BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
ET DE L'INDUSTRIE

BANET-RIVET

L'Aéronautique

PARIS
SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ÉDITIONS D'ART
L.-HENRY MAY
ÉDITEUR DES COLLECTIONS QUANTIN
9 et 11, rue Saint-Benoît

3

L'AÉRONAUTIQUE

BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

OUVRAGES PARUS

A. Badoureau. — LES SCIENCES EXPÉRIMENTALES (nouvelle édition entièrement refondue).

O. Chemin et F. Verdier. — LA HOUILLE ET SES DÉRIVÉS.

P. Lefèvre et G. Cerbelaud. — LES CHEMINS DE FER.

E. Lisbonne. — LA NAVIGATION MARITIME.

H. Deutsch (de la Meurthe). — LE PÉTROLE.

Badoureau et Grangier. — LES MINES, LES MINIÈRES ET LES CARRIÈRES.

Guy Le Bris. — LES CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES.

E. Estaunié. — LES SOURCES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

F. Bère. — LES TABACS.

Dr Brocchi. — LA PISCICULTURE DANS LES EAUX DOUCES.

J. Sageret. — LES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ (transformations de l'énergie électrique).

EN PRÉPARATION

U. Le Verrier. — LA MÉTALLURGIE DU FER.

E. Flavien. — LE TISSAGE MÉCANIQUE.

BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

De MM. J. PICHOT et POL LEFÈVRE, anciens élèves de l'Ecole polytechnique.

L'AÉRONAUTIQUE

PAR

M. BANET-RIVET

PROFESSEUR AU LYCÉE MICHELET

PARIS

SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ÉDITIONS D'ART

L.-HENRY MAY

9 ET 11, RUE SAINT-BENOIT, 9 ET 11

1898

L'AÉRONAUTIQUE

INTRODUCTION

LES ORIGINES DE L'AÉRONAUTIQUE

I. — De tout temps et en tout lieu, l'homme s'est demandé s'il ne serait pas possible d'imiter l'oiseau et de quitter la terre en s'élevant dans les airs. Les légendes de l'antiquité, comme celle de Dédale et de son fils Icare, abondent en récits de tentatives de ce genre, récits qui prouvent que, s'inspirant de la Nature, l'homme a d'abord cherché à imiter le vol des oiseaux.

Au IV^e siècle avant J.-C., Archytas de Tarente, savant pythagoricien auquel on attribue l'invention de la vis, de la poulie et du cerf-volant, aurait, d'après Aulu-Gelle, construit une colombe en bois pouvant s'élever en l'air et s'y soutenir au moyen d'un mécanisme resté inconnu.

Des récits dignes de foi racontent qu'au XI^e siècle, Olivier de Malmesbury, savant bénédictin anglais, entreprit de voler, en s'élançant du haut d'une tour, à l'aide de deux ailes attachées à ses bras et à ses pieds. On dit qu'après avoir pu parcourir une certaine distance, il tomba et se cassa les jambes. Il attribua, et avec raison, cet accident à ce qu'il avait oublié de munir son appareil d'une queue, qui lui aurait permis de garder son équilibre et d'atterrir doucement.

Au XVI^e siècle, Léonard de Vinci a établi, le premier, que l'oiseau, qui est plus lourd que l'air, s'y soutient et avance « en rendant ce fluide plus dense là où il passe que là où il ne passe pas ». Pour voler, il doit prendre son point d'appui sur l'air : son aile, en s'abaissant, exerce sur ce fluide une pression de haut en bas, dont la réaction de bas en haut force le centre de gravité de l'animal à remonter à chaque instant à la hauteur où l'oiseau désire se maintenir. Certains croquis parvenus jusqu'à nous, montrent que Léonard de Vinci s'était même occupé, comme Olivier de Malmesbury, de permettre à l'homme de voler à l'aide d'ailes convenablement fixées à son corps.

On lui doit aussi l'invention du parachute qu'il décrit dans les termes suivants : « Si un homme a un pavillon de toile empesée, dont chaque face ait 15 brasses de large et soit haute de 12 brasses, il pourra se jeter, de quelque grande hauteur que ce soit, sans crainte de danger. »

Enfin, on peut encore dire que c'est à Léonard de Vinci qu'on doit l'idée du premier hélicoptère : « Si, dit-il, cet instrument, en forme de vis, est bien fait, c'est-à-dire fait en toile de lin dont on a bouché les pores avec de l'amidon, et si on le tourne avec vitesse, *une telle vis se fera son écrou dans l'air* et montera en haut. On en aura une preuve en faisant mouvoir rapidement à travers l'air une règle large et mince : le bras est forcé de suivre la direction du tranchant de cette planchette. La charpente de ladite toile doit être faite avec de longs et gros roseaux. On en peut faire un petit modèle en papier, dont l'axe soit une lame de fer mince que l'on tord avec force. Quand on laissera cette lame libre elle fera tourner la vis. »

En 1680, Borelli publia des études remarquables, par leur justesse, sur le vol des oiseaux. D'après lui, l'aile agit sur l'air, dans la phase d'abaissement, à la façon d'un plan incliné, pour produire, par suite de la résistance que lui oppose ce fluide, une réaction qui pousse le corps de l'animal en haut d'abord et, de plus, en avant. Quant à l'action de l'aile qui remonte, elle est analogue à celle d'un cerf-volant, et, par suite, elle continue à soutenir le corps de l'oiseau en attendant le coup d'aile qui va suivre. Mais Borelli ne songea nullement à profiter de ses observations pour donner à l'homme les moyens de voler.

En 1742, on s'occupa beaucoup de la tentative du marquis de Bacqueville, renouvelée de celle d'Olivier de Malmesbury et qui se termina par un accident analogue.

Paucton qui, en 1768, a esquissé le projet d'un véritable hélicoptère, mérite aussi une mention.

Enfin, en 1784, Launoy et Bienvenu présentèrent à l'Académie des Sciences de Paris, et firent fonctionner devant elle, un hélicoptère mû par un fort ressort. Mais, déjà, Joseph et Étienne Montgolfier remplissaient le monde du bruit de leur découverte, et on n'accorda peut-être pas à l'ingénieuse machine de ces aviateurs tout l'intérêt qu'elle méritait.

II. — On sait, depuis Archimède, que *tout corps plongé, entièrement ou non, dans un liquide en équilibre, subit de la part du liquide une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du liquide déplacé.*

Considérons donc un corps plongé entièrement dans un liquide, de l'eau par exemple :

Si son poids est plus grand que la poussée qu'il subit, il tombera au fond de l'eau sous l'action d'une *force descensionnelle* égale, à chaque instant, à la différence entre le poids du corps, qui est invariable, et la poussée, qui est invariable aussi et, par suite, est constante non seulement en direction, mais encore en grandeur.

Si le poids du corps est plus petit que la poussée, celle-ci l'emporte, et, contrairement aux lois ordinaires de la Pesanteur, le corps s'élèvera sous l'action d'une force ascensionnelle, qui, évidemment, sera encore constante en grandeur comme en direction. Un bouchon maintenu au fond d'un vase plein d'eau et que l'on abandonne à lui-même offre un exemple de ce mouvement ascensionnel.

Un troisième cas peut aussi se présenter : celui où le poids du corps est égal à la poussée de l'eau. Alors, poids et poussée s'équilibrent mutuellement : aucune force ne sollicite le corps ni à descendre ni à monter, et il reste en équilibre au milieu du liquide, à l'endroit même où il se trouve placé ; que, pour une cause quelconque, il vienne à gagner une couche différente de celle où il flotte, il y restera encore en équilibre. Mais cet état d'*équilibre indifférent* n'est possible que si le poids du corps reste rigoureusement constant : la moindre augmentation dans ce poids le fait immédiatement descendre ; la plus minime diminution le fait immédiatement monter. De là les difficultés que présente la construction des bateaux sous-marins, lorsque leur ascension ou leur descente est obtenue par des chambres à air que l'on remplit ou que l'on vide d'eau, suivant les besoins. L'état d'équilibre de ces engins est toujours précaire, et c'est ainsi que l'on s'explique comment aucun d'eux, depuis van Drebbel (1620) jusqu'à Goubet (1895), n'a pu donner des résultats véritablement pratiques au point de vue de la stabilité d'immersion.

Lorsque Galilée, après Aristote, eut démontré la pondérabilité de l'air, et que Torricelli eut prouvé que cette pondérabilité a pour conséquence l'existence de la pression atmosphérique, on pensa immédiatement que le principe découvert par Archimède devait s'étendre à l'air, et Otto de Guéricke en donna, le premier, une démonstration expérimentale, en inventant le baroscope.

Il semble donc que, dès cette époque, la découverte des aérostats s'imposait. Si le poids du volume d'air déplacé est, en effet, plus grand que celui du corps, celui-ci doit prendre, dans l'air, un mouvement ascensionnel, comme le fait un bouchon de liège plongé dans l'eau, et il est évident que pour qu'un corps satisfasse à de pareilles conditions, il suffit de remplir une enveloppe très légère d'un gaz moins dense que l'air ambiant. Mais, au XVIIe siècle, l'étude des gaz était encore dans l'enfance et on sait qu'il ne fallut rien moins que les travaux de Moitrel d'Elément et de Hales, au commencement du siècle suivant, pour apprendre aux physiciens à les recueillir et à les garder.

L'histoire des progrès de l'esprit humain montre, d'ailleurs, qu'il ne suffit pas, pour qu'une découverte scientifique produise toutes les conséquences qu'on est en droit d'en attendre, qu'elle soit purement et simplement acceptée ; il faut encore que, s'imprégnant dans les cerveaux, elle y passe, pour ainsi dire, à l'état d'idée innée.

La Chimie, à propos justement de la découverte de la pesanteur de l'air et des gaz, nous présente un exemple frappant de l'exactitude de cette proposition. La pondérabilité de l'air était, en effet, acceptée depuis longtemps par les physiciens, que les chimistes continuaient à n'en tenir aucun compte, et cependant, comme le fait remarquer Mendéléeff, on ne pouvait, dans ces conditions, avoir aucune notion exacte sur la plupart des phénomènes chimiques. La gloire de Lavoisier consiste à avoir, le premier, tenu compte non seulement de cette pondérabilité, mais encore de celle de tous les gaz. Si l'on réfléchit que ce n'est que vers 1775, c'est-à-dire un siècle et demi après Galilée, que l'illustre Français a commencé à imposer ses idées, il n'y a rien d'étonnant à ce que la découverte des aérostats n'ait été faite que vers la fin du XVIII^{e} siècle. Lalande s'abusait donc en disant : *C'était si simple ! Comment n'y a-t-on pas songé !*

Il serait injuste, cependant, de rapporter uniquement aux efforts des Montgolfier la découverte des aérostats. Comme tous les inventeurs, comme Lavoisier lui-même, les deux frères, ainsi que le fait remarquer Figuier, ont bénéficié d'une longue série de travaux isolés, et souvent sans but spécial, qui avaient rassemblé les éléments de leur invention.

En 1670, le père Lana, de Brescia, avait imaginé de construire un navire se soutenant dans l'air et se déplaçant à l'aide de voiles :

Quatre globes de cuivre dans lesquels on aurait fait le vide pour les rendre plus légers que le poids du volume d'air déplacé, devaient supporter le navire ; les voiles auraient assuré la propulsion. La conception scientifique des globes vides était exacte, mais le père Lana ne pensait point à la force d'écrasement énorme que la pression atmosphérique devait exercer sur eux. Quant à l'idée de la voile, qui assimilait son bateau aérien à un vaisseau poussé par le vent, elle est complètement erronée, comme nous aurons lieu de l'expliquer par la suite.

Plus tard, en 1755, le père Galien, d'Avignon, formula assez clairement le principe des aréostats. S'appuyant sur le principe d'Archimède, il soutint que si l'on pouvait emplir d'un air suffisamment raréfié un globe formé d'une étoffe légère, ce globe posséderait nécessairement une force ascensionnelle, qui lui permettrait de s'élever en l'air avec un navire et toute sa cargaison. Il proposait de puiser cet air raréfié dans les hautes régions de l'atmosphère, sur le sommet des hautes montagnes, oubliant que cet air, ramené au niveau du sol, se réduirait de volume et prendrait la densité de l'air ambiant.

Fig. 1. — Etienne Montgolfier.

Il ne vint pas et il ne pouvait pas venir à l'idée du père Galien, étant donnée l'ignorance relative où l'on était encore, à son époque, des propriétés des gaz, de se servir d'autres gaz que l'air ; il ne pouvait pas davantage penser à employer la chaleur pour raréfier l'air, car les premières notions un peu précises sur la diminution de densité des gaz par l'action de la chaleur datent de Priestley, seulement. Mais lorsque, en 1765, Cavendish eut étudié complètement le gaz hydrogène et montré que ce gaz, tel qu'on le préparait à cette époque, est sept fois moins dense que l'air, on vit, peu après, Black émettre l'idée qu'en emplissant d'hydrogène une enveloppe légère, cette enveloppe pourrait enlever en l'air un certain poids. Or, les travaux de Cavendish, de Black, la découverte de l'oxygène, de l'azote et d'autres gaz par Priestley, furent, quelques années après, résumés par ce dernier dans un livre célèbre : *des Différentes espèces d'air*, livre qu'Etienne et Joseph Montgolfier (fig. 1 et 2) eurent entre les mains. C'est évidemment dans cet ouvrage que les deux frères trouvèrent le germe de leur invention.

Fig. 2. — Joseph Montgolfier.

Il est juste cependant de dire que les Montgolfier, déjà connus dans le monde savant par leurs découvertes dans les Sciences Mécaniques, avaient songé, avant de connaître le livre de Priestley, à imiter la Nature en enfermant un nuage artificiel de vapeur d'eau (gaz plus léger que l'air) dans une enveloppe en papier, qui aurait dû être soulevée, en même temps que la vapeur renfermée se serait soutenue dans l'air comme un nuage. Mais la température intérieure condensa leur vapeur, et l'enveloppe en papier, alourdie, retomba bientôt sur le sol. La fumée produite par la combustion du bois et enfermée dans une enveloppe de toile ne leur donna pas de meilleurs résultats.

Dès qu'ils eurent connaissance de l'ouvrage de Priestley, ils remplacèrent par de l'hydrogène la vapeur d'eau et la fumée. Mais le gaz traversa l'enveloppe de papier qu'ils employaient, et ils renoncèrent à s'en servir.

Revenant alors à leur première idée, ils s'imaginèrent que l'électricité était une des causes de l'ascension des nuages, et ils se mirent à la recherche d'un gaz qui eût des propriétés électriques. Ils pensèrent le trouver en brûlant ensemble de la paille mouillée et de la laine : un parallélipipède creux en soie fut gonflé avec ce gaz et ils eurent l'immense joie de le voir s'élever d'abord au plafond de leur chambre, puis, dans un second essai, dans les airs ! Cette expérience mémorable eut lieu au mois de novembre 1782.

Cinq mois auparavant, en Angleterre, Tibère Cavallo, voulant exécuter l'expérience indiquée par Black, remplit des sacs en papier avec du gaz hydrogène. Mais, comme dans les expériences des Montgolfier, le gaz traversa le papier. Il fut plus heureux avec des bulles de savon, l'eau étant imperméable : les bulles s'élevèrent en l'air, comme Black l'avait prédit. De nos jours encore, dans tous les cours de Chimie, on répète cette dernière expérience, pour démontrer l'exactitude de l'extension, aux gaz, du principe d'Archimède.

En somme, dès cette époque, la découverte des aérostats était (et c'est bien ici le cas de le dire) *dans l'air*. Mais Tibère Cavallo s'arrêta au moment même où il touchait à la solution du problème, tandis que les Montgolfier comprirent, du premier coup, l'importance et l'utilité de leur découverte, et n'hésitèrent pas à la faire connaître au monde entier par une expérience publique qui eut lieu, le 4 juin 1783, à Annonay :

Un gros ballon en toile couverte de papier, gonflé par l'air chaud et saturé d'humidité que produisit la combustion de 5 à 6 kilogrammes de paille mouillée et de laine hachée, s'éleva, en quelques minutes, à une hauteur d'environ 2.000 mètres, puis descendit majestueusement pour tomber à 4 kilomètres du point de départ, environ.

