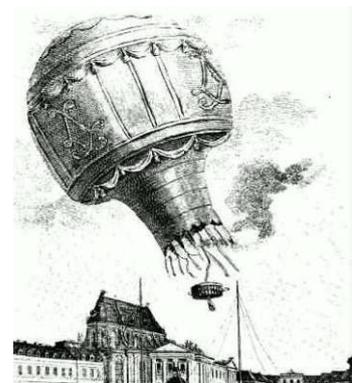


<http://www.ballooning.es/fr/la-montgolfiere/histoire.php>

caractéristiques des ballons actuels : une enveloppe vernie, une soupape, des suspentes, une nacelle en osier, du lest, une ancre et des instruments de mesures.

Pendant une dizaine d'années, les vols se succèdent, montant de plus en plus haut et faisant des trajets de plus en plus longs. Ensuite, un nouveau rêve titille les aérostatiers : traverser la Manche. Ce vol légendaire, réalisé le 7 janvier 1785, se termine in extremis : les passagers, partis de Douvres, sont obligés de jeter par-dessus bord une bonne partie de leur équipement, de leurs vêtements et tous leurs instruments pour atteindre la France !

Le défi suivant est de refaire cette traversée mais dans l'autre sens, c'est-à-dire en bravant les vents dominants. C'est à cette époque que Pilâtre de Rozier imagine ce que, deux siècles plus tard, les passionnés de montgolfières appelleront la « rozière » : une aéro-montgolfière, un hybride entre la montgolfière et le ballon. La partie supérieure de cette rozière est ronde et contient un gaz plus léger que l'air (dans les premiers prototypes de l'hydrogène, ensuite de l'hélium) tandis que sa partie inférieure est cylindrique et contient de l'air qu'il faut chauffer. Le premier vol de la rozière gonflée à l'hydrogène est catastrophique, celle-ci s'enflamme et les deux passagers, dont Pilâtre de Rozier, n'en réchappent malheureusement pas.



<http://www.momes.net/dictionnaire/m/montgolfiere/montgolfiere.html>

Il faut faire un grand bon dans le temps pour entendre à nouveau parler d'aéronefs. Les années 1930-1940 voient décoller les premiers zeppelins, dirigeables à l'enveloppe rigide. Les Allemands en construiront 123 pendant la Première Guerre mondiale. Contrairement aux ballons dont seule l'altitude peut être modifiée par le pilote, les dirigeables peuvent, comme leur nom l'indique, être orientés de façon à arriver à un endroit choisi au préalable. Malheureusement



<http://irdx.fr/spip.php?article150>

certains de ces zeppelins ont connu une fin tragique, comme le tristement célèbre Hindenburg, entraînant avec lui, dans une explosion épouvantable survenue le 6 mai 1937, les passagers vers une mort inéluctable.

Il faut attendre 1960, la mise au point d'un nouveau tissu, le Nylon, de nouveaux brûleurs fonctionnant au propane liquide, et des réservoirs plus légers pour revoir à nouveau des ballons à air chaud dans les airs. Don Cameron, écossais de naissance, devient un important constructeur de montgolfières. Il perfectionne les coutures des fuseaux, utilise le Velcro double face pour fixer la soupape et améliore les brûleurs, invente de nouveaux procédés pour améliorer le confort et les performances des vols en montgolfières.

Les records à battre sont toujours plus impressionnants. Ainsi un ballon américain de 286 000 m³ atteindra les 34 668 m d'altitude en 1961 alors qu'une montgolfière montera jusqu'à 21 000 m en 2005.

Le record d'altitude n'est le seul record visé, la distance parcourue par l'engin fait aussi rêver l'homme. Après avoir traversé la Manche, l'homme rêve alors de traverser l'Atlantique ! En 1992, un concours est donc organisé. Les concurrents montent dans des rozières identiques et également équipées de brûleurs identiques. Des cinq équipages, celui de Bertrand Piccard, le petit-fils d'Auguste Piccard, remporte la victoire après 144 heures de vol.

Après avoir traversé la Manche et l'Atlantique c'est ... du tour du monde sans escale que l'homme se met à rêver. En mars 1998, Bertrand Piccard et Brian Jones embarquent à bord d'une rozière dont l'enveloppe est un peu particulière. Elle fait 55 m de haut, est réalisée dans un matériau (argent aluminisé) qui capte particulièrement bien la chaleur du Soleil et contient un ballon à moitié rempli d'hélium. Pendant la journée, l'air qui se trouve sous l'enveloppe et l'hélium qui se trouve dans le ballon sont chauffés par le Soleil. D'autre part soumis à une pression atmosphérique qui diminue pendant l'ascension l'air et l'hélium se dilatent. En se dilatant dans son ballon, l'hélium augmente la portance de l'aéronef. La nuit, les brûleurs prennent le relais. Les avantages d'une telle configuration sont certains : l'hélium contenu dans un environnement chaud (l'air contenu dans l'enveloppe) se refroidit moins facilement que s'il était en contact direct avec l'air ambiant ; l'hélium chauffant plus facilement que l'air, les brûleurs consomment moins de propane et ce qui entraîne une quantité de lest à embarquer moins importante. En surfant, à 10 000 m d'altitude sur les courants des jet-streams, et après avoir volé 19 jours 21 heures et 47 minutes et parcouru 45 633 km, le tour du monde sans escale est bouclé et il ne reste plus que 40 kilogrammes de propane liquide sur les 3,7 tonnes embarquées au départ !



<http://www.pionnair-ge.com/spip1/spip.php?article190>

2. Les montgolfières actuelles

Une montgolfière se compose de trois parties : l'enveloppe, le brûleur, et la nacelle. D'une manière approximative il est nécessaire d'avoir un volume de un mètre cube pour soulever une charge de 250 g. Une montgolfière de 2000 m³ - qui est une valeur moyenne pour une montgolfière de loisir - peut donc soulever une charge totale (avec la montgolfière elle-même) d'environ 500 kilogrammes.

Le pilote, appelé aussi aéroneute ou aérostatier, fait monter la montgolfière en injectant de l'air chaud et la fait descendre en laissant l'air contenu dans l'enveloppe se refroidir. Pour que la montgolfière puisse monter il faut que la température de l'air intérieur soit de 60 et 80°C supérieure à celle de l'air extérieur. La température intérieure varie donc, en général, entre 80 et 100 °C. Lorsque le pilote ne chauffe plus l'air, celui-ci se refroidit et la montgolfière descend d'abord en accélérant et puis ensuite avec une vitesse constante (à l'équilibre, les forces de frottements compensent l'accélération de la pesanteur) de 5 mètres par seconde, comme un parachute.

Les vols en montgolfières se font souvent le matin ou en fin de journée mais jamais en plein après-midi chaud. Lorsque la température est fraîche, que les vents sont faibles et que les ascendances thermiques dues au réchauffement du sol ne se manifestent pas trop.

2.1. L'enveloppe

L'enveloppe est réalisée avec du tissu en Nylon traité afin de résister aux attaques du Soleil, de la pluie et à la chaleur interne au ballon.

Les enveloppes peuvent avoir des formes très originales comme celles d'animaux, de personnages connus, de château ou d'immense journal ...



<http://photos.linternaute.com/photo/888817/8962060810/1612/festival-de-mongolfieres/>



<http://flickrhivemind.net/Tags/palloneaerostatico/Interesting>



<http://selunair.blogspot.com/2009>

... mais la plupart ont une forme de goutte d'eau inversée (la pointe vers le bas et non vers le haut).



www.crea-sciences.be/



<http://angely.over-blog.com/article-22284004.html>



<http://www.sport-decouverte.com/vol-montgolfiere-haute-saone.html>

Des sangles horizontales ou verticales donnent sa forme à l'enveloppe et limitent ou arrêtent les éventuelles déchirures. Les sangles verticales sont rassemblées au sommet du ballon par un anneau de « couronne » et sont attachées, à la base de l'enveloppe, à des câbles d'acier qui supportent la charge de la nacelle, son matériel et les passagers.



http://www.mairie-annonay.fr/-Annonay-site-historique-de-la-.html?id_document=899

Au sommet de l'enveloppe se trouve un grand orifice qui se ferme par l'intérieur et qui, en s'ouvrant, laisse échapper de l'air chaud pour perdre de l'altitude.

A la base de l'enveloppe un morceau de tissu, de forme trapézoïdale et résistant particulièrement bien aux fortes températures (en Nomex), permet de protéger la flamme des rafales de vent.

Le volume de ces enveloppes varie entre 1 000 et 10 000 m³ mais la moyenne se situe aux alentours de 2 000 m³ pour les montgolfières touristiques.

2.2. Le brûleur

Le brûleur de forte puissance et alimenté en propane liquide (qui se trouve à moins 20 °C dans la bonbonne) est fixé sur un cadre circulaire à la base de l'enveloppe et est réglable en inclinaison de manière à toujours être bien dirigé dans l'ouverture (la bouche) de l'enveloppe. La flamme qui sort de ce brûleur a une hauteur de 3 à 5 mètres ! Le carburant se trouve dans des réservoirs (cylindres) en acier inoxydable ou en titane qui se trouvent sangles verticalement aux quatre coins de la nacelle. Leur contenance, qui varie de 20 à 50 kg, impose l'autonomie de la montgolfière et donc la durée du vol. Il existe un type de brûleur particulier : le « brûleur à vache ». Ce brûleur est particulièrement silencieux et permet ainsi de survoler les



http://www.pointsdactu.org/article.php3?id_article=1414

animaux sans les effrayer. Cependant ce type de brûleur est moins puissant et ne peut être utilisé qu'occasionnellement car il entraîne un dépôt de suie sur l'enveloppe.

2.3. La nacelle

La nacelle, traditionnellement en osier ou en rotin tressés, est renforcée par une armature en aluminium ou en acier inoxydable. Les rebords sont, pour plus de confort pour les passagers, recouverts de mousse et de cuir. Les grandes nacelles peuvent accueillir 10 à 20 personnes, elles sont alors cloisonnées pour assurer une meilleure rigidité et une meilleure répartition des poids.



http://www.europeanballoon.be/old/fr/fra_vent_fr_new_U_M_News.htm

3. Ballons solaires de petite taille

3.1. Comment les reconnaître ?

L'enveloppe des ballons solaires est remplie d'air, tout comme celle de la montgolfière. Cependant, cet air n'est pas chauffé grâce à un brûleur mais grâce à l'énergie fournie par le Soleil.

Ces ballons sont facilement identifiables parmi tous les aéronefs. En effet, ils sont noirs, ce qui leur permet de capter particulièrement bien l'énergie fournie par le Soleil.

Les dimensions de ces ballons varient en fonction de l'utilisation que l'on souhaite en faire, c'est-à-dire de la masse que l'on désire soulever. Il faut que le volume du ballon soit suffisamment important pour contrecarrer, grâce à la poussée d'Archimède, le poids total (enveloppe et charge accrochée) qui a tendance à « clouer le ballon au sol ».



<http://www.google.be/>

3.2. Avantages et inconvénients

De par le fait qu'aucun brûleur ne soit nécessaire pour chauffer l'air, ces ballons présentent deux avantages certains : un poids et un coût moins importants. Par contre, ces ballons ont un inconvénient majeur : ils ne peuvent prendre de l'altitude que si le Soleil est bien présent. (Ensoleillée ne veut pas forcément dire chaude, la journée peut être froide, comme le sont les journées d'hiver, mais le Soleil doit être présent !) Il est donc impensable d'espérer faire voler ces ballons par temps nuageux, le soir ou encore moins la nuit.

Ces ballons peuvent effectuer deux types de vols : les vols captifs et les vols libres. Lors des vols captifs, le ballon qui est retenu au sol par une ficelle, qu'il faut prévoir suffisamment solide, est très facilement récupérable et ne risque pas de provoquer d'incident en prenant de l'altitude. Par contre avant un vol libre, il est primordial de se renseigner sur la législation en vigueur car toutes les régions ne peuvent pas être survolées et il est impératif de ne pas gêner le passage éventuel d'avions. De plus il faut avoir à l'esprit que, s'il n'est pas muni d'une balise, le ballon risque d'être emmené par les courants aériens et donc définitivement perdu.

3.3. L'enveloppe

L'enveloppe est construite dans un film de polyéthylène noir dont l'épaisseur est de 15 à 20 microns (le micron est le millième de millimètre). Pour les amateurs de ce genre de construction, il est possible d'acheter ce film en rouleau dans des entreprises spécialisées ou alors, afin d'en diminuer le coût, d'utiliser le film des sacs poubelles.

La forme de ces ballons solaires varie d'un modèle à l'autre mais reste assez simple, tout du moins pour les modèles trouvés lors de la rédaction de ce dossier :



<http://amifaunuscatalogue.over-blog.org/article-voler-en-ballon-solaire-37574639.html>

<http://ballonsolaire.pagesperso-orange.fr/>

Le raccordement des panneaux peut se faire en utilisant du ruban adhésif double face ou en thermo-soudant (en chauffant avec un chalumeau, un fer à souder, un coupe corde...) les bords. Cette deuxième méthode, qui permet d'obtenir un ballon plus léger (il n'y a pas le poids du papier collant), est cependant assez dangereuse et difficile à maîtriser.

3.4. La charge utile

Comme annoncé plus haut, si le volume de l'enveloppe est suffisamment important, le ballon peut soulever le matériel nécessaire à la prise de vue (caméra ou appareil photo) ou à la prise de certaines mesures comme la température, la pression atmosphérique...

4. Ballons gonflés avec de l'hélium

4.1. Comment les reconnaître ?

Les ballons gonflés à l'hélium sont les ballons qui sont vendus dans les fêtes foraines ou qui sont utilisés dans les magasins pour en faire la publicité. Ces ballons s'envolent sans espoir de retour dès qu'ils ne sont plus attachés.

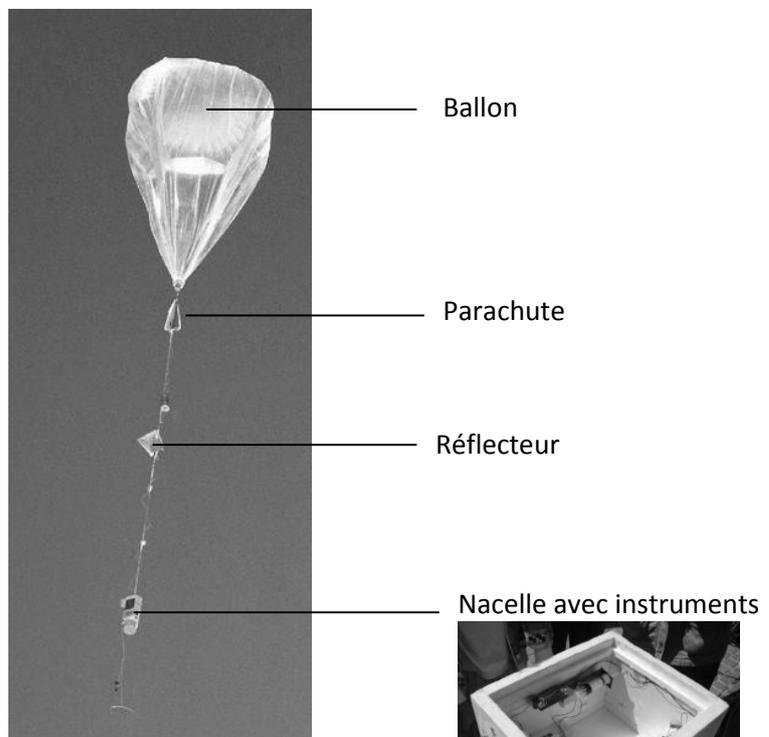


<http://superhelium.blogspot.com/>

De plus grands modèles, appelés ballons-sondes, sont utilisés dans les domaines de la météorologie ou de l'aéronautique. Ces ballons embarquent alors dans leur nacelle, appelée radiosonde, des appareils qui effectuent des mesures locales (température, pression atmosphérique,...) de l'atmosphère.

Un ballon-sonde est constitué d'une *chaîne de vol* :

- le ballon lui-même ;
- un parachute (qui permet au système de redescendre doucement sur terre si le ballon explose en altitude, ce qui est le cas pour les ballons dont l'enveloppe n'est pas rigide) ;
- un réflecteur radar (qui permet de localiser le ballon) ou un système de radiolocalisation ;
- et enfin la nacelle (une boîte qui contient les instruments de mesures et qui doit résister autant que possible au choc de l'atterrissage).



http://www.annee-polaire.fr/api/la_recherche_francaise_et_l_api/99_ozone_layer_and_uv_radiation_in_a_changing_climate_evaluated_during_ipy.html



<http://www.isturm.fr/allemand-ballonsonde.php>

4.2. Pourquoi utiliser de l'hélium ?

L'hélium est un gaz qui est environ cinq fois plus léger que l'air (sa masse volumique est environ cinq fois plus petite que celle de l'air). Pour cette raison, un même volume d'hélium permet de soulever une charge plus importante que le même volume d'air.

Les ballons gonflés à l'hélium présentent un deuxième avantage : le gaz contenu dans l'enveloppe n'étant pas chauffé, le ballon décolle sans personne à son bord et sans brûleur ce qui représente un considérable gain de charge.

