

vent dans la masse fluide, à la manière des corps flottants (97), et les plus denses s'abaissent. Par conséquent, pour qu'une masse fluide demeure en équilibre, il faut : 1° que la densité soit la même pour tous les points d'une couche horizontale; 2° pour que l'équilibre soit stable, les couches fluides doivent être disposées par ordre de densités croissantes de haut en bas (88).

Or, les gaz et les liquides étant très-dilatables par l'action de la chaleur, leur densité décroît quand la température augmente; par conséquent, la deuxième condition ci-dessus ne peut être satisfaite, pour les liquides du moins, qu'autant que les couches inférieures sont plus froides que les couches supérieures. Mais pour les gaz, qui sont très-compressibles, il n'est pas nécessaire que les couches supérieures soient plus chaudes que les couches inférieures; car ces dernières, étant plus comprimées, tendent à être plus denses. Il suffit donc que la densité augmente plus par l'effet de la pression dans les couches inférieures qu'elle ne décroît par l'élévation de la température: c'est ce qui a lieu, en général, dans l'atmosphère.

Les courants qui naissent dans une masse fluide par l'effet des différences de densité dues aux différences de température d'une couche à l'autre, ont reçu leur application dans le tirage des cheminées et dans les appareils de chauffage par circulation d'eau chaude. Nous donnerons ces applications (liv. VI, chap. XI) après avoir fait connaître la dilatation des liquides et des gaz.

### CHAPITRE III.

#### PRESSIONS SUPPORTÉES PAR LES CORPS PLONGÉS DANS L'AIR, AÉROSTATS.

167. **Principe d'Archimède appliqué au gaz.** — On a déjà vu (131) que les mêmes raisonnements qui ont conduit au principe d'Archimède pour les liquides sont, mot à mot, applicables aux gaz; d'où l'on conclut que tout corps plongé dans l'atmosphère y perd une partie de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace.

Cette perte de poids dans l'air se démontre au moyen du *baroscope*. On nomme ainsi un appareil qui consiste en un fléau de balance portant à l'une de ses extrémités une petite masse de plomb, et à l'autre une sphère de cuivre creuse, dont le volume est environ d'un demi-décimètre cube (fig. 107). Dans l'air, les deux corps se font équilibre; mais si l'on place l'appareil sous le récipient de la

machine pneumatique, et si l'on fait le vide, on voit le fléau incliner vers la grosse sphère, ainsi que le montre la figure ci-dessous, ce qui indique qu'en réalité elle pèse plus que la petite masse de plomb; car actuellement elles ne supportent l'une et l'autre aucune pression, et n'obéissent qu'à la pesanteur. Donc, dans l'air, la sphère perdait une certaine partie de son poids. Si l'on veut vérifier, à l'aide du même appareil, que cette perte est bien égale au poids de l'air déplacé, on mesure le volume de la sphère, que nous supposons égal à un demi-litre. Le poids d'un pareil volume d'air étant 0<sup>gr</sup>,65 (128), on attache un poids égal à la petite masse de plomb: l'équilibre, qui avait lieu auparavant dans l'air, est alors rompu; mais dans le vide il se rétablit.

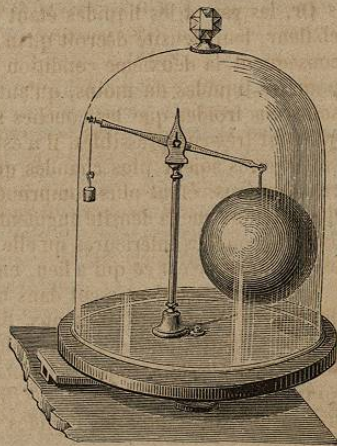


Fig. 107 (h = 20).