III. — L'expérience d'Annonay produisit une sensation immense. Etienne Montgolfier fut mandé à Paris et prévenu que l'expérience serait répétée aux frais de l'Académie des Sciences. Mais la curiosité était trop vivement excitée pour que l'on s'accommodât des lenteurs habituelles des commissions académiques, et on résolut, dans le public, de la recommencer le plus tôt qu'il serait possible. Une souscription fut ouverte ; des fonds considérables réunis en quelques jours : les frères Robert, constructeurs d'instruments de physique, furent chargés d'édifier la machine et le physicien Charles (fig. 3) de diriger leur travail.

Charles ignorait de quel gaz s'étaient servis les inventeurs ; il savait seulement, d'après le procès-verbal de l'expérience d'Annonay, que la machine avait été remplie avec un gaz dont la densité était la moitié de celle de l'air ordinaire. Il ne perdit pas son temps à chercher ce gaz. Il comprit que l'électricité n'était pour rien dans l'ascension de la machine d'Annonay, comme de Saussure le démontra en donnant un mouvement ascensionnel à un petit ballon de papier plein d'air, par la simple introduction, à son intérieur, d'une barre de fer rouge. Il résolut de remplir simplement un ballon de *gaz inflammable*, comme on appelait encore l'hydrogène à cette époque. L'expérience réussit, et le premier ballon à hydrogène, ballon non monté, d'ailleurs, fut lancé au Champ-de-Mars le 27 août 1783.


Fig. 3. — Le physicien Charles.

Ce ballon avait été construit et rempli aux deux tiers par les frères Robert, place des Victoires, où se trouvaient leurs ateliers. Le 26 août, tout se trouvant prêt pour l'expérience, on transporta, pendant la nuit, pour éviter l'affluence des curieux, la machine au Champ-de-Mars, où devait s'effectuer son ascension.

Une fois le ballon placé dans l'enceinte disposée pour le recevoir, on le retint à l'aide de petites cordes fixées au méridien du globe et arrêtées dans des anneaux de fer plantés en terre ; puis, dès que le jour parut, on s'occupa de préparer du gaz hydrogène pour achever de le remplir. A midi, il était prêt à s'élancer, mais il ne partit qu'à cinq heures, aux acclamations des trois cent mille personnes qui s'étaient massées au Champ-de-Mars et dans ses environs pour assister à ce curieux spectacle.

Un coup de canon annonça que l'expérience allait commencer; il servit en même temps d'avertissement pour les savants qui, placés sur la terrasse du Garde-Meuble, sur les tours de Notre-Dame et à l'Ecole militaire, devaient appliquer les instruments et le calcul à l'observation du phénomène.

Délivré de ses liens, le globe s'élança avec une telle vitesse, qu'il fut porté en deux minutes à 1.000 mètres de hauteur environ; là il trouva un nuage obscur dans lequel il se perdit. Un second coup de canon annonça sa disparition; mais on le vit bientôt percer la nue, reparaître un instant à une très grande élévation, puis s'éclipser enfin dans d'autres nuages. Un sentiment d'admiration et d'enthousiasme indicible s'empara alors de l'esprit des spectateurs : l'idée qu'un corps parti de la terre voyageait en ce moment dans l'espace, avait quelque chose de si merveilleux, elle s'écartait si fort des lois ordinaires, que l'on ne pouvait se défendre des plus vives impressions.

L'aérostat, cependant, ne fournit pas toute la carrière qu'il aurait pu parcourir. Dans leur désir de lui donner une forme complètement sphérique, et d'en augmenter ainsi le volume aux yeux des spectateurs, les frères Robert avaient voulu, contrairement à l'opinion de Charles, que le ballon fût entièrement gonflé au départ; ils introduisirent même de l'air au moment de le lancer, afin de tendre toutes les parties de l'étoffe. L'expansion du gaz amena la rupture du ballon lorsqu'il fut parvenu dans une région élevée. Il se fit, à sa partie supérieure, une large déchirure, le gaz s'échappa, et le globe vint tomber lentement, après trois quarts d'heure de marche, auprès d'Ecouen.

Le 19 septembre 1783, une *Montgolfière* (car c'est le nom que l'on a immédiatement donné aux ballons gonflés d'air chaud, comme celui de l'expérience d'Annonay) partit du parc de Versailles. On avait enfermé dans une cage d'osier, suspendue à la partie inférieure de la machine, un mouton, un coq et un canard, qui étaient ainsi destinés à devenir les premiers navigateurs aériens. Dix minutes après, l'aérostat, avec sa cage, tomba à une lieue de Versailles, dans le bois de Vaucresson : Pilâtre de Rozier,

Fig. 4. — Montgolfière de Pilâtre de Rozier et du marquis d'Arlandes.

accouru sur les lieux, constata que les animaux qui y étaient enfermés n'avaient éprouvé aucun mal.

Dès lors, on crut pouvoir avec quelque confiance transformer les ballons en appareils de navigation aérienne et Étienne Mongolfier se chargea lui-même de la construction d'un ballon destiné à recevoir des voyageurs.

Les dimensions du nouvel aérostat (fig. 4) étaient considérables : il n'avait pas moins de 20 mètres de hauteur sur 16 de diamètre, et pouvait contenir 20 000 mètres cubes d'air. On disposa autour de la partie extérieure du ballon une galerie circulaire d'osier, recouverte de toile, destinée à recevoir les aéronautes. Cette galerie avait un mètre de large ; une balustrade la protégeait et permettait d'y circuler commodément : on pouvait ainsi faire le tour de l'orifice de l'aérostat. Au milieu de cet orifice, se trouvait, suspendu par des chaînes, un réchaud en fil de fer, avec les matières inflammables dont la combustion devait entraîner l'appareil. On avait emmagasiné dans une partie de la galerie, une provision de paille, pour donner aux aéronautes la faculté de s'élever à volonté en activant le feu.

Fig. 5. — Pilâtre de Rozier.

C'est avec cette machine que Pilâtre de Rozier et le marquis d'Arlandes (fig. 5 et 6), avec une intrépidité sans égale, eurent l'audace d'entreprendre le premier des voyages aériens, le 21 novembre 1783. Ils traversèrent Paris, de la Muette au moulin de Croulebarbe, en même temps qu'ils s'élevaient jusqu'à près de 1.000 mètres de hauteur, démontrant ainsi à la foule accourue pour les admirer que l'homme peut s'élever dans les airs et que les lois soi-disant inéluctables de la Pesanteur ne le sont pas plus que les autres.

Mais si Pilâtre de Rozier avait atteint son but, on reconnut bien vite que l'appareil dont il s'était servi ne pouvait rendre que de très médiocres services. Sans compter les dangers d'incendie, la nécessité constante d'alimenter le feu absorbait évidemment tous les moments des aéronautes et leur ôtait toute possibilité de se livrer à des expériences ou à des observations scientifiques.

On comprit donc immédiatement, après l'ascension de la Muette, que les ballons à hydrogène pouvaient seuls offrir la sécurité et la commodité indispensables à l'exécution des voyages aériens. Le voyage de Pilâtre de Rozier et du marquis d'Arlandes avait été surtout un trait d'audace ; l'ascension de Charles et de Robert, exécutée le 1er décembre 1783, avec un ballon à hydrogène (fig. 7), au jardin des Tuileries, présenta des conditions toutes différentes.

Pour cette ascension, Charles imagina : — la *soupape*, qui donne issue au gaz hydrogène, permet d'éviter l'explosion qui pourrait résulter d'une trop grande augmentation de la pression intérieure et permet aussi de descendre à volonté ; — la *nacelle*, où s'embarquent les voyageurs ; — le *filet*, qui soutient la nacelle, répartit également la pression en tous les points de l'enveloppe du ballon, qu'il protège sans la comprimer, se prêtant à tous ses mouvements de contraction ou de dilatation ; — le *lest*, qui règle l'ascension, permet de planer et modère la chute ; — l'*enduit* de caoutchouc qui, appliqué sur le tissu du ballon, le rend imperméable et prévient la déperdition du gaz ; — l'*appendice* ou *manche*, qui sert au gonflement du ballon, et permet la libre sortie du gaz lorsque le ballon est complètement gonflé ; — l'usage du *baromètre*, qui permet de déterminer à chaque instant, par l'élévation ou la dépression du mercure, la hauteur où l'on se trouve.

Fig. 6. — Le marquis d'Arlandes.

En même temps, il inventait, pour la préparation en grand de l'hydrogène, *l'appareil à tonneaux* (Chap. III), que l'on a employé jusqu'à nos jours (1875). C'est à lui, aussi, que l'on doit l'*équilibrage* du ballon, ainsi que les *ballons-pilotes* qu'on lance, un peu avant le départ, pour s'assurer de la direction et de la vitesse du vent, et qui mériteraient leur nom, s'ils n'avaient la déplorable habitude de prendre, même lancés simultanément, des directions aussi différentes que possible, se dispersant généralement en éventail dans un angle dont l'ouverture peut aller jusqu'à 90°.

La relation que Charles a écrite de ce voyage montre chez lui un excellent esprit d'observation. Rien ne lui échappe : l'absence de toute sensation de vertige au moment du départ, le sentiment de sécurité absolue qui envahit peu à peu les voyageurs, les mouvements giratoires du ballon autour de son axe, la buée qui rend visible le gaz lorsqu'il s'échappe de l'orifice inférieur de l'aérostat, le rôle de soupape automatique que joue l'appendice, les courants d'air qui résultent des mouvements du ballon suivant la verticale, courants descendants quand il monte, ascendants quand il descend, le refroidissement considérable de l'air avec l'altitude, etc. Ajoutons, pour être complet, qu'après avoir déposé Robert à Nesles, Charles s'enleva encore une fois de terre : en 10 minutes, il arriva à l'altitude de 4.000 mètres, éprouva des bourdonnements d'oreilles dus certainement à la raréfaction de l'air et, surtout, à la vitesse de la montée, et eut le plaisir d'assister à un second coucher du soleil, son premier atterrissage ayant eu lieu au moment de la disparition de l'astre pour les observateurs placés sur le sol. Il atterrit doucement à quelques kilomètres de Nesles, heureux de s'être élancé dans les airs, plus heureux

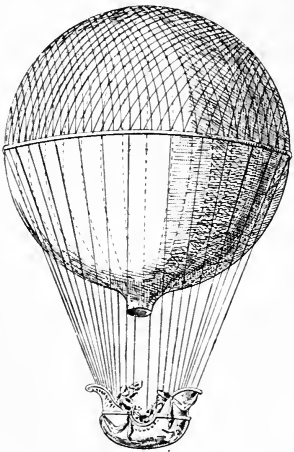

Fig. 7.
Aérostat de Charles et de Robert.

encore, ont prétendu les mauvaises langues, d'avoir regagné le plancher des vaches.

En somme, tout d'un coup et tout d'une pièce, comme le dit si bien Figuier, Charles a créé, à propos de cette ascension, la première et la dernière du célèbre physicien, l'art de l'Aérostation. Sauf l'emploi de l'*ancre*, les modifications apportées au *cercle* par Blanchard, dans son ascension du 2 mars 1784, le *guide-rope*, invention de Green, d'une simplicité presque géniale, on a ajouté peu de choses, depuis 115 ans, aux dispositions imaginées par Charles, au moins en ce qui concerne les ballons non dirigeables. La figure 8 permet, d'ailleurs, de comparer les ballons actuels avec l'aérostat de Charles et de se rendre compte, à peu près, des progrès accomplis.

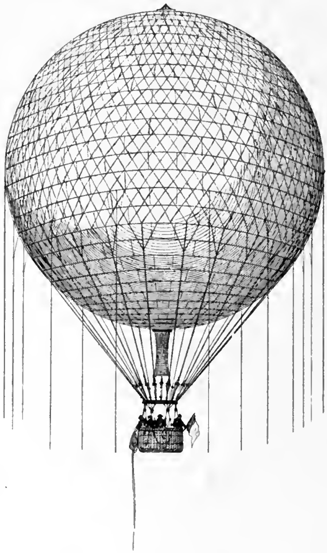

Fig. 8. — Aérostat moderne.

Les récompenses académiques ne manquèrent pas aux Montgolfier et aux premiers aéronautes. Les deux Montgolfier entrèrent à l'Académie des Sciences comme membres titulaires; Pilâtre de Rozier, le marquis d'Arlandes, Charles et Robert, à titre d'associés surnuméraires; enfin, le père des Montgolfier fut anobli.

Quant aux ascensions, elles se multiplièrent, à partir de cette époque, en France et dans toute l'Europe. Il s'engagea même, presque immédiatement, une vive polémique entre les partisans des *montgolfières* et ceux des *ballons à hydrogène.* On verra dans le chapitre suivant les raisons pour lesquelles, abstraction faite des chances d'incendies, les ballons à gaz léger, comme l'hydrogène, doivent être préférés aux ballons à gaz lourd, comme l'air chaud.

CHAPITRE PREMIER

THÉORIE DU BALLON LIBRE

On a souvent comparé un ballon flottant librement dans l'atmosphère à une bulle gonflée de gaz, abandonnée à elle-même. La comparaison est exacte si le ballon n'est pas monté ; elle ne l'est plus si le ballon est monté. *L'homme*, a dit Pascal, *n'est qu'un roseau, mais c'est un roseau pensant;* un ballon monté n'est qu'une bulle de gaz, mais c'est une bulle de gaz douée de vie et de raison, une molécule *pensante*, capable de lutter contre les fatalités brutales du monde extérieur.

Aussi, pour se faire une idée à peu près exacte des principes de l'Aérostatique, est-il nécessaire d'étudier d'abord, à l'aide du raisonnement, la marche dans l'air d'un ballon libre.

1. — Avant tout, il importe d'avoir une idée, au moins approximative, de la constitution du milieu dans lequel se meuvent les aérostats, c'est-à-dire de l'*Atmosphère*.

On sait, depuis Pascal, qu'à mesure qu'on s'élève au-dessus du sol, la pression atmosphérique diminue. On sait aussi, depuis Mariotte, qu'à une même température, le *poids spécifique d'un gaz* (c'est-à dire *sa densité par rapport à l'eau*) varie proportionnellement à la pression qu'il supporte (loi de Mariotte). Enfin, on sait aussi, et c'est une conséquence du principe d'Archimède, que, dans une masse formée de fluides de densités différentes, ces fluides tendent à se superposer les uns aux autres par ordre décroissant des densités.

Dès lors, si l'on suppose l'atmosphère parfaitement calme, les couches d'air qui la composent doivent se superposer les unes aux autres dans l'ordre décroissant de leurs densités, leur force élastique (ou, ce qui revient au même, la pression atmosphérique correspondante) diminuant à mesure que leur hauteur augmente. C'est ce qui a lieu d'ordinaire, malgré les perturbations qui, à chaque instant, troublent l'océan aérien : presque toujours on constate qu'à mesure qu'on s'élève, le poids spécifique, et, par suite, la pression des couches d'air que l'on traverse, diminue régulièrement.