4.3. Les rozières

Les rozières sont des aérostats un peu particuliers : ils allient les qualités des montgolfières et des ballons à l'hélium. Une rozière est constituée de deux compartiments différents : un compartiment fermé qui contient un gaz plus léger que l'air (souvent de l'hélium) et un compartiment ouvert qui contient de l'air qui est chauffé par un brûleur.

C'est l'hélium qui assure le maximum de la flottabilité, le contrôle de l'altitude se fait en modifiant la température de l'air.

L'autonomie de ce type de ballons est donc supérieure à celle des montgolfières.



<http://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photos-breitling-orbiter-balloon-chateau-d-oex-2010-image12679738>

Chapitre 2 – L'air, ce gaz dans lequel nous baignons quotidiennement

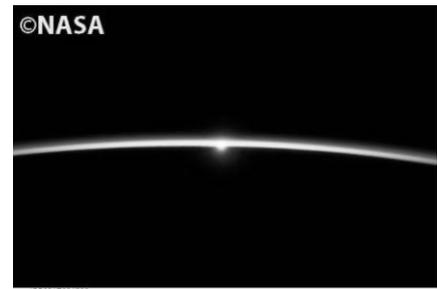
1. Introduction

L'air est omniprésent autour de nous et vital pour notre santé : sans lui, respirer, gonfler un ballon, allumer une bougie, faire voler les avions ou faire monter une montgolfière... serait impossible et pourtant, sauf lorsqu'il se déplace (courant d'air, vent, fuite dans un ballon, sèche-cheveux, ventilateur...), les enfants n'ont pas forcément conscience de sa présence.

Ce chapitre va vous permettre de vous remémorer quelques-unes des propriétés de l'air, de revisiter la notion de pression atmosphérique (que représente cette notion, comment la mesurer, son lien avec la météorologie...) et de retravailler le mécanisme de la respiration chez l'homme.

2. L'atmosphère terrestre

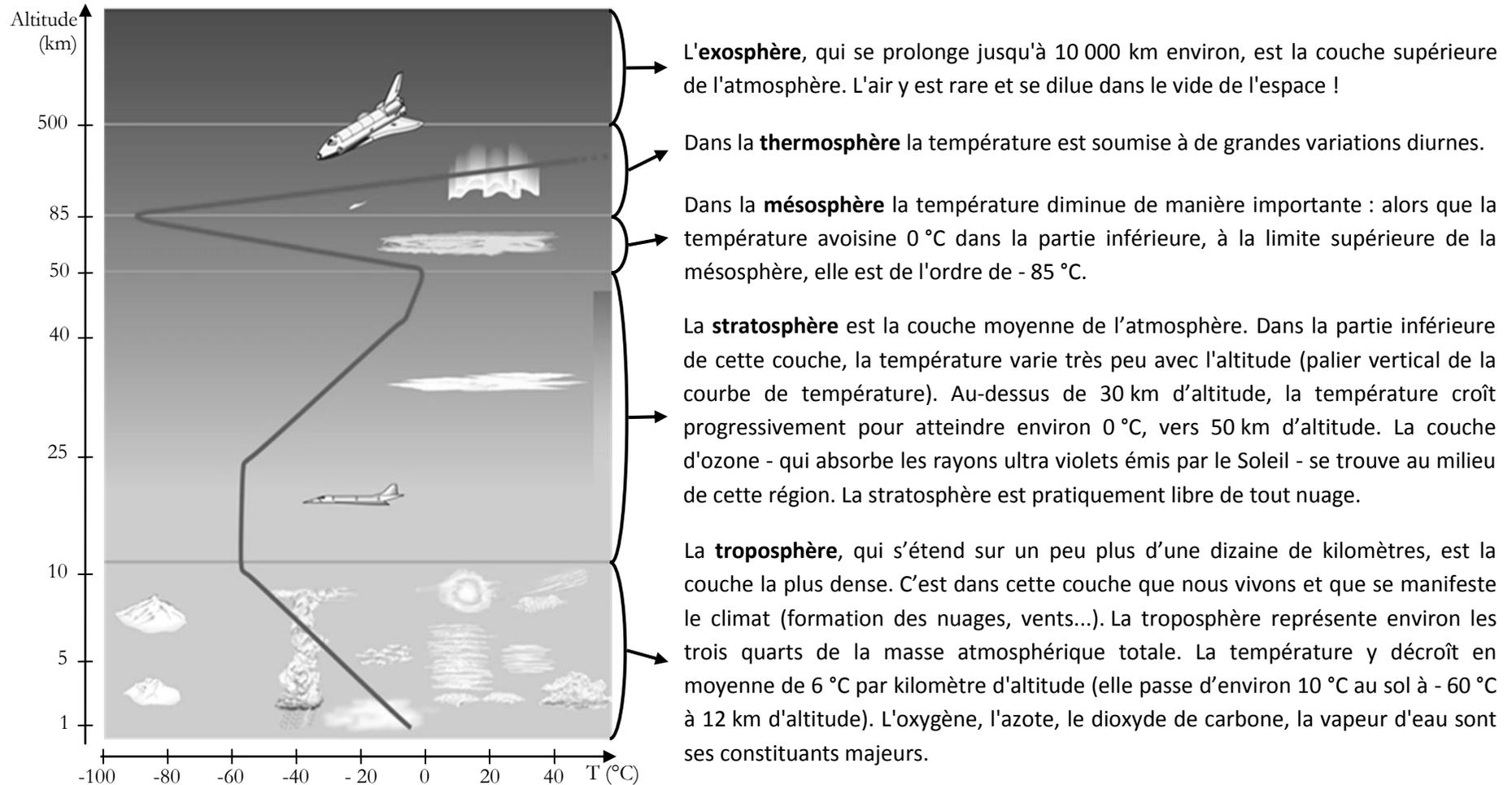
L'atmosphère¹ est la couche d'air qui entoure le globe terrestre. Son origine remonte à l'époque de la formation de la Terre, il y a près de 5 milliards d'années ! Vue de l'espace, l'atmosphère ressemble à un halo de lumière bleu foncé enveloppant notre planète.



L'atmosphère terrestre est généralement découpée en cinq strates successives désignées par le suffixe « sphère » : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère. Ces strates ont des caractéristiques bien spécifiques. Les plus importantes sont reprises ci-dessous en regard de la zone correspondante sur le dessin.

¹ Le mot atmosphère provient du grec : atmos (vapeur) et sphaira (corps rond).

Ces zones sont séparées par des surfaces (tropopause, stratopause, mésopause et thermopause) qui, pour des raisons de clarté, ne sont pas reprises ci-dessous.



<http://www.larousse.fr/encyclopedie/>

Comme signalé dans la description de la troposphère, les deux composants majoritaires de notre atmosphère sont à 78% l'azote (on devrait dire du diazote) et à 21% l'oxygène (on devrait dire du dioxygène). D'autres gaz sont aussi présents dans l'atmosphère mais en moindres proportions : l'argon (0,93%), le gaz carbonique² (0,033%), l'hydrogène (0,00005%)... L'atmosphère contient aussi de la vapeur d'eau (entre 0 et 4%) et des particules solides provenant de l'activité humaine ou d'origine naturelle comme des poussières.

L'atmosphère fournit l'air que nous respirons, maintient une température relativement clémente sur Terre et, grâce à sa couche d'ozone, nous protège contre les rayonnements solaires nocifs.

3. L'air est un gaz

Comme tous les gaz, l'air possède certaines propriétés : il est compressible, expansible et pesant.

3.1. L'air est compressible

L'expérience classique consiste à prendre une seringue (sans aiguille), la remplir d'air, maintenir la sortie fermée avec un doigt et pousser sur le piston. Cette poussée permet d'enfoncer une partie du piston dans le cylindre de la seringue. Après quelques instants le mouvement du piston s'arrête. L'air qui occupait un certain volume avant la poussée du piston est maintenant enfermé dans un volume plus petit : il a été comprimé (cette compression a une limite).

3.2. L'air est expansible

Une fois la pression manuelle sur le piston arrêtée, l'air comprimé poussant sur le piston, celui-ci revient à sa position initiale. L'air est expansible. L'air, comme tous les gaz, occupe tout le volume mis à sa disposition.

3.3. L'air est pesant

L'air a une masse : dans des conditions que l'on qualifie de « normales » (c'est-à-dire à une température de 0 °C et sous une pression de 1013 hPa) un litre d'air a une masse d'environ 1,2 g.

Pour prendre conscience de cette masse, il est possible de réaliser une expérience relativement simple qui nécessite peu de matériel : un ballon de foot (l'idéal est de disposer d'un ballon qui soit peu déformable et qui garde une forme la plus ronde possible, même une fois dégonflé) et une balance à deux plateaux (ou un système équivalent) sensible au gramme près.

Dans un premier temps, il faut déposer le ballon dégonflé (mais non déformé) sur l'un des plateaux et équilibrer la balance. Dans un deuxième temps, il faut gonfler le ballon au maximum (il doit être vraiment très dur) avec une pompe pour bicyclette. Enfin, il suffit de redéposer le ballon gonflé sur le plateau de la balance et d'observer le comportement de celle-ci. La balance

² Le gaz carbonique (CO₂) se dissout facilement dans l'eau : dans les boissons pétillantes un litre d'eau dissout un litre de CO₂.

n'est plus équilibrée mais penche du côté du ballon gonflé. La balance montre donc que l'air insufflé dans le ballon a bien une masse et donc un poids. L'air est pesant.

Remarque : Certains manuels proposent, pour montrer que l'air est pesant, de réaliser une expérience avec une tige horizontale suspendue en son milieu (faisant office de balance de Roberval) aux extrémités de laquelle il suffirait de suspendre d'un côté un ballon de baudruche (ballon de fête) vide et de l'autre côté un ballon de baudruche rempli d'air. La tige serait alors censée s'incliner du côté du ballon rempli. On remarque qu'il n'en est rien : si la balance est bien équilibrée au départ, sans les ballons, elle reste équilibrée avec les ballons. C'est la poussée d'Archimède (voir *Chapitre 4 - La poussée d'Archimède*) qui est responsable de cet équilibre. En effet la poussée d'Archimède s'exerce sur le ballon gonflé³ : elle pousse sur ce ballon du bas vers le haut avec une intensité exactement égale au poids du volume d'air déplacé. Elle compense donc exactement le poids de l'air ajouté dans le ballon et « efface » donc l'effet de déséquilibre.

4. La pression atmosphérique

4.1. Qu'est-ce qu'une pression ?

Quelques exemples :

1. Lorsque nous poussons avec notre main sur un objet, notre main exerce une pression sur cet objet (nous pouvons même le déformer).
2. Lorsque nous marchons, notre pied exerce une pression sur le sol :
 - a. Si nous marchons avec des chaussures à talon ou des chaussures de basket, la pression est différente : plus importante au niveau du talon pointu que de la chaussure de basket. La surface de contact joue donc un rôle important ! Plus la surface est importante, plus la pression est petite. 
 - b. Une personne adulte et lourde n'exercera pas non plus la même pression sur le sol qu'un enfant. Le poids (la force) de la personne joue donc aussi un rôle important ! Plus la force exercée est importante, plus la pression est importante. 

Définition :

Nous venons de voir que la pression augmente si :

- la surface diminue (exemple a) ;
- la force (pour être plus précis : la force qui agit perpendiculairement à la surface de contact) augmente (exemple b).

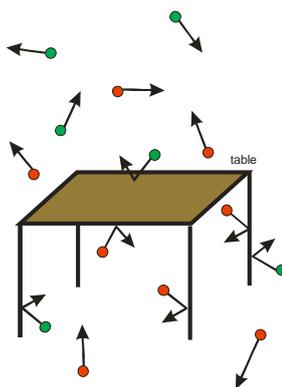
La pression est définie comme étant le rapport de ces deux grandeurs : $P = \frac{F}{S}$. Elle se mesure en Pascal, en millibar ou en hectopascal (voir paragraphe 7 de ce chapitre).

³ La poussée d'Archimède s'exerce aussi sur le ballon dégonflé mais de façon négligeable puisque le ballon est plat.

4.2. La pression atmosphérique

Même si elle fait partie de notre langage courant, la notion de pression atmosphérique n'est pas aisée à aborder.

Pour la comprendre il faut s'imaginer que l'air qui nous entoure est constitué de molécules⁴ (un peu comme des petites billes) qui sont invisibles à nos yeux mais qui s'agitent dans **tous** les sens et dans **toutes** les directions. En s'agitant, ces molécules tapent sur tous les objets qu'elles rencontrent (par exemple la table ci-dessous). Dans notre quotidien, ces molécules tapent sur les meubles, les objets qui nous entourent, les êtres vivants, les végétaux... L'air exerce donc une pression sur les objets. On appelle cette pression, la pression atmosphérique (exercée par l'atmosphère).



Pour avoir une idée de la valeur de cette pression sachons que chaque cm^2 de notre peau supporte le poids d'un kilogramme. Nous ne sentons pas cette pression parce que notre corps y est habitué mais aussi parce qu'elle s'exerce dans toutes les directions.

Lors des bulletins météorologiques, la pression atmosphérique est donnée en «millibar» (voir §7 de ce chapitre) ou «hectopascal» (voir §7 de ce chapitre). *Exemple : Aujourd'hui, la pression atmosphérique est de 1013 mBar ou 1013 hPa.*

Attention : Naturellement nous avons tous tendance à penser que la pression atmosphérique s'exerce uniquement verticalement et du haut vers le bas. Ceci est faux. Il est très important de rectifier cette croyance et d'insister sur la propriété fondamentale de la pression atmosphérique : celle-ci s'exerce dans toutes les directions (verticalement, horizontalement, obliquement...) et dans tous les sens (de la gauche vers la droite, de la droite vers la gauche, du haut vers le bas, du bas vers le haut...).

⁴ Il est possible d'introduire simplement cette notion auprès des enfants :

Prendre un morceau de craie, le casser, avec les doigts, en deux morceaux, casser un de ces morceaux encore en deux et ainsi de suite. Les morceaux seront de plus en plus petits. Ensuite, avec un marteau, on peut casser les petits morceaux en morceaux encore plus petits. Enfin, si on avait un outil suffisamment précis (que l'on n'a pas en classe), on pourrait casser ces très petits morceaux en morceaux tellement petits qu'à un moment, on obtiendrait les plus petits morceaux possibles qui soient encore de la craie (qui aient quand même les mêmes propriétés chimiques que le morceau de craie original). Ces morceaux extrêmement petits, s'appellent des « molécules ».

On peut donc dire que la pression atmosphérique est la pression qui est exercée, sur les objets, les personnes, les animaux, les végétaux, par la colonne d'air qui se trouve au-dessus mais en ayant à l'esprit l'avertissement du paragraphe précédent.

4.3. Comment approcher cette notion avec les élèves ?

Il existe plusieurs approches possibles et complémentaires les unes des autres pour aborder cette notion. Ces approches font appel à des analogies qui ont, malheureusement, comme toutes les analogies, leurs limites. Celles que nous proposons ci-dessous n'échappent pas à la règle et nous devons donc toujours être très prudents et conserver en mémoire ces limites.

La première analogie, assez parlante, pour approcher la notion de pression atmosphérique est celle de la « pile de crêpes ». Chacune des crêpes d'une pile est soumise à la pression imposée par le poids de toutes les crêpes qui se trouvent au-dessus d'elle. Cette analogie permet notamment de comprendre la diminution de la pression lorsque l'altitude augmente. En effet, dans une pile de crêpes, la crêpe qui se trouve tout en dessous est soumise au poids de toutes les crêpes qui se trouvent au-dessus d'elle. Elle est donc soumise à une pression « importante ». Par contre, la crêpe qui se trouve à mi-hauteur est soumise à un poids deux fois plus faible et donc à une pression qui diminue dans les mêmes proportions. Quant à la deuxième crêpe de la pile, elle n'est soumise qu'au poids de la crêpe précédente et donc à une pression encore plus faible. Il en va de même pour l'air. Au niveau de la mer la pression dépend du poids de toute la colonne d'air qui se trouve au-dessus. Plus on monte en altitude, plus cette colonne diminue et donc plus la pression atmosphérique diminue. Le danger d'employer cette analogie est qu'elle peut laisser penser que la pression atmosphérique s'exerce uniquement verticalement et du haut vers le bas. Ce qui est faux, la pression atmosphérique s'exerce dans toutes les directions et dans tous les sens. Il est possible de le vérifier dans la vie quotidienne : il n'est pas plus facile d'ouvrir une conserve sous vide, le pot renversé, la tête en bas (dans l'espoir d'éviter l'influence de la pression atmosphérique) que dans le sens habituel. Pour s'en convaincre, les élèves peuvent

réaliser en classe les deux défis de la fiche expérience n°3  .

Une deuxième façon de visualiser le concept de pression atmosphérique consiste à demander aux élèves de se déplacer dans une partie de la classe, chaque enfant représentera une molécule du gaz. Les enfants marcheront assez vite et changeront de direction (tourneront à gauche, à droite, se « cogneront » aux murs et repartiront...) sans se préoccuper du trajet des voisins, ni des murs (dans la limite de la sécurité des élèves bien évidemment !). En marchant suffisamment vite, les enfants vont inévitablement se cogner entre eux et se cogner aux murs. Ces chocs permettent de visualiser de manière macroscopique les chocs entre molécules de gaz. Si l'endroit est de plus en plus restreint (délimitez l'espace réservé aux enfants avec des chaises et rapprochez de plus en plus les chaises les unes des autres), le nombre de chocs entre enfants va augmenter. Il en va de même pour un gaz : la pression en son sein augmente si le volume disponible pour ce gaz diminue. L'inconvénient de ce modèle est que les élèves risquent de penser cette fois que les chocs ne se produisent que dans un plan horizontal, celui du sol. On arrive donc à une autre limite du modèle. Il est donc très important que l'enseignant insiste sur le fait qu'il ne s'agit que d'un modèle et que ce modèle a malheureusement ses limites.