Le principe d'Archimède étant vrai pour les corps plongés dans l'air, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit des corps plongés dans les liquides (97), c'est-à-dire que lorsqu'un corps est plus pesant que l'air, il tombe, en vertu de l'excès de son poids sur la poussée du fluide. S'il est de même densité que l'air, son poids et la poussée de bas en haut se font équilibre, et le corps flotte dans l'atmosphère. Enfin, si le corps est moins dense que l'air, c'est la poussée qui l'emporte, et le corps s'élève dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'il rencontre des couches d'air de même densité que lui. La force d'ascension est alors égale à l'excès de la poussée sur le poids du corps. Telle est la cause qui fait que la fumée, les vapeurs, les nuages, les aérostats, s'élèvent dans l'atmosphère.

168. **Correction des pesées faites dans l'air.** — On vient de voir que les corps perdent dans l'air une partie de leur poids égale au poids de l'air qu'ils déplacent; par suite, lorsqu'on pèse un corps dans une balance, ce n'est pas son poids réel, c'est-à-dire dans le vide, qu'on obtient, mais seulement son poids apparent; à moins toutefois que le volume du corps ne soit précisément le même que celui des poids gradués qui lui font équilibre, car alors il y a perte égale des deux côtés.

Pour déduire du poids apparent d'un corps son poids réel, soient  $p$  son poids réel en kilogrammes, et  $d$  sa densité.  $\frac{p}{d}$  sera le volume du corps en litres, d'après

la formule connue  $P = VD$  (106); et le poids d'un litre d'air étant  $0^k,001293$ , celui de l'air déplacé par le corps est  $0^k,001293 \times \frac{p}{d}$ . Donc son poids apparent est

$$p - 0^k,001293 \times \frac{p}{d} = p \left( 1 - \frac{0^k,001293}{d} \right).$$

En représentant par  $P$  les poids gradués qui font équilibré au corps, par  $D$  la densité de leur substance, on trouvera de même que leur poids apparent est  $P \left( 1 - \frac{0^k,001293}{D} \right)$ . Mais ces deux poids apparents sont égaux; donc on a

$$p \left( 1 - \frac{0^k,001293}{d} \right) = P \left( 1 - \frac{0^k,001293}{D} \right),$$

équation qui donne la valeur de  $p$ .

Dans la solution de ce problème, on a supposé la pesée faite à zéro et à la pression  $0^m,76$ . Pour résoudre la question dans toute sa généralité, on doit tenir compte non-seulement des variations de température et de pression, mais même de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, car elle modifie le poids de l'air déplacé. Cette rigueur dans les pesées n'est pas indispensable quand on pèse des corps très-lourds, comme des métaux, mais elle le devient quand on pèse des gaz ou des vapeurs; aussi cette question sera-t-elle reprise quand on aura vu les dilatations des gaz (290 et 331).

## AÉROSTATS.

169. **Invention des aérostats.** — Les aérostats, ou ballons, sont des globes d'étoffe légère et imperméable, qui, remplis d'air chaud ou de gaz hydrogène, s'élèvent dans l'atmosphère en vertu de leur légèreté relative.

L'invention des aérostats est due aux frères Étienne et Joseph Montgolfier, fabricants de papier dans la petite ville d'Annonay, où le premier essai eut lieu le 5 juin 1783. Ce premier ballon était un globe de toile doublé de papier, ayant 36 mètres de circonférence et pesant 250 kilogrammes. Ouvert à la partie inférieure, il fut gonflé d'air chaud, en brûlant au-dessous, du papier, de la laine, de la paille mouillée.

« A cette nouvelle, écrivait l'académicien Lalande, nous dîmes tous : Cela doit être; comment n'y a-t-on pas pensé? » On y avait bien pensé; mais il y a loin de la conception d'une idée à sa réalisation. Black, professeur de physique à Edimbourg, avait annoncé dans ses cours, en 1767, qu'une vessie remplie d'hydrogène s'élèverait naturellement dans l'atmosphère, mais il ne fit jamais l'expérience, la regardant comme purement amusante. Enfin, Cavallo, en 1782, avait communiqué à la Société royale de Londres des expériences qu'il avait faites, et qui consistaient à remplir d'hydrogène des bulles de savon qui s'élevaient d'elles-mêmes dans l'atmosphère, le gaz qui les remplissait étant plus léger que l'air.

