particulièrement sensible dans les baromètres (de poche) qui servent aux courses et aux ascensions aérostatiques, où ils subissent des variations de pression brusques et considérables. Pour apprécier la précision d'un instrument de ce genre, il faut l'essayer, comparativement à un baromètre à mercure, dans un récipient où l'on fait varier graduellement la pression entre les limites pour lesquelles il est construit. Cet essai doit être répété de temps à autre, à titre de vérification.

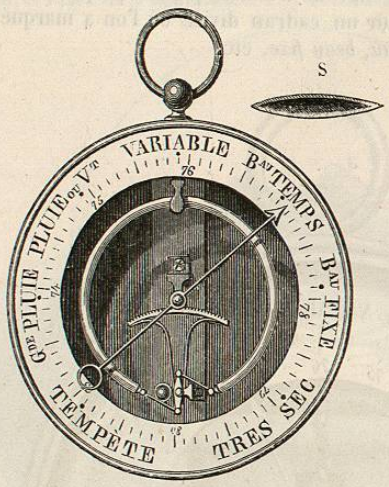

Fig. 229.

5° Remarque. — Il nous reste à décrire les *baromètres enregistreurs*, spécialement employés en météorologie, pour *enregistrer*, c'est-à-dire pour noter d'une manière continue, les variations incessantes de la pression atmosphérique en un lieu donné : tels sont le *baromètre statique* ou *barographe de Secchi*, le *baromètre Rédier*. Nous décrirons le premier de ces instruments, qui peut leur servir de type, dans le livre consacré à la Météorologie.

CHAPITRE II

STATIQUE DES GAZ

—

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE ET AÉROSTATS.

210. **Extension du principe d'Archimède au cas des gaz.** — Tous les gaz en général, et l'atmosphère en particulier, étant fluides et pesants, exercent, comme les liquides pesants en équilibre,

des pressions normales sur les corps solides qui y sont immergés. Ces pressions ont, dans chaque cas, une résultante unique, qui est déterminée, comme pour les liquides pesants, par le principe d'Archimède. On peut donc généraliser, comme il suit, l'énoncé de ce principe fondamental :

Lorsqu'un corps solide est entièrement plongé dans *un fluide pesant en équilibre*, les pressions qui s'exercent à sa surface ont une résultante unique, égale et directement opposée au poids *du volume fluide déplacé* et appliquée au centre de gravité de ce volume.

On peut démontrer ce principe *à priori* pour les gaz, comme on l'a fait précédemment (158) pour les liquides. On peut aussi le vérifier expérimentalement à l'aide d'un petit instrument appelé *baroscope*.

211. **Expérience du baroscope.** — 1° *Description.* — Cet appareil consiste en une sorte de petite balance dont le fléau supporte, au lieu de plateaux, d'un côté une petite masse de plomb *b*, et de l'autre une sphère de cuivre creuse *a*, dont le volume est environ d'un demi-centimètre cube (fig. 230). On peut régler la distance de la masse *b* de manière que les deux corps se fassent équilibre, soit dans l'air, soit dans le vide.

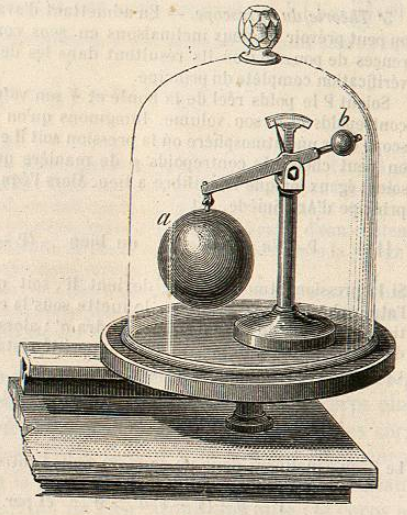

Fig. 230.

2° *Usages.* — Cet instrument avait été inventé par Otto de Guericke pour mesurer, ou tout au moins pour indiquer, les variations de la pression atmosphérique : et c'est de là que lui vient son nom (de βάρος, pesanteur, et σκοπεῖν, examiner). Cet usage a été abandonné depuis l'invention du baromètre, et le baroscope ne sert plus qu'à manifester l'existence de la poussée des gaz et à vérifier le principe d'Archimède, sous la forme suivante :

Tout corps plongé dans une atmosphère gazeuse paraît y perdre une partie de son poids égale au poids du gaz qu'il déplace.

On commence par établir dans l'air l'horizontalité du fléau; puis on place l'appareil sous un récipient où l'on fait le vide à l'aide d'une machine pneumatique : on voit alors le fléau s'incliner du côté de la grosse sphère (fig. 230). Cela prouve évidemment que le poids réel de la sphère est plus fort que celui de la petite masse de plomb, puisque actuellement elles ne supportent ni l'une ni l'autre aucune poussée sensible et qu'elles obéissent librement à la pesanteur. Si donc elles se faisaient équilibre dans l'air, c'est que l'excès de poids de la grosse sphère était compensé par l'excès de poussée qu'elle subissait de la part du gaz : ce qui prouve l'existence de cette poussée.

On pourrait faire l'expérience inverse, c'est-à-dire équilibrer la sphère d'abord dans le vide, à l'aide du contrepoids, puis laisser rentrer l'air sous le récipient : on verrait le fléau s'incliner, cette fois, du côté de la masse de plomb.