Il est éventuellement possible de parer aux limites des deux premiers modèles en utilisant un troisième modèle qui, lui aussi, a ... ses limites ! Ces dernières sont d'une part d'ordre expérimental et d'autre part, et cela est plus embêtant, d'ordre pédagogique. Le modèle est essentiellement constitué d'un aquarium, de quelques boules de polystyrène, d'un aspirateur qui servira de soufflerie (il suffit de brancher le tuyau sur la bouche d'air d'évacuation et non sur la bouche d'aspiration) et d'un morceau de carton aux dimensions intérieures de l'aquarium. Les boules de polystyrène (de couleurs différentes pour représenter les différents gaz) sont placées dans l'aquarium, l'aquarium est recouvert du couvercle en carton (préalablement percé d'un trou d'un diamètre égal au diamètre du tuyau de l'aspirateur). Lorsque la soufflerie est mise en route, les boules de polystyrène qui se trouvent dans l'aquarium s'agitent dans tous les sens et dans toutes les directions (les deux contraintes des modèles précédents sont bien levées), se cognent entre elles ou aux parois de l'aquarium. Il s'agit alors d'une bonne visualisation des chocs entre molécules de gaz. Il est intéressant de reconnaître que ce modèle permet aussi de montrer comment varie la pression atmosphérique en fonction du volume : plus le couvercle s'enfonce dans l'aquarium plus le nombre de chocs augmente de manière significative. Mais aussi comment varie la pression en fonction de la température : l'augmentation (ou la diminution) du débit d'air de la soufflerie simule l'augmentation (ou la diminution) de la température ce qui a pour effet visuel l'augmentation (ou la diminution) du nombre de chocs. Malheureusement ces chocs se font pendant un temps assez bref : très rapidement toutes les boules se dirigent le plus loin possible de la soufflerie (effet courant d'air) et restent ensuite plaquées contre les parois (on a ce que l'on appelle un effet d'anisotropie – on n'a pas les mêmes propriétés dans toutes les directions). La deuxième limite, d'ordre pédagogique est facilement compréhensible : pour montrer le concept de pression atmosphérique le modèle se base sur la soufflerie, donc sur une différence de pression atmosphérique ...

La dernière analogie dont nous parlons ici consiste à montrer aux élèves une animation téléchargeable sur Internet. Cette animation est assez parlante et permet à l'enseignant et aux élèves de modifier certains paramètres. Voici son adresse :

http://cnfpc.gtlux.com/files/sani/site%20web%20electricite%20de%20base/site/_private/quatrieme/chimie/air_pression.htm

Nous le répétons, aucune de ces analogies ne se suffit à elle-même, chacune a ses limites et peut être considérée comme complémentaire aux autres.

4.4. Le parfum qui se répand dans une pièce

Tous les corpuscules qui constituent l'air se déplacent très vite dans l'air, à la vitesse moyenne d'environ 300 m/s (soit un peu plus de 1000 km/h !!). Pourtant, un parfum, lâché dans un coin d'une pièce met un certain temps pour arriver à un autre endroit. Ce laps de temps nécessaire est dû au fait que les corpuscules ne se déplacent pas en ligne droite mais se cognent constamment les uns aux autres et donc changent continuellement de direction. Il faut donc attendre un certain temps pour que le parfum arrive à un endroit précis.

5. La mesure de la pression atmosphérique

L'appareil qui mesure la pression atmosphérique est le baromètre.

5.1. Un peu d'histoire

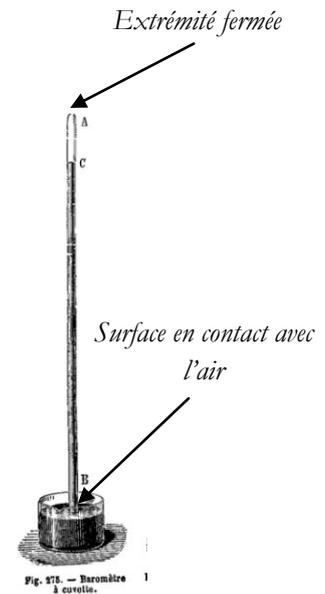
L'un des premiers baromètres qui ait été inventé est celui imaginé par Torricelli. Il s'agit du plus simple des baromètres mais aussi du plus encombrant (+/- 1 m de long).

Ce baromètre est constitué de trois éléments importants :

- un tube en verre fermé à son extrémité haute et ouvert son extrémité basse ;
- un récipient assez large ;
- du mercure⁵.

Le tube est complètement rempli de mercure et est retourné dans un récipient contenant lui aussi du mercure. La surface de ce dernier est directement en contact avec l'air de la pièce.

Suivant son intensité, la pression atmosphérique appuie plus ou moins fort sur le mercure situé dans le récipient ouvert. Une pression importante fait descendre le niveau de mercure dans le récipient ouvert et fait donc monter le niveau de mercure dans le tube. Ce niveau haut annonce le beau temps. Une pression faible, un niveau plus bas dans le tube, annonce la pluie ou la tempête. Les inconvénients majeurs de ce baromètre sont son instabilité et sa fragilité.



⁵ Le mercure est un produit toxique pour l'homme et l'environnement.

5.2. Le baromètre à mercure

Le baromètre à mercure est, comme son nom l'indique, basé lui aussi sur le principe d'une variation de la hauteur d'une colonne de mercure.

La colonne de mercure (partie gauche de l'illustration ci-contre) est surmontée par le vide, et est donc hermétiquement fermée dans sa partie supérieure. La partie de droite est par contre « ouverte » : il y a bien un bouchon mais celui-ci n'est pas vissé (il est présent uniquement pour éviter que la poussière ne vienne se déposer) et permet à l'air de passer.

La pression atmosphérique agissant sur le ménisque du tube de droite est exactement équilibrée par la pression due au poids de la colonne de mercure dans la colonne de gauche (dont la hauteur est celle mesurée à partir du niveau du ménisque du tube de droite). Ainsi, lorsque la pression atmosphérique augmente (ou diminue), la colonne de mercure de gauche monte (ou descend).

Ce baromètre n'est plus tellement utilisé, car il est fragile, coûteux et le mercure est toxique (il est d'ailleurs interdit de le manipuler dans les classes).

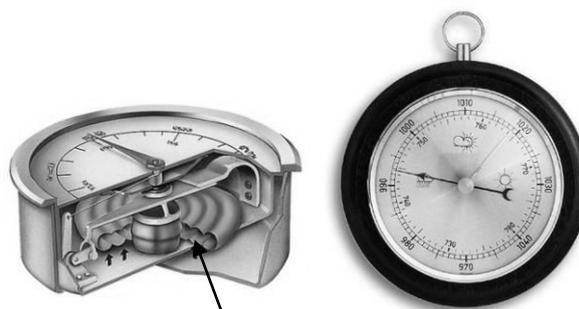
Le baromètre à mercure est avantageusement remplacé par d'autres types de baromètres comme, par exemple, le baromètre anéroïde (ou métallique) et le baromètre digital.



5.3. Le baromètre anéroïde

L'élément essentiel du baromètre métallique (appelé aussi anéroïde – aérien en grec) est sa boîte métallique vide d'air.

Plus l'air de la pièce presse sur le couvercle (petites flèches sur le dessin), plus celui-ci s'incurve. Le déplacement du couvercle provoque la rotation d'une aiguille devant le cadran, celle-ci indique la valeur de la pression atmosphérique. Un système de rappel fait reprendre au couvercle sa forme initiale lorsque la pression revient à sa valeur initiale.



Boîte métallique vide d'air

5.4. Les appareils électroniques

Les appareils électroniques affichent souvent plusieurs grandeurs : températures, heure, date, prévisions météo...



6. Unités de pression dans les gaz

L'unité de pression est le Pascal (symbole : Pa)

La pression atmosphérique s'exprime en hectopascal (1 hPa = 100 Pa) : on parle, par exemple, d'une pression atmosphérique de 1013 hPa.

Il existe aussi deux autres unités de pression :

- les millimètres de mercure (noté : mm de Hg) qui font référence à la hauteur, mesurée en mm, de la colonne de mercure ;
- les bars (symbole : bar) ou en millibar (symbole : mbar) qui est mille fois plus petit que le bar (1 bar = 1000 hPa, donc 1 mbar = 1 hPa). Les pressions qui existent dans les bouteilles de boissons gazeuses ou dans les pneus sont exprimées en bar (environ 2 bars dans les pneus des voitures, 3 ou 4 bars dans les boissons gazeuses, 150 bars dans les bouteilles d'oxygène...).

Ainsi au niveau de la mer, la pression atmosphérique est de 760 mm de Hg ou 1013 hPa, ou 1013 mbar.

7. Influence de la température sur la pression atmosphérique

Le Soleil ne chauffe pas la Terre dans son entièreté partout de la même manière. Ainsi se succèdent les jours, les nuits, les saisons et apparaissent des régions plus chaudes, d'autres plus froides.

La pression atmosphérique, variant avec la température, sera donc différente d'une région à une autre. Certaines régions seront le siège de hautes pressions (anticyclones), d'autres, de basses pressions (dépressions).

Les anticyclones annoncent le beau temps tandis que les dépressions amènent les nuages, la pluie et parfois la tempête.

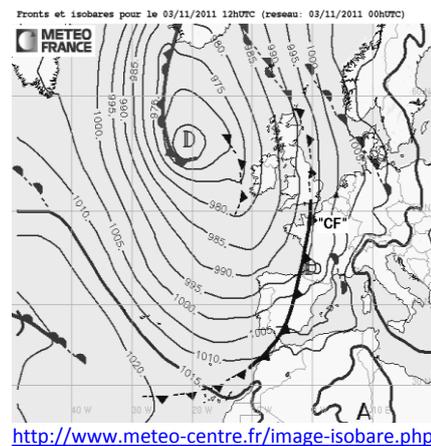
Les mécanismes de formation d'anticyclones et de dépressions sont repris dans l'annexe n° 2.

Dans les conditions extrêmes, la valeur de la pression atmosphérique peut varier entre 880 hPa et 1080 hPa.

Le tableau ci-dessous reprend, à titre indicatif, les conditions météorologiques habituellement associées à différentes valeurs de la pression atmosphérique. Il faut cependant toujours avoir à l'esprit que beaucoup de facteurs peuvent intervenir sur le terrain et modifier ces conditions !

Pression en mm Hg	Pression en hPa	Tendance
730	973	Tempête
750	1000	Pluie-vent
760	1013	Variable
770	1026	Beau temps
790	1053	Très sec

Les météorologues délimitent les zones d'égale pression (isobares) par des courbes. De part et d'autre de ces courbes, les pressions atmosphériques sont différentes :



Les vents sont constitués par des déplacements de l'air d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. Il y a des vents planétaires plus ou moins permanents mais aussi des perturbations passagères associées à des fluctuations du temps.

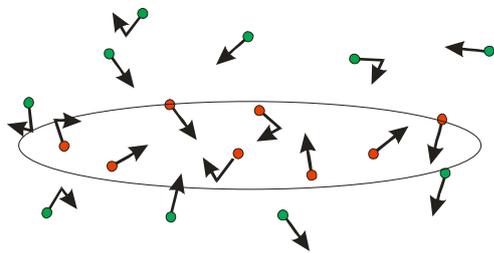
8. Influence de l'altitude sur la pression atmosphérique

La pression atmosphérique varie aussi avec l'altitude. Cette diminution de pression est visible sur les deux photos du même paquet de chips, l'une prise à une altitude proche de la mer, l'autre en montagne :

A une altitude proche de la nôtre :



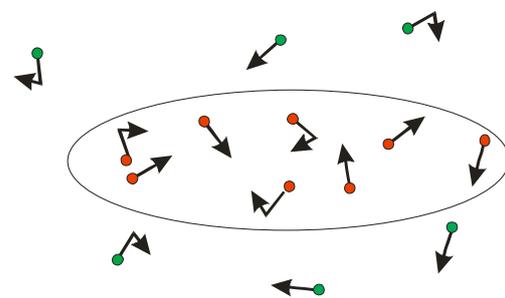
Le paquet⁶ est soumis à une certaine pression et il a l'aspect qu'on lui connaît habituellement.



En montagne :



Le paquet¹⁰ « est gonflé ». En réalité, il ne contient pas plus d'air, c'est le même paquet que celui de la photo de gauche, mais il est soumis à une pression atmosphérique plus faible, donc il occupe un plus grand volume.



- air situé dans l'atmosphère
- air situé dans le paquet de chips

Ainsi, au niveau de la mer, la pression atmosphérique est de l'ordre de 1013 hPa mais à une altitude de 5500 m, elle ne vaut plus alors que 507 hPa. Au sommet de l'Everest (point culminant de la Terre), c'est-à-dire à 8800 m d'altitude, elle vaut seulement 314 hPa.

9. La respiration

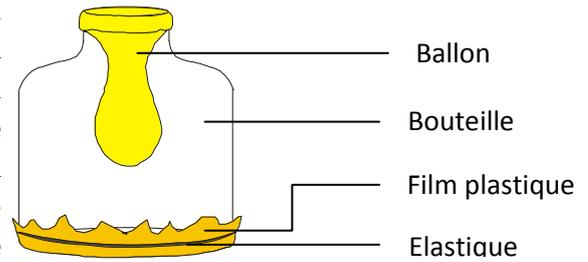
Inévitablement, en parlant de l'air, les élèves auront naturellement des questions qui leur viendront à l'esprit à propos de la respiration.

Un modèle très simple du système respiratoire

Avec très peu de matériel (une bouteille en plastique de 1,5 l, un ballon de baudruche, un sac d'emballage de grande surface et un élastique) il est possible de construire un modèle très simple de l'appareil respiratoire.

⁶ <http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/physique/pression-altitude.htm>

Dans un premier temps il faut découper le fond de la bouteille, ensuite remplacer ce fond par la membrane plastique maintenue à la bouteille par un élastique (la membrane ne doit pas être trop tendue car il devra être possible de la déformer en tirant ou en poussant dessus). Ensuite il suffit de fixer le ballon sur le goulot de la bouteille à l'intérieur de celle-ci.

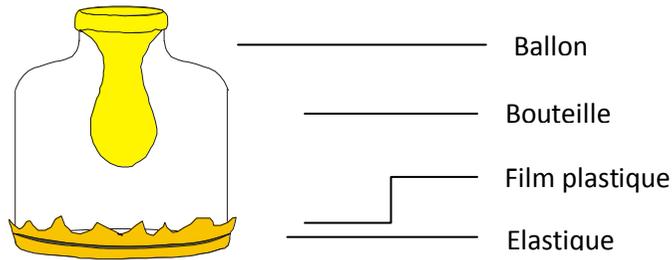


Les élèves peuvent constater qu'à chaque traction vers le bas de la membrane, le ballon se gonfle et qu'à chaque poussée vers le haut de la membrane, le ballon se dégonfle !

Il est alors possible de chercher la correspondance entre les différents éléments du modèle et les différentes parties de notre système respiratoire ainsi que le rôle joué par chacune de ces parties (voir page suivante) :

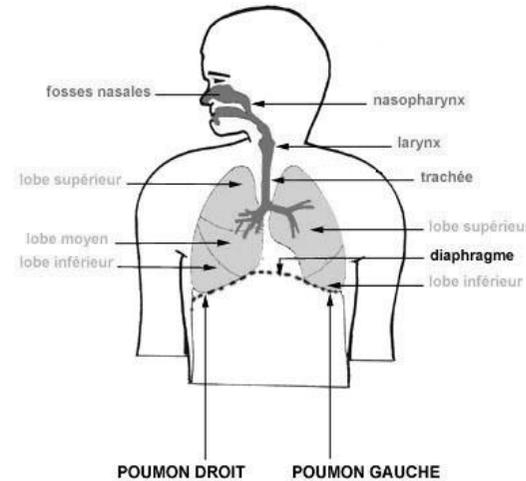
Dans le modèle construit :

La bouteille représente.....
 Le goulot du ballon représente.....
 Le ballon représente.....
 La membrane représente.....



Dans notre corps :

.....la cage thoracique
la trachée
un poumon
 le diaphragme



Lorsque la membrane est tirée vers le bas, celle-ci s'abaisse.

Le volume à l'intérieur de la bouteille augmente.
 La pression à l'intérieur de la bouteille diminue et donc le ballon peut se gonfler plus facilement.
 L'air entre dans le ballon qui donc se gonfle.

Lorsque la membrane est poussée vers le haut, le volume diminue.

La pression augmente à l'intérieur de la bouteille et comprime donc le ballon. L'air est expulsé du ballon.

Lorsque nos muscles se contractent, la cage thoracique se dilate, le diaphragme s'abaisse. Les poumons suivent le mouvement de la cage thoracique (par l'intermédiaire de la plèvre).