Mariotte a, le premier, démontré que *si l'on suppose la température constante suivant une verticale, les pressions décroissent, suivant cette verticale, en progression géométrique, lorsque les hauteurs auxquelles elles correspondent croissent en progression arithmétique*. Halley, traduisant algébriquement cette loi, connue sous le nom de *loi du nivellement*, a donné une formule approchée permettant de calculer l'altitude en fonction de la pression atmosphérique et, réciproquement, la pression atmosphérique en fonction de l'altitude. Cette formule

$$z_n - z_0 = 18.400 \, log \, \frac{h_0}{h^n}, \tag{1}$$

qui suppose l'air sec et à la température de 0°, et dans laquelle z_0 et z_n désignent, en mètres, l'altitude des deux stations, h_0 et h_n les valeurs correspondantes de la pression atmosphérique, exprimées en colonne de mercure, s'appelle *formule du nivellement barométrique*. Comme, si a_0 et a_n représentent les poids spécifiques de l'air à ces deux stations, on a, en supposant toujours la température constante suivant la verticale, la proportion

$$\frac{a_0}{a_n} = \frac{h_0}{h_n}, \tag{2}$$

la formule du nivellement peut donc, en cas de besoin, être remplacée par la suivante :

$$z_n - z_0 = 18.400 \; log \frac{a_0}{a_n} . \qquad (3)$$

La Table ci-dessous, qui donne jusqu'à 6.000 mètres, et à 40 mètres près, les altitudes en fonction de la pression atmosphérique, exprimée en millimètres de mercure, permet de se faire de la loi du nivellement une idée plus exacte que celle qui résulte de la formule d'Halley. La troisième colonne de cette Table indique, pour les différentes altitudes, la hauteur dont il faut s'élever pour que la pression atmosphérique diminue de un millimètre, ce qui permet de calculer avec facilité l'altitude correspondante à des pres-

Baromètre.	Altitudes en m. à ± 20 m. près.	Différence. pour 1mm.	Baromètre	Altitudes en m. à ± 20 m. près.	Différence pour 1mm.
355mm	6082m	22m,5	565mm	2367m	14m,1
365	5860	21,9	575	2227	13,9
375	5664	21,3	585	2089	13,6
385	5433	20,8	595	1954	13,4
395	5228	20,2	605	1821	13,2
405	5028	19,7	615	1690	13,0
415	4833	19,2	625	1561	12,8
425	4643	18,8	635	1434	12,5
435	4457	18,4	645	1310	12,3
445	4275	18,0	655	1187	12,2
455	4098	17,6	665	1066	12,0
465	3924	17,2	675	947	11,9
475	3754	16,8	685	829	11,6
485	3587	16,5	695	713	11,5
495	3424	16,1	705	599	11,3
505	3264	15,8	715	487	11,2
515	3108	15,5	725	376	11,0
525	2954	15.2	735	267	10,8
535	2802	14,9	745	159	10,7
545	2655	14,7	755	52	10,6
555	2510	14,4	760	0	10,5

sions comprises entre deux valeurs consécutives de la première colonne de la Table.

Si la formule d'Halley n'est que grossièrement approchée, c'est parce qu'elle suppose la température constante le long d'une même verticale, alors que depuis longtemps l'observation a montré que, sauf quelques cas d'inversion relativement rares, la température décroît toujours à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. Pour avoir une formule du nivellement à peu près exacte, il faudrait connaître la loi suivant laquelle la température décroît quand l'altitude augmente, ou, au moins, la loi suivant laquelle elle décroît à mesure que la pression diminue.

Actuellement, on admet, avec Saigey et Mendéléeff, que *la décroissance de la température est*, jusque vers 6.000 mètres environ, *proportionnelle à la diminution de la pression*, c'est-à-dire que t_n étant la température à la pression h_n, t_{n+1} la température, sur la même verticale, à la pression h_{n+1}, on a

$$t_n - t_{n+1} = a\,(h_n - h_{n+1}), \tag{A}$$

a étant une constante qui dépend évidemment de la latitude, de la saison, etc. Cette constante est, aujourd'hui encore, même dans nos régions, fort mal connue. On peut cependant, jusqu'à 4.000 mètres, lui attribuer la valeur moyenne

$$a = \frac{1}{13{,}9}.$$

La formule précédente peut alors, dans les limites que nous venons d'indiquer, être remplacée par la suivante :

$$t_0 - = t_n\, 55 \left(1 - \frac{h_n}{760}\right), \tag{4}$$

t_0 étant la température au niveau de la mer, où la hauteur moyenne du baromètre est de 760 millimètres, les températures étant, d'ailleurs, exprimées en degrés centigrades, et les pressions en millimètres de mercure.

II. — Considérons, maintenant, un ballon rempli d'un gaz quelconque et muni à sa partie inférieure d'un appendice dont l'orifice soit assez large pour permettre au fluide intérieur d'être toujours en équilibre de pression avec l'air extérieur. Admettons que le gaz aérostatique employé soit toujours, pendant la durée de l'ascension, en équilibre de température avec l'extérieur.

Désignons par V le volume du ballon à un instant donné, par a le poids spécifique de l'air ambiant (c'est-à-dire sa densité par rapport à l'eau) à cet instant. Appelons d la densité du gaz aérostatique, le mot *densité* étant pris dans le sens où on l'entend en Physique, c'est-à-dire désignant le rapport constant qui existe toujours entre le poids d'un volume de gaz et le poids du même volume d'air, le gaz et l'air étant à la même température et à la même pression.

La *poussée de l'air* sur le ballon égale, d'après le principe d'Archimède, au poids du volume d'air qu'il déplace, est

$$Va.$$

Le poids du gaz qui le remplit est

$$Vad.$$

Par suite, la force verticale, dirigée de bas en haut, que le gaz du ballon pourrait exercer sur un *dynamomètre* ou, mieux, la *force portative* de ce gaz, sera

$$Va - Vad = Va\,(1 - d).$$

Si, comme c'est le cas à propos des aérostats, cette force est employée à soulever des corps tels que l'enveloppe, les agrès, la nacelle, etc., d'un ballon, corps solides dont le *poids apparent dans l'air* est à très peu près le même que leur *poids absolu*, la force portative devra être regardée comme *à très peu près* égale au poids total que le ballon peut soulever. Dès lors, si l'on appelle *force ascensionnelle propre d'un aérostat*, à un instant donné, le poids total que le gaz du ballon peut soulever, on voit que cette force est, en général, donnée par la formule

$$F = Va\,(1 - d), \tag{5}$$

qui montre que *la force ascensionnelle propre d'un ballon, à un instant donné : 1° est proportionnelle à son volume et au poids spécifique de l'air ambiant ; 2° est d'autant plus grande que le gaz aérostatique employé est plus léger.*

Faisons $V = 1$ dans cette formule : le produit

$$\varphi = a\,(1 - d) \tag{6}$$

représentera alors la force ascensionnelle de l'unité de volume d'un gaz aérostatique quelconque à un instant donné, ce qu'on appelle sa *force ascensionnelle propre à un instant donné.*

Seulement, pour rendre comparables les nombres qui expriment soit la force ascensionnelle propre d'un aérostat, soit celle d'un gaz aérostatique, on est d'accord, en Aéronautique, pour rapporter ces nombres au niveau de la mer où la pression moyenne est de 760 millimètres, et de supposer qu'à ce niveau l'air est sec et à 0°, c'est-à-dire a un poids spécifique très voisin de 0,0013. La *force ascensionnelle propre d'un aérostat* est alors donnée par la formule :

$$F_0 = V \times 0{,}0013\,(1 - d), \tag{7}$$

la *force ascensionnelle propre d'un gaz aérostatique* étant

$$\varphi_0 = 0{,}0013\,(1 - d). \tag{8}$$

Considérons alors le *gaz hydrogène* (*hydrogène pur* des aéronautes) que fournissent les appareils industriels actuellement employés, gaz qui possède une densité moyenne

$$d = 0{,}154,$$

densité qui est à peu près le septième de celle de l'air. Sa force ascensionnelle propre sera

$$\varphi_0 = 0,0013\ (1 - 0,154) = 0,0010998,$$

c'est-à-dire que la force ascensionnelle d'un mètre cube d'hydrogène est de $1^{kg},0998$ environ. Pour le *gaz d'éclairage* (gaz des aéronautes), dont la densité moyenne est

$$d = 0,465,$$

on trouverait

$$\varphi_0 = 0,0013\ (1 - 0,465) = 0,0006955,$$

c'est-à-dire que la force ascensionnelle d'un mètre cube de gaz d'éclairage est de $0^{kg},6955$ environ.

Ces nombres sont d'ailleurs un peu trop forts. En réalité, si l'on tient compte de l'humidité moyenne de l'air, il faut prendre pour poids spécifique moyen de l'air, à Paris (et dans les lieux peu élevés au-dessus de la mer), le nombre 0,001287. On trouve alors, pour l'hydrogène :

$$\varphi_0 = 0,001088,$$

pour le gaz d'éclairage :

$$\varphi_0 = 0,000688545,$$

c'est-à-dire que *la force ascensionnelle propre de l'hydrogène est*, pratiquement, *par mètre cube, de 1 kilogramme, celle du gaz d'éclairage étant de* $0^{kg},688$ en moyenne.

Considérons maintenant un ballon tel que le *Ballon militaire normal* employé en France, ballon dont le rayon est de 5 mètres environ et le tonnage de 540 mètres cubes. Sa force ascensionnelle propre sera, si on le remplit de gaz hydrogène,

$$F_0 = 540 \times 1\ \text{kg.} = 540\ \text{kg.}\ ;$$

si on le remplit de gaz d'éclairage :

$$F_0 = 540 \times 0^{kg},688 = 371^{gr},5.$$

Giffard a donné un moyen commode de mesurer approximativement la force ascensionnelle propre d'un gaz. A cet effet, on remplit du gaz un ballon en baudruche, d'un mètre cube, terminé par une chaîne en métal dont les chaînons, de même poids, sont numérotés (fig. 9). Sous l'influence de la force ascensionnelle du gaz, le ballon sélève dans l'air et ne s'arrête que lorsque cette force est équilibrée par le poids de la portion de chaîne soulevée, poids facile à évaluer, d'après le nombre des chaînons soulevés. Comme on opère dans des conditions de chaleur, de pression et d'humidité analogues à celles auxquelles le ballon sera soumis, que la baudruche est une substance très légère, que la chaleur et l'humidité n'en font pas sensiblement varier les dimensions, il n'y a pas besoin de se préoccuper des corrections.

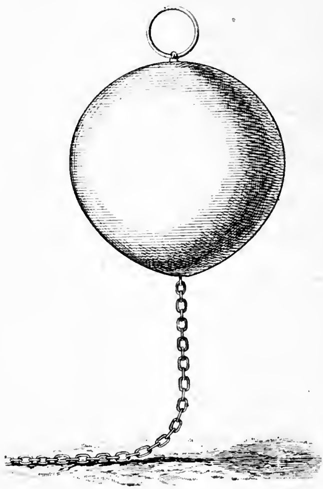

Fig. 9.

III. — Cherchons maintenant l'influence que peut avoir sur la force ascensionnelle propre d'un aérostat son ascension dans l'atmosphère.

Deux cas peuvent se présenter : ou le ballon est *plein*, c'est-à-dire *complètement gonflé au départ*; ou il est *flasque*, c'est-à-dire *incomplètement gonflé au départ*.

a). — Supposons d'abord le ballon *plein*.

A mesure qu'il monte, il pénétrera dans des couches d'air de moins en moins denses, dont la force élastique diminue de plus en plus. Dès lors, son gaz s'échappera peu à peu par l'orifice. En supposant que le principe d'Archimède soit applicable à un corps *en mouvement*, hypothèse que l'expérience justifie, la force ascensionnelle propre du ballon, au niveau du sol, sera

$$F_o = Va_o (1 - d),$$

a_o étant le poids spécifique de l'air ambiant. Pour une couche d'air de poids spécifique quelconque a_p, cette force ascensionnelle sera

$$F_p = Va_p (1 - d).$$

Comme, nécessairement, $a_p < a_o$, on aura

$$F_p < F_o.$$

La force ascensionnelle propre d'un ballon plein diminue donc *à mesure qu'il s'élève*. Elle serait nulle pour $a_p = 0$, c'est-à-dire à la limite extrême de l'atmosphère.

b). — Examinons maintenant le cas du même ballon, supposé *incomplètement gonflé au départ*.

Soit V_o son volume au départ (V_o étant plus petit que son volume réel V). A cet instant, sa force ascensionnelle propre est

$$F_o = V_o a_o (1 - d).$$

Le ballon s'élevant à travers des couches d'air dont la force élastique diminue progressivement, son gaz tend, en vertu de son expansibilité, à occuper un volume de plus en plus considérable, de sorte que le ballon tend peu à peu à se gonfler complètement, sans cependant que le poids du gaz qu'il contient change. Appelons a_m le poids spécifique d'une couche d'air, pour laquelle le ballon n'est pas encore complètement gonflé, V_m le volume du ballon dans cette couche, a_m étant plus petit que a_o, mais V_m étant plus grand que V_o. Pour cette couche, la force ascensionnelle propre sera

$$F_m = V_m a_m (1 - d)$$

Mais le poids du gaz n'a pas changé, c'est-à-dire que

$$V_m\, a_m\, d = V_o\, a_o\, d,$$

et, par suite,

$$V_m\, a_m = V_o\, a_o.$$

Dès lors,

$$V_m\, a_m\,(1 - d) = V_o\, a_o\,(1 - d),$$

c'est-à-dire que

$$F_m = F_o.$$

La force ascensionnelle d'un ballon flasque reste donc *constante, tant que ce ballon n'est pas complètement gonflé.*

Cherchons le poids spécifique a_q de la couche d'air pour laquelle le ballon est complètement gonflé : à cet instant, sa force ascensionnelle propre est encore égale à F_o ; d'un autre côté, elle est égale à $Va_q\,(1 - d)$. On a donc

$$F_o = Va_q\,(1 - d),$$

relation qui donne, en y remplaçant F_o par sa valeur, la formule fondamentale :

$$a_q = a_o \frac{V_o}{V}. \qquad (9)$$

Un ballon flasque est donc, *quels que soient son volume et la densité du gaz aérostatique, complètement gonflé lorsqu'il atteint une couche d'air dont le poids spécifique est une fraction de celui de la couche d'air du départ, égale à la fraction qui représente le remplissage du ballon.* Par exemple, si le ballon est gonflé aux $\frac{8}{10}$ au moment du départ, il sera complètement gonflé dans une couche d'air dont le poids spécifique sera les $\frac{8}{10}$ du poids spécifique de l'air au niveau du sol et, cela, quels que soient son volume et la densité du gaz aérostatique employé.

Il va de soi qu'une fois le ballon complètement gonflé, tout se passe comme dans le cas d'un ballon plein : sa force ascensionnelle diminue de plus en plus à mesure qu'il s'élève.

IV. — Considérons, enfin, un *aérostat* véritable, c'est-à-dire l'ensemble formé par le ballon, son filet, sa nacelle, ses agrès, etc.

a). — Supposons d'abord le ballon *plein*.

Soit V son volume, d la densité du gaz aérostatique, P son *poids mort irréductible*, c'est-à-dire la somme des poids de l'enveloppe, du filet, de la nacelle et des agrès, a_0 le poids spécifique de l'air au départ. *Equilibrons* le ballon à cet instant, en plaçant dans la nacelle un poids total L de lest, tel que le *poids mort total* P + L du ballon soit égal à sa force ascensionnelle propre :

$$Va_0 (1 - d) = P + L. \qquad (a)$$

Pour que l'aérostat puisse s'élever, il suffira évidemment de le débarrasser d'une portion quelconque du lest qu'il emporte. Soit λ_0 le poids de lest projeté. Le ballon, dont le poids mort total n'est plus que $P + L - \lambda_0$, s'élèvera, dans ces conditions, sous l'influence d'une *force ascensionnelle réelle* égale à

$$Va_0 (1 - d) - (P + L - \lambda_0) = \lambda_0,$$

c'est-à-dire égale à la *rupture d'équilibre* provoquée.