Quoi qu'il en soit, les frères Montgolfier ne connaissaient pas l'expérience de Cavallo, ni celle de Black, lorsqu'ils firent leur découverte. Comme ils employèrent exclusivement l'air chaud pour remplir leur ballon, on a donné le nom de *montgolfières* aux ballons à air chaud, pour les distinguer des aérostats à hydrogène, les seuls usités aujourd'hui.

Charles, professeur de physique à Paris, mort en 1823, substitua le gaz hydrogène à l'air chaud. Le 27 août 1783, un ballon ainsi gonflé fut lancé au Champ de Mars. « Jamais, écrit Mercier, leçon de physique ne fut donnée devant un auditoire plus nombreux et plus attentif. »

Le 21 novembre de la même année, Pilâtre de Rozier entreprit, en compagnie du chevalier d'Arlandes, le premier voyage aérien avec un ballon libre à air chaud. L'ascension eut lieu dans le jardin de la Muette, près du bois de Boulogne. Les aéronautes entretenaient au-dessous du ballon un feu de paille mouillée pour maintenir la dilatation de l'air intérieur : le feu pouvait donc se communiquer à chaque instant à l'enveloppe.

Dix jours après, dans le jardin des Tuileries, Charles et Robert répétaient la même expérience avec un ballon à gaz hydrogène.

Le 7 janvier 1785, Blanchard, en compagnie du Dr Jeffries, fit, le premier, la traversée de Douvres à Calais. Les deux aéronautes n'atteignirent les côtes de France qu'à grand-peine, et après avoir jeté à la mer jusqu'à leurs vêtements pour rendre le ballon plus léger.

Depuis, un nombre considérable d'ascensions ont été exécutées. Celle que fit Gay-Lussac, en 1804, fut la plus remarquable par les faits dont elle a enrichi la science, et par la hauteur qu'atteignit le célèbre physicien, hauteur qui fut de 7016 mètres au-dessus du niveau des mers. Depuis, M. Green s'est élevé plus haut encore. A cette hauteur, le baromètre était descendu à 32 centimètres, et le thermomètre centigrade, qui marquait 31 degrés à la surface du sol, était alors à  $9^{\circ},5$  au-dessous de zéro. Une ascension récente a donné, pour la même hauteur, une température encore plus basse.

Dans ces hautes régions, la sécheresse était telle, le jour de l'ascension de Gay-Lussac, en juillet, que les substances hygrométriques, telles que le papier, le parchemin, se desséchaient et se tordaient, comme si on les eût présentées au feu. La respiration et la circulation du sang s'accéléraient à cause de la grande raréfaction de l'air : Gay-Lussac a constaté que son pouls faisait alors 120 pulsations, au lieu de 66, qui était son état normal. A cette grande hauteur, le ciel prend une teinte bleue très-foncée, tirant sur le noir, et un silence absolu et solennel entoure l'aéronaute.

Parti de la cour du Conservatoire des arts et métiers, Gay-Lussac descendit auprès de Rouen, au bout de six heures, ayant fait environ trente lieues.

170. **Construction, remplissage et ascension des aérostats.** — L'enveloppe des aérostats est formée de longs fuseaux de taffetas cousus ensemble et enduits d'un vernis au caoutchouc, qui rend le