Le volume des poumons augmente.
 La pression à l'intérieur des poumons diminue.
 L'air entre par le pharynx, le larynx et la trachée : c'est **l'inspiration** (phénomène actif).

Quand les muscles et le diaphragme se relâchent, de par son élasticité, la cage thoracique reprend son volume initial et le diaphragme se relève.

Le volume des poumons diminue.
 La pression augmente à l'intérieur des poumons.
 L'air est chassé : c'est **l'expiration** (phénomène passif).

Le modèle proposé à la page précédente présente deux inconvénients : il ne modélise qu'un seul poumon et ne permet pas de voir les changements de volume de la cage thoracique. Cependant, à condition de discuter avec les élèves de ces deux limites, et au vu de sa simplicité, la facilité de construction et son coût quasi nul, nous pensons qu'il est tout à fait pertinent de le construire avec les élèves.

Il existe aussi d'autres modèles en vente chez les firmes qui proposent du matériel didactique, notamment un modèle plus élaboré en vente au *Centre Technique et Pédagogique de l'enseignement de la Communauté française* (+/- 80 euros) qui contient deux ballons (deux poumons) mais pour lequel le problème de la mobilité de la cage thoracique n'est pas, non plus, résolu.

Quelques litres d'air par jour !

Il est facile d'estimer la quantité d'air inspirée et expirée, chaque jour, lors de respirations normales (donc au repos, sans fournir d'effort particulier).

Pour réaliser cette expérience, il faut : un aquarium (ou grand récipient), une bouteille en plastique (eau...) de 1,5 litre graduée à l'envers, un tuyau en plastique (de +/- 1 m), de l'eau, un feutre et ... très certainement une serpillère ou un essuie !

Dans un premier temps, il faut remplir le grand récipient d'eau à moitié (pendant l'expérience l'eau va s'évacuer de la bouteille et remplir l'aquarium), ensuite remplir aux 3/4 (la bouteille d'eau, la fermer avec le bouchon. Ensuite renverser la bouteille dans l'aquarium, la maintenir verticalement (le mieux est qu'un autre élève tienne la bouteille) et repérer le niveau d'eau dans la bouteille.

Ensuite il faut, tout en maintenant la bouteille en position verticale, enlever le bouchon (la bouteille ne se vide pas !) et insérer une extrémité du tuyau dans le goulot de la bouteille.

L'élève qui souhaite mesurer sa capacité thoracique inspirera alors normalement et soufflera normalement dans l'autre extrémité du tuyau (voir photo ci-contre sur laquelle le jeune garçon, trop motivé, souffle, lui, en forçant ...). Lorsque l'expiration est terminée, il faut repérer à nouveau le niveau d'eau dans la bouteille en faisant un petit trait avec un marqueur. Le niveau d'eau a donc baissé dans la bouteille. Le volume d'eau a été chassé par un volume d'air équivalent provenant des poumons de l'élève. En général, ce volume est de l'ordre de 200 à 300 ml.



Un calcul rapide permet d'estimer le volume d'air expiré chaque jour :

En inspirant normalement, environ 200 à 300 ml d'air entrent dans nos poumons.

En estimant⁷ à environ 15 le nombre de respirations par minute, la quantité d'air expirée est entre 3 et 4 litres par minute ($15 \times 250 \text{ ml} = 3\,750 \text{ ml}$ soit 3,750 litres). Après une heure, le

⁷ Notre respiration dépend de nos activités :

Quand nous dormons, nous respirons plus calmement (10 à 12 respirations par minute). Quand nous marchons, le rythme augmente et passe à +/- 19 respirations par minute. Quand nous faisons du sport, les

volume expulsé est de 225 litres ($60 \times 3,75$ litres) et après 24 heures, le volume sera de $24 \times 225 = 5\,400$ litres, donc plus de 5000 litres !!!

besoins en oxygène de notre corps augmentent : le rythme respiratoire s'accélère et passe à +/- 6 litres d'air par minute. Quand nous sommes stressés, les mouvements de notre cage thoracique sont plus petits mais plus nombreux.

Chapitre 3 - La poussée d'Archimède

1. Introduction

La poussée d'Archimède ne fait pas partie des notions enseignées dans l'enseignement fondamental. Cependant, c'est grâce à cette poussée que de nombreux phénomènes se produisent dans la nature et que les montgolfières peuvent s'élever dans le ciel. Il nous a donc semblé judicieux de lui consacrer, à elle seule, un chapitre.

A nouveau, il est bien évident que les notions qui suivent ne sont pas à travailler avec les élèves. Ces notions sont présentées ici dans le seul but de rendre l'enseignant plus à même d'appréhender la thématique dans toute sa globalité.

2. Énoncé du principe d'Archimède

Le principe d'Archimède s'énonce de la manière suivante : « *Tout corps plongé dans un fluide⁸ subit de la part de ce fluide une poussée dirigée verticalement, du bas vers le haut, appliquée au centre de poussée et égale au poids du volume du fluide déplacé.* »

Notons que par « poids du volume du fluide déplacé » on entend : le « poids du volume du fluide dont le solide occupe la place », autrement dit encore « le poids du volume de fluide correspond à la partie immergée du solide ».

Donc par exemple, pour un bateau, il s'agit du poids du volume d'eau qui remplirait la partie immergée de la coque, pour une montgolfière, il s'agit du poids du volume d'air ambiant qui remplirait l'enveloppe (l'enveloppe est en réalité, tout le monde le sait, remplie d'air fortement chauffé).

Comment se manifeste cette poussée d'Archimède ?

3. Dans les liquides

3.1. Un ballon dans l'eau

Prenons un exemple très simple : quand nous essayons d'enfoncer un ballon dans l'eau d'une piscine (ou de la mer), nous nous rendons compte que ce n'est pas si facile et que, lorsque nous lâchons le ballon, celui-ci remonte à la surface et jaillit de l'eau. Cela veut dire que nous poussons sur le ballon avec une force dirigée vers le bas mais que l'eau pousse aussi sur le ballon avec une force dirigée vers le haut. Cette force, dirigée du bas vers le haut et exercée par l'eau sur le

⁸ Les gaz et les liquides sont des fluides.

ballon, est la poussée d'Archimède (pour plus de détails, le calcul complet des valeurs numériques est repris dans l'annexe n° 3).

3.2. Coulera, coulera pas ?

Nous savons tous que si nous déposons à la surface de l'eau une petite balle en polystyrène⁹, un petit caillou ayant à peu près le même volume, une boule de pâte à modeler et la même quantité de pâte, mais cette fois façonnée sous la forme d'une petite coque de bateau, certains objets flotteront, d'autres couleront au fond de l'eau.

La bille en polystyrène et la pâte à modeler en forme de coque de bateau flottent à la surface de l'eau. Le caillou et la boule de pâte à modeler coulent au fond de l'eau. D'où provient cette différence ?

Pour le comprendre il suffit de faire le bilan des forces qui agissent sur chaque objet. Ces forces sont¹⁰ :

- vers le bas : le poids de l'objet qui entraîne celui-ci vers le fond de l'eau ;
- vers le haut : la poussée d'Archimède (force dont l'intensité est égale au poids du volume de liquide déplacé – ici l'eau) qui pousse l'objet vers la surface.

Quelles sont les possibilités pour ces deux forces ?

- Si le poids est plus important que la poussée d'Archimède, la force résultante est dirigée vers le bas et l'objet coule jusqu'au fond de l'aquarium.
- Si la poussée d'Archimède est supérieure au poids de l'objet, la force résultante est dirigée vers le haut l'objet remonte à la surface.
- Si la poussée d'Archimède et le poids sont égaux, la force résultante est nulle, l'objet est en équilibre, entre deux eaux.

Qu'en est-il de la balle et du caillou lorsqu'on les fait descendre dans l'eau et qu'on les lâche ?

- Les deux objets ont le même volume et déplacent donc la même quantité d'eau (ils font remonter le niveau d'eau de la même hauteur), donc la poussée d'Archimède est la même.
- Par contre les poids sont différents donc les forces qui entraînent les objets vers le bas sont différentes, plus grande dans le cas du caillou que dans le cas de la balle.

La balle en polystyrène est donc soumise à une force résultante dirigée vers le haut : elle remonte à la surface. Le caillou est soumis à une force résultante dirigée vers le bas : il coule donc au fond de l'eau.

Qu'en est-il des deux objets en pâte à modeler (en forme de boule et en forme de coque de bateau) ?

⁹ Petite balle en polystyrène (*frigo-lite*).

¹⁰ D'autres forces comme les forces de frottements existent mais nous n'en tenons pas compte.

- Cette fois les poids sont donc identiques.
- Par contre les volumes déplacés sont différents (la coque déplace un volume plus important que la boule) : les poussées d'Archimède sont donc différentes (plus grande dans le cas de la coque de pâte à modeler, plus petite dans le cas de la boule de pâte à modeler) .

Le « bateau » est donc soumis à une force résultante dirigée vers le haut : il remonte jusqu'à la zone de flottaison. La boule, quant à elle, coule car son poids est supérieur à la poussée d'Archimède.

3.3. Les bateaux

La coque des bateaux est parfois peinte en deux couleurs bien distinctes. La jonction de ces deux zones correspond alors souvent à la ligne de flottaison.

Les coques des bateaux présentent aussi plusieurs traits distincts, ces traits correspondent à des eaux différentes (eaux douces, eaux salées) ou à des charges¹¹ différentes.

Lorsque cette marque est au-dessus de l'eau, le bateau peut encore être chargé (le volume immergé et donc la poussée d'Archimède peuvent encore augmenter).

Lorsque la ligne est au niveau de l'eau, la charge est maximale, un surplus entrainerait un probable déséquilibre qui pourrait être préjudiciable au bateau.



3.4. Les sous-marins

Les plongées et les remontées des sous-marins sont gérées par l'entrée et la sortie de l'eau dans les ballasts : laisser entrer de l'eau dans les ballasts alourdit le sous-marin, chasser l'eau avec de l'air comprimé allège le sous-marin.

Imaginons le sous-marin complètement immergé, la poussée d'Archimède (qui s'exerce verticalement du bas vers le haut) est maximale et constante. Le poids (qui s'exerce verticalement de haut en bas et qui entraîne le sous-marin vers le fond) varie en fonction de la quantité d'eau dans les ballasts.

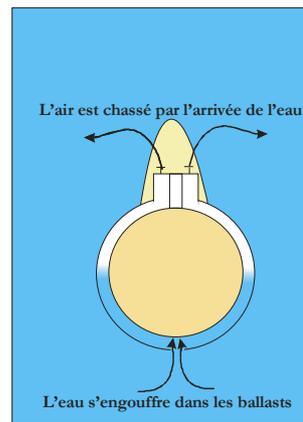
- Lorsque le poids est supérieur à la poussée d'Archimède (le sous-marin fait rentrer de l'eau dans ses ballasts), le sous-marin plonge.
- Lorsque le poids est inférieur à la poussée d'Archimède (le sous-marin fait sortir l'eau de ses ballasts), le sous-marin remonte à la surface.
- Quand le poids et la poussée d'Archimède sont égaux, le sous-marin flotte entre deux eaux.

¹¹ A chaque fois que le mot « charge » apparaît, il faut comprendre qu'il s'agit du poids total du bateau (coque et charge). C'est le poids total du bateau qui doit être comparé à la poussée d'Archimède.

Le sous-marin remonte :



Le sous-marin plonge :



Remarque : Quand le sous-marin amorce sa sortie de l'eau, le volume immergé diminue et donc la poussée d'Archimède diminue aussi.

3.5. Le thermomètre de Galilée

Le thermomètre de Galilée est à la fois un objet de décoration et un thermomètre particulièrement précis.

Ce thermomètre est constitué d'une colonne de verre contenant un liquide transparent (probablement un mélange d'hydrocarbures) et de petites ampoules de verre lestées de petits disques. Sur ces derniers, différentes températures (allant généralement de 17 °C à 27 °C) sont inscrites.

La masse volumique du liquide contenu dans la colonne de verre (appelons-le « porteur ») est particulièrement sensible aux changements de température. Ces ampoules sont lestées de manières différentes et peuvent monter et descendre dans la colonne en fonction de la température ambiante.

Les ampoules ont été placées dans la colonne de manière suivante : la moins dense doit se trouver au-dessus, la plus dense doit se trouver en dessous. Le liquide (eau ou alcool) contenu dans les ampoules est coloré différemment d'une ampoule à l'autre pour rendre l'ensemble plus esthétique.

La masse volumique du liquide contenu dans la colonne est supérieure à celle des ampoules. Quand la température dans la pièce est inférieure à 17 °C toutes les boules flottent : la poussée d'Archimède est suffisante pour maintenir toutes les ampoules au-dessus.

Quand la température augmente, un certain nombre de boules descendent dans la colonne. Le disque fixé à l'ampoule qui est en équilibre à mi-hauteur dans la colonne donne la température¹² de la pièce. En effet quand la température augmente, la masse volumique du liquide porteur



¹² Les ampoules ne se dilatent pas.

diminue, la poussée d'Archimède diminue donc aussi. Donc, toutes les ampoules qui ont une masse volumique plus grande que celle du liquide porteur coulent les unes après les autres dans la colonne et la dernière qui se trouve équilibrée au milieu de la colonne est celle qui a la même masse volumique que le liquide transparent.

Toutes les ampoules suivantes (qui indiquent des températures supérieures) restent en haut de la colonne puisque leur masse volumique est supérieure à celle du liquide porteur.

4. Dans l'air

Dans l'air, c'est aussi la poussée d'Archimède qui permet les mouvements (montée et descente) des montgolfières.

4.1. Pourquoi les montgolfières s'élèvent-elles dans le ciel ?

Pour préparer un vol en montgolfière, il faut tout d'abord remplir le ballon d'air, ensuite, il faut chauffer cet air grâce à un brûleur. Quand l'air chauffe, l'enveloppe se soulève doucement du sol. Lorsque l'air est suffisamment chaud, la montgolfière peut s'élever dans le ciel si on la libère de ses attaches au sol.

La différence entre la température de l'air situé à l'intérieur et celle de l'air ambiant est l'un des paramètres les plus importants pour qu'une montgolfière prenne facilement de l'altitude. Plus cette différence est grande, plus la montgolfière va monter facilement. Voilà pourquoi les montgolfières décollent en début de matinée ou fin d'après-midi en été (rarement en plein soleil).



Pendant le vol, l'aérostier joue avec le brûleur : s'il donne un coup de gaz, il réchauffe l'air contenu dans l'enveloppe et permet ainsi au ballon de prendre de l'altitude. Si, au contraire, il laisse l'air se refroidir, l'engin descend. S'il s'avère que la descente doit être rapide, le pilote peut ouvrir une trappe qui se situe au sommet de l'enveloppe et permettre ainsi à l'air chaud de s'échapper.

Chapitre 4 - Corrigés des fiches d'aide

1. Corrigés des fiches « concept »

Ces fiches sont repérées par le logo :  .

Corrigé de la fiche n° 1  : Cette fiche ne nécessite pas de correction.

Corrigé de la fiche n° 2  : Les deux défis qui permettent de prendre conscience de la présence de l'air sont les deux défis proposés dans la fiche n°1  . Pour en connaître les détails, il suffit donc d'aller consulter les corrections de ces fiches.

Corrigé de la fiche n° 3  : De même, les deux défis qui permettent de prendre conscience que l'air appuie dans toutes les directions sur les objets sont les deux défis proposés dans la fiche n°3  . Il suffit donc d'aller consulter les corrections de ces fiches.

Corrigé des fiches n° 4 et 5  : Ces fiches ne nécessitent pas de correction.

2. Corrigés des fiches « organisation »

Ces fiches sont repérées par le logo :  .

Les corrections éventuelles de ces fiches se trouvent dans la série de fiches intitulées « Corrections des fiches » qui sont destinées aux élèves.

3. Corrigés des fiches « mesures »

Ces fiches sont repérées par le logo :  .

Les corrections de ces fiches se trouvent aussi dans les fiches intitulées « Corrections des fiches » et qui sont destinées aux élèves.

Néanmoins le tableau ci-dessous vous donne des valeurs à titre indicatif. Il est bien évident que ces valeurs dépendent fortement d'une part, des caractéristiques des montgolfières construites par les élèves (matière de l'enveloppe, quantité de papier collant...) et d'autre part, des conditions météorologiques (température extérieure).

Afin que les enfants aient une vue d'ensemble du travail de la classe, il peut être judicieux de présenter les résultats sous la forme d'un tableau (la première colonne n'est pas nécessaire pour les élèves, elle est reprise ici pour que l'enseignant sache à quelle fiche correspondent les résultats). Le nombre de colonnes correspondra alors au nombre de montgolfières construites.