Si un ballon plein conservait toujours la même force ascensionnelle propre, il en serait évidemment de même de l'aérostat considéré. Mais, comme on l'a vu, à mesure qu'un ballon plein monte, sa force ascensionnelle propre diminue. Par suite, comme le poids total $P + L - \lambda_0$ qu'emporte le ballon reste le même, il est évident que la force ascensionnelle réelle du ballon diminuera et finira par devenir nulle : à ce moment, l'aérostat s'arrêtera et flottera. Appelons a_n le poids spécifique de l'air dans la *zone d'équilibre* où le ballon s'arrête et flotte. Pour cette zone, la force ascensionnelle de l'aérostat est $Va_n (1 - d)$, et puisqu'il y a équilibre entre cette force et le poids mort total du ballon, on a

$$Va_n (1 - d) = P + L - \lambda_0, \qquad (b)$$

d'où, en remplaçant P + L par la valeur qu'en donne l'équation (a), la formule

$$a_n = a_0 - \frac{\lambda_0}{V(1-d)}. \qquad (c)$$

Si le ballon est *monté*, c'est-à-dire emporte un ou plusieurs voyageurs, et qu'on veuille s'élever davantage, il faudra évidemment projeter une nouvelle quantité de lest λ_1. En remarquant que la formule (c) est générale, on aura, pour le poids spécifique de la nouvelle zone d'équilibre, la valeur

$$a_{n+1} = a_n - \frac{\lambda_1}{V(1-d)}.$$

ou, en remplaçant a_n par sa valeur tirée de (c),

$$a_{n+1} = a_0 - \frac{\lambda_0 + \lambda_1}{V(1-d)}. \qquad (d)$$

En continuant ainsi à projeter de nouvelles quantités de lest λ_2, λ_3, etc., on finira par atteindre une zone d'équilibre dont le poids spécifique a_l aura la valeur

$$a_l = a_0 - \frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \ldots\ldots}{V(1-d)},$$

d'où, en posant

$$\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots = l,$$

l désignant ainsi la somme des quantités de lest projetées pendant l'ascension, la formule fondamentale

$$a_l = a_0 - \frac{l}{V(1-d)}. \qquad (10)$$

Il résulte d'abord des calculs précédents qu'*on s'élève aussi haut, avec un ballon complètement gonflé au départ, en projetant par petites portions un poids donné de lest, qu'en le projetant d'un seul coup*. Il est donc possible, lorsqu'un ballon de ce genre est monté, de régler à volonté la vitesse d'ascension, ce qui, surtout au départ, est très important au point de vue de la sécurité des voyageurs et de l'aérostat.

Pour les ballons *non montés*, comme les *ballons-sondes*, il faut, du premier coup, les débarrasser du poids de lest nécessaire pour leur permettre d'atteindre la hauteur voulue, à moins que l'on ait recours au procédé Kovanko, dont il sera parlé plus loin (chap. III).

Quant à la formule (10), elle montre que : 1° *Étant donné un ballon plein, il s'élève d'autant plus haut que le poids de lest projeté* (soit en bloc, soit graduellement) *est plus considérable.* En effet, plus l est grand, plus, toutes choses égales d'ailleurs, a_1 est petit, et, par suite, la hauteur de la zone d'équilibre, *la différence entre le poids spécifique de la zone de départ et celui de la zone d'arrivée (zone d'équilibre) étant*, d'ailleurs, *proportionnelle au poids de lest projeté*, car la formule (10) donne

$$a_0 - a_1 = \frac{l}{V(1-d)}.$$

2° *Pour un même poids de lest projeté, un ballon gonflé monte d'autant plus haut que son volume est plus petit, le gaz aérostatique étant le même.* En effet, plus V est petit, plus la fraction $\frac{l}{V(1-d)}$ est grande et, par suite, plus a_1 est petit, *la différence entre le poids spécifique de la zone de départ et celui de la zone d'arrivée étant inversement proportionnelle au volume du ballon.*

3° *Pour un même poids de lest projeté et à volume égal, de deux aérostats pleins, celui qui est rempli du gaz le plus lourd est celui qui s'élève le plus haut*, résultat qui étonne au premier abord, d'où le nom de PARADOXE AÉROSTATIQUE donné à ce théorème. En effet, plus d est grand, plus $1-d$ est petit; par suite, plus la fraction $\frac{l}{V(1-d)}$ est grande et, par conséquent, plus a_1 est petit, *la différence entre le poids spécifique de la zone de départ et celui de la zone d'équilibre étant inversement proportionnelle* *à la force ascensionnelle propre du gaz aérostatique*, car $1 - d$ est proportionnel à φ_0.

Pour fixer les idées, considérons le *ballon normal* de 540 mètres cubes. Supposons cet aérostat complètement rempli de gaz au niveau de la mer (ou dans un lieu peu élevé), de façon qu'on puisse admettre que la pression atmosphérique est d'environ 760 millimètres et le poids spécifique de l'air égal à 0,0013 à peu près. Supposons aussi la température égale à 0° et cherchons la hauteur des zones d'équilibre qu'atteindra le ballon, suivant les valeurs que l'on donnera soit à la rupture d'équilibre, soit au volume de l'aérostat ou, encore, suivant la nature du gaz aérostatique employé.

Admettons d'abord que le ballon est rempli d'*hydrogène* et que la rupture d'équilibre est de 10 kilogrammes. En remarquant que dans l'application de la formule (8), comme dans l'application des formules précédentes, il est nécessaire d'exprimer les données en *unités correspondantes* et, par suite, ici, les poids en tonnes, le poids spécifique de la zone d'équilibre sera :

$$a_1 = 0{,}0013 - \frac{0{,}010}{540\,(1 - 0{,}154)} = 0{,}00128.$$

Or, si l'on appelle h_1 la valeur, en millimètres de mercure, de la pression atmosphérique correspondant à la zone d'équilibre de poids spécifique 0,00128, on a, d'après la formule (2), la proportion

$$\frac{h_1}{760} = \frac{0{,}00128}{0{,}0013},$$

d'où

$$h_1 = 748 \text{ millimètres à peu près.}$$

La Table ci-dessus (p. 19) montre que cette pression correspond à une hauteur de

127 mètres environ.

Si on veut monter plus haut, il faut projeter du lest. En supposant le poid total de lest projeté de 40 kilogrammes, on trouvera, pour le poids spécifique de la zone d'équilibre, $a_1 = 0{,}00121$. Un calcul analogue au précédent montrera que ce poids spécifique correspond à une pression $h_1 = 707$ millimètres à peu près, soit, d'après la Table, à une hauteur de

576 mètres environ.

Si ce ballon est rempli de *gaz d'éclairage*, plus lourd que l'hydrogène, on trouvera, pour les mêmes ruptures d'équilibre, des zones d'équilibre de poids spécifiques 0,001625 et 0,001162, correspondant à des pressions de 739 et de 679 millimètres, et à des hauteurs d'environ

223 mètres et 900 mètres,

hauteurs plus considérables que les précédentes, conformément au paradoxe aérostatique.

Enfin, si le volume du ballon était moitié de celui du ballon normal considéré, soit 270 mètres cubes, on trouverait que pour une projection de 40 kilogrammes de lest, le ballon plein de gaz hydrogène s'élèverait à

1.150 mètres environ,

c'est-à-dire au double, à peu près, de la hauteur atteinte avec le tonnage de 540 mètres cubes.

Il importe de remarquer que la hauteur à laquelle un ballon s'élève, pour une rupture d'équilibre donnée, dépend de l'altitude de la station de départ. Cela provient de ce qu'à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère une différence donnée de poids spécifique correspond, conformément à la loi du nivellement, à des différences d'altitude de plus en plus considérables.

Supposons, par exemple, le ballon normal de 540 mètres cubes, plein d'hydrogène, lancé d'une station de 840 mètres d'altitude, station pour laquelle le poids spécifique de l'air est $a_0 = 0{,}00117$;

supposons que le poids de lest projeté soit de 40 kilogrammes. On trouvera, pour la valeur du poids spécifique de la zone d'équilibre, la valeur $a_1 = 0{,}000843$, qui correspond à une pression de 434 millimètres et à une hauteur de

1.446 mètres environ,

soit 600 mètres au-dessus du sol, au lieu de 490 mètres.

b). — Considérons maintenant un *ballon flasque*, de volume total V, mais ayant seulement un volume V_0 au départ (V_0 étant plus petit que V). Soit λ_0 la rupture d'équilibre qui donne au ballon sa force ascensionnelle.

Tant que l'aérostat n'est pas complètement gonflé, sa force ascensionnelle propre, comme on l'a vu plus haut, reste constante et, par suite, il en sera de même, ici, de sa force ascensionnelle réelle, le poids mort total $P + L - \lambda_0$ étant invariable. Soumis à l'action d'une force verticale constante, dirigée de bas en haut, le ballon prendra ou, du moins, tendra à prendre un mouvement uniformément accéléré et arrivera ainsi, avec des vitesses de plus en plus grandes, à la couche d'air pour laquelle il est complètement gonflé, couche dont le poids spécifique a_q est donné par la formule (9). A partir de cet instant, tout se passera comme pour un ballon plein, dont le départ aurait lieu à partir d'une couche d'air de poids spécifique a_q. Sous l'influence de la force ascensionnelle λ_0, l'aérostat tendra donc à s'arrêter dans une zone d'équilibre de poids spécifique a_{λ_0} donnée par la formule (10), soit

$$a_{\lambda_0} = a_q - \frac{\lambda_0}{V(1-d)}.$$

Si on veut s'élever plus haut, il faudra jeter du lest, et, pour une dépense totale de lest *l*, que cette dépense ait lieu peu à peu ou d'un seul coup, le poids spécifique de la *zone d'équilibre* sera évidemment

$$a = a_q - \frac{l}{V(1-d)},$$

ou, en remplaçant a_q par sa valeur,

$$a_1 = a_0 \frac{V_0}{V} - \frac{l}{V(1-d)}, \tag{11}$$

formule fondamentale qui montre qu'*un ballon flasque s'élève d'autant plus haut qu'il est moins gonflé au départ, que son volume total est plus faible, que la projection de lest est plus considérable et que le gaz aérostatique est plus lourd.*

Pour fixer les idées, supposons le *ballon normal* de 540 mètres cubes, gonflé aux $\frac{9}{10}$, partant du niveau de la mer ou d'un lien peu élevé, et contenant du gaz hydrogène. En appliquant les formules précédentes, le poids spécifique de la zone de gonflement sera

$$a_q = 0{,}00133 \times \frac{9}{10} = 0{,}00117,$$

poids spécifique correspondant à une pression de 684 millimètres et à une altitude de

840 mètres environ.

Supposons que pendant l'ascension, on ait projeté un poids de lest de 40 kilogrammes. On trouvera pour le poids spécifique de la zone d'équilibre, la valeur

$$a_1 = 0{,}00117 - \frac{0{,}040}{540\,(1 - 0{,}154)} = 0{,}0010843,$$

qui correspond à une hauteur de

1.471 mètres environ,

soit 630 mètres au-dessus de la zone de gonflement.

Si, au lieu d'hydrogène, le ballon était rempli aux $\frac{9}{10}$ de gaz d'éclairage, c'est encore à une altitude de 840 mètres qu'il serait complètement gonflé. Mais, pour la même projection de 40 kilogrammes de lest, on trouvera, pour le poids spécifique de la zone d'équilibre, la valeur $a_1 = 0,00104$ correspondant à une pression d'environ 613 millimètres et à une hauteur de 1.781 mètres environ, soit 310 mètres de plus que lorsque le ballon est rempli d'hydrogène.

V. — Considérons un ballon plein flottant définitivement dans sa zone d'équilibre. Supposons l'enveloppe *imperméable*, ce qui est parfaitement admissible, un ballon bien construit ne devant pas perdre plus de 1 à 2 p. 100 de son poids de gaz en 24 heures. Soit, à un instant quelconque, a_1 le poids spécifique de la zone d'équilibre, V le volume du ballon, P son poids mort total, L le poids de lest qui reste, ces grandeurs étant reliées entre elles par la relation :

$$P + L = Va_1 (1 - d),$$

qui exprime qu'il y a égalité entre la force ascensionnelle du ballon et son poids mort total.

L'aérostat est, dans ces conditions, soumis à un grand nombre d'*influences accidentelles* : d'un côté la pluie, la neige, l'occultation du soleil, la diminution d'intensité du rayonnement des surfaces placées au-dessous du ballon, etc. ; de l'autre, la réapparition du soleil, l'augmentation d'intensité du rayonnement des surfaces placées au-dessous du ballon, etc. (Ces influences se font sentir aussi bien pendant l'ascension ou la descente que pendant que le ballon plane, mais c'est évidemment dans ce dernier cas qu'elles produisent les effets les plus sensibles pour l'aéronaute, lorsque celui-ci veut effectuer un voyage de quelque durée.)

Examinons d'abord l'influence de la *surcharge* qui peut résulter pour le ballon, soit de la rencontre d'un nuage de pluie ou de givre formant, sur l'enveloppe, un dépôt qui l'alourdit ; soit du dépôt de rosée qui se produit sur l'enveloppe par suite de son refroidissement (refroidissement qui peut être occasionné, soit par l'occultation du soleil, soit par une diminution de l'intensité du rayonnement des surfaces placées sous le ballon, etc.).

Désignons par ϖ cette surcharge, qui a évidemment pour effet de rompre l'équilibre entre la force ascensionnelle propre du ballon $Va_1(1-d)$ et son poids total $P + L + \varpi$. Le ballon, grâce à elle, descendra sous l'influence d'une *force descensionnelle* réelle justement égale à la surcharge, car

$$\varpi = Va_1(1-d) - (P + L).$$

Mais à mesure qu'il descendra, il est évident qu'il deviendra flasque, le poids de gaz qu'il contient ne pouvant faire équilibre aux pressions de plus en plus fortes que le ballon rencontre, que sous un volume plus petit. Soit V' son volume, pour une couche d'air de poids spécifique $a_p > a_1$. Le poids du gaz étant constant, on aura

$$V a_p d = Va_1 d,$$

d'où

$$V'a_p = Va_1,$$

et

$$V'a_p(1-d) = Va_1(1-d).$$

La force ascensionnelle propre du ballon restant constante, sa force descensionnelle restera donc égale à ϖ. Par suite, *sous l'influence d'une surcharge, un ballon prend toujours un mouvement descensionnel uniformément accéléré ou qui, du moins, tend à le devenir, et ne s'arrête qu'à terre.*

Si l'on veut enrayer la descente, il faudra projeter un poids de lest au moins égal à ϖ : le ballon rebondira alors jusqu'à sa zone primitive d'équilibre, mais après avoir perdu une quantité de lest d'autant plus considérable que la surcharge aura été plus grande. Chaque surcharge devant être combattue de la même façon, on voit que toute une catégorie d'influences accidentelles a pour résultat de faire perdre de plus en plus de lest à l'aérostat.

Quant au mouvement de descente dû à la surcharge, il se produit, dans certains cas, avec une si grande intensité qu'il est positivement irrésistible, ce qui tient à ce que le ballon, dont le gaz et l'enveloppe sont relativement froids, rencontrant, dans sa descente, des couches d'air généralement de plus en plus chaudes : 1° sa force descensionnelle augmente rapidement, par suite de la différence des températures ; 2° son enveloppe joue le rôle d'un véritable *condenseur* de machine à vapeur et se charge de quantités d'eau de plus en plus considérables.

On profite quelquefois, cependant, de ce dernier genre de surcharge. Tous les aéronautes savent que l'on peut regagner la terre, sans toucher à la soupape (et, par suite, sans perdre de gaz), si l'on attend le coucher du soleil, à cause de la condensation considérable d'humidité qui se produit dans l'atmosphère, au moment où l'astre disparaissant, son action calorifique cesse.