3° *Théorie du baroscope.* — En admettant d'avance le principe d'Archimède, on peut prévoir ces deux inclinaisons en sens contraires, et calculer les différences de poussée d'où ils résultent dans les deux cas : ce qui constitue une vérification complète du principe.

Soient P le poids réel de la boule et V son volume; soient p le poids réel du contrepoids et v son volume. Imaginons qu'on établisse l'équilibre du baroscope dans une atmosphère où la pression soit H et le poids spécifique de l'air a; on peut choisir le contrepoids p de manière que les bras de levier du fléau soient égaux lorsque l'équilibre a lieu. Alors l'équation d'équilibre, fondée sur le principe d'Archimède, est

$$[1] \qquad P - Va = p - va, \qquad \text{ou bien} \qquad (P - p) - (V - v)\,a = 0.$$

Si la pression atmosphérique devient H', soit qu'on laisse l'instrument dans l'atmosphère libre, soit qu'on le mette sous la cloche d'une machine pneumatique, le poids du litre d'air deviendra a' : alors l'équation d'équilibre cessera d'être satisfaite, puisque, le terme positif restant constant, le terme négatif varie en même temps que a. On aura

$$P - p - (V - v)\,a' \gtrless 0.$$

Le fléau s'inclinera dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'on aura

$$P - p - (V - v)\,a' > 0 \qquad \text{et par suite} \qquad a' < a$$

ou bien

$$(P - p) - (V - v)\,a' < 0 \qquad \text{et par suite} \qquad a' > a.$$

Par conséquent l'inclinaison du fléau indiquera directement ces variations de densité. Or, les variations de la pression atmosphérique étant, comme nous le verrons bientôt, exactement proportionnelles aux variations de la densité de l'air, on comprend qu'on puisse utiliser l'instrument pour évaluer ces dernières, ainsi que l'avait imaginé Otto de Guericke.

212. **Conséquences du principe d'Archimède : Poids réels et poids apparents. — Correction des pesées faites dans l'air.** — Les corps perdant dans l'air une partie de leur poids égale au poids du gaz qu'ils déplacent, il y a lieu de distinguer entre leur *poids réel*, c'est-à-dire leur *poids dans le vide*, et leur *poids apparent*, c'est-à-dire leur *poids dans l'air*. La balance ne donne pas le poids réel, mais seulement le 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 aurait perte égale des deux côtés.

On peut déduire du poids apparent d'un corps son poids réel. Soient p son poids réel en kilogrammes et d son poids spécifique, $\frac{p}{d}$ sera le volume du corps en litres (d'après la formule connue $P = VD$). Soit a le poids d'un litre d'air dans les conditions de température et de pression où s'est faite la pesée; celui de l'air déplacé par le corps est $a\frac{p}{d}$. Donc son poids apparent est

$$p - a\frac{p}{d} \qquad \text{ou} \qquad p\left(1 - \frac{a}{d}\right).$$

De même, les poids marqués qui servent dans la pesée ont été échantillonnés dans le vide : ils n'interviennent donc, dans l'équilibre du fléau, que par leur poids apparent. Soient P la somme de ces poids et D la densité de leur substance, on trouve de même que leur poids apparent est $P\left(1 - \frac{a}{D}\right)$. Si la balance est juste, ces deux poids apparents sont égaux, et l'on peut écrire l'équation d'équilibre

$$p\left(1 - \frac{a}{d}\right) = P\left(1 - \frac{a}{D}\right),$$

d'où l'on tirera la valeur de p.

Remarques. — 1° *Correction de température.* — Si la pesée était faite à zéro et sous la pression $0^m,76$, a serait égal au poids du litre d'air normal, qui est $0^k,001293$. Dans le cas général, on doit tenir compte non seulement des variations de température et de pression, mais aussi de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, car elle modifie le poids de l'air déplacé : alors la valeur de a s'obtient par une formule que nous verrons plus loin.

2° *Cas des corps très lourds.* — Cette rigueur dans les pesées n'est pas indispensable quand on pèse des corps très lourds, comme les métaux; mais elle le devient quand on pèse des gaz ou des vapeurs.

213. **Conséquences du principe d'Archimède : Équilibre des corps immergés dans l'atmosphère.** — On peut appliquer aux corps plongés dans l'air ou dans un autre gaz tout ce qui a été dit des corps plongés dans les liquides (161). Soient V le volume d'un corps, D son poids spécifique à la température de l'atmosphère ambiante et a le poids spécifique actuel de l'air atmosphérique : le corps est soumis à deux forces verticales et opposées, son poids VD et la poussée de l'air Va, dont la résultante est une force verticale, d'intensité égale à $V(D - a)$ et dirigée dans le sens de la plus grande. Il y a trois cas à considérer.

1° D *est plus grand que* a, c'est-à-dire que *le corps est plus dense que l'air*, ce qui est le cas le plus général : il tombe à terre, entraîné, non par son poids réel VD, mais par son poids apparent $V(D - a)$.

2° $D = a$, c'est-à-dire que *le corps a la même densité que l'air :* son poids et la poussée de bas en haut se font équilibre, et le corps flotte dans l'atmosphère.