Le tableau ci-dessous reprend les données récoltées pour trois des montgolfières construites lors des différents essais lors de l'élaboration de ce dossier :

		1 ^e montgolfière	2 ^e montgolfière	3 ^e montgolfière
Grandeur mesurée	Marguerite « mesure »			
Altitude maximale à laquelle peut monter la montgolfière	Fiche « mesure » n° 2	Entre le 1 ^e et le 2 ^e étage du bâtiment (8 ou 9 m)	21 m (mesure de la longueur de la ficelle)	27 m (mesure de la longueur de la ficelle)
Le temps de vol	Fiche « mesure » n° 4	60 sec	1,5 min	1,17 ¹³ min
La masse totale (enveloppe et nacelle) de la montgolfière	Fiche « mesure » n° 1	107 g	330 g	620 g
Le volume	Fiche « mesure » n° 5	0,75 m ³	2,5 m ³	6,4 m ³
La température extérieure	Fiche « mesure » n° 3	14 °C	0 °C	6 °C

Les deux paramètres essentiels sont la température extérieure et le volume de la montgolfière. Plus la température extérieure est faible, plus la différence de températures (air froid extérieur et air chaud intérieur à l'enveloppe) sera importante et mieux la montgolfière s'élèvera dans le ciel. De même, plus le volume sera grand, plus la poussée d'Archimède sera importante et mieux la montgolfière s'élèvera dans le ciel. Donc, pour favoriser l'envol, il vaut mieux construire une grande montgolfière et la faire voler par temps frais.

¹³ Le vol aurait probablement pu durer plus longtemps si un coup de vent n'avait pas vidé une partie de l'air contenu dans l'enveloppe.

4. Corrigés des fiches « pannes »



Ces fiches sont repérées par le logo :

Les deux fiches ne nécessitent aucune correction.

5. Corrigés des fiches « aller plus loin »



Ces fiches sont repérées par le logo :

Nous insistons sur le fait que ces fiches proposent des activités de dépassement qui ne font pas partie des objectifs visés au démarrage de l'activité. Elles permettent donc simplement aux élèves qui auraient relevé le défi de ne pas s'ennuyer en attendant les autres condisciples mais de mener la réflexion plus avant et de chercher des informations complémentaires.



Corrigé de la fiche n° 1 : Du point de vue de la présentation des valeurs, les baromètres que l'on trouve habituellement dans les maisons peuvent être classés en trois grandes familles : les baromètres à colonne de mercure, les baromètres avec aiguilles et les baromètres électroniques (voir tableau page suivante).

Baromètres à colonne de mercure	Baromètres à aiguilles	Baromètres électroniques
		
<p>Ces baromètres mesurent la pression atmosphérique grâce à la variation de la hauteur de la colonne de mercure.</p> <ul style="list-style-type: none"> -La colonne de mercure (partie gauche de l'illustration ci-dessus) est surmontée de vide et est hermétiquement fermée dans sa partie supérieure. -La partie de droite est par contre « ouverte » (il y a un bouchon qui n'est pas vissé, qui protège de la poussière mais qui permet à l'air de passer). -La pression atmosphérique agissant sur le ménisque du tube du côté droit est exactement équilibrée par la pression due au poids de la colonne de mercure dans la colonne de gauche. Ainsi, lorsque la pression augmente, la colonne de mercure de gauche monte et vice versa. 	<p>Ces baromètres mesurent la pression atmosphérique grâce à la déformation d'une capsule métallique.</p> <p>Quand la pression atmosphérique augmente, la capsule se creuse et fait tourner l'aiguille.</p> <p>Quand la pression diminue, la capsule se bombe et entraîne l'aiguille dans l'autre sens.</p> <p>L'aiguille foncée repère la pression du jour, l'aiguille dorée permet de « garder en mémoire » la pression de la veille (il est possible de la faire tourner manuellement).</p>	<p>Ces baromètres mesurent aussi la pression atmosphérique grâce à la déformation d'une capsule métallique.</p> <p>Quand la pression atmosphérique varie, la capsule se creuse ou se bombe et sa déformation est prise en compte par un système électronique qui affiche le résultat sur l'écran.</p> <p>Les appareils électroniques affichent souvent d'autres grandeurs comme l'heure, la température, la date, les prévisions météo (par icônes : nuages, soleil ...) ...</p>
<p>Les valeurs sont exprimées en millimètres de mercure.</p> <p>Par exemple la pression atmosphérique est de 760 mmHg.</p>	<p>Les valeurs sont exprimées en millibars (mbar) ou en hectopascals (hPa) qui sont deux unités équivalentes.</p> <p>Par exemple, la pression atmosphérique est de 1013 hPa, ou 1013 mbar.</p>	
<p>Ces baromètres deviennent rares car ils sont fragiles, coûteux et le mercure qu'ils contiennent est toxique pour la santé.</p>	<p>Ces baromètres sont encore très présents dans les habitations.</p>	<p>Il s'agit des baromètres les moins chers, les plus récents et les plus courants.</p>



Corrigé de la fiche n° 2 :

La fiche ne nécessite pas de correction.



Corrigé de la fiche n° 3 :

Ces ballons qui s'appellent « ballons solaires » montent dans le ciel grâce à l'énergie fournie par le Soleil.



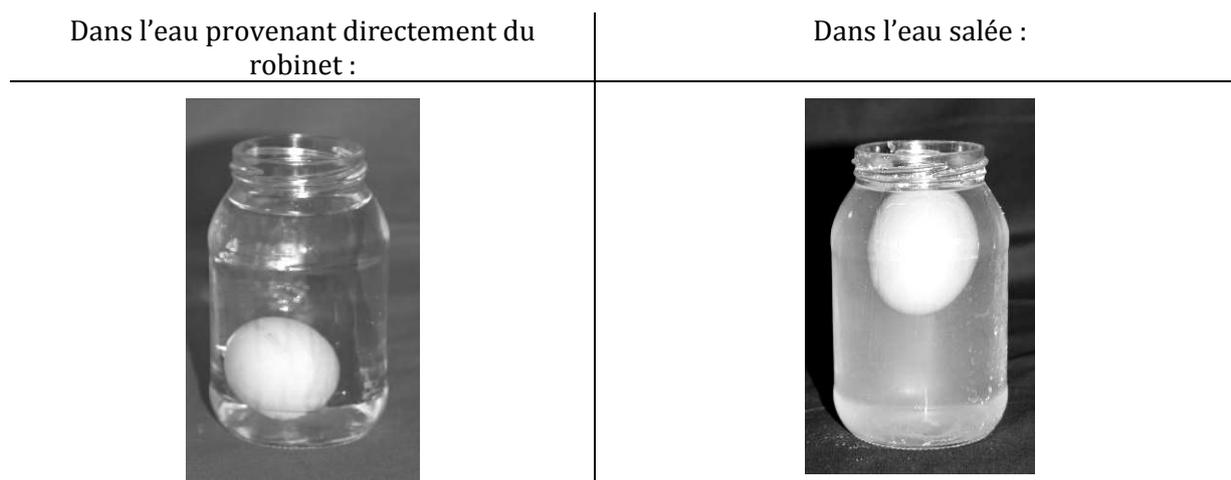
- En comparant les ballons qui sont photographiés (sur la feuille *Ballons solaires*) il est possible de constater que ces ballons :
 - ont des formes différentes : un ballon est un prisme à base carrée, deux sont plutôt cylindriques et le troisième est plutôt sphérique ;
 - semblent construits avec des sacs poubelles ;
 - sont tous de la même couleur : noire.
- Ces ballons fonctionnent uniquement quand il y a du soleil. Voici les étapes du phénomène :
 - Le Soleil chauffe l'air qui se trouve dans le ballon.
 - En chauffant l'air se dilate et occupe donc un plus grand volume :
 - si l'enveloppe du sac est ouverte, comme sur les photos, une petite partie de l'air s'échappe vers l'extérieur ;
 - si l'enveloppe est fermée mais n'est pas remplie complètement au départ, l'air en se dilatant va alors occuper tout le volume qui est à sa disposition.
 - Dans les deux cas, les ballons deviennent plus légers que l'air extérieur et, soumis à la poussée d'Archimède, commencent à prendre de l'altitude.
- Ces ballons ont des avantages :
 - ils sont plus légers (car pas de brûleur) ;
 - ils sont peu coûteux (car pas de brûleur) ;
 - ils ne présentent aucun risque lié au feu.
- Mais ces ballons présentent aussi des inconvénients :
 - ne peuvent s'envoler par temps nuageux ;
 - ne peuvent s'envoler la nuit !



Corrigé de la fiche n° 4 :

L'objectif de cette expérience est que les enfants se rendent compte que la poussée d'Archimède varie d'un liquide à un autre.

Pour relever ce défi, les enfants auront apporté un œuf cuit dur (c'est plus prudent !) et du sel. Après avoir plongé cet œuf successivement dans de l'eau douce et dans de l'eau salée, les enfants constatent que dans le premier cas, l'œuf coule alors que dans le deuxième cas, il flotte :



La différence entre les deux situations provient bien évidemment de la présence ou de l'absence du sel. La présence de ce sel modifie la masse volumique de l'eau.

Ainsi la masse volumique de l'eau (non salée) est de 1000 kg/m^3 , celle de l'eau salée est d'environ 1025 kg/m^3 . Ces différences de masse volumique entraînent des poussées d'Archimède différentes. Rappelons une nouvelle fois que la poussée d'Archimède est la force qui est exercée, par le liquide - ou le gaz - (ici, en l'occurrence, l'eau) sur l'objet (ici, l'œuf). De plus cette force est verticale, dirigée vers le haut (elle pousse donc l'œuf vers le haut) et égale « au poids du volume de liquide déplacé », c'est-à-dire au poids du volume d'eau occupé, dans l'eau, par l'œuf. L'eau salée ayant une masse volumique plus grande que l'eau douce, un volume d'eau salée sera plus lourd que le même volume d'eau douce. La force avec laquelle l'eau salée pousse sur l'œuf sera donc plus importante que la force avec laquelle l'eau douce pousse sur l'œuf. Donc, l'œuf flottera mieux dans l'eau salée que dans l'eau douce (il coulera).

Piscine et eau de mer :

Nous connaissons cette différence de flottaison : il est plus fatigant de faire la planche dans une piscine qu'en mer. Remarquons encore que notre masse volumique est proche de celle de l'eau, ce qui explique le fait que nous flottons relativement facilement. Néanmoins, notre facilité à flotter dépend aussi de la quantité d'air contenue dans nos poumons : en les remplissant, nous flottons plus facilement, en expirant l'air, nous coulons doucement.

Notre œuf et la mer Morte :

Dans le cas de notre expérience, l'eau est saturée en sel (un petit dépôt de sel non dissout s'est formé dans le fond). L'œuf se trouve à peu près dans les mêmes conditions que la personne qui lit son journal, couchée sur ... la mer Morte. Cette eau est tellement salée (salinité d'environ 27%) que, mêmes si certains organismes microscopiques peuvent y vivre, aucun poisson ou algues macroscopiques n'y survit¹⁴. La masse volumique de cette eau est de 1240 kg/m^3 .



http://fr.wikipedia.org/wiki/Mer_Morte

¹⁴ D'où son nom de mer « morte »

Prolongements souhaitables :

Il est ensuite possible pour l'enseignant d'inviter ses élèves à transposer les informations découvertes dans un autre contexte : celui des gaz. Dans la classe deux ballons de volumes identiques sont remplis de gaz différents : l'un est rempli d'air, l'autre d'hélium. Les enfants constatent bien évidemment que le ballon rempli d'air reste posé sur le banc alors que celui qui est rempli d'hélium s'envole jusqu'au plafond. Pour expliquer cette différence de comportement il faut comparer les forces agissant sur les ballons.

Les poids des deux ballons sont différents : le ballon rempli d'air est plus lourd que le ballon rempli d'hélium. La force qui maintient le ballon rempli d'air est donc plus grande que celle qui maintient celui rempli d'hélium.

Les poussées d'Archimède (forces qui poussent les ballons vers le haut – consultez si nécessaire le *Chapitre 4 – La poussée d'Archimède*) sont identiques dans les deux situations puisque les volumes des ballons sont identiques.

Le ballon rempli d'air sera donc soumis à une force résultante dirigée vers le bas (le poids l'emporte sur la poussée d'Archimède) il restera sur le banc. Le ballon rempli d'hélium sera donc soumis à une force résultante dirigée vers le haut (la poussée d'Archimède l'emporte sur le poids) : il s'envolera vers le plafond.

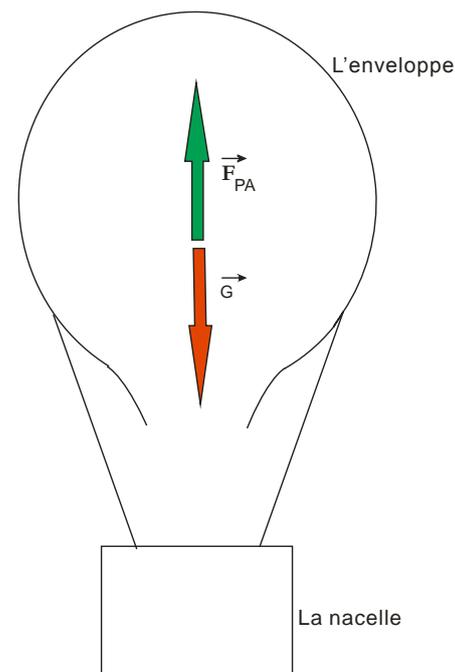
Le deuxième prolongement possible consiste à avoir avec les élèves une discussion autour du paramètre température. Cette discussion permettra de revenir naturellement au point de départ : pourquoi une montgolfière va-t-elle s'élever dans le ciel ?

Cette étude est reprise aussi dans le *Chapitre 4 – La poussée d'Archimède* et dans *L'annexe n°3* mais, dans un souci d'autonomie, nous la reprenons une nouvelle fois ici :

Comme toujours, il convient de faire le bilan des forces agissant sur l'objet dont on étudie le mouvement possible :

- La force qui maintient la montgolfière au sol est son poids total (le poids de l'enveloppe + le poids de l'air chaud contenu dans cette enveloppe + le poids de la nacelle (matériel et personnes)). Sur le dessin ci-contre, ce poids total est représenté par la flèche, dirigée vers le bas et noté \vec{G} .

- La force qui peut faire monter la montgolfière dans les airs est la poussée d'Archimède (noté: \vec{F}_{PA} ; PA = Poussée d'Archimède). Cette poussée est égale au poids du volume d'air déplacé c'est-à-dire au poids de l'air ambiant (froid par rapport à celui contenu dans l'enveloppe). Cette poussée reste constante (et cela quelle que soit la température du gaz contenu dans le ballon) si l'enveloppe n'est pas remplacée par une enveloppe plus petite ou plus grande.



La montgolfière s'élèvera dans les airs si son poids total est plus petit que la poussée d'Archimède. Mis à part la possibilité de changer d'enveloppe ou de nacelle ou de minimiser le matériel ou le nombre de passagers, la seule manière de diminuer ce poids total est de chauffer davantage l'air contenu dans l'enveloppe (un volume déterminé d'air chaud est moins lourd que le même volume d'air froid). Une manière d'augmenter encore l'écart de température (air chaud dans l'enveloppe – air ambiant) est de faire les tests à un moment pendant lequel la température extérieure n'est pas trop élevée. Il s'agit là d'une des raisons pour lesquelles il est plus fréquent de voir des montgolfières dans le ciel en tout début de matinée ou en fin d'après-midi plutôt qu'en pleine heure de midi (une autre raison est qu'à cette heure plus tardive, les turbulences¹⁵ sont moins nombreuses dans le ciel).

Pour décoller et pendant le vol, l'aérostier se sert du brûleur : s'il donne un coup de gaz, il réchauffe l'air contenu dans l'enveloppe et permet ainsi au ballon de prendre de l'altitude. Si, au contraire, il laisse l'air se refroidir, l'engin descend. S'il s'avère que pour une raison ou l'autre la descente doit être rapide, le pilote ouvre une trappe qui se situe au sommet de l'enveloppe et permet ainsi à l'air chaud de quitter l'enveloppe et d'être remplacé par de l'air plus froid.



Corrigé de la fiche n°5 :

Pour tout renseignement, n'hésitez pas à consulter le petit dossier consacré aux ballons gonflés à l'hélium (ce dossier se trouve dans les documents à photocopier pour les élèves).

6. Corrigés des fiches « expériences »



Ces fiches sont repérées par le logo :

¹⁵ Les turbulences sont des vents parfois difficilement prévisibles et qui peuvent s'avérer dangereux.

Corrigé de la fiche n° 1  :

1^e défi

L'objectif du 1^e défi est de permettre aux enfants de prendre conscience que « quelque chose » appuie sur la feuille de papier et que ce « quelque chose » est en réalité l'air qui nous entoure.

Les élèves constatent que, lors d'une poussée brutale sur la latte, la feuille ne se soulève presque pas, elle reste même collée à la table !

Comment l'expliquer ? « Quelque chose » d'invisible appuie sur la feuille de papier. Ce « quelque chose » est la masse d'air qui se trouve au-dessus de la feuille. Cette masse appuie sur la feuille et l'empêche de se soulever. On dit que l'air exerce une force pressante sur la feuille de journal.



2^{ème} défi

L'objectif du 2^e défi est de permettre aux enfants de prendre conscience qu'il y a « quelque chose » dans la bouteille « vide ».

Les élèves constatent que même en soufflant très fort, le ballon ne se gonfle presque pas !

Comment l'expliquer ? La bouteille contient de l'air (on a tendance dans le langage courant à parler de bouteille « vide », en réalité la bouteille est vide du liquide qu'elle contient habituellement mais remplie d'air !). Cet air occupe tout le volume de la bouteille. En soufflant dans le ballon, celui-ci se gonfle légèrement, le volume disponible à l'intérieur de la bouteille diminue donc et l'air qui se trouve dans cette partie est alors comprimé. On dit que l'air contenu dans la bouteille est soumis à une certaine pression. Cette pression dépend des capacités physiologiques de la personne qui souffle, des caractéristiques de la bouteille et du ballon. On ne sait plus gonfler le ballon, à la bouche, lorsque cette pression dans la bouteille devient trop importante.