Examinons maintenant une influence telle que celle de la réapparition du soleil. Un *coup de soleil*, comme on dit, ne change pas notablement la température de la zone d'équilibre et, par suite, le poids spécifique de cette zone (on sait que le pouvoir absorbant des gaz pour la chaleur est très faible). Mais il n'en est pas de même pour le gaz du ballon : l'enveloppe, matière solide, possède un pouvoir absorbant assez considérable et, dès lors, elle peut échauffer d'un certain nombre de degrés le gaz aérostatique. Cet effet du coup de soleil se trouve, d'ailleurs, amplifié par la vaporisation de la couche d'eau qui, pendant le cours d'une ascension, se dépose presque toujours sur l'enveloppe.

Quoi qu'il en soit, désignons par t l'élévation de température du gaz intérieur due au coup de soleil, et supposons, pour simplifier les calculs, qu'à cet instant, le gaz intérieur soit, ainsi que l'air ambiant, à 0°. Par suite de sa dilatation, il va s'échapper par l'orifice et, en même temps, son poids spécifique, qui était $a_1 d$, deviendra $\frac{a_1 d}{1+\alpha t}$, α désignant le coefficient de dilatation des gaz. Dès lors, le poids du gaz qui reste dans le ballon et le remplit, au lieu d'être $V a_1 d$, ne sera plus que $\frac{V a_1 d}{1+\alpha t}$. La force ascensionnelle propre du ballon, qui était Va_1 $(1-d)$, deviendra donc :

$$Va_1 - \frac{Va_1 d}{1+\alpha t} = Va_1\left(1 - \frac{d}{1+\alpha t}\right),$$

valeur qu'on aurait pu obtenir immédiatement en remplaçant, dans la formule (5), d par $\frac{d}{1+\alpha t}$. L'équilibre est rompu, et comme

$$Va_1\left(1 - \frac{d}{1+\alpha t}\right) > Va_1\ (1 - d),$$

le ballon montera.

Seulement, le ballon, qui était plein au moment du coup de soleil, restera plein pendant la durée de son ascension, puisqu'il pénétrera dans des couches d'air de moins en moins denses. Sa force ascensionnelle propre diminuera donc rapidement et finira par s'annuler. Si a_p est le poids de la nouvelle zone d'équilibre, la condition d'équilibre

$$Va_p\left(1 + \frac{d}{1+\alpha t}\right) = P + L$$

donnera, en remplaçant $P + L$ par sa valeur, la relation approchée

$$a_p = a_1\left(1 - \frac{d\alpha t}{1+\alpha t}\right), \tag{12}$$

qui montre que a_p est indépendant de V et est d'autant plus faible que a_1 est plus petit et que d est plus grand, ainsi que t. Par suite, *lorsqu'un ballon plein subit un coup de soleil, il monte comme sous l'influence d'une projection de lest, et la hauteur de la zone d'équilibre nouvelle atteinte, indépendante du volume du ballon, est d'autant plus grande que le gaz aérostatique est plus lourd, l'action calorifique plus intense et, enfin, la zone où s'est produit le coup de soleil, plus élevée.* Il est clair, d'ailleurs, que ce théorème s'applique à toutes les influences accidentelles qui agissent pour élever la température du gaz intérieur.

Pour fixer les idées, considérons un ballon planant à 2.954 m., hauteur correspondant à une pression de 525 mm. et à un poids spécifique de 0,000898. Supposons l'augmentation de température due à la radiation solaire égale à 20°, c'est-à-dire posons $t = 20°$. Supposons, aussi, le ballon rempli de *gaz hydrogène*. On aura :

$$a_p = 0{,}000898\left(1 - \frac{0{,}154 \times 0{,}004 \times 20}{1 + 0{,}004 \times 20}\right) = 0{,}000706,$$

poids spécifique correspondant à une hauteur de 3.062 m. environ. Le ballon, sous l'influence du coup de soleil, s'est donc élevé de 108 mètres à peu près au-dessus de la zone d'équilibre normale. Un calcul analogue montre que, rempli de *gaz d'éclairage*, il s'élèverait, dans les mêmes conditions, de 278 mètres environ.

Le coup de soleil et les influences analogues remplacent donc un délestage. Aussi les aéronautes utilisent-ils souvent le coup de soleil, ou son apparition le matin, soit pour monter sans perdre de lest, soit encore pour compenser les effets d'une surcharge ou même d'un simple refroidissement du gaz du ballon.

Il est évident que l'*occultation du soleil* ou le refroidissement subit du gaz du ballon, par suite de son entrée dans une couche d'air froide, produirait, indépendamment de tout effet de surcharge, un effet contraire de celui du coup de soleil. Le ballon se contracterait et descendrait, comme sous l'action d'une surcharge.

Au point de vue de la sustentation prolongée, le coup de soleil (et les causes qui agissent dans le même sens) occasionnent, en somme, une perte de gaz. D'un autre côté, pratiquement, il est impossible de combattre la surcharge (et les causes qui agissent dans le même sens) sans perdre du lest. Les influences accidentelles que nous avons énumérées plus haut doivent donc, en général, être regardées comme des *ennemis du ballon*, du moins au point de vue d'un voyage au long cours, les unes tendant à élever le ballon au-dessus de sa zone d'équilibre normale, les autres tendant à le précipiter vers le sol. Ainsi s'explique la difficulté qu'éprouvent encore, actuellement, les aéronautes à stationner plus de quelques heures dans les airs.

VI. — Lorsque la quantité de gaz perdue est suffisante et que la provision de lest touche à sa fin, il est temps de songer à descendre.

A cet effet, on donne un *coup de soupape*, c'est-à-dire qu'on ouvre la soupape pendant un instant, de manière à permettre à une certaine quantité de gaz de s'échapper. Soit v la diminution presque de volume qu'éprouve alors le ballon, P son poids mort irréductible, L la provision de lest réservée pour la descente, a_1 le poids spécifique de la zone d'équilibre. La force ascensionnelle du ballon n'est plus $Va_1(1-d)$, mais $(V-v)\,a_1(1-d)$; son poids mort total

$$P + L = Va_1(1-d)$$

l'emporte donc sur cette force, et le ballon descend sous l'influence d'une force descensionnelle

$$f = P + L - (V - v)\,a_1(1-d),$$

ou, en remplaçant $P + L$ par sa valeur,

$$f = v\,a_1(1-d). \tag{13}$$

Mais, comme dans le cas où il y a surcharge, à mesure que le ballon descend, il devient flasque, le poids du gaz restant toujours le même. La force descensionnelle f restera donc constante pendant toute la durée de la descente et le ballon prendra ou, du moins, tendra à prendre, sous l'influence de cette force, un mouvement descensionnel uniformément accéléré, pour ne s'arrêter qu'à terre.

Si la soupape est parfaitement construite et le coup de soupape bien donné, le poids du gaz sorti étant relativement très petit, f sera très petit, car, alors, v sera relativement très petit. En général, s'il n'en est pas ainsi, soit par suite d'une surcharge accidentelle, soit encore par suite de l'accroissement de température des couches d'air inférieures, la force descensionnelle augmente et peut devenir très grande. Il faut alors, pour éviter tout accident, jeter du lest : à la suite de cette projection, le ballon remontera à sa zone de départ, mais il y arrivera à l'état de *ballon flasque*, car son volume, au lieu d'être V, n'est plus que $V - v$. Dès lors, au contraire de ce qui se passe dans le cas de la surcharge, il dépassera sa zone de départ, pour ne s'arrêter que dans une zone d'équilibre plus élevée. Si l'on appelle λ le poids de lest projeté, le poids spécifique de cette zone sera, en appliquant la formule (9), donné par la formule

$$a_{\text{r}} = a_1 \frac{V - v}{V} - \frac{\lambda}{V(1 - d)}.$$

Il pourra arriver ainsi que le ballon rebondisse, à chaque coup de soupape, à une hauteur plus grande que celle dont il est parti. C'est à l'aéronaute de se servir de l'ancre et du guide-rope pour l'aider dans ses manœuvres d'atterrissage.

Le rôle de l'*ancre* se comprend facilement.

Celui du *guide-rope* est double : 1° la partie qui repose sur le sol allège d'autant le poids du ballon et, par suite, lui permet de remonter, si la chute est trop brusque; 2° le frottement qu'il développe en traînant diminue considérablement (de moitié en temps ordinaire) la vitesse du mouvement du ballon. Il est clair, d'ailleurs, qu'en ramenant une partie du guide-rope dans la nacelle, on peut, si on le juge nécessaire, alourdir l'aérostat et lui redonner un mouvement descensionnel.

Il va de soi que lorsque l'étoffe du ballon n'est pas rigoureusement imperméable, les fuites de gaz inévitables produisent, en somme, le même effet qu'un coup de soupape et doivent se combattre, par conséquent, de la même façon, c'est-à-dire à l'aide de légères projections de lest.

Remarque. — Pour comprendre nettement la théorie du coup de soupape, il est nécessaire, de remarquer que le *gaz intérieur n'est pas*, comme nous l'avons supposé jusqu'ici, *à la même pression que l'air extérieur*, mais, en réalité, à une pression un peu supérieure. Les deux pressions sont, en effet, égales à l'orifice de l'appendice, mais si on s'élève suivant une verticale, la pression diminue moins vite à l'intérieur, où se trouve un gaz léger, qu'à l'extérieur où se trouve l'air atmosphérique, la différence des deux pressions étant évidemment *maxima* au sommet du ballon.

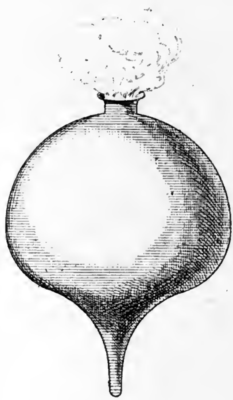

Fig. 10.

Giffard a indiqué une démonstration expérimentale très simple de l'existence de cet excès de pression, ou *surpression*, comme on l'appelle d'ordinaire. Qu'on remplisse d'hydrogène un petit ballon sans soupape, mais ouvert à sa partie inférieure : on le verra, si on le retourne brusquement, se vider sans que l'air rentre par l'orifice, et ce qui le prouve, c'est que le ballon se contractera à sa partie inférieure, à mesure que le gaz s'échappera (fig. 10).

Soit Z la hauteur du ballon, d la densité du gaz, a le poids spécifique de l'air ambiant à la hauteur de l'orifice, poids spécifique que l'on peut supposer constant le long de la verticale de hauteur Z. La surpression au sommet du ballon sera, pour la couche d'air considérée, donnée, évidemment, par la formule

$$P = Za - Zad = Za\,(1 - d),$$

ou

$$P = Z\varphi, \tag{14}$$

φ représentant la force ascensionnelle propre du gaz aérostatique dans la couche d'air où le ballon se trouve. Comme P est proportionnel à Z et à φ, on voit que *la surpression au sommet d'un ballon est proportionnelle à sa hauteur et à la force ascensionnelle propre du gaz aérostatique*, son *maximum* ayant évidemment lieu quand le ballon est à terre, puisque alors φ est maximum.

Considérons, par exemple, le ballon normal de 540 mètres cubes, placé à terre, rempli de gaz hydrogène. Si l'on fait abstraction de l'appendice, on a $Z = 2R = 10$ mètres à peu près. Comme $\varphi_0 = 1$ kilogramme par mètre cube, environ, la valeur de la surpression au sommet sera

$$P = 10 \text{ kg.}$$

par mètre carré, soit, par centimètre carré, une pression de 1 gramme. Si on tient compte de l'appendice, qui est plein de gaz, et dont la hauteur est d'à peu près $1^{m},50$, alors $Z = 11^{m},50$ et l'on a

$$P = 12^{kg},8$$

par mètre carré, soit, par centimètre carré, une surpression de $1^{gr},28$.

Cet excès de pression à l'intérieur, excès qui prend sa valeur maximum aux environs du sommet, explique pourquoi, lors du coup de soupape, le gaz s'échappe du ballon sans être remplacé par un volume égal d'air : cet air, en effet, ne pourrait entrer que par l'orifice de l'appendice et, justement à cet orifice, il y a toujours équilibre de pression. Cet excès de pression fait comprendre aussi pourquoi un ballon, une fois rempli, tend à se déformer immédiatement, par suite de l'expansion de l'étoffe. Cet effet est si notable, surtout avec les gros tonnages, que le ballon captif de Giffard, de 1878, construit pour contenir 24.000 mètres cubes de gaz hydrogène, en contenait jusqu'à 25.000.

On voit enfin que, connaissant P et Z, la formule (14) permet de calculer le produit $\varphi = a\,(1 - d)$, c'est-à-dire la force ascensionnelle propre du gaz aérostatique employé : c'est le principe d'une méthode de mesure préconisée par Renard.

VII. — En résumé :

1° Le *lest* est le véritable *palladium* de l'aéronaute. Sans lui, il ne peut ni monter, ni planer, ni descendre : il faut, en effet, qu'il en projette pour partir, qu'il en projette pour arriver dans la zone d'équilibre normale et s'y maintenir, qu'il en projette, enfin, pour enrayer le mouvement du ballon à la descente.

2° Si l'on ne cherche qu'à faire une ascension en hauteur, les *ballons flasques* sont préférables aux ballons pleins, puisque, pour une dépense de gaz égale, ils s'élèvent beaucoup plus haut. Mais si l'on veut planer, les *ballons pleins* sont préférables, et la raison en est la suivante : de deux ballons ayant le même tonnage et remplis du même gaz, l'un flasque, l'autre plein, il est évident que le ballon qui, au départ, sera totalement rempli, aura une force ascensionnelle plus grande, et, par suite, pourra emporter une plus grande provision de lest.

D'ailleurs, avec une provision de lest convenable, on pourra toujours s'élever aussi haut en ballon plein qu'en ballon flasque.

3° Pour une même rupture d'équilibre, le ballon à gaz lourd s'élève, d'après ce qui précède, plus haut qu'un ballon à gaz léger. Il semble donc que, au moins pour les ascensions en hauteur, les gaz lourds sont préférables aux gaz légers. Mais, à volume égal, la force ascensionnelle d'un ballon à gaz lourd est évidemment moindre que s'il contenait du gaz léger : pour une même rupture d'équilibre, le gaz lourd ne permet donc pas d'emporter autant de lest que le gaz léger. Or, c'est là un grave inconvénient, même pour une simple ascension en hauteur, car c'est surtout pendant la descente qu'on a besoin de lest. De plus, d'après ce qui précède, les gaz lourds rendent évidemment les aérostats beaucoup plus *sensibles* à toutes les influences accidentelles et, par suite, difficilement maniables : pour la même surcharge, en effet, le ballon à gaz lourd descend plus vite qu'un ballon à gaz léger, tandis que la projection d'un même poids de lest ou l'action d'un même coup de soleil, le fait rebondir plus haut. *Les ballons à gaz lourd doivent* donc *être rejetés, même pour les ascensions de peu de durée.*

4° On pourrait se demander si les résultats précédents ont un degré de généralité suffisant. En effet, nous avons admis, dans tout ce qui précède, que le gaz intérieur est à la même température que le gaz extérieur, ce qui n'a jamais lieu, un ballon pouvant être considéré comme une sorte de *thermomètre très paresseux*, lent à se refroidir, lent à s'échauffer, dont le gaz, par suite, n'est jamais à la même température que le gaz extérieur. L'expérience montre qu'en ce qui concerne les ascensions ordinaires, on peut regarder les conclusions précédentes comme suffisamment exactes.

Il serait, d'ailleurs, facile d'utiliser les formules précédentes pour le cas où la température ne serait pas la même à l'intérieur et à l'extérieur. Il suffirait, en effet, de supposer que d représente, non ce que nous avons entendu jusqu'à présent par *densité d'un gaz*, mais le rapport du poids d'un volume donné de ce gaz, pris à la température intérieure du ballon, au poids du même volume d'air pris à la température extérieure, le gaz intérieur et l'air extérieur étant supposés à la même pression ; plus simplement, il suffirait, comme le prouve l'étude du coup de soleil, de remplacer, dans ces formules, d par $\frac{d}{1+\alpha t}$, α représentant le coefficient de dilatation des gaz, t la différence de température, positive ou négative, entre l'intérieur et l'extérieur.