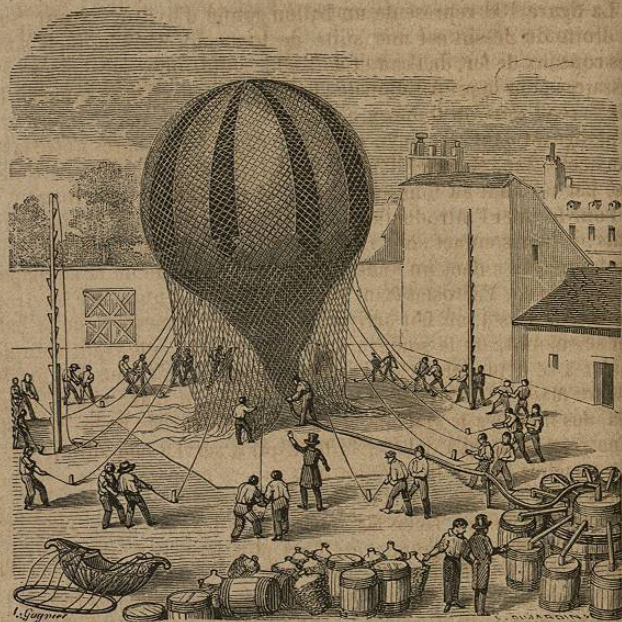


Fig. 108 (h = 15<sup>m</sup>).

tissu imperméable. Au sommet du ballon est une soupape que maintient fermée un ressort, et que l'aéronaute peut ouvrir à volonté, à l'aide d'une corde. Une légère nacelle d'osier, dans laquelle peuvent se placer plusieurs personnes, pend au-dessous du ballon, soutenue par un filet de corde qui enveloppe celui-ci en entier (fig. 108 et 109).

Un ballon de dimension ordinaire, pouvant enlever facilement trois personnes, a environ 15 mètres de hauteur, 11 mètres de diamètre, et son volume, quand il est gonflé complètement, est de près de 700 mètres cubes. L'enveloppe pèse 100 kilogrammes, et les accessoires, tels que filet, nacelle, 50 kilogrammes.

On gonfle les ballons, soit avec l'hydrogène pur, soit avec l'hydrogène carboné qui sert à l'éclairage. Bien que ce dernier gaz soit plus dense que le premier, on l'emploie généralement aujourd'hui, parce qu'on l'obtient plus facilement et à meilleur compte que l'hydrogène pur. Il suffit, en effet, de le faire arriver de l'usine à gaz la plus voisine jusqu'à l'aérostat, au moyen d'un conduit de toile gommée.

La figure 108 représente un ballon gonflé d'hydrogène pur. Sur la droite du dessin est une suite de tonneaux dans lesquels sont des copeaux de fer, de l'eau et de l'acide sulfurique, substances nécessaires pour la préparation de l'hydrogène. De chaque tonneau le gaz se rend sous un tonneau central, défoncé à la partie inférieure et plongeant dans une cuve remplie d'eau. Le gaz, après s'être lavé dans cette eau, se rend dans l'aérostat par un long tube de toile, fixé par un bout au tonneau central, et par l'autre à l'aérostat.

Pour faciliter l'introduction du gaz dans le ballon, on dresse deux mâts ; à leur sommet sont des poulies sur lesquelles s'enroule une corde qui passe dans un anneau fixé à la couronne de la soupape. Par ce moyen, l'aérostat étant d'abord soulevé d'un mètre environ au-dessus du sol, on fait arriver le gaz ; puis, à mesure que le ballon se remplit, on le soulève un peu plus haut, en ayant soin de l'aider à se déployer, et cela jusqu'à ce qu'il n'ait plus besoin de tutelle. Mais il faut alors s'opposer à sa force d'ascension. Pour cela, des hommes le retiennent au moyen de cordes fixées au filet. Il ne reste plus qu'à enlever le tube qui a servi à conduire le gaz, et à attacher la nacelle au filet. Ces divers préparatifs exigent au moins deux heures. L'aéronaute se place enfin dans la nacelle ; à un signal donné, on lâche les cordes, et le ballon s'élève avec une vitesse d'autant plus grande, qu'il est plus léger par rapport à l'air déplacé (fig. 109).

Il importe de ne pas gonfler un ballon complètement ; car la pression atmosphérique diminuant à mesure qu'il s'élève, le gaz intérieur se dilate en vertu de sa force expansive, et tend à le faire crever.