Conclusion tirée de ces deux défis :

Ces deux défis permettent de mettre en évidence la présence de l'air. L'air est présent partout : dans la pièce, sur la feuille de journal, à l'intérieur de la bouteille...

Corrigé de la fiche n° 2  :

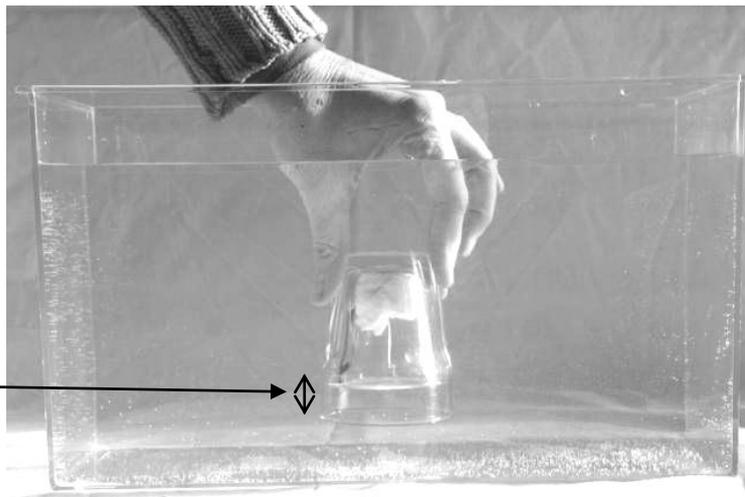
Les deux défis suivants sont basés sur le même principe (l'air peut être, dans certaines limites, comprimé), mais alors que le premier défi est simple et s'explique rapidement, le deuxième permet davantage de prolongements.

1^e défi

Les élèves constatent que le mouchoir qui semblait plongé dans l'eau, en ressort sec !

Comment l'expliquer ? Il y a de l'air dans le récipient contenant le mouchoir (défi 1). En enfonçant ce récipient (ouverture vers le bas) l'eau monte jusqu'à une certaine hauteur (repérée par la double

flèche noire) en emprisonnant une poche d'air dans le fond du récipient. L'eau ne monte pas plus haut car l'air emprisonné au-dessus est alors comprimé au maximum. Si cette poche est suffisamment grande pour contenir le mouchoir, celui-ci ne se mouille pas !



Les enfants ont, comme tout un chacun, des préconceptions. Ces préconceptions, parfois fausses, ont la vie dure et peuvent parfois, de manière insidieuse perturber l'apprentissage. Pour preuve cet extrait des notes proposées aux enseignants sur le site français de *La main à la pâte* :

« Les enfants ont beaucoup de difficultés à imaginer que le mouchoir reste sec alors que le récipient qui le contient s'enfonce dans l'eau : il ne peut en ressortir que mouillé. »

Certains disent que « le mouchoir sec est mouillé ». Il faut leur donner un mouchoir mouillé pour qu'ils puissent faire la différence.

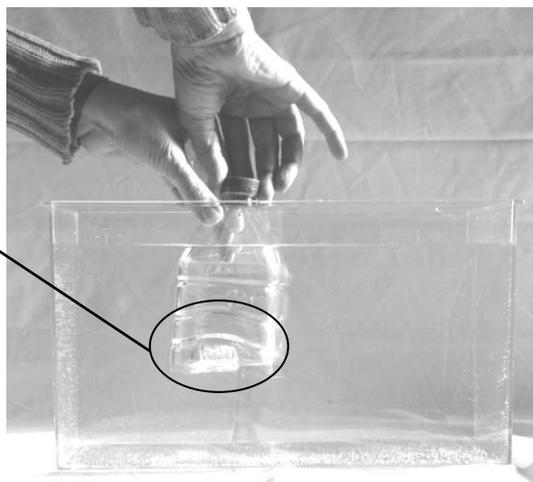
Les enfants ont beaucoup de difficultés à bousculer leurs représentations premières. Alors qu'ils avaient expérimenté que le mouchoir était sec avec le récipient complètement enfoncé dans l'eau, ils ne peuvent s'empêcher de dessiner ce récipient seulement enfoncé à moitié dans l'eau.

Les mots et les dessins utilisés dans les rapports montrent que les représentations initiales ont la vie plus dure que l'observation. »

2^{ème} défi :

- Les enfants constatent que le bouchon en liège semble couler dans l'eau !

En réalité le bouchon flotte à la surface de l'eau. Pour les mêmes raisons que celles citées lors du premier défi, le niveau de l'eau ne remonte pas complètement dans le récipient (une poche d'air reste comprimée en haut de la bouteille). Donc, en ne regardant pas attentivement, le bouchon donne l'impression de couler. En fait, il flotte toujours à la surface mais le niveau d'eau est plus bas. En dévissant le bouchon, un léger courant d'air s'échappe de la bouteille et le bouchon remonte au niveau de départ car l'air comprimé peut alors s'échapper. La pression qui s'exerce à l'intérieur de la bouteille redevient égale à celle qui s'exerce à la surface de l'aquarium (pression atmosphérique) et les deux niveaux (extérieur et intérieur à la bouteille) sont identiques.



- En aspirant l'air qui se trouve dans la bouteille et en remettant le bouchon de la bouteille le plus vite possible (ou, plus facile, en dévissant le bouchon, en enfonçant la bouteille au maximum dans l'eau, en revissant le bouchon et enfin en soulevant la bouteille) le bouchon en liège est plus haut que le niveau de l'eau dans l'aquarium ! Cela s'explique par le fait que la pression dans la bouteille est plus faible qu'à l'extérieur et donc le niveau d'eau peut y monter.



Remarque :

Ces expériences montrent que l'air peut être comprimé mais nous savons tous qu'il existe une limite à cette compression : quand nous poussons sur le piston de la pompe de bicyclette (ou d'une seringue) en maintenant sa sortie obturée, nous sentons une certaine résistance voir une opposition franche en fin de parcours : l'air a atteint sa limite de compression.

Conclusion de ces deux défis :

L'air occupe un certain volume. Cependant il peut être, dans une certaine mesure, comprimé.

Corrigé de la fiche n° 3  :

1^e défi :

L'objectif de ce défi est de montrer que l'air ambiant exerce également une force pressante du bas vers le haut.

Les élèves constatent que le morceau de carton reste « collé » au verre, et que l'eau ne s'écoule pas !

Comment l'expliquer ? Il y a en fait, deux raisons pour lesquelles cette expérience fonctionne bien :

- La présence de la pression atmosphérique : l'air ambiant de la pièce exerce une force pressante sur le carton.

S'il est facilement compréhensible que l'air exerce des forces pressantes du haut vers le bas

sur les objets (voir 1^{er} défi de fiche n°1 ), il est plus difficile d'admettre que ces forces pressantes s'exercent aussi du bas vers le haut, ce qui est pourtant le cas !

- Il faut cependant savoir qu'il existe une autre raison, souvent oubliée dans les manuels scolaires, qui explique pourquoi le carton colle : l'existence des forces d'adhésion qui s'exercent entre l'eau et le carton. Ce sont ces forces d'adhésion qui nous permettent, par exemple, en humectant notre doigt de salive, de tourner les pages récalcitrantes d'un livre ou d'ouvrir le sachet plastique d'emballage du supermarché. Pour être le plus rigoureux possible, il ne faut pas « escamoter » cet aspect de la question.



Pour ces deux raisons, le carton reste fixé au verre et empêche l'eau de tomber.

Dernière remarque : contrairement à ce que disent certains manuels, le carton est maintenu « collé » au verre même si celui-ci n'est pas complètement rempli. Il suffit d'essayer pour s'en convaincre !

2^{ème} défi :

L'objectif de ce défi est de montrer que l'air ambiant exerce une force pressante qui agit en réalité dans **toutes** les directions.

Les enfants constatent que le morceau de carton reste collé à la paille aussi longtemps qu'ils aspirent l'air qui se trouve dans cette paille. Et cela, même en inclinant la tête dans toutes les directions.

Comment l'expliquer ? Au départ, la pression est la même dans la paille et dans la pièce.



Une fois l'air contenu dans la paille aspiré, la pression à l'intérieur de celle-ci diminue. La pression atmosphérique devient supérieure à celle qui est dans la paille. C'est cette différence de pression qui maintient le morceau de carton « collé » à la paille.

Application pratique :

C'est l'action de la pression atmosphérique qui permet de boire à la paille le soda contenu dans une cannette. En effet, lorsque l'air qui se trouve dans la paille est aspiré, la pression dans la paille est inférieure à la pression atmosphérique ; le liquide monte dans la paille, laissant un volume disponible dans la cannette. Ce volume libéré par le liquide est remplacé par le même volume d'air extérieur (qui se trouve dans la pièce) qui pousse de nouveau sur la surface du soda et fait de nouveau monter le liquide dans la paille, nous permettant ainsi de boire !

Si l'espace libre entre la paille et la cannette est obturé par de la pâte à modeler, par exemple, (idéalement - le trou ne devrait plus laisser d'air) ... il devient très difficile (impossible) d'aspirer le soda. En effet, l'air ambiant ne peut presque plus entrer (l'air ambiant ne rentre du tout) dans la cannette, et ne poussera que faiblement (ne poussera plus du tout) sur la surface du soda. Celui-ci montera plus difficilement (ne montera plus du tout) dans la paille.

Conclusion tirée de ces deux défis :

L'air ambiant exerce une force pressante qui est dirigée dans toutes les directions.

Corrigé de la fiche n° 4



L'objectif de ce défi est que les élèves constatent qu'en se réchauffant l'air occupe un volume plus grand.

Les élèves constatent que :

- Lorsque la bouteille est dans l'air, le ballon est affaissé sur le goulot de la bouteille, le ballon est dégonflé :



- Lorsque la bouteille est enfoncée dans l'eau chaude, le ballon se redresse et se gonfle légèrement :



L'explication :

Pour expliquer correctement le phénomène il faut faire référence aux notions de « pression », « température » ou « chaleur » qui ne seront réellement étudiées que dans le secondaire. Cependant et afin de ne pas induire, ou entretenir, de fausses préconceptions, il nous semble important que nous, enseignants, les maîtrisions dès à présent.

Pour mettre au point ces notions, qui se basent au départ sur des considérations sensorielles évidentes (la distinction chaud/froid, avant tout), il a fallu considérer ce qui se passe au cœur de la matière.

Nous savons que la matière est constituée de molécules, ces molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes, et ces atomes sont constitués d'un noyau (lui-même constitué de protons¹⁶ et de neutrons¹⁶) et d'électrons¹⁶. Ces éléments s'agitent continuellement dans la matière. Cette agitation, difficilement visible est appelée agitation « thermique ». Les mouvements moléculaires liés à cette agitation engendrent des collisions entre particules, et lors de ces chocs, les particules échangent de l'énergie (notamment cinétique – due à leur mouvement).

Lorsque deux objets à température différente sont en contact, de tels chocs se produisent aussi entre molécules appartenant au corps chaud et molécules appartenant au corps froid (chaud et froid étant ici relatifs). Les molécules qui se trouvent du côté « chaud », sont plus agitées que celles qui se trouvent du côté « froid », et en moyenne, les chocs ont pour effet de transférer une partie de l'énergie du corps chaud (ses molécules ralentissent) aux molécules « froides » (leur mouvement s'accélère). Ce transfert se poursuit à l'intérieur du corps initialement plus froid, qui finit par se réchauffer complètement, jusqu'à ce que les températures des deux corps s'égalisent. L'effet global est un effet moyen : lorsqu'un ensemble de molécules « froides » entre en contact avec un ensemble de molécules « chaudes », les « chaudes », qui disposent d'un stock d'énergie plus important que les « froides », leur cèdent toujours de l'énergie ; le corps chaud refroidit donc, alors que le corps froid se réchauffe. L'inverse ne se produit jamais. Cette évolution (refroidissement du corps chaud et réchauffement du corps froid) est ce qu'on appelle un transfert de chaleur – c'est d'ailleurs la seule manière précise de définir la chaleur dans le contexte moderne.

La température est, quant à elle, une mesure de l'agitation qui est à l'origine du transfert de chaleur. Plus les particules s'agitent, plus la température correspondante est élevée, moins les particules s'agitent, plus la température est basse. La température est donc une mesure du stock d'énergie disponible dans un corps à l'équilibre, et plus précisément, de l'énergie par particule.

Dans notre cas les molécules d'eau (chaude) s'agitent plus que les particules d'air contenues dans la bouteille. La température de l'eau chaude est supérieure à celle de l'air ambiant. Lorsque l'on enfonce la bouteille dans l'eau chaude, une partie de l'agitation des molécules de l'eau se transmet aux particules qui constituent l'air (via des chocs sur la paroi de la bouteille). Les molécules de l'air s'agitent davantage, les mouvements sont plus amples, plus rapides, plus nombreux. Leur agitation les amène à heurter la paroi du ballon, ce qu'elles font avec plus de force lorsque l'air est plus chaud. Les chocs avec la paroi sont eux-mêmes la cause première de la pression exercée par l'air (la pression est plus élevée si la température est plus élevée). Cette pression accrue gonfle le ballon, de sorte que l'air chaud occupe un volume plus grand que la même quantité d'air froid.

Remarque : Il se peut aussi que, dans certains cas, l'énergie fournie à la matière permette un changement d'état (chauffer de la glace peut permettre d'obtenir de l'eau et même de la vapeur).

¹⁶ On pourrait encore « casser » ces éléments, nous en trouverions de plus petits encore mais nous sortons alors très largement du cadre de ces notes.

Il est important d'insister auprès des élèves sur le fait suivant : dans les deux situations (bouteille hors de l'eau chaude et bouteille dans l'eau chaude), la quantité d'air contenue dans la bouteille et dans le ballon est la même. Le volume a augmenté mais il y a toujours la même quantité d'air dans la bouteille (on n'en a ni injecté, ni enlevé).

Corrigé de la fiche n° 5



L'objectif de ce défi est que les élèves prennent conscience que l'air chaud est plus léger que le même volume d'air froid et que donc l'air chaud monte vers le plafond d'une pièce tandis que l'air froid descend vers le sol.

Constatation :

Les élèves constatent que

- La température indiquée par le thermomètre posé sur le sol est, dans notre cas, de 21°C.
- La température indiquée par le thermomètre posé sur le bord supérieur du tableau est, dans notre cas, de 23°C.

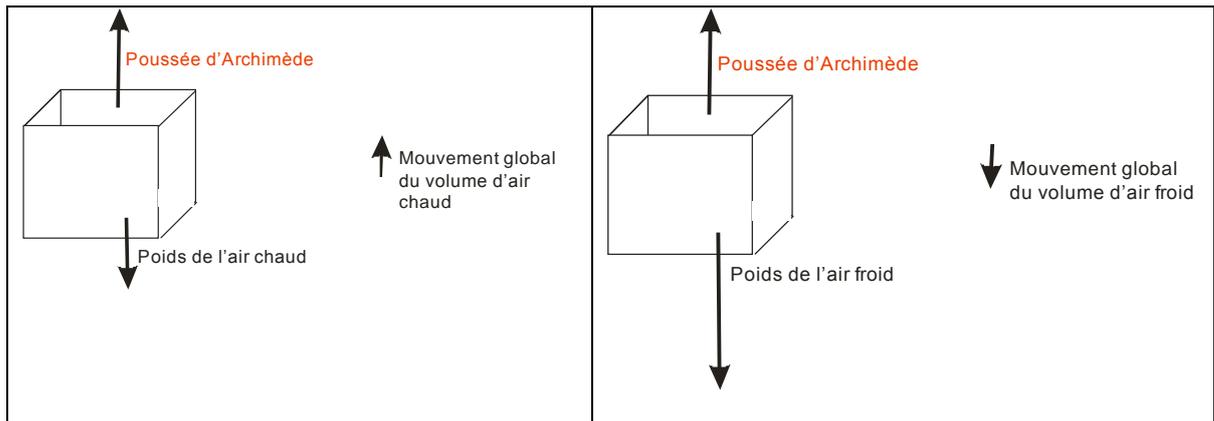


Explication :

Pour les élèves le raisonnement qui suit est moins accessible que celui qui correspond à l'expérience précédente car il faut « isoler » par la pensée un volume d'air. Comme à chaque fois, les explications données ci-dessous nous sont destinées, à nous enseignants.

A partir des constatations tirées de l'expérience précédente (fiche  n° 4) nous pouvons déduire que si comparons deux volumes identiques, l'un d'air chaud et l'autre d'air froid, il y aura une quantité d'air (une masse d'air, ou un nombre de molécules) plus petite dans le volume d'air chaud que dans celui d'air froid. Donc le poids de ce volume d'air chaud sera inférieur au poids du même volume d'air froid. Or la poussée d'Archimède est la même¹⁷ dans les deux cas. Cela veut donc dire que l'air chaud sera soumis à une force résultante globalement dirigée vers le haut alors que l'air froid sera, lui, soumis à une force globalement dirigée vers le bas. Ce que l'on peut représenter de la façon suivante :

¹⁷ Si on suppose les volumes d'air étudiés plongés dans la même atmosphère gazeuse (constituée d'air à température bien définie et que cet air est le même dans les deux cas) car alors la poussée d'Archimède est en effet égale au poids du volume de fluide qui entoure les parties étudiées.