Ainsi, au siècle dernier, une querelle s'éleva, comme nous l'avons dit plus haut (Introduction), entre les partisans des *montgolfières*, c'est-à-dire des ballons à air chaud, et ceux des *ballons à hydrogène*, relativement à leurs avantages ou à leurs inconvénients respectifs. Il est facile de décider la question :

La température de l'air chaud, plus ou moins chargé de vapeur d'eau, de gaz carbonique, etc., que peut contenir une montgolfière d'un tonnage un peu considérable, ne dépasse guère 90°, ce qui correspond, d'après les expériences de Fabry, à une température d'environ 75° pour une montgolfière qui serait remplie d'air pur. Or, à cette température, la densité de l'air chaud par rapport à celle de l'air extérieur, supposé à 0°, est

$$d = \frac{1}{1 + 0,004 \times 75} = 0,769.$$

Tout au plus, l'air chaud dont on peut gonfler une montgolfière d'une centaine de litres, comme celles que construisent les écoliers, peut-il atteindre la température de 111°, ce qui correspond à une densité

$$d = \frac{1}{1 + 0,004 \times 110} = 0,694.$$

L'*air chaud est* donc *un gaz aérostatique lourd*, et, par suite, abstraction faite des dangers d'incendie et de l'inconvénient d'avoir à entretenir leur feu, *les montgolfières doivent être rejetées.*

CHAPITRE II

CONSTRUCTION D'UN AÉROSTAT

I. — Depuis Charles, l'enveloppe d'un ballon, monté ou non, a toujours, à moins qu'il ne s'agisse d'un ballon dirigeable, la forme d'une *sphère*. La sphère, en effet, présente les avantages suivants : minimum de surface et, par suite, de poids, au moins en ce qui concerne l'enveloppe, pour un volume donné, ce qui réduit à leur minimum les frais de construction et les phénomènes d'exosmose ; maximum de résistance pour une épaisseur donnée de l'enveloppe ; construction plus facile de l'enveloppe et du filet, le filet se mariant plus intimement avec l'enveloppe ; gonflement plus aisé ; stabilité plus grande de route.

Reste à chercher le *volume* que l'on doit donner à un ballon, plein ou flasque, pour qu'il puisse arriver à une hauteur donnée.

Supposons-le *plein*. La formule (3) permet de calculer le poids spécifique a_1 de la zone d'équilibre qui correspond à une hauteur donnée z au-dessus du sol, car elle donne immédiatement

$$\log a_1 = \log a_0 - \frac{z}{18\,400} \qquad (15)$$

On aura dès lors le volume cherché V en exprimant que l'aérostat doit flotter dans la zone de poids spécifique a_1, ce qui donne la relation

$$Va_1 (1 - d) = P,$$

d'où

$$V = \frac{a_1 (1 - d)}{P}, \qquad (16)$$

d désignant la densité de gaz aréostatique, P le poids mort total

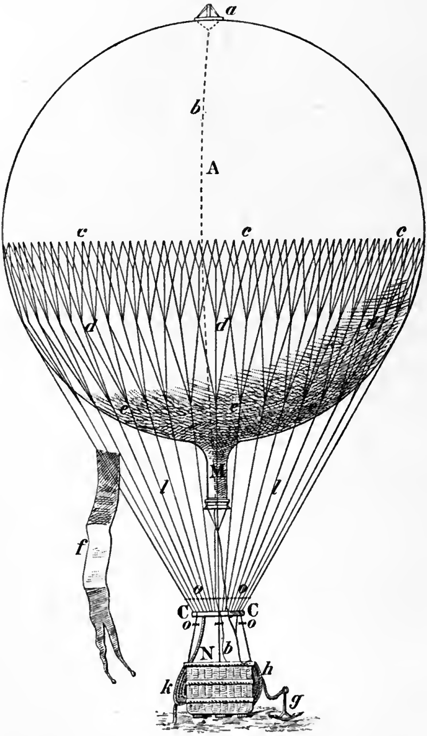

Fig. 11. — Ensemble du gréement d'un aérostat.

A, ballon. — M, appendice ou manche. — CC, cercle. — N, nacelle. — *a*, soupape. — *b*, corde de soupape. — *c*, filet. — *d*, petites pattes d'oie. — *e*, grandes pattes d'oie. — *l*, suspentes. — o, petits et gros cabillots. — *k*, guide-rope. — *h*, corde d'ancre. — *g*, ancre. — *f*, banderole Loch.

du ballon (somme des poids de l'enveloppe, du filet, de la nacelle, etc.). Appelons R le rayon du ballon : la formule (13) donne alors, en remarquant que

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3, \tag{C}$$

l'équation

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{P}{a_1(1-d)}, \tag{17}$$

qui permettrait de calculer facilement R si, dans le poids P, n'entraient le poids de l'enveloppe et celui du filet, qui dépendent de la surface du ballon et, par suite, du carré de son rayon. On verra d'ailleurs plus loin (Chap. X), à propos des *ballons-sondes*, comment on opère ce genre de calcul.

Supposons maintenant le ballon *flasque*. Le problème, au premier abord, semble plus simple, car il suffit de ne remplir le ballon, au départ, que dans le rapport

$$\frac{V_0}{V} = \frac{a_1}{a_0},$$

pour être sûr d'atteindre la zone d'équilibre voulue. Mais il faut qu'au départ la force ascensionnelle du ballon suffise pour élever son poids total, ce qui donne la condition

$$V_0\, a_0 (1 - d) > P,$$

ou, en remplaçant V_0 par sa valeur tirée de la proportion précédente,

$$\frac{4}{3}\pi R^3 > \frac{P}{a_1(1-d)},$$

inégalité du 3[e] degré dont la résolution prête aux mêmes remarques que celle de l'équation (17).

II. — Les principales parties d'un aérostat sont :

1° *L'enveloppe* ou *ballon proprement dit*, avec sa *soupape* et son *appendice* ou *manche ;* 2° le *filet*, qui aboutit au *cercle ;* 3° la *nacelle* qui est suspendue en cercle; 4° les *engins* nécessaires à la montée, à la sustentation et à la descente (lest, ancre, etc.).

Étudions successivement la fabrication de ces différentes parties :

a). — Les étoffes que l'on peut employer pour faire l'enveloppe sont : en premier lieu, la *soie* ou *taffetas ;* puis le *ponghée* ou *soie de Chine;* ensuite, la *toile de lin*, le *tissu de coton* (*percale* ou *cretonne*) ; enfin, surtout pour les *ballons-sondes*, la *baudruche* ou une *soie particulière*, sur les propriétés de laquelle nous reviendrons plus loin.

Le ponghée, à cause de sa grande résistance, de sa souplesse (même après le vernissage), de son imperméabilité et de son bon marché relatif est, actuellement, le tissu le plus employé, surtout lorsque le voyage aérien doit avoir une certaine durée. Cette étoffe, essayée au dynamomètre, présente, même après qu'elle a été vernissée, une résistance minima de 800 kilogrammes par mètre de longueur suivant la *trame* et suivant la *chaîne*, ce qui veut dire que pour séparer en deux une pièce de cette étoffe, il faudrait exercer, dans le sens de la trame ou celui de la chaîne, un effort de 800 kilogrammes par mètre de longueur. Mais, à cause des coutures, il ne faut compter que sur une résistance de 400 kilogrammes par mètre, quand le ballon est construit.

Cette question de résistance est de la plus haute importance. On a vu dans le chapitre précédent qu'au sommet d'un ballon s'exerce, à l'intérieur, une surpression dont la valeur est donnée par la formule (14), et qui possède sa valeur minimum quand le ballon est encore à terre. Cette surpression a évidemment pour effet de développer au sommet du ballon une tension qui, *si on assimile un ballon réduit à son enveloppe à une bulle liquide sphérique* (ce qui, évidemment, est loin d'être rigoureux), est donnée par la relation connue

$$T = \frac{R}{2} \times P, \qquad \text{(D)}$$

R étant le rayon du ballon, P la surpression.

Considérons alors un ballon au niveau du sol, et soit, dans ces conditions, P_0 la valeur de la surpression, φ_0 la force ascensionnelle propre du gaz. *Négligeons l'appendice.* Alors, dans la formule (14), P = 2 R et l'on a

$$P_0 = 2 R \varphi_0,$$

d'où, pour T, la valeur

$$T = R^2 \varphi_0, \tag{18}$$

qui montre que *la tension de l'étoffe au sommet d'un ballon sphérique est à peu près proportionnelle au carré du rayon et à la force ascensionnelle propre du gaz aérostatique.*

Mais comme la tension maxima de l'étoffe correspond, évidemment, au point du ballon où la surpression P est maximum, c'est-à-dire au sommet, le plus grand rayon qu'on puisse donner à une étoffe dont la résistance à la déchirure est connue s'obtiendra en calculant R d'après cette formule, et sera donc

$$R = \sqrt{\frac{T}{\varphi_0}}, \tag{19}$$

formule qui montre que *le plus grand rayon qu'on puisse donner à un ballon construit avec une étoffe donnée, est, à peu près, proportionnel à la racine carrée de sa résistance et inversement proportionnel à la racine carrée de la force ascensionnelle propre du gaz aérostatique.*

Pour fixer les idées, cherchons le plus grand rayon qu'on puisse donner à un ballon rempli d'hydrogène dont l'enveloppe est du ponghée, en admettant 400 kilogrammes pour la résistance de ce tissu par mètre de longueur. La formule précédente donnera

$$R = \sqrt{\frac{0,400}{0,001}} = 20 \text{ mètres environ.}$$

Dans la pratique, il sera prudent de rester au-dessous de ce chiffre et de ne faire travailler l'étoffe qu'à 1/5 de sa rupture, ce qui revient à supposer sa résistance 5 fois plus petite qu'elle ne l'est réellement. On aura alors

$$R = \sqrt{\frac{0{,}080}{0{,}001}} = 9 \text{ mètres environ,}$$

valeur qui correspond à un tonnage d'environ 2.900 mètres cubes.

Si l'on tient compte du surcroît de pression dû à l'appendice, on voit même qu'il sera prudent, pour un ballon de ponghée, de ne pas dépasser un rayon de 8 m., soit un tonnage de 2.100 m^3 à peu près.

Pour les tonnages supérieurs, il faudra se servir d'une double, triple, etc., enveloppe ou, au moins, employer l'étoffe en double, en triple, etc., dans la moitié supérieure du ballon, l'expérience montrant que lorsqu'on double, triple, etc., une étoffe, sa résistance à la déchirure augmente à peu près dans le même rapport que son épaisseur.

b). — Passons maintenant à la construction de l'enveloppe.

Le problème revient à construire une sphère, c'est-à-dire un corps rond, avec des feuilles d'étoffe planes. Théoriquement, le problème est insoluble, car on ne peut jamais, en déformant une sphère, l'appliquer exactement sur un plan. On est donc obligé, pour construire une enveloppe sphérique, d'assembler des morceaux d'étoffe de façon à former non une sphère, mais une surface qui s'en rapprochera suffisamment. Le problème ainsi posé présente de nombreuses solutions ; mais le procédé qui permet d'assembler et de coller les morceaux de la façon la plus simple est la méthode dite *méthode des fuseaux*, employée dans la construction des *globes terrestres*, la seule que nous exposerons dans cet ouvrage :

Supposons la sphère coupée par un nombre infini de plans horizontaux perpendiculaires à son axe vertical (c'est-à-dire à l'axe vertical du ballon), chacun de ces plans coupant la sphère suivant une circonférence. Remplaçons chacune de ces circonférences par un polygone régulier circonscrit d'un nombre quelconque n de côtés. Il est évident que tous ces polygones réguliers engendreront une surface *un peu plus grande* que celle de la sphère, mais qui en différera d'autant moins que n sera plus grand. Soit P_1AP_2 un des méridiens de la sphère sur lesquels s'appuient les côtés des polygones réguliers ainsi définis (fig. 12).

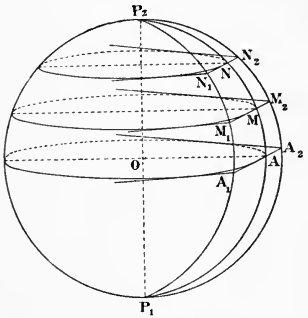

Fig. 12.

En ce qui concerne ce méridien, tous les côtés correspondants M_1M_2, N_1N_2, A_1A_2, etc., ont la même direction, puisque ce sont des droites horizontales : leur ensemble forme donc une portion de surface cylindrique droite, à base circulaire, limitée par deux courbes planes. Ces courbes étant les intersections de cette surface par deux plans menés par l'axe P_1OP_2, sont nécessairement des ellipses, situées dans des plans verticaux, dont le petit axe est le diamètre vertical P_1OP_2 de la sphère, leur grand axe étant le rayon du polygone circonscrit à l'équateur de cette surface. La sphère sera ainsi remplacée par n portions de surfaces cylindriques, telles que la surface $P_1A_1A_2P_2$, auxquelles on donne le nom de *fuseaux* (ou *côtes*) et dont les lignes de séparation sont des arcs d'ellipse dont l'excentricité sera d'autant plus faible que le nombre n des côtés des polygones circonscrits et, par suite, le nombre des fuseaux sera plus grand.

Reste maintenant à obtenir la forme d'un fuseau.

Pour cela il faut le supposer développé et appliqué sur un plan, ce qui est possible, un cylindre ouvert suivant une de ses génératrices pouvant toujours être appliqué exactement sur une surface plane. Le calcul montre que les deux courbes qui limitent le fuseau sont alors des arcs de cosinusoïde, symétriques l'un de l'autre par rapport à sa ligne médiane, ou *axe*, qui n'est que la moitié développée du méridien P_1P_2, la *base* du fuseau, c'est-à-dire sa plus grande largeur A_1A_2, étant un arc de l'équateur égal à la $n^{\text{ième}}$ partie de sa longueur L'équation de cette cosinusoïde est d'ailleurs

$$y = R \operatorname{tg} \alpha \cos x, \tag{20}$$

R étant le rayon du ballon, α le demi-angle du fuseau, de sorte que

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2n},$$

les axes des y et des x correspondant respectivement à l'équateur et au méridien développés, l'angle x étant la latitude de l'abscisse, abcisse dont la valeur est $\frac{3 \pi R}{360} x$. Les formules

$$S = 4n \operatorname{tg} \alpha, \tag{21}$$

et

$$V = \frac{4}{3} n \operatorname{tg} \alpha, \tag{22}$$

donnent respectivement la surface et le volume du *sphéroïde* ainsi obtenu, la longueur de l'arc de cosinusoïde étant donnée par la formule approchée :

$$l = \pi R \left(1 + \frac{1}{4} \operatorname{tg}^2 \alpha - \frac{3}{64} \operatorname{tg}^4 \alpha\right). \tag{23}$$

Soit alors à construire un ballon de 6 mètres de rayon au moyen de 48 fuseaux. La base du fuseau sera

$$\frac{2\pi R}{n} = \frac{2\pi \times 6}{48} = 0^m,786,$$

sa longueur

$$\pi R = \pi \times 6 = 18^m,85,$$

son angle

$$2\alpha = \frac{360}{48} = 7^\circ 30',$$

son demi-angle,

$$\alpha = 3^\circ\, 45'.$$

Or

$$\text{tg } 3^\circ 45' = 0{,}0655\,;$$

par suite

$$\text{R tg } \alpha = 6 \times 0{,}0655 = 0^{\text{m}},393,$$

et l'équation de la cosinusoïde sera :

$$y = 0^{\text{m}},393 \cos x.$$

Rien de plus facile, dès lors, que de construire le fuseau par points.