3° $D < a$, c'est-à-dire que *le corps est moins dense que l'air :* c'est la poussée qui l'emporte et le corps s'élève jusqu'à ce qu'il rencontre des couches d'air de même densité que lui. La force d'ascension est égale alors à $V(D - a)$: c'est l'excès de la poussée sur le poids du corps.

Ces deux derniers cas s'appliquent aux corps flottant dans l'atmosphère, parmi lesquels on peut citer la fumée, les vapeurs, les nuages et surtout les aérostats.

214. **Aérostats : montgolfières et ballons.** — Les *aérostats*[1] sont des globes d'étoffe légère et imperméable, qui, remplis d'air chaud, d'hydrogène ou de tout autre gaz plus léger que l'air, s'élèvent dans l'atmosphère ou s'y tiennent en équilibre, conformément aux conditions d'équilibre des corps flottant dans les gaz.

Les premiers aérostats furent gonflés à l'air chaud : on les appelle plus particulièrement *montgolfières* (du nom de leurs inventeurs, les frères *Montgolfier*). On ne les remplit guère aujourd'hui qu'à l'hydrogène ou au gaz d'éclairage ; et on les appelle ordinairement *ballons*[2].

Les hommes qui montent dans l'aérostat, et exécutent la manœuvre de cette sorte de navigation aérienne, se nomment des *aéronautes* (de ἀήρ, air, et ναύτης, navigateur).

215. **Principaux organes d'un aérostat : description.** — Les principaux perfectionnements de l'invention des Montgolfier furent apportés, dès le début, par le physicien Charles, qui répéta leur expérience immédiatement.

1° *Forme des aérostats.* — La première forme qui ait été donnée aux aérostats est celle d'un globe à peu près sphérique, terminé à sa partie inférieure par un appendice cylindrique ou conique. Dans la montgolfière (fig. 238), cet appendice est percé d'une large ouverture par où s'introduit l'air chauffé; dans le ballon (fig. 231 et 233), l'appendice se termine par une pointe munie d'un étroit orifice, par où le gaz hydrogène peut s'échapper en cas de dilatation exagérée, de manière à éviter une rupture par excès de pression. De plus, tous les ballons sont percés, à leur partie supérieure, d'une autre ouverture, mais celle-ci fermée à l'aide d'une soupape à ressort. L'aéronaute peut ouvrir à volonté cette soupape, à l'aide d'une corde qui y est attachée et qui descend dans la nacelle jusqu'à sa portée (fig. 231). Cette forme sphérique est encore la plus ordinairement employée : c'est celle que tendrait naturellement à prendre l'enveloppe sous la pression du gaz qu'elle renferme, si elle était partout également extensible; mais ce n'est pas la plus avantageuse au point de vue de la résistance que l'air oppose à la progression du ballon. Aussi les aéronautes qui ont essayé, dans ces derniers temps, de construire des ballons dirigeables, leur ont-ils donné une forme ellipsoïdale, plus ou moins allongée dans le sens du mouvement de progression (fig. 241). On réduit ainsi au minimum la résistance de l'air; mais on diminue également la solidité de l'enveloppe. On est alors obligé d'employer pour ces ballons allongés des étoffes plus solides, plus résistantes et partant plus lourdes que pour des ballons sphériques de même capacité : de sorte qu'on perd en partie, du côté de la force d'ascension, ce qu'on gagne du côté de la facilité de progression.

1. Ce mot vient de ἀήρ, air, et στατός, arrêté (de στάω, je suis debout, en latin *stare*).

2. On peut faire rentrer dans la catégorie des aérostats les machines volantes qu'on appelle *aéronefs*. Mais ce sont des aérostats *plus lourds que l'air*, des sortes d'*oiseaux artificiels*, qui empruntent au mécanisme physiologique du vol les moyens de se soutenir et de progresser dans l'air. La construction de ces appareils *plus lourds que l'air*, qui constitue le problème de l'*aviation*, est encore peu avancée.

2° *Structure de l'enveloppe.* — L'enveloppe des aérostats doit être faite avec une étoffe à la fois solide et imperméable aux gaz, surtout pour les ballons à hydrogène. Montgolfier avait pris simplement de la toile doublée de papier, qu'il avait cousue sur un réseau de ficelles. Cette enveloppe, qui suffisait à peu près pour conserver de l'air chaud, eût été absolument incapable de garder un gaz plus léger. Aussi dès sa seconde expérience il employa de la toile d'emballage doublée à l'extérieur et à l'intérieur d'un papier très fort. Le physicien Charles construisait ses ballons avec du taffetas de soie, recouvert d'un enduit de caoutchouc. Les derniers progrès en ce genre ont été réalisés par l'ingénieur Giffard. Il obtint une imperméabilité presque parfaite en fabriquant l'enveloppe avec deux tissus de toile, séparés par une feuille de caoutchouc, et recouverts d'une feuille de mousseline, vernie elle-même à la gomme laque et peinte de plusieurs couches à l'huile.