Il nous semble important d'insister, auprès des élèves, sur deux points particuliers :

- Nous envisageons, cette fois, des volumes identiques (mais dont les masses sont différentes donc de poids différents aussi).
- En sciences, il est indispensable de vérifier que la constatation que l'on vient de faire reste toujours valable. Il sera donc intéressant de relever les températures par exemple deux ou trois fois par jour pour vérifier si la différence de températures reste toujours présente et de tenter d'expliquer les différents écarts éventuels.

Il se peut que les températures (prises respectivement au sol et au plafond) soient presque identiques. Ce résultat est dû au fait qu'après un certain temps un équilibre thermique peut s'établir : l'air chaud a progressivement réchauffé tout l'air froid (et s'est lui-même refroidi). L'ensemble de l'air de la pièce est alors à la même température (comme lorsque l'on ajoute de l'eau froide au thé brûlant et que l'on mélange le tout pour refroidir le thé).

De nouveau ces transferts d'énergie peuvent entraîner des changements d'états. Par exemple, les glaçons rafraîchissent le jus de fruits (en réalité, c'est le jus de fruit qui réchauffe les glaçons et par voie de conséquence, se refroidit) mais ces glaçons vont aussi très probablement fondre et passer de la forme solide à la forme liquide.

Bibliographie

Pour l'aspect didactique :

- *Enseigner les Sciences physiques - Collège et classe de 2^{ème}* - D. Courtillot, M. Ruffenach - Bordas pédagogie - 2004.
- *Enseigner les Sciences physiques - L'enseignement par compétences* - M. Ruffenach, D. Courtillot - Bordas - 2009.
- *Problèmes de sciences et de technologie - Pour le préscolaire et le primaire* - M. Thouin - Editions MultiMondes - 1999.
- *Sciences - 64 enquêtes pour comprendre le monde* - J.-M. Rolando, G. Simonin, P. Pommier, J. Nombrot, J.-F. Laslaz, S. Combaluzier - Editions Magnard - 2003.
- *La pression atmosphérique : un jeu d'enfants ?* T. Castermans, P. Gillis, S. Mélin - Recherche en éducation 65/00 - Ministère de la Communauté Française.

Pour d'informations concernant les montgolfières :

- *Montgolfières L'aventure dans les airs* - B. Piccard ; R. Magni ; D. Comi ; J. Becker ; Editions White Star - 2009.

Liste, non exhaustive, de sites sur lesquels il est possible de trouver des informations sur ...

- L'air :

<http://www.crdp-montpellier.fr/cd66/map66/fichiers/projetsfederatifs/air/cycle%203%20air.pdf>

- La météorologie :

<http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/m%C3%A9t%C3%A9orologie/69777>

- L'influence de la rotation de la Terre sur les dépressions et anticyclones :

<http://galileo.cyberscol.qc.ca/intermet/vent/pvent2corio.htm>

- Le climat :

<http://www.sceren.fr/eedd/selectionWeb/pourlaclasse.htm>

- La poussée d'Archimède :

<http://lewebpedagogique.com/dunant77/2009/10/22/experience-2-la-poussee-darchimede/>

- Les montgolfières :

- o <http://www.lamap22.net/La-montgolfiere.html>
- o http://www.crea-sciences.be/divers/montgolfiere.htm#_Toc108792155
- o http://www.dailymotion.com/video/x37mtt_mini-montgolfiere-essai-2_news
- o <http://www.momes.net/dictionnaire/m/montgolfiere/montgolfiere.html>
- o <http://dipi1.free.fr/montgolfiere.htm>

- Les ballons solaires :

- o <http://ballonsolaire.free.fr/ballon.htm>
- o <http://ballonsolaire.pagesperso-orange.fr/essais-autres2008.htm>
- o <http://ballonsolaire.pagesperso-orange.fr/essais-autres2006.htm>
- o <http://www.paperblog.fr/1705870/mini-ballon-solaire-ou-plus-grand-fabrication-a-la-porter-de-tous/>
- o <http://www.google.be/>
- o <http://ballonsolaire.pagesperso-orange.fr/>

- <http://amifaunuscatalogue.over-blog.org/article-voler-en-ballon-solaire-37574639.html>
- Les ludions :
 - <http://bateaux-alain.chez-alice.fr/plouf2.html>
 - <http://bateaux-alain.chez-alice.fr/coulapic.html>
 - <http://bateaux-alain.chez-alice.fr/plouf.html>

Annexes

Annexe n°1 – Quelques notions importantes de physique

1. Introduction

Les différents paragraphes de cette annexe reprennent certaines notions de base qu'il est bon de se remémorer. La notion de force est ainsi illustrée par plusieurs exemples et définie par ses caractéristiques, les notions de masse et de poids, très souvent confondues dans la vie quotidienne, sont ici différenciées. La masse volumique qui est une grandeur abordée en fin de troisième étape dans le fondamental est aussi détaillée et comparée à une notion très proche : la densité.

Ces mises au clair ne sont en aucun cas destinées aux élèves, elles sont reprises ici uniquement pour les enseignants et cela dans le souci de proposer un document qui soit le plus rigoureux et le plus complet possible. Leur éventuelle exploitation en classe est bien évidemment laissée à l'appréciation des enseignants.

2. Qu'est-ce qu'une force en physique ?

Avant toute chose, il est important de remarquer que l'on ne voit pas une force : une force est invisible, il est uniquement possible de constater ses effets.

2.1. Quelques exemples

Le pied du footballeur va taper sur le ballon : ce pied va exercer une force sur le ballon. Sous le choc, le ballon se met à rouler : le ballon est soumis à une force (le ballon se déforme aussi mais ce n'est pas le but du geste). Dans ce cas, la force permet de modifier le mouvement du ballon (soit le mettre en mouvement, si le ballon était arrêté avant le choc ; soit dévier le ballon, s'il était déjà en mouvement avant le choc).



Si aucun autre footballeur ne tape ensuite sur le ballon, celui-ci finira par s'arrêter à cause des frottements entre le ballon, le sol et l'air.

Les mains qui pétrissent la pâte à pain posée sur la table ou la gymnaste qui tend l'élastique entre la main et le pied exercent des forces sur ces objets. D'un autre point de vue : la pâte à pain et l'élastique sont soumis à ces forces.



Dans les deux cas, ces forces ont comme conséquence de déformer l'objet.

Il est intéressant de remarquer que pour déformer¹⁸ un objet, deux forces sont nécessaires : la pâte est soumise à une compression de la part de la main et une compression de la part de la table ; l'élastique est soumis à une traction de la part de la main et une traction de la part du pied. Une seule force (une seule compression ou une seule traction dans les cas qui nous intéressent) ne pourrait pas déformer l'objet.

Dans les trois exemples précédents les forces mises en jeu sont des forces d'origine **musculaire** et de **contact** (il y a contact entre le pied et le ballon, entre la main et la pâte...).

Il existe également des forces qui **ne sont pas** d'origine musculaire :

Ainsi, l'aimant reste collé sur la porte du frigo parce qu'il existe une force magnétique entre lui et le fer contenu dans la porte du frigo.

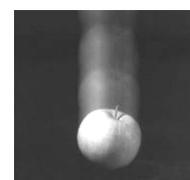


La rivière et le vent peuvent faire respectivement tourner la roue à aube du moulin ou la pale de l'éolienne...



Il existe aussi des forces qui s'exercent à **distance** (sans contact) :

C'est le cas de la force de pesanteur. La Terre attire¹⁹ tous les corps qui l'entourent. On dit que la Terre exerce une force d'attraction. Ainsi, si nous lâchons une pomme, celle-ci tombe car elle est soumise²⁰ à une force.



La force magnétique qui fait tourner l'aiguille de la boussole est aussi une force qui s'exerce à distance, sans contact avec l'objet.



¹⁸ Nous parlons ici uniquement de déformer l'objet (allonger un ressort par exemple), et non pas le déformer pour le déplacer (tirer avec une seule force sur une ficelle enroulée sur une table, déformera celle-ci mais la déplacera aussi).

¹⁹ Cette force d'attraction diminue très vite quand la distance augmente. Elle diminue en fonction du carré de la distance : si la distance est multipliée par 2 (3, 4, 5...) la force est divisée par 4 (9, 16, 25...).

²⁰ Il est important de remarquer qu'une force n'apparaît jamais seule : l'action (la Terre attire la pomme) et la réaction (la pomme attire la Terre) apparaissent en même temps. La Terre est attirée par la pomme exactement de la même manière que la pomme est attirée par la Terre. Cependant la Terre ne bougera pas, elle ne montera pas vers la pomme parce que la masse de la Terre est évidemment énorme par rapport à celle de la pomme !

2.2. Caractéristiques des forces

Les exemples précédents montrent que :

- Pour caractériser une force il est nécessaire de spécifier **par qui** et **sur qui** cette force est exercée (par exemple : **par** le pied, **sur** le ballon ; **par** la Terre, **sur** la pomme...).
- Les forces agissent toujours par paires.
- Les forces permettent :
 - o de **modifier le mouvement** d'un objet (qui est libre de se déplacer) en le mettant en mouvement, en l'accéléralant, en le ralentissant ou encore en le déviant. Parfois plusieurs effets peuvent être présents en même temps. Par exemple, une balle de tennis peut, en même temps, être renvoyée dans une autre direction et être ralentie ;
 - o de **déformer** un objet (qui est coincé ou attaché à un objet fixe).

Il est possible de caractériser une force de manière univoque et complète en spécifiant :

- son **support** (ligne d'action suivant laquelle la force s'exerce) ;
- son **sens** (par exemple : de la droite vers la gauche, du haut vers le bas,...) ;
- son **intensité** (sa valeur numérique, exprimée en Newton – voir paragraphe suivant) ;
- son **point d'application** (endroit où s'applique la force).

Toutes ces caractéristiques sont représentées par un vecteur que l'on dessine par une flèche (voir dessins ci-dessous), et que l'on note : \vec{F} .

2.3. Unité de force

Les forces se mesurent grâce à une unité spécifique²¹ : le Newton (que l'on note N). Cette unité a été choisie en hommage au physicien du même nom qui a élaboré le concept de force : Isaac Newton.

Par exemple une personne qui a une masse corporelle de 60 kg est attirée par la Terre, avec une force de 600 N environ (en réalité : $60 \times 9,81 = 588,6$ N, mais souvent on arrondit la valeur 9,81 à une valeur « ronde » : 10, pour faciliter les calculs). Sur la Lune cette force d'attraction est environ 6 fois plus petite que sur Terre, alors que sur le Soleil cette force est environ 27 fois plus grande.

2.4. Appareil de mesure des forces : le dynamomètre

Le dynamomètre est l'appareil qui permet de mesurer les forces. Bien que son emploi ne fasse pas partie des compétences visées dans l'enseignement fondamental, celui-ci est très simple et

²¹ Chaque grandeur physique se mesure au moyen d'une unité spécifique. Ainsi les distances se mesurent en mètre(s), les masses en kilogramme(s), les durées en seconde(s), ...

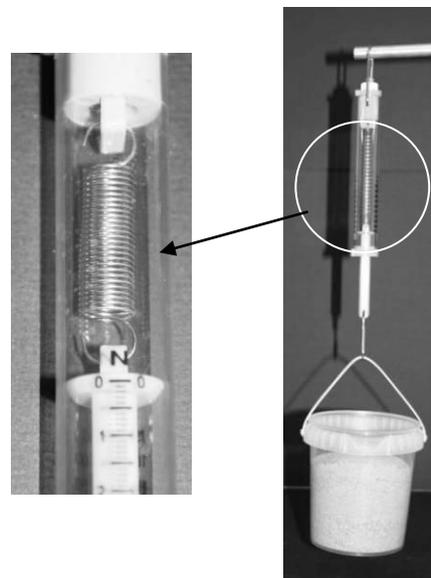
son principe très logique. Il peut donc être intéressant de le faire découvrir une première fois aux élèves si l'on songe à la transition imminente vers le secondaire.

Le principe du dynamomètre est basé sur la mesure de l'allongement d'un ressort soumis à une force.

- deux masses identiques, suspendues à tour de rôle à un même dynamomètre, produisent le même allongement du ressort.

L'allongement du ressort est proportionnel à la force :

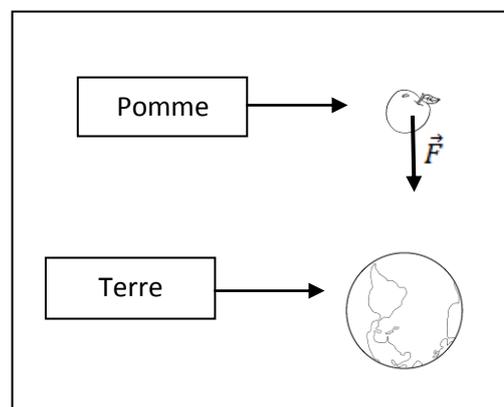
- si la force est deux (trois, quatre ...) fois plus grande, l'allongement du ressort est deux (trois, quatre...) fois plus grand ;
- si la force est deux (trois, quatre...) fois plus petite, l'allongement du ressort est deux (trois, quatre...) plus petit.



2.5. Exemple

Ainsi, dans l'exemple de la pomme qui tombe, la force qui fait tomber cette pomme a les caractéristiques suivantes :

- le support : la verticale (donnée par la direction du fil à plomb) ;
- le sens : du haut vers le bas ;
- l'intensité est exprimée en Newton²³ (N). Par exemple, 1 N ;
- le point d'application : le centre de gravité de la pomme



2.6. Principe des actions réciproques (appelé encore parfois « principe de l'action et la réaction »)

Comme nous l'avons déjà signalé, une force n'apparaît jamais seule : quand une force apparaît, une deuxième force apparaît automatiquement simultanément. On dit que les forces apparaissent par paires. Le principe des actions réciproques prend en compte ce phénomène.

2.6.1. Enoncé du principe des actions réciproques

Ce principe s'énonce de la façon suivante : Si un corps A exerce une force (notée \vec{F}_{AB}) sur un corps B automatiquement et simultanément, le corps B exerce une force (notée \vec{F}_{BA}) sur le corps A. Ces deux forces sont simultanées, de même intensité, de même support, de points d'applications différents et de sens opposés.

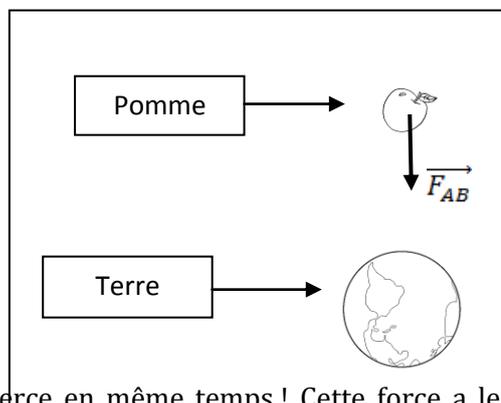
Il est important de remarquer que l'un des points d'application appartient au corps A et que l'autre point d'application appartient au corps B.

2.6.2. La Terre et la pomme

Afin de mieux comprendre ce principe évoqué au point précédent, reprenons l'exemple de la pomme qui tombe :

Nous pouvons constater l'effet d'une des deux forces en jeu : celle qui fait tomber la pomme. Cette force a les caractéristiques suivantes :

- le support : la verticale (donnée par la direction du fil à plomb) ;
- le sens : du haut vers le bas ;
- l'intensité est exprimée en Newton²² (N). Par exemple, 1 N ;
- le point d'application : le centre de gravité de la pomme.

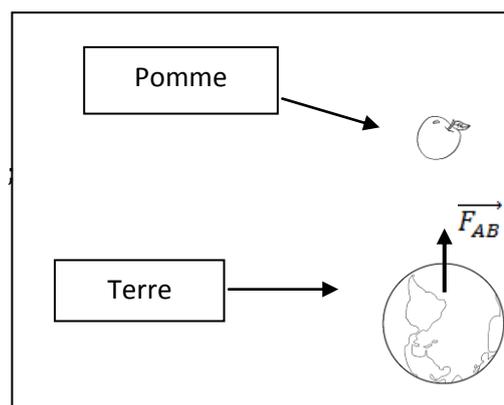


Une deuxième force, dont on ne voit aucun effet, s'exerce en même temps ! Cette force a les caractéristiques suivantes :

- le support : la verticale ;
- le sens : bas vers le haut ;

l'intensité est exprimée en Newton (N). Par exemple, 1 N ;

- le point d'application : le centre de gravité de la Terre.



La pomme attire aussi la Terre vers elle mais bien entendu, pour des raisons de masses extrêmement différentes, la Terre ne se mettra pas à monter vers la pomme. Cette deuxième force, qui n'a donc aucun effet visible, s'exerce quand même bel et bien sur la Terre.

²² Voir paragraphe 3 de cette annexe.

2.6.3. Autre exemple – la fusée

Les fusées sont propulsées grâce à l'éjection de très grosses quantités de gaz. En effet, ces gaz, produits dans une chambre à combustion qui se trouve à l'intérieur de la fusée, lorsqu'ils s'échappent de la fusée, poussent celle-ci dans la direction opposée.