Supposons, par exemple, qu'on veuille obtenir 20 de ces points, nombre suffisant pour les besoins de la pratique. On remarquera d'abord qu'il suffit pour cela de déterminer 10 points de la portion de courbe A_2P_2, car la moitié inférieure A_2P_1 est symétrique de cette portion de courbe par rapport à l'axe des y, et la cosinusoïde $P_1 A_1 P_2$ est symétrique de la cosinusoïde $P_1 A_2 P_2$ par rapport à l'axe Ax du fuseau. On calculera alors les abscisses

$$0,\ \frac{2\pi R}{360} \times 9,\ \frac{2\pi R}{360} \times 18,\ \ldots,\ \frac{2\pi R}{360} \times 90,$$

qui correspondent aux valeurs

$$0^\circ,\ 9^\circ,\ 18^\circ,\ \ldots\ldots,\ 90^\circ,$$

de l'angle x, et on cherchera, à l'aide des Tables trigonométriques, les valeurs correspondantes des ordonnées, soit

$$0^{\text{m}},393,\ 0^{\text{m}},393 \times \cos 9^\circ,\ 0^{\text{m}},393 \times \cos 18^\circ,\ \ldots,\ 0.$$

Prenant maintenant un *patron de papier* de longueur convenable, 10 mètres environ, on tracera sur ce patron deux perpendiculaires Ax et Ay (fig. 13) correspondant aux axes des x et des y.

On portera ensuite, sur l'axe des x, à l'aide du compas, 10 longueurs

$$Ax_1,\ x_1\,x_2,\ x_2\,x_3,\ \ldots\ldots,\ x_9\,P_2,$$

égales chacunes à

$$\frac{2\pi R}{360} \times 9 = 0{,}942,$$

et correspondantes aux abscisses calculées. On mènera à l'é-

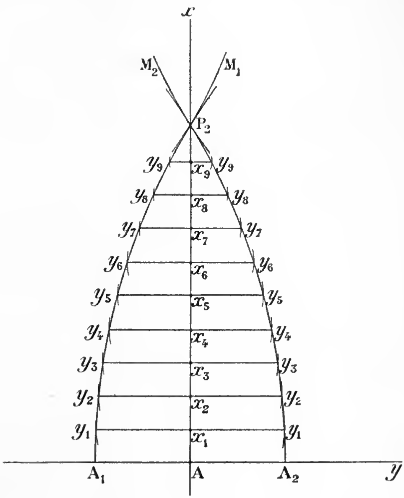

Fig. 13.

querre des parallèles à l'axe des y par les points de division ainsi obtenus ; puis, avec des ouvertures de compas

$$A\,A_2,\ x_1\,y_1,\ x_2\,y_2,\ \ldots,\ x_9\,y_9,$$

égales aux valeurs successives trouvées pour les y, on tracera des arcs de cercle qui couperont ces parallèles, à droite et à gauche de l'axe des x, en des points

$$y_1, y^2, y_3, \dots\dots y^9,$$

qui correspondent exactement aux deux courbes qui limitent la moitié supérieure du fuseau. En réunissant ces points par une courbe convenablement tracée, on aura le *patron d'une moitié du fuseau* (on se souviendra qu'aux extrémités du fuseau, les tangentes aux deux courbes qui le limitent font entre elles, comme il est facile de le démontrer, un angle égal à l'angle du fuseau, soit, ici, 7° 30′). Le patron de *l'autre moitié du fuseau* pourra aisément se tailler, ensuite, avec le patron obtenu, puisque les deux moitiés du fuseau sont symétriques par rapport à l'axe des y.

Dans la pratique, on se contente souvent, pour tailler les fuseaux, d'une *épure* dessinée comme il suit :

On trace sur le papier une demi-circonférence dont le rayon est le dixième, par exemple, de la base du fuseau (fig. 14). Du centre A de cette demi-circonférence, on mène un certain nombre de rayons, 20 par exemple, également inclinés les uns sur les autres et, par suite, correspondant à un même nombre de divisions égales de la demi-circonférence. On mène les parallèles correspondantes aux points de division ainsi obtenus et, pour plus de commodité, on les projette comme l'indique la figure, sur dix droites parallèles équidistantes, menées perpendiculairement à la verticale A P_2. Il est évident que les parallèles

$$y_1y_1, y_2y_2, y_3y_3, \dots\dots$$

ainsi menées sont proportionnelles aux cosinus des angles que font les rayons menés du centre A avec la base A_1A_2 de la demi-circonférence décrite, et, par suite, donnent les longueurs relatives de 10 diamètres de la moitié supérieure du fuseau.

Soit alors à construire, à l'aide de ce graphique, un ballon d'un rayon de 6 mètres, formé de 48 fuseaux. La circonférence de ce ballon étant de $37^m,7$ environ, la longueur du fuseau sera de $18^m,35$; sa base sera de $\frac{37.7}{48} = 0^m,785$ environ. On tracera donc l'épure précédente avec un rayon de $\frac{0^m,785}{10} = 7^c,85$. Ensuite, après avoir, sur un patron de papier d'envi-

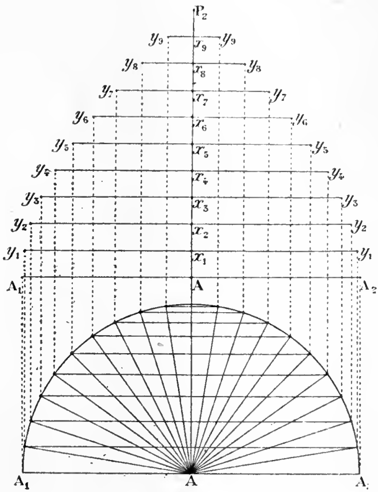

Fig. 14.

ron 10 mètres de longueur, mené les deux perpendiculaires $A_1 A_2 = 0^m,785$ et $P_1 P_2 = \frac{18^m,85}{2} = 9^m,425$, on prendra, sur $A P_2$, 10 longueurs égales chacune à la dixième partie de AP_2, soit $0^m,942$. Par les points ainsi déterminés on mènera des perpendiculaires à l'axe AP_2 et on finira le tracé comme plus haut, chacune des longueurs A_1A_1, y_1y_2, $y_2y_2 \ldots$, devant être amplifiée 10 fois avant d'être reportée sur le patron La moitié du fuseau ainsi obtenue sera, si l'épure a été bien faite et à une assez grande échelle, dessinée avec la même approximation que par la méthode précédente.

D'après le patron en papier obtenu, on taille un *patron définitif*, devant servir à découper les fuseaux. En général, on ne taille pas un fuseau d'un seul morceau : on l'établit en trois ou quatre fragments et il faut alors autant de patrons que de fragments. On épingle le patron sur l'étoffe, et on découpe les fuseaux, soit successivement un à un, soit en masse, en ménageant de chaque côté le rebord nécessaire à la couture.

Les différents fragments composant un fuseau entier étant réunis, on les coud solidement à la machine avec du fil de chanvre ou de soie. Puis on coud les fuseaux les uns aux autres, d'abord deux par deux, puis quatre par quatre. On rabat les coutures et, pour éviter les fuites de gaz, on les recouvre d'une bande faite avec l'étoffe de l'enveloppe et que l'on fixe avec un vernis convenablement choisi.

Le ballon ainsi obtenu a, d'ailleurs, des dimensions très voisines de celui de la sphère demandée. Ainsi, dans l'exemple choisi, le tonnage de ce sphéroïde, une fois rempli de gaz, est de

$$905^{m3},472 \text{ au lieu de } 904^{m3},781,$$

volume de la sphère théorique. La surface est

$$452^{m2},736 \text{ au lieu de } 452^{m2},390,$$

surface de la sphère théorique. Enfin, la longueur commune des côtés des fuseaux est de

$$18^{m},859 \text{ au lieu de } 18^{m},850,$$

longueur théorique du demi-méridien.

Il est évident que dans le cas d'un ballon sphérique, la méthode graphique ne présente aucun avantage sur la méthode trigonométrique. En revanche, elle est beaucoup plus générale, car elle peut évidemment s'appliquer à un aérostat de forme quelconque, pourvu que cette forme soit celle d'une surface de révolution autour de son axe vertical.

Remarquons que puisqu'un ballon sphérique, dès qu'il est plein de gaz, tend, par suite des pressions intérieures qui s'exercent en ses différents points, à se déformer et à prendre la forme de *poire*, il faudrait, rigoureusement, tailler les fuseaux en tenant compte de cette déformation.

Remarquons aussi que le nombre des fuseaux qui entrent dans la construction d'un ballon dépend de la largeur de l'étoffe employée. La couture d'un fuseau à un autre, nécessitant ordinairement $1^{c},5$ pour chaque côté du fuseau, et les fausses coupes correspondant à un écart égal, on voit qu'avec une étoffe de 80 centimètres, par exemple, on ne peut compter que sur 74 centimètres de largeur réelle. Pour le ballon de 6 mètres de rayon, pris comme exemple, dont la circonférence est de $37^{m},70$, il faudra donc, avec une pareille étoffe, employer $\frac{37,70}{0,74} =$ 50 fuseaux à peu près.

Quel que soit le tissu employé, il est de toute nécessité, une fois le ballon cousu, de s'arranger de façon à éviter la perte de gaz par exosmose.

On a proposé divers moyens pour arriver à atténuer cette perte. D'abord, l'emploi de *ballons métalliques*, ce qui n'est guère pratique ; ensuite la *métallisation des enveloppes*, par exemple leur argenture par dépôt galvanique procédé qui aurait, entre autres avantages, celui d'annuler le frottement de l'air sur l'enveloppe, puis d'atténuer le coup de soleil, et, enfin, d'empêcher l'eau de s'accumuler sur les mailles du filet.

Cependant, le moyen le plus communément encore employé est, comme il y a un siècle, le *vernissage* de l'enveloppe. Cette opération s'exécute à l'intérieur et à l'extérieur, et il est évident que c'est surtout à la partie supérieure du ballon, où l'excès de pression de l'intérieur sur l'extérieur est maximum, qu'elle doit être faite avec le plus de soin.

Bien des vernis ont été préconisés et employés depuis un siècle. Les meilleurs sont ceux à base d'huile de lin siccative, et, en première ligne, d'après Graffigny, le *vernis Arnoul*, formé du mélange de deux sortes d'huile de lin cuite, la première, traitée par la litharge et le bioxyde de manganèse, qui la rendent plus siccative, l'autre épaissie au contact de l'air, en la maintenant longtemps à une température élevée.

L'opération du vernissage n'est pas, d'ailleurs, sans présenter quelques difficultés : l'enveloppe du ballon s'échauffe considérablement, en effet, par suite de la réaction chimique qui se produit entre le vernis et l'étoffe, réaction que favorise encore la chaleur due au frottement intense qu'il faut exercer pour que le vernis pénètre dans les pores. Aussi fait-on toujours suivre le vernissage de la *ventilation*, c'est-à-dire du gonflement à l'air du ballon, gonflement que l'on opère à l'aide d'une pompe à compression. Non seulement cette dernière opération (à laquelle d'ailleurs les aéronautes se livrent après chaque ascension) est indispensable parce que, hâtant l'évaporation du vernis, elle empêche un échauffement spontané de l'étoffe trop considérable, mais elle permet aussi de s'assurer que l'étoffe n'a pas de trous, et peut même servir à juger les effets de l'exosmose : un ballon gonflé d'air, qui a passé la nuit sans se dégonfler sensiblement, peut être regardé comme bien construit. On comprend, dès lors, au moins pour les ballons ordinaires, l'inutilité du remplacement des enveloppes de soie, dont on se sert actuellement, par des enveloppes métalliques, que l'on ne pourrait manier convenablement, et qui se gondoleraient au moindre choc, à moins d'être en acier assez épais, auquel cas le ballon serait incapable de s'enlever.

Il importe de remarquer que le vernissage augmente de beaucoup le poids de l'enveloppe, qui est plus que triplé par cette opération, surtout lorsqu'on tient à avoir une étoffe parfaitement imperméable. Cette augmentation de poids a évidemment pour effet une diminution considérable de la force ascensionnelle. Malheureusement, il est impossible d'éviter le vernissage, même dans le cas d'un *ballon-sonde*, quoique ces appareils soient plutôt destinés à s'élever haut qu'à planer.

Il n'existe au monde qu'un seul tissu que l'on puisse regarder comme absolument imperméable à l'hydrogène et dont le vernissage soit, par suite, inutile : c'est la *baudruche*. Ce tissu est le plus léger de tous, sa résistance est considérable : avec huit couches de baudruche, on obtient une étoffe dont le poids ne dépasse pas 213 grammes par mètre carré et dont la résistance est de 1.200 kilogrammes par mètre de longueur. Malheureusement, la baudruche coûte cher ; elle est, par sa nature organique, sujette à une décomposition rapide ; il est difficile de la défendre, sans risquer de l'altérer, contre les atteintes des insectes. Enfin, avec le temps, elle devient dure et cassante.

c). — Le *filet*, en chanvre ou en soie, a pour effet de répartir également sur toute la surface de l'enveloppe le poids de la nacelle et de son contenu.

L'expérience a montré qu'il y a des avantages sérieux à ce qu'il n'enveloppe le ballon que jusqu'aux 2/3 seulement en partant du sommet. Quant à son épaisseur, ou plutôt quant à l'épaisseur des cordons qui le forment, nous nous bornerons, pour en donner une idée, et en écartant des calculs qui relèvent plutôt du domaine de la Mécanique que de celui de l'Aérostatique, à dire qu'un ballon de 8 mètres de rayon, gonflé au gaz d'éclairage, dont la force ascensionnelle est de 1.395 kilogrammes et dont l'enveloppe de ponghée pèse, soupape comprise, 380 kilogrammes, exige un filet (supposé en chanvre) d'une section totale d'à peu près 30 centimètres carrés (correspondant à un diamètre de $6^{c}.2$) : dans ces conditions, le filet pourra soutenir le poids qu'il est destiné à porter, soit $1.395 - 380 = 1.015$ kilogrammes. Cette valeur relativement faible de la section totale d'un filet fait comprendre pourquoi les cordons de chanvre employés à sa construction paraissent, au premier abord, d'un diamètre si minime.

Comme l'enveloppe, le filet est formé d'un certain nombre de *fuseaux* dont le tracé s'effectue comme celui des fuseaux de l'enveloppe. Seulement, le tracé des mailles ne se fait pas de la même façon pour la moitié supérieure que pour la moitié inférieure. On demande, en effet, aux mailles de la partie supérieure de s'adapter exactement sur l'enveloppe, tandis que les mailles de la partie inférieure doivent, lorsqu'on gonfle le ballon, permettre au filet de descendre en prenant la forme d'un cylindre légèrement conique presque vertical.

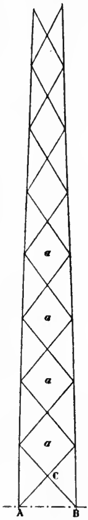

Fig. 15.

Dès lors, en ce qui concerne les mailles supérieures, le point de départ de la maille équatoriale est un triangle ABC ayant pour base la largeur de cette maille et que l'on construit équilatéral afin d'égaliser les tractions en ses trois sommets (fig. 15). Toutes les autres mailles *a*,*a*,... sont tracées à l'équerre en leur conservant le même angle et la même forme : il suffit, à cet effet, de mener des parallèles aux deux côtés AC et BC du triangle de base, en limitant ces parallèles aux bords du fuseau.

Quant au point de départ des mailles inférieures, c'est bien encore un triangle équilatéral A B C′ égal au triangle A B C et qui, avec celui-ci, complète la maille équatoriale (fig. 16). Mais afin de permettre au filet de descendre verticalement, on se préoccupe, avant tout, de donner aux côtés des losanges une longueur invariable. Les mailles changent alors d'angle et de forme, à mesure qu'elles se rapprochent de la partie du ballon où le filet devient tangent à l'enveloppe, s'allongeant ainsi de plus en plus.