3° *Filet* et *nacelle.* — Tous les aérostats destinés à enlever des aéronautes sont munis d'une nacelle et d'un filet. Celui-ci protège le ballon, dont il recouvre tout l'hémisphère supérieur; un peu au-dessous du grand cercle équateur, toutes les cordes du filet se détachent, en s'écartant de la surface du ballon, et viennent aboutir et s'attacher à la circonférence d'un cercle en bois très dur, auquel est suspendue la nacelle (fig. 231). Le filet enveloppe le

ballon sans y être fixé ; il le protège sans le comprimer, il se prête à tous ses mouvements de contraction ou de dilatation, enfin il

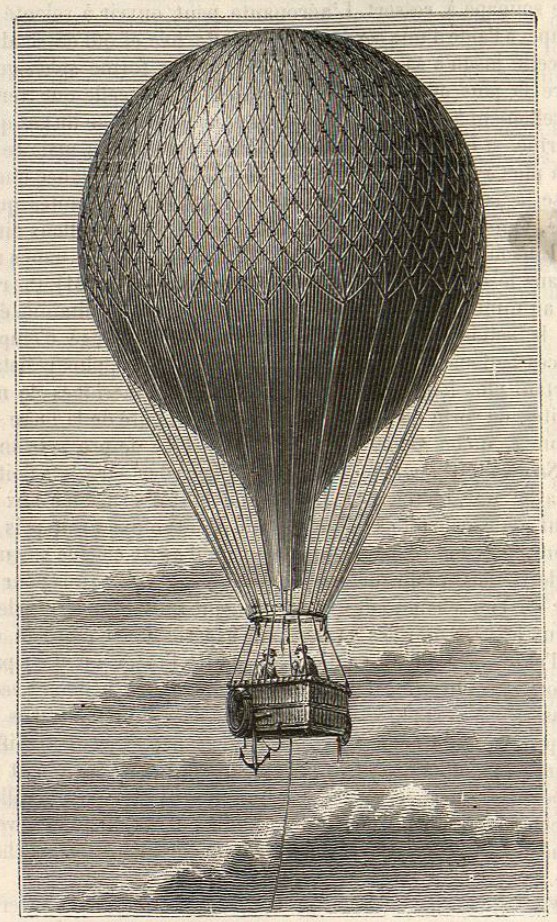

Fig. 231

répartit également sur toute sa surface la charge de la nacelle. Celle-ci se compose d'une sorte de panier en osier, plus ou moins vaste, suivant l'usage auquel on la destine, suivant le nombre des

aéronautes qu'elle doit contenir ou la quantité des accessoires, des agrès et des instruments qui doivent servir dans l'ascension (fig. 232).

4° *Accessoires usuels.* — Parmi ces accessoires ou instruments, il y en a deux qui sont pour ainsi dire indispensables : le *lest* et un *baromètre*.

Le *lest* se compose d'un certain nombre de sacs de toile pleins de sable. Ils ne servent pas en réalité à *lester* le ballon, c'est-à-dire à augmenter sa stabilité, comme fait le lest des navires;

Fig. 232.

mais on peut, en les vidant à propos, diminuer à volonté le poids du ballon, et augmenter en proportion sa force d'ascension. Le lest permet donc de régler l'ascension, de modérer la vitesse de chute ou de l'annuler à propos. Quant au *baromètre*, il est le compagnon obligé de toutes les ascensions : c'est la marche de la colonne barométrique qui peut seule indiquer à l'aéronaute, à partir d'une certaine altitude, si l'aérostat monte ou descend.

Enfin, on emporte généralement un rouleau de corde à nœuds, d'une cinquantaine de mètres (*guide-rope*), avec une ou deux ancres (fig. 232), qui peuvent servir à régler la descente du ballon et à l'arrêter dans sa course.

216. Construction et remplissage des aérostats. — Le tissu qui doit former l'enveloppe est découpé d'abord en longs fuseaux, qui constituent comme les méridiens d'une sphère. On les coud ensemble, avec beaucoup de soin, de manière à ne laisser entre eux ni interstices, ni fissures, ni même les trous des piqûres d'aiguilles, par où le gaz intérieur pourrait s'échapper. Il reste alors à gonfler l'aérostat.

1° *Montgolfières.* — Dans ce cas l'opération est très simple. Il suffit de placer un réchaud au-dessous de l'ouverture de l'enveloppe et d'y brûler des matières combustibles. L'air échauffé s'élève au-dessus du foyer, s'engouffre dans l'ouverture de l'enveloppe, en distend les parois et finit par remplir l'aérostat en lui donnant la forme sphérique.

Mais ce procédé de gonflement, si simple et si commode, a le grave inconvénient de n'être pas définitif. L'aérostat ne peut rester gonflé qu'autant que l'air intérieur y reste chaud, et l'on ne peut conserver à celui-ci sa température initiale qu'en l'entretenant à l'aide d'un foyer permanent, que doit emporter la montgolfière, en même temps que la nacelle : ce qui constitue un danger continuel d'incendie. Cependant l'usage des montgolfières est si commode et si économique, par rapport à celui des ballons, qu'on a cherché à le conserver en perfectionnant le mode de gonflement. On a substitué d'abord une éponge imbibée d'alcool au combustible encombrant de la paille et de la laine; de plus, l'aéronaute Godard a adapté au foyer une cheminée fermée par un tube métallique, qui, dans une certaine mesure, pare au danger d'incendie.