Il suffit que la force d'ascension, c'est-à-dire l'excès du poids de l'air déplacé sur le poids total de l'appareil, soit de 4 à 5 kilogrammes. Il est à remarquer que cette force reste constante tout le temps que le ballon n'est pas complètement gonflé par la dilatation du gaz intérieur. En effet, si la pression atmosphérique est devenue, par exemple, deux fois plus petite, le gaz de l'aérostat, d'après la loi de Mariotte, a doublé de volume. Il en résulte que le volume d'air déplacé est lui-même devenu deux fois plus grand ; d'ailleurs sa densité est deux fois moindre ; donc son poids et, par suite, la

poussée de bas en haut n'ont pas changé. Mais une fois que le ballon est complètement gonflé, s'il continue à s'élever, la force d'ascension décroît; car, le volume d'air déplacé restant le même,



Fig. 109.

sa densité diminue. Il vient donc un moment où la poussée est égale au poids du ballon. Par conséquent, le ballon ne fait alors que suivre une direction horizontale, emporté par les courants d'air qui règnent dans l'atmosphère.

Ce n'est que d'après les indications du baromètre que l'aéronaute sait s'il monte ou s'il descend. Dans le premier cas, la colonne de mercure s'abaisse; elle s'élève dans le second. C'est à l'aide du même instrument qu'il évalue la hauteur à laquelle il se trouve. Une longue banderole fixée à la nacelle (fig. 109) indique aussi, par la position qu'elle prend au-dessous ou au-dessus de celle-ci, si l'on monte ou si l'on descend.

Lorsque l'aéronaute veut opérer sa descente, il tire la corde qui ouvre la soupape placée à la partie supérieure du ballon; l'hydrogène se mélange alors avec l'air extérieur, et le ballon baisse. Au contraire, pour ralentir la descente, lorsqu'elle est trop rapide, ou pour remonter, si elle s'effectue dans un endroit périlleux, l'aéronaute vide des sacs de toile pleins de sable, dont il a soin de se munir en quantité suffisante. Ainsi allégé, le ballon s'élève de nouveau, pour descendre ensuite dans un lieu plus propice. On facilite encore la descente en suspendant

par une longue corde une ancre à la nacelle. Une fois que cette ancre est fixée à un obstacle, on s'abaisse lentement en tirant sur la corde.

Les aérostats n'ont pas eu jusqu'ici d'applications importantes. A la bataille de Fleurus, en 1794, on fit usage d'un ballon captif, c'est-à-dire retenu par une corde, dans lequel était un observa-



Fig. 110.

teur qui faisait connaître par des signaux les mouvements de l'ennemi. Plusieurs ascensions ont aussi été entreprises dans le but de faire des observations météorologiques dans les hautes régions de l'atmosphère. Mais les aérostats ne pourront être d'une véritable utilité que le jour où l'on pourra les diriger. Les tentatives faites jusqu'ici dans ce but ont complètement échoué. On n'a aujourd'hui d'autre ressource que de s'élever dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'on rencontre un courant d'air qui porte plus ou moins dans la direction qu'on veut suivre.

171. **Parachute.** — Le parachute a pour objet de permettre à l'aéronaute d'abandonner son ballon, en lui donnant le moyen de

ralentir la vitesse de la chute. Cet appareil est formé d'une vaste toile circulaire (fig. 110) d'environ 5 mètres de diamètre, qui, par l'effet de la résistance de l'air, s'étend en forme d'un vaste parapluie, et ne tombe que lentement. Sur le contour sont fixées des cordes qui soutiennent une nacelle où se place l'aéronaute. Au centre du parachute est une ouverture par laquelle s'échappe l'air comprimé par l'effet de la descente; autrement il se produit des oscillations qui se communiquent à la nacelle et peuvent être dangereuses.

Dans la figure 109, on voit, sur le côté du ballon, un parachute plié et attaché au filet au moyen d'une corde passant sur une poulie pour venir se fixer à la nacelle. Il suffit de lâcher cette corde pour que le parachute abandonne l'aérostat.

C'est J. Garnerin qui, le premier, descendit en parachute; mais c'est Blanchard qui paraît en être l'inventeur.