2.6.4. Remarque

Le principe des actions réciproques est aussi parfois appelé principe de l'action et la réaction.

Dans notre quotidien, il est naturel de faire référence à l'objectif poursuivi par la personne (ou l'objet) qui exerce l'une de ces forces et de voir l'autre force comme étant une vraie réaction à cette première force. Ainsi on peut attribuer naturellement la dénomination « action » à la force exercée par un enfant sur une balle et l'étiquette « réaction » à la force exercée par la balle sur le pied de l'enfant. Dans d'autres cas, comme celui de l'attraction qui existe entre un aimant et un morceau de fer, ces étiquettes « d'action » et de « réaction » semblent être davantage interchangeables. Dans ce cas, attribuer le terme « d'action » à une force (plutôt qu'à l'autre) donne l'impression de privilégier une partie du système (plutôt que l'autre partie). Cette manière de faire le bilan des forces peut induire une sorte de hiérarchie dans le statut des forces alors que celles-ci sont tout à fait équivalentes. Il nous semble donc préférable de parler des actions réciproques plutôt que d'actions et réactions.

3. Masse et poids, deux grandeurs différentes ?

Suivant qu'ils sont utilisés dans notre langage courant ou dans un contexte bien particulier, comme celui d'un cours de sciences, certains mots peuvent avoir des sens différents.

Ainsi dans la vie quotidienne nous confondons généralement deux notions qui sont distinctes lorsqu'elles sont étudiées dans le cadre du cours de sciences : il s'agit des notions de masse et de poids.

3.1. La masse

La masse est liée à la quantité de matière d'un objet. Quel que soit l'endroit (sur Terre, sur la Lune,...) où se trouve l'objet, sa masse ne change pas. La masse est une caractéristique intrinsèque de l'objet, elle s'exprime en kilogramme(s).

3.2. Le poids

Le poids d'un objet, quant à lui, est une force qui provient de la double présence du corps lui-même et de la planète qui l'attire. Le poids varie donc suivant l'endroit où il est mesuré. Par exemple, le poids d'un même objet est six fois plus petit sur la Lune que sur la Terre. Le poids n'est donc pas une caractéristique intrinsèque de l'objet. Comme toutes les forces, le poids se mesure en Newton.

Cependant, quand on nous demande quel est notre poids, nous répondons d'instinct, par exemple 60 kilos²³, ce qui correspond en réalité à notre masse et non à notre poids. Pour être correct, nous devrions exprimer notre poids en Newton et dire « mon poids est de 600 N ».

3.3. D'où vient cette confusion entre les notions de masse et poids ?

Lorsque nous voulons nous peser, nous utilisons un pèse-personne, ce qui est correct ! Le pèse-personne est un instrument construit sur le principe du dynamomètre (voir § 2.4. de ce chapitre). A l'intérieur du pèse-personne se trouve un ressort qui s'écrase (contrairement à celui qui se trouve dans un dynamomètre qui lui s'allonge, cependant le principe est le même) lorsqu'il est soumis à une force. Le pèse-personne devrait donc être gradué en Newton, ce qui n'est pas le cas, il est gradué en kilogrammes. C'est exactement de là que provient la confusion ! Ayant une mesure exprimée en kilogrammes, nous associons dans cette mesure deux notions différentes. Tout serait correct si les pèse-personnes étaient étalonnés en Newton : une même personne pèserait environ 600 N sur Terre et 100 N sur la Lune et sa masse resterait égale à 60 kg, quel que soit l'endroit où elle se trouve.

Remarquons encore, que la seule balance qui mesure des masses est la balance à plateaux, car celle-ci compare deux masses entre elles : celle que l'on souhaite mesurer d'un côté et la masse étalon de l'autre côté.

4. Masse volumique et densité

4.1. Masse volumique

Comme son nom l'indique, la masse volumique est une grandeur physique qui prend en compte deux grandeurs en même temps : la masse et le volume d'un matériau, d'un objet. En effet, bien qu'occupant des volumes égaux, des matériaux différents peuvent avoir des masses différentes et donc des poids différents.

La masse volumique est le rapport entre la masse d'un objet (d'une matière solide, liquide ou gazeuse) et le volume qu'occupe cette masse.

La masse volumique est souvent repérée par une lettre grecque : ρ (lire rho) et se calcule par la formule : $\rho = m/V$ (elle s'exprime donc en kg/m^3).

Prenons quelques exemples :

1. L'huile flotte sur l'eau :
 - 1 m^3 d'eau douce a une masse de 1000 kg, sa masse volumique est donc de 1000 kg/m^3 .
 - 1 m^3 d'huile d'olive a une masse de 920 kg, sa masse volumique est donc de 920 kg/m^3 .
2. L'air « chaud » est plus léger que l'air « froid » (l'air « chaud » s'élève dans la pièce).
 - 1 m^3 d'air à 4°C a une masse de 1,293 kg, sa masse volumique est donc de 1,293 kg/m^3 .

²³ Remarquons que le préfixe *kilo* voulant seulement dire *mille* ne devrait pas être employé seul. Il faudrait dire, dans ce cas, *kilogramme* ...

○ 1 m³ d'air à 20°C a une masse de 1,204 kg, sa masse volumique est donc de 1,204 kg/m³. L'air à 4°C et l'air à 20°C n'ont donc pas la même masse volumique. La température est un paramètre très important pour les gaz : la masse volumique des gaz varie donc en fonction de la température. C'est grâce à ce phénomène que les montgolfières s'élèvent dans les airs.

3. L'hélium (gaz dont sont remplis les ballons dans les fêtes) est plus léger que l'air, même chaud.

○ 1 m³ d'hélium à 20°C a une masse de 0,179 kg, sa masse volumique est donc de 0,179 kg/m³.

4.2. Qu'est-ce que la densité ?

La densité d'un corps est le rapport entre la masse volumique de ce corps et celle d'un corps pris comme référence.

Pour les solides et les liquides, c'est la masse volumique de l'eau à 4°C qui sert de référence. La densité d'un solide ou d'un liquide est donc le rapport entre la valeur de la masse volumique de ce solide ou ce liquide et la masse volumique de l'eau à 4°C.

Pour les gaz, c'est la masse volumique de l'air dans les mêmes conditions (de température et de pression) que le gaz qui sert de référence. La densité d'un gaz est donc le rapport entre la valeur de la masse volumique de ce gaz et la masse volumique de l'air pris dans les mêmes conditions de pression et de température.

Puisque la densité est le rapport entre deux grandeurs identiques (les masses volumiques) cette grandeur est un nombre sans unité (tout comme lorsque l'on divise une valeur exprimée en mètres par une autre valeur exprimée elle aussi en mètres, on obtient une valeur sans unité).

4.3. La masse volumique et la densité d'un matériau sont-elles des grandeurs différentes ?

Au lieu d'exprimer la masse volumique en kg/m³, il est possible l'exprimer en g/cm³. Dans ce système d'unités, qui n'est pas le Système International²⁴ dans lequel nous travaillons habituellement, la masse volumique de l'eau à 4 °C vaut 1,00 g/cm³.

Dans ce système d'unités, peu utilisé, la densité de n'importe quel liquide sera donc égale à la valeur de sa masse volumique (exprimée en g/cm³) puisque pour la calculer il suffira de diviser cette dernière par 1. Dans ces conditions, il est donc possible de confondre densité et masse volumique.

²⁴ Le Système International (souvent noté SI) est le système de référence choisi d'un commun accord par les scientifiques pour pouvoir comparer des grandeurs comparables, en d'autres mots, pour que nous ayons tous les mêmes unités de mesures de base.

Annexe n°2 – La poussée d'Archimède

1. Exemple du ballon que l'on essaie d'enfoncer dans l'eau

Comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre consacré à la poussée d'Archimède, enfoncer un ballon dans l'eau d'une piscine (ou de la mer) n'est pas facile.

Faisons le bilan des forces qui agissent sur ce ballon :

Les **forces dirigées vers le bas** sont le poids du ballon (contenant + air) et la force que nous exerçons pour le maintenir dans l'eau.

- Le poids (de l'enveloppe du ballon + l'air contenu dans le ballon)
 - o Estimons la masse du ballon à environ 50 g, soit 0,05 kg.
 - o La masse de l'air emprisonné est minime ! Sachant qu'un litre d'air a une masse de 1,3 g, la masse d'air contenu dans le ballon est par exemple d'environ 2 g.
 - o La masse totale (bouteille + air) vaut donc : $0,05 \text{ kg} + 0,002 \text{ kg} = 0,052 \text{ kg}$. Ce qui correspond à un poids d'environ $0,052 \times 10 \text{ N} = 0,52 \text{ N}$
- Nous ne connaissons pas la valeur de la force avec laquelle nous poussons sur le ballon pour le maintenir complètement immergé mais nous allons voir que dans notre calcul, ce n'est pas important.

La seule **force dirigée vers le haut** est la poussée d'Archimède, cette force est dirigée de bas en haut et est égale au poids du volume du liquide déplacé. Le volume d'eau déplacé est celui occupé par le ballon que nous pouvons estimer à 2 litres. Ce volume de 2 litres d'eau a donc une masse approximative de 2 kg, soit un poids de $2 \times 10 \text{ N} = 20 \text{ N}$. Cela veut donc dire que l'eau exerce sur le ballon une force verticale, dirigée vers le haut, égale à 20 N.

Dès que nous lâchons le ballon, celui-ci est soumis à deux forces : une force, dirigée vers le bas, de 0,52 N (son poids) et une force, dirigée vers le haut, de 20 N (la poussée d'Archimède). Il est évident que la force dirigée vers le haut l'emporte et fait rapidement remonter le ballon à la surface quand on le lâche !

2. Les mouvements ascendants et descendants des montgolfières

Sans entrer dans les détails techniques - qui sortent du cadre de cette étude - identifions les forces qui entrent en jeu dans l'équilibre d'une montgolfière.

Les trois parties essentielles de la montgolfière sont :

- l'enveloppe ;
- le volume de gaz chauffé enfermé dans l'enveloppe (plusieurs milliers de mètres cube) ;
- la nacelle (contenant le matériel et les personnes qui souhaitent faire un vol).

1. Bilan des forces :

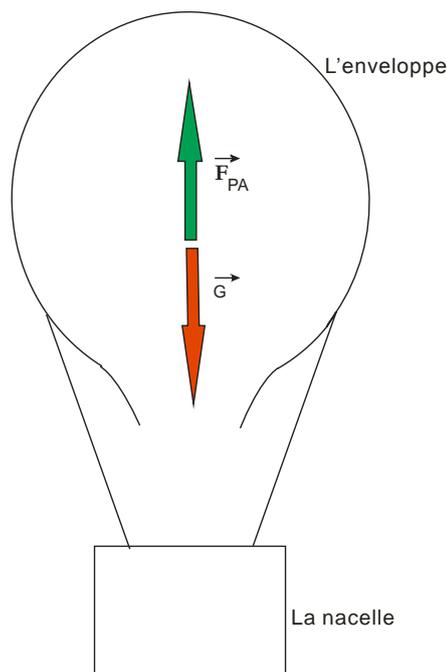
Les forces qui tendent à **maintenir la montgolfière au sol** sont :

- le poids de l'enveloppe,
- le poids du gaz contenu dans l'enveloppe,
- le poids de la nacelle, du matériel et des personnes

Sur le dessin ci-contre, la somme de ces trois forces est représentée par une seule flèche, dirigée vers le bas, placée au centre et notée \vec{G} .

La force qui peut **faire monter la montgolfière dans les airs** est :

- la poussée d'Archimède²⁵ (noté : \vec{F}_{PA} ; $PA =$ *Poussée d'Archimède*).



2. Comment ces forces peuvent-elles influencer la montée de la montgolfière dans les airs ?

- Si la force qui maintient la montgolfière au sol est supérieure à la force qui lui permet de s'élever, la montgolfière reste au sol.
- Si la force qui permet à la montgolfière de s'élever est supérieure à la force qui maintient la montgolfière au sol, la montgolfière s'envole.
- Si la force qui maintient la montgolfière au sol et la force qui lui permet de s'élever sont égales, la montgolfière reste à la même altitude dans le ciel.

3. Comment l'aérostier fait-il pour faire monter ou descendre la montgolfière ?

Le poids de l'enveloppe, celui de la nacelle et du matériel embarqué sont imposés par les caractéristiques de la montgolfière. La poussée d'Archimède est, quant à elle, limitée par la taille de l'enveloppe et la température ambiante extérieure.

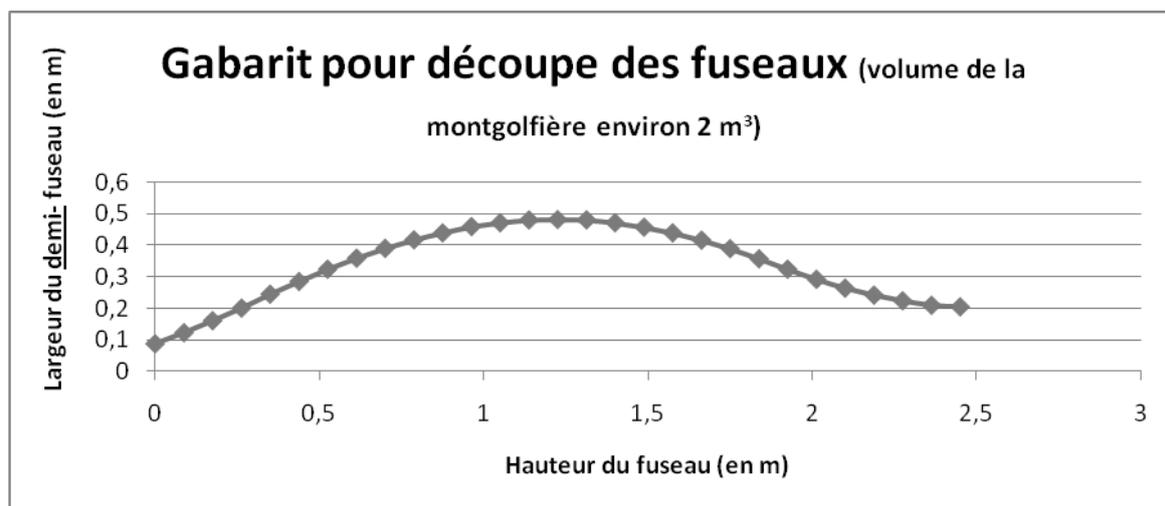
Le seul paramètre qui puisse être modifié est le poids de l'air contenu dans le ballon. Ce poids peut être modifié en chauffant ou en refroidissant cet air. En effet en chauffant, l'air devient plus léger (un même volume contient moins d'air chaud que d'air froid) et la masse volumique de cet air diminue. Donc, en chauffant l'air contenu dans le ballon, le poids de l'ensemble (enveloppe, air chaud et nacelle) diminue. Il arrive un moment où la force ascensionnelle (poussée

²⁵ La poussée d'Archimède est la force (dirigée vers le haut) qui est égale au poids du volume d'air déplacé (c'est-à-dire l'air ambiant « froid »). Cette poussée reste constante si on garde le même volume pour l'enveloppe (et cela quelle que soit la température du gaz contenu dans le ballon).

d'Archimède) prend le dessus sur le poids de l'ensemble et le ballon s'élève dans le ciel. Donc, pour faire prendre de l'altitude à la montgolfière, il faut chauffer l'air contenu dans l'enveloppe. Par contre, pour la faire descendre, il faudra laisser refroidir l'air contenu dans l'enveloppe ou lui permettre de s'évacuer par une trappe.

Annexe n°3 – Gabarit pour une montgolfière de 2 m³

Le gabarit repris ci-dessous correspond à une montgolfière (de forme classique) mais de grande taille : il s'agit toujours du modèle proposé par le site de *La main à la pâte* (<http://www.lamap22.net/La-montgolfiere.html>) dont la version originale (proposée dans le Chapitre 2) a été agrandie de manière à pouvoir construire une montgolfière d'environ 2 m³.



Si vous utilisez les films « Mylar » (6 feuilles complètes seront alors nécessaires) et le papier collant double face fournis dans la valise pédagogique l'enveloppe, une fois terminée, aura²⁶ les caractéristiques suivantes :

- un rayon de +/- 0,80 m, une masse est de +/- 0,280 kg
- un volume calculé²⁷ estimé à 2 m³

Puisque nous savons qu'il faut environ 1 m³ d'air chaud pour soulever environ 250g, le volume de gaz contenu dans l'enveloppe (2 m³) permettra de soulever une masse totale d'environ 500 g (2 x 250g).

Or, la masse de l'enveloppe seule qui a été mesurée vaut, dans notre cas, 280 g. Il sera donc possible d'embarquer une nacelle et du matériel ayant une masse d'environ 200 g (théoriquement 220g).

Nous signalons que, dans les magasins d'aéromodélisme ou sur Internet, il est possible de trouver des appareils photographiques miniatures dont la masse n'excède pas 80g et qui permettent de réaliser des photos de qualité.

²⁶ Il s'agit bien entendu d'un ordre de grandeur car suivant la façon de procéder, la quantité de papier collant et donc la masse pourront varier.

²⁷ Calcul du volume : $\frac{4}{3} \times \pi \times r^3 = \frac{4}{3} \times 3,14 \times 0,80^3 = 2 \text{ m}^3$