2° *Ballons à hydrogène.* — On prépare le gaz par la méthode ordinaire, c'est-à-dire par la réaction de l'acide sulfurique dilué sur le zinc ou le fer. Il est important que l'hydrogène soit purifié de vapeurs acides, qui pourraient attaquer les tissus ou les enduits de l'enveloppe et en altérer la solidité ou l'imperméabilité.

La figure 233 représente l'ancien dispositif longtemps employé pour cette opération. On y voit, sur la droite, une série de tonneaux qui contenaient les copeaux de fer, l'eau et l'acide sulfurique nécessaires pour la préparation de l'hydrogène. De chaque tonneau le gaz se rend dans une espèce de gazomètre formé par un plus grand tonneau central, défoncé à la partie inférieure et plongeant dans une cuve remplie d'eau; le gaz se lave dans cette eau, puis il se rend dans l'aérostat par un long tube abducteur en toile. A mesure que le ballon se remplit, des hommes le retiennent au moyen de cordes fixées au filet. Quand il est suffisamment plein, il ne reste plus qu'à enlever le tube. L'aéronaute se place

enfin dans la nacelle; au cri de *lâchez tout!* 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.

La figure 234 représente les perfectionnements qui ont été apportés à l'ancien dispositif. Les tonneaux à acide sulfurique sont proprement alignés sur des supports et sous un appentis; le gaz qui s'en dégage vient s'accumuler et se laver dans un véritable

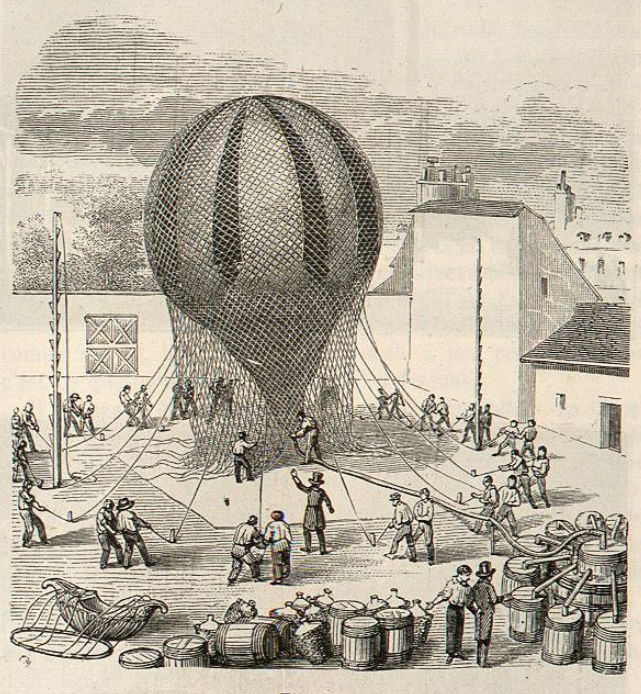

Fig. 233.

gazomètre, analogue à ceux des usines à gaz. C'est de là que l'hydrogène purifié est amené par un tube abducteur dans l'appendice inférieur de l'enveloppe. Celle-ci est solidement amarrée au sol dans l'intérieur d'une enceinte destinée à la préserver de tout accident. L'expérience a démontré en effet que l'amarrage le plus solide n'était pas suffisant pour garantir des déchirures et autres avaries causées par le vent un ballon de grandes dimensions. Il faut nécessairement un hangar ou quelque autre

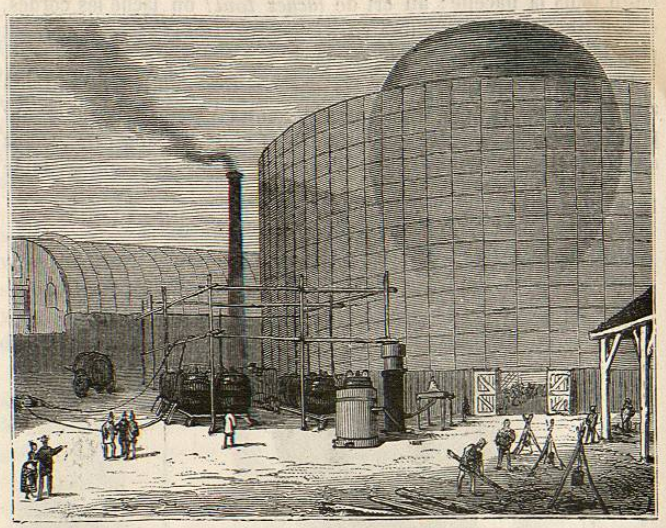

Fig. 234.

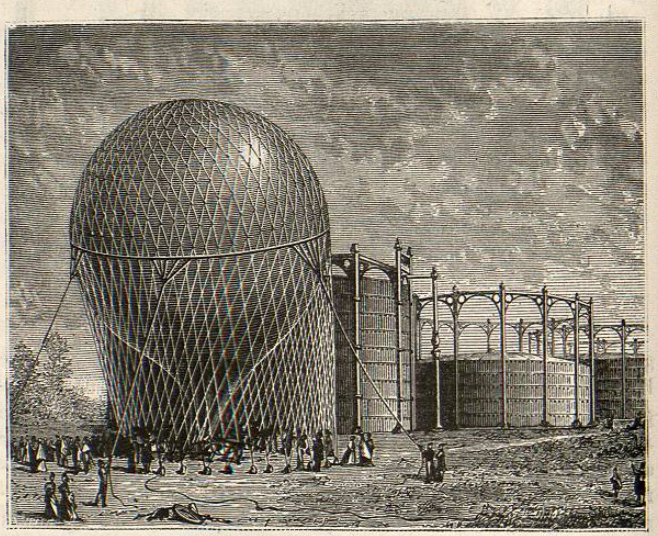

Fig. 235.

abri pour remiser l'appareil, soit au repos, soit pendant le gonflement.