172. **Calcul du poids que peut enlever un ballon.** — Pour calculer le poids que peut enlever un ballon dont les dimensions sont données, supposons le parfaitement sphérique, et rappelons que les formules qui donnent le volume et la surface de la sphère en fonction du rayon sont  $V = \frac{4\pi R^3}{3}$ , et  $S = 4\pi R^2$ ,  $\pi$  étant

le rapport de la circonférence au diamètre et égale à 3,1416. Cela posé, le rayon  $R$  étant mesuré en décimètres, soient  $p$  le poids du mètre carré du taffetas dont le ballon est formé,  $P$  le poids de la nacelle et de ses accessoires,  $a$  le poids d'un litre d'air à zéro et à la pression 0<sup>m</sup>,76, et  $a'$  le poids d'un litre d'hydrogène dans les mêmes conditions. Le poids total de l'enveloppe, en kilogrammes, est donc représenté par  $\frac{4\pi R^2 p}{100}$ ; celui de l'hydrogène par  $\frac{4\pi R^3 a'}{3}$ ; et celui de l'air dé-

placé, par  $\frac{4\pi R^3 a}{3}$ ; c'est la poussée. En représentant par  $X$  le poids que le ballon peut porter, on a donc.

$$X = \frac{4\pi R^3 a}{3} - \frac{4\pi R^3 a'}{3} - \frac{4\pi R^2 p}{100} - P,$$

ou

$$X = \frac{4\pi R^3}{3} (a - a') - \frac{4\pi R^2 p}{100} - P.$$

Toutefois, comme on l'a vu ci-dessus, afin que le ballon s'élève, on doit prendre pour  $X$  une valeur plus petite de 3 kilogrammes environ que celle obtenue par cette équation. Il y a aussi, en général, des corrections de température et de pression à faire aux poids de l'air et de l'hydrogène; et enfin, dans la pratique, on doit tenir compte de ce que le ballon n'est jamais complètement gonflé au départ, ce qui revient à lui donner un volume moindre que celui calculé par la formule  $\frac{4\pi R^3}{3}$ .

## CHAPITRE IV.

## APPAREILS FONDÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'AIR.

173. **Machine pneumatique.** — La *machine pneumatique* est un appareil qui sert à faire le vide dans un espace déterminé, ou, plus rigoureusement, à raréfier l'air, car elle ne peut donner le vide absolu.

Cette machine a été inventée par Otto de Guéricke, bourgmestre

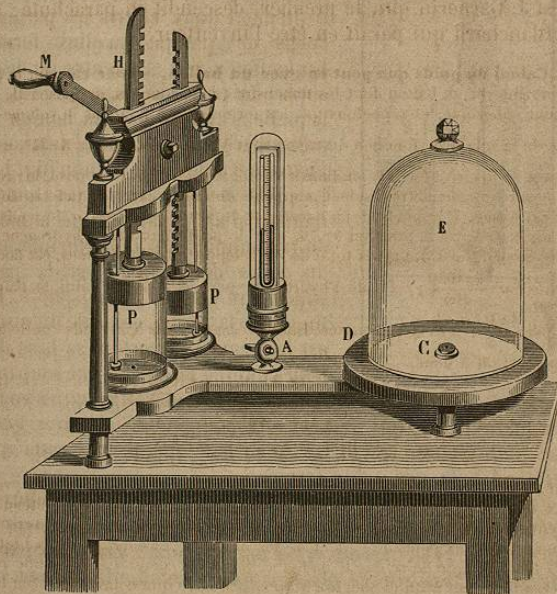


Fig. 111 (h = 70).

de Magdebourg, en 1650, peu d'années après l'invention du baromètre. Ce physicien ne donna à sa machine qu'un seul corps de pompe. C'est Hawksbee, physicien anglais, qui, le premier, adopta deux corps de pompe, et rendit ainsi la manœuvre de la machine plus prompte et moins pénible, car les pressions exercées par l'at-