3° *Ballons au gaz de l'éclairage.* — L'hydrogène est le plus avantageux des gaz au point de vue aérostatique, parce qu'il est le plus léger des gaz; mais les difficultés de sa préparation et son prix de revient élevé lui font préférer ordinairement le gaz de l'éclairage, dont la densité est beaucoup plus grande (environ 0,65), mais qu'on peut obtenir aisément, et à peu de frais, partout où il y a des usines à gaz. La figure 235 montre le dispositif d'un gonflement de ballon au gaz de l'éclairage dans l'enceinte même d'une usine à gaz. On peut y remarquer le mode d'arrimage du ballon, ainsi que la disposition du filet autour de l'enveloppe.

Remarque. — Dans aucun cas l'on ne gonfle complètement l'aérostat. On cesse soit d'en chauffer l'air, soit d'y introduire du gaz avant que l'enveloppe ait acquis son maximum de tension. Cette précaution offre deux avantages : le premier, de laisser le gaz intérieur se dilater librement et sans danger de rupture pour l'enveloppe à mesure que la pression extérieure diminue par suite de l'ascension dans les couches supérieures de l'atmosphère; le second, de conserver à l'aérostat une force d'ascension, ou, comme on dit, une *force ascensionnelle* à peu près constante : c'est ce que nous allons démontrer ci-dessous.

217. **Théorie des aérostats. — Force ascensionnelle.** — La théorie des aérostats est une conséquence directe des conditions d'équilibre d'un corps immergé dans un fluide pesant. En effet, tout aérostat plongé dans l'atmosphère y est soumis à deux forces :

1° Son poids P, force verticale et dirigée de haut en bas, résultante de plusieurs poids partiels, qui sont le poids du gaz enfermé dans l'enveloppe, le poids de cette enveloppe elle-même et celui des accessoires (nacelle, aéronautes, agrès, instruments, etc.).

2° La poussée P′, force verticale et dirigée de bas en haut, qui, d'après le principe d'Archimède, est égale au poids du volume d'air déplacé par l'aérostat *tout entier*.

Si la poussée P′ est plus forte que le poids P, l'aérostat montera dans l'atmosphère, sous l'influence d'une force F, verticale et dirigée de bas en haut, égale à la résultante des deux forces P′ et P, c'est-à-dire à leur différence. Cette force accélératrice F s'appelle la *force ascensionnelle* de l'aérostat. On a, par définition,

$$F = P' - P.$$

Il suffit que la force F soit de 4 à 5 kilogrammes au départ pour que l'aérostat s'enlève.

Remarque. — La force ascensionnelle reste *sensiblement constante* tout le temps que le ballon n'est pas complètement gonflé par la dilatation du gaz intérieur, à la condition toutefois de négliger le poids de l'enveloppe et des agrès (qui sont d'ailleurs négligeables par rapport au poids total). En effet, si la pression atmosphérique est devenue, par exemple, deux fois plus petite à une certaine altitude, le gaz de l'aérostat (d'après la loi de Mariotte, que nous étudierons plus loin) a doublé de volume. Il en résulte que le volume d'air déplacé est lui-même devenu deux fois plus grand; en même temps, les densités des deux gaz sont devenues deux fois moindres : donc ni le poids intérieur P ni la poussée P′ n'ont changé, ni par suite la force ascensionnelle F qui est égale à P′ — P. Mais une fois que le ballon est complètement gonflé, s'il continue à s'élever, la force ascensionnelle décroît nécessairement; car, le volume d'air déplacé restant le même, sa densité diminue, et il vient un moment où la poussée est égale au poids du ballon. On est alors dans le cas d'équilibre, ou P = P′; la force F est nulle, et l'aérostat ne peut monter; il ne peut que suivre une direction horizontale, emporté par les courants aériens qui règnent dans l'atmosphère.

Calcul de la force ascensionnelle. — Quant on connaît la capacité de l'aérostat, la densité de l'air atmosphérique et celle du gaz intérieur, le poids spécifique moyen de l'enveloppe et le poids des accessoires, il est facile de calculer la force ascensionnelle de l'appareil. Il suffit d'appliquer la formule de définition, et de calculer séparément P et P′.

Soient V la capacité du ballon (supposé complètement gonflé), exprimée en mètres cubes; a le poids du mètre cube à 0° et sous la pression normale, et a' le poids du mètre cube du gaz, dans les mêmes conditions; S la surface de l'enveloppe extérieure (non compris celle de la nacelle et des agrès), δ le poids moyen de l'unité de surface de l'enveloppe, et Π le poids total de l'ensemble des accessoires. On aura évidemment

$$P' = Va' \quad \text{(en négligeant la poussée de l'air déplacé par les accessoires)}$$

et

$$P = Va + \Pi,$$

d'où

$$F = V(a' - a) - \Pi.$$

Force ascensionnelle des gaz. — Le terme positif de cette formule est de beaucoup le plus important. Le facteur $(a' - a)$, qui est égal à la différence des poids de l'air et du gaz dans les conditions normales, s'appelle quelquefois *force ascensionnelle spécifique* du gaz. Ce coefficient, en effet, est caractéristique de ce gaz, au point de vue aérostatique.

Ainsi, pour l'*air chaud* des montgolfières, on a les valeurs suivantes du poids, par mètre cube :

1293	grammes à	0°
1247	—	10°
955	—	50°
278	—	100°

Par conséquent, la *force ascensionnelle spécifique* de l'air chaud est

46	grammes à	10°
338	—	50°
1015	—	100°

Pour l'*hydrogène*, le coefficient $(a' - a)$ est notablement plus élevé : il est de 1203 grammes à 0°.

Pour le *gaz de l'éclairage*, la valeur moyenne est de 693 grammes.

Ce coefficient varie nécessairement avec la température et la pression : il diminue quand la pression diminue et quand la température s'élève. Ainsi, à la température assez ordinaire de 10°, il n'est plus que de 1160 grammes pour l'hydrogène et de 670 grammes pour le gaz de l'éclairage.

Exemple numérique. — On peut citer le ballon captif, construit par Giffard en 1878, et qui fit plusieurs ascensions par jour, dans la cour des Tuileries, pendant toute la durée de l'Exposition universelle.

L'enveloppe sphérique avait 36 mètres de diamètre; par suite, lorsqu'elle était entièrement gonflée d'hydrogène, sa capacité était de 25 000 mètres cubes. Le terme positif $V(a' - a)$ de la force ascensionnelle s'élevait donc au moins à 25 000 kilogrammes, car la force ascensionnelle spécifique de l'hydrogène, à la température des expériences, était toujours supérieure à 1 kilogramme. Ce terme $V(a' - a)$ donne la mesure du poids que l'aérostat est capable d'enlever. Ce poids total, que nous avons représenté par Π dans la formule, s'élevait à 18 850 kilogrammes. Il se décomposait de la manière suivante :

Enveloppe et soupapes.	5000	kilogrammes
Filet et cordages.	4500	—
Nacelle avec son arrimage.	1600	—
Câble accessoire.	750	—
Câble de 600 mètres retenant le ballon. . . .	3000	—
Poids moyen de 50 voyageurs.	4000	—
	18 850	poids total

En portant ces différentes valeurs dans la formule de F, il vient

$$F = 25\,000 - 18850 = 6150 \text{ kilogrammes.}$$

Il restait donc un excédent de force qui dépassait 6000 kilogrammes [1]. Ajoutons, à titre de curiosité, que le câble de 600 mètres, à l'aide duquel le ballon colossal était retenu captif, était enroulé sur un treuil pendant la descente, et qu'il ne fallait pas moins de deux machines à vapeur de 300 chevaux pour exécuter ce travail.

218. **Manœuvres aéronautiques.** — Nous avons dit précédemment (216) que lorsque l'aéronaute juge le ballon suffisamment gonflé, il s'installe dans la nacelle; puis sur son ordre, devenu proverbial, de *lâchez tout!* l'aérostat est démarré et s'enlève aussitôt avec une vitesse qui s'accélère aussi longtemps que la force ascensionnelle reste constante. Dès que celle-ci diminue et que la vitesse se ralentit par suite de la raréfaction croissante des couches d'air traversées, l'aéronaute peut augmenter dans une certaine mesure la force ascensionnelle, de manière à faire monter l'aérostat plus vite ou plus haut. Il peut également diminuer la force ascensionnelle, de manière à ralentir la marche ascendante ou à provoquer la descente. Mais là se borne son intervention : il

1. Guillemin, *Monde physique*, t. Ier.

ne peut en aucune façon, comme nous l'expliquerons plus loin, pousser l'aérostat, comme un navire, en avant ou en arrière, dans le sens horizontal, ni le soustraire à l'action des vents qui le repoussent ou qui l'entraînent dans leur propre direction. Tout au plus peut-il manœuvrer de manière à se déplacer verticalement, jusqu'à ce qu'il rencontre, s'il en existe, une couche d'air animée d'une vitesse voisine du chemin qu'il voudrait parcourir. Toutes les manœuvres aéronautiques se réduisent donc à deux, ayant pour objet de faire monter ou de faire descendre verticalement l'aérostat.

Si c'est une montgolfière, on n'a qu'à activer le feu ou bien à le ralentir. Dans le premier cas, la température de l'air chaud s'élève, sa densité diminue et la force ascensionnelle augmente : on remonte; dans le second cas, la température s'abaisse, le poids de l'air intérieur augmente : on redescend.

Si c'est un ballon, on ne peut accroître la force ascensionnelle qu'en diminuant le poids des accessoires. On jette alors une partie du lest : les sacs de sable sont vidés lentement, petit à petit, de manière que l'impulsion donnée au ballon ne soit pas trop brusque et que la chute du lest ne produise pas d'accident sur le sol. On comprend d'ailleurs que, la provision de lest ayant été nécessairement limitée au départ, ce moyen d'action soit très vite épuisé. Pour descendre, l'aéronaute laisse échapper une partie de l'hydrogène, en ouvrant la soupape supérieure. La force ascensionnelle diminue nécessairement, et l'aérostat redescend jusqu'à ce que l'accroissement de densité de l'air ait compensé la diminution de volume du ballon. Si la descente doit être définitive, l'aéronaute se garde bien de l'opérer d'un seul coup, car la vitesse croissante de cette chute communiquerait à l'aérostat une force vive considérable qui le briserait infailliblement sur le sol. Il descend, comme on dit, *par cascades*, c'est-à-dire que, après une descente de 500 mètres par exemple, il s'arrête ou même il remonte d'une centaine de mètres, de manière à épuiser sa force vive, puis il redescend d'une notable hauteur pour remonter encore d'une faible hauteur, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il arrive à terre. C'est alors qu'il déroule la corde à nœuds ou *guide-rope* et qu'il laisse traîner les ancres pour s'accrocher aux aspérités du sol.

Remarque. — Au départ, l'aéronaute peut apprécier son mouvement d'ascension par la vue des objets terrestres; mais cette ressource lui manque complètement à partir d'une altitude relativement faible. Il ne peut alors savoir s'il monte ou s'il redescend que par l'observation du baromètre : la colonne baisse quand l'aérostat s'élève, et elle monte quand il redescend.

219. **Parachute.** — Nous n'avons pas parlé jusqu'ici d'un accessoire des aérostats qui a joui d'une grande vogue à l'époque de son apparition, mais qui est totalement abandonné aujourd'hui : c'est le *parachute*. Cet appareil, comme son nom l'indique, était destiné à parer aux éventualités d'une chute provoquée soit par déchirure du ballon, soit par tout autre accident. Il se compose d'une large toile circulaire, formée de fuseaux cousus ensemble comme l'enveloppe d'un ballon, et qui peut se ployer ou se déployer comme un vaste parapluie (fig. 236 et 237). Au centre de la toile, on a ménagé une petite ouverture circulaire, dont nous verrons l'utilité tout à l'heure, et sur le pourtour est fixé un système de cordes, qui vont se rattacher à la nacelle de l'aérostat de manière à l'envelopper et à le soutenir, en cas de besoin, comme les cordes mêmes du ballon.

Pendant l'ascension, le parachute, plié comme un parapluie, est fixé par un point de son enveloppe à celle du ballon (fig. 236). Quand l'aéronaute veut s'en servir, il rompt d'une part les attaches du ballon avec la nacelle, et celle du ballon avec le parachute. Celui-ci, emporté par la nacelle, tombe d'abord d'un mouvement accéléré ; mais la résistance de l'air force le parapluie à s'ouvrir de plus en plus (fig. 237) et ralentit la chute du système dans une proportion considérable. On peut se faire une idée de ce ralentissement par la vitesse d'une descente en parachute que l'aéronaute Sivel exécuta à Naples, il y a quelques

années : il mit 45 *minutes pour tomber d'une hauteur de* 1800 *mètres ;* or il n'aurait mis en chute libre (abstraction faite de la résistance de l'air) qu'environ 19 *secondes :* il serait donc tombé 135 *fois et demie* plus vite.

La première idée du parachute remonte à une haute antiquité. L'invention paraît due au physicien Lenormant, de Montpellier; mais le premier essai fut

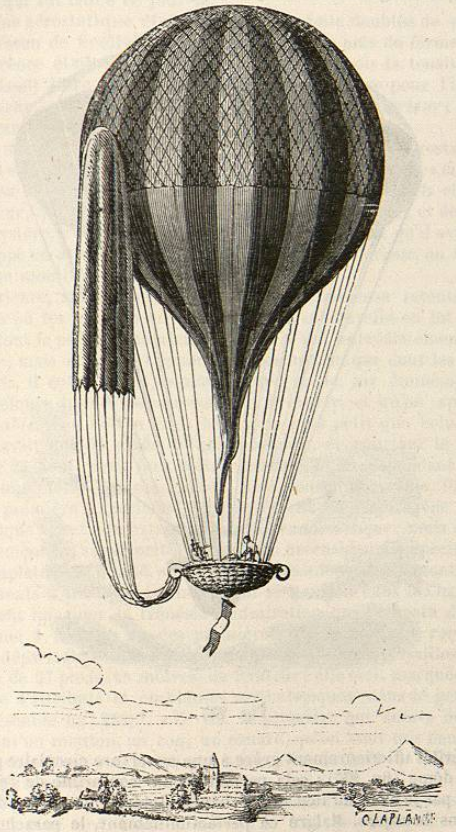

Fig. 236.

tenté à Paris, en 1802, par l'aéronaute Garnerin. Voici comment cette curieuse expérience est racontée par l'astronome Lalande :

« Garnerin s'éleva, à ballon perdu, dans la plaine Monceau, jusqu'à une hauteur de 350 toises (environ 700 mètres). Là, il coupa la corde qui joignait le parachute et son char avec l'aérostat [1]; ce dernier fit explosion, et le parachute,

1. Les parachutes primitifs étaient munis eux-mêmes d'une petite nacelle qui