La figure montre, d'ailleurs, comment, à partir du point O (situé au 2/3 du diamètre du ballon en partant du sommet) sont disposées les premières pattes d'oie, *p*,*p*,... dites *petites pattes d'oie*, qui réunissent les mailles deux à deux, lorsque le filet devient tangent au ballon. Elle montre aussi, ainsi que la figure 11, comment ces petites pattes d'oie sont elles-mêmes réunies deux à deux par les *grandes pattes d'oie* P auxquelles on attache les *cordeaux de suspension* (ou *suspentes*) qui terminent le filet.

L'exécution du filet ne présente rien de particulier : l'épure étant tracée sur une planche, on plante des clous à l'intersection de chaque maille et on la reproduit en les calquant sur le dessin. On fait le *nœud* de chaque maille sur un clou, ce qui facilite beaucoup l'exécution. Le lecteur trouvera dans les ouvrages techniques sur la construction des ballons les renseignements désirables.

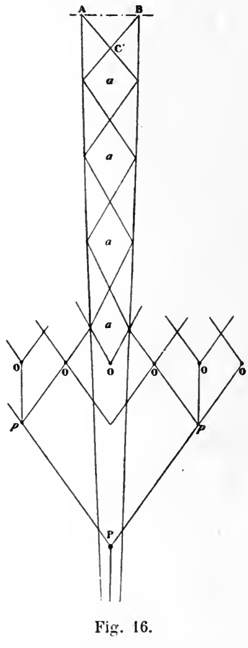

Fig. 16.

Ajoutons que, d'ordinaire, on profite, pour alléger le filet, de son enroulement autour de la partie supérieure du ballon, enroulement qui a pour effet de diminuer, à mesure que l'on s'approche de la soupape, la tension des cordes, ce qui permet de diminuer graduellement leur section.

Une fois construit, le filet est toujours passé à une *préparation hydrofuge*, destinée à le rendre imputrescible et à atténuer les variations de longueur que subirait le chanvre sous l'action de l'eau et du soleil. D'ordinaire, les petites cordes molles dont le diamètre ne dépasse pas un centimètre sont trempées dans une dissolution de cachou; quant aux cordeaux, chacun d'eux est passé dans un récipient contenant un mélange chaud de goudron, et de suif. Cette opération a malheureusement pour effet d'augmenter le poids du filet et de diminuer la résistance de ces différentes parties à la rupture ; mais il n'y a pas moyen de l'éviter.

d). — Dans l'aérostat monté par Charles et Robert, le cercle entourait l'équateur du ballon. On ne tarda pas à comprendre l'inconvénient de cette disposition au point de vue de la stabilité de la nacelle et, surtout, au point de vue de la solidité de l'enveloppe, pressée, comme elle l'était, par les suspentes.

Aussi, comme nous l'avons dit plus haut, dès 1785 Blanchard

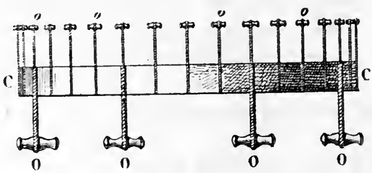

Fig. 17. — Cercle.

montait un ballon dans lequel le *cercle d'arrimage* était placé au-dessous de l'enveloppe, comme dans les ballons actuels, et possédait un diamètre beaucoup plus petit, ce qui ne pouvait qu'augmenter sa solidité.

De nos jours, cette partie de l'aérostat, qui a pour but principal de répartir uniformément le poids de la nacelle et de son contenu sur tout le filet, est souvent un simple tube de laiton creux, d'autres fois un assemblage de cerceaux en hêtre, en noyer ou en chêne, de section circulaire, courbés à chaud, collés, tournés, et enfin vernis. Sa solidité doit être à toute épreuve, puisque c'est lui qui porte la nacelle et les aéronautes et que, tant que le mouvement du ballon peut être considéré comme accéléré, il est soumis, en plus du poids qu'il porte, à l'action de la force ascensionnelle. Aussi, lorsqu'il est en bois, le serre-t-on fortement, extérieurement, avec une longue cordelette solidement nouée. Comme il est très voisin de la nacelle, on a soin de le placer assez au-dessous de l'orifice de l'appendice, pour que le gaz qui s'échappe pendant l'ascension n'incommode pas les aéronautes.

Le cercle (fig. 17) est pourvu d'un certain nombre d'*encoches* dans lesquelles on fait passer des *boucles* faites par épissures. On laisse un bout de 10 à 12 centimètres et on fait une seconde boucle où l'on fixe un *cabillot*. Aux petites encoches et aux *petits cabillots* correspondants *o*,*o*,... sont fixées les suspentes ; aux encoches profondes portant les *gros cabillots* O,O,... correspondent les cordes de nacelle.

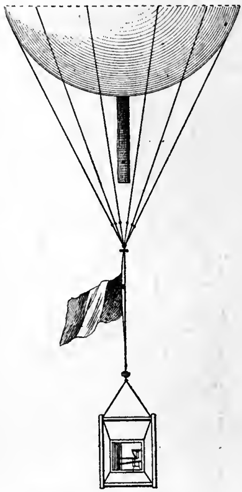

Fig. 18. — Filet et panier d'un ballon-sonde.

En général, pour les ballons de tonnage moyen, un cercle d'arrimage porte 40 encoches, dont 32, les plus petites, correspondent aux 32 suspentes, aux 32 grandes pattes d'oie, et aux 128 fuseaux de filet. Pour les ballons à fort tonnage, ces nombres ne sont plus exacts, l'expérience démontrant que la grandeur d'une maille de filet, à l'équateur, ne doit jamais dépasser 1/3 de mètre. D'ailleurs, aujourd'hui, dans les ballons bien construits, le principe de suspension rigide posé par Dupuy de Lôme, et que l'on exposera plus loin (Chap. VII), est appliqué même aux nacelles de petite dimension.

Dans les *ballons-sondes*, le filet est construit assez sommairement, de façon à avoir un poids minimum ; le cercle devient inutile, et les suspentes s'accrochent à un *nœud* (fig. 18), où l'on amarre une longue corde portant le *panier* qui sert de nacelle, panier dont nous reparlerons plus loin (Chap. III).

e). — Les *nacelles* en usage dans les ballons ordinaires sont des paniers en osier tressés, dont le fond est renforcé par de solides traverses et par des planches minces, et dont le bordage est rendu indéformable par un cadre intérieur en fer creux.

Toutes sont munies de *soutes* dont le dessus sert de siège (fig. 19). Pour plus de solidité, les cordes de la nacelle sont tressées avec l'osier, et passent sous les pieds des voyageurs, c'est-à-dire sous le pont en planches de la nacelle. Seulement, il faut veiller à ce que l'humidité ne les pourrisse pas.

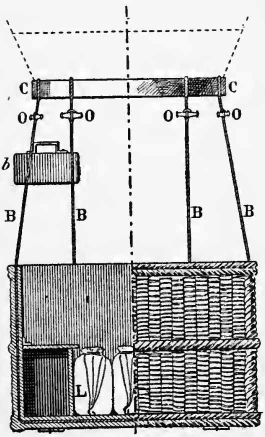

Fig. 19. — Nacelle.

f). — La soupape la plus communément employée encore par les aéronautes est celle de Charles.

En principe, la *soupape de Charles* (fig. 20 et 21) se compose essentiellement de deux *clapets* en bois *a* et *b*, mobiles autour d'une charnière, et qui s'ouvrent de haut en bas. Cette ouverture s'obtient à volonté à l'aide d'une corde C traversant le ballon de part en part, de manière à être à portée de l'aéronaute. Cette corde, au voisinage des clapets, se bifurque en deux cordeaux *p* et *q* attachés à deux pitons plantés au milieu de chacun des clapets. En tirant sur cette corde, on ouvre les clapets; lorsqu'on cesse de tirer, des *ressorts de rappel* puissants *r*, en cuivre ou en caoutchouc, au nombre de deux ou de quatre, agissent en sens inverse de la corde et forcent les clapets à reprendre leur position primitive. Il est nécessaire de luter les clapets, qui sont d'ailleurs soigneusement feutrés, si on veut que la soupape fonctionne bien. Le meilleur lut est la graisse à wagon, qui se soude automatiquement chaque fois que l'on referme les clapets, ou la vaseline.

Malgré cette précaution, il est presque impossible de maintenir les clapets hermétiquement fermés. Même en protégeant la soupape par une sorte de *toit*, comme l'a fait le premier Giffard, il est difficile d'empêcher la pluie ou la neige de pénétrer dans

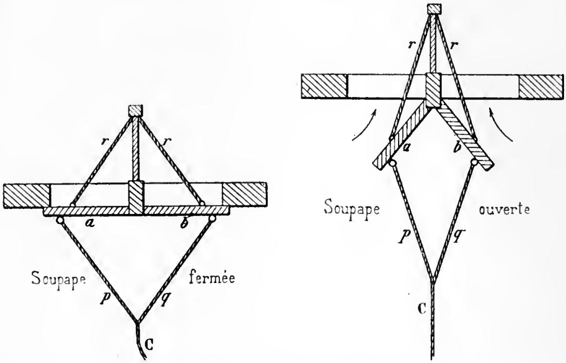

Fig. 20-21. — Soupape de Charles.

les fissures. Aussi emploie-t-on souvent aujourd'hui la *soupape d'Yon*.

Cette soupape (fig. 22 et 23) ne comporte qu'un seul et unique clapet AB, circulaire et d'une seule pièce. Le joint est formé par un rebord qui entre dans une encoche garnie de caoutchouc : ce rebord forme ainsi comme une sorte de *couteau circulaire* qui ne permet pas à des morceaux de glace, en s'interposant entre lui et l'encoche, d'empêcher la fermeture de la soupape. Quatre ressorts de rappel à boudin, en acier, assurent cette fermeture. La tige du clapet, terminée par un écrou, glisse dans un creux et l'ouverture s'obtient par le moyen d'une corde, comme dans les soupapes ordinaires. Yon a d'ailleurs perfectionné cette soupape en faisant horizontaux les ressorts de rappel, ce qui la rend moins encombrante.

La pose de la soupape se fait à peu près comme il suit :

On pratique une ouverture au sommet du ballon, et on y fait entrer le cercle de la soupape. On fixe d'abord l'étoffe avec des *semences* de tapissier, puis on la serre solidement sur le siège de la soupape, avec une bande de cuir ramolli, qu'on fixe avec de petits clous à larges têtes. On cloue ensuite, tout autour et à distance égale les unes des autres, un certain nombre de courroies de cuir à boucles *a*,*a*,... et on serre le tout avec un long cordeau, que l'on tourne une douzaine de fois autour de la soupape. Ces courroies servent de repères pour la pose du filet et l'attache du cordage particulier, appelé *couronne* (cordage figuré avec la soupape d'Yon dans la figure 23), qui termine le filet à sa partie supérieure. Notons, en passant, qu'à cause de l'excès de pression aux environs de la soupape, l'enveloppe est toujours, dans cette partie du ballon, renforcée au moyen d'une collerette d'étoffe double.

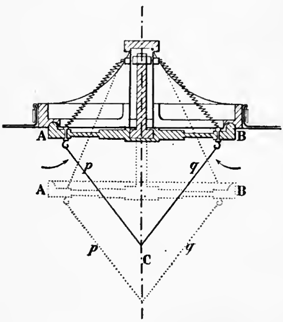

Fig. 22. — Soupape d'Yon.

Quelle que soit la soupape employée, il importe que le poids de la corde ne soit pas assez grand pour ouvrir de lui-même les clapets. Sinon, le ballon peut se vider sans qu'on s'en aperçoive, comme il est arrivé au *Géant*, sous la direction de Nadar, dans sa première ascension (4 oct. 1863) : les voyageurs étaient partis de Paris, pleins d'espoir, se demandant vers quelles contrées inconnues les porterait leur ballon ; ils descendirent piteusement à Meaux.

Il importe aussi que la corde de soupape n'échappe pas de la main de l'aéronaute pendant le trainage et, si la chose arrive, qu'on puisse la retrouver facilement. Il serait bon de la peindre d'une couleur éclatante, en rouge par exemple. Le fameux et terrible traînage du *Géant*, lors de sa seconde ascension, à sa descente dans le Hanovre (18 oct. 1863), eût peut-être été évité, si cette dernière précaution avait été prise.

En général, la corde de la soupape est attachée au cercle. Seulement, il faut avoir soin de lui laisser du jeu, car, *à mesure que le ballon se vide il s'allonge*, de sorte que la distance qui sépare la soupape de l'appendice va en augmentant. Si l'on négligeait cette précaution, la soupape pourrait rester ouverte sans que l'aéronaute

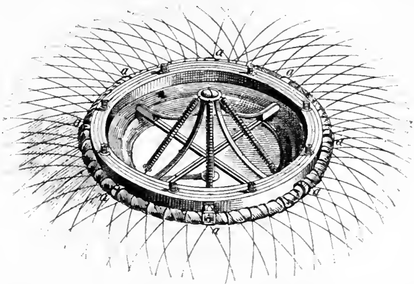

Fig. 23. — Couronne d'un ballon et soupape d'Yon.

s'en doutât. Pareil accident est arrivé à W. de Fonvielle qui, en 1873, faillit périr pour avoir négligé cette précaution élémentaire.

Autant que possible, les soupapes métalliques doivent être rejetées. En effet, ces soupapes peuvent, pendant l'ascension, se charger fortement d'électricité, soit par suite du frottement du filet contre l'étoffe du ballon, soit encore parce que la soupape se met en équilibre électrique avec les couches d'air à haut potentiel que l'aérostat traverse. Au moment de l'atterrissage, une étincelle peut alors éclater entre la soupape et l'aéronaute chargé du dégonflement, et mettre le feu au gaz du ballon. Le mal n'est pas grand si l'hydrogène n'est pas mélangé d'air ; mais, dans le cas contraire, il peut y avoir explosion et mort d'homme, comme cela est arrivé, en 1883, en Allemagne.

Actuellement, les aéronautes militaires se servent de soupapes qui, comme celle de Renard (Chap. XI), ne comportent aucune pièce métallique.

Le poids de la soupape doit être calculé de façon qu'il n'y ait pas déformation de la tête du ballon : autour d'une soupape trop lourde, il se formerait, dans l'étoffe, une rigole où l'eau ne tarderait pas à s'accumuler.

On doit chercher aussi à donner à l'ouverture de la soupape un diamètre tel qu'une fois le ballon retombé à terre, il puisse se vider en 4 ou 5 minutes.

Soit r la valeur que doit avoir le rayon d'ouverture de la soupape pour que le ballon puisse se vider en 4 minutes, soit 240 secondes, v la vitesse d'écoulement du gaz en mètres par secondes, Z la hauteur du ballon, d la densité du gaz aérostatique, g l'accélération de la pesanteur ($g = 9^{m},81$). On a, en vertu d'une loi connue, due à Torricelli,

$$v = \sqrt{2g\mathrm{Z}\,\frac{1-d}{d}}. \tag{24}$$

D'autre part, le volume du gaz écoulé pendant les 240 secondes sera $240\,\pi r^2 v$; mais, à cause de la contraction de la veine fluide et de la diminution de pression qui résulte du dégonflement, il est prudent de diminuer ce volume de 1/4 et, par suite, d'admettre pour le *volume réel* écoulé pendant les 240 secondes, la valeur

$$\mathrm{U} = 180\,\pi r^2 v. \tag{25}$$

D'après la convention faite, il faut que ce volume soit égal au volume du ballon. *Négligeons l'appendice :* il faut alors que

$$180\,\pi r^2 v = \frac{4}{3}\pi \mathrm{R}^3, \tag{a}$$

R étant le rayon du ballon, et, dans ces conditions,

$$v = 2\sqrt{g\mathrm{R}\,\frac{1-d}{d}}. \tag{b}$$

Ces deux équations de condition donnent, en remplaçant g par sa valeur,

$$r = \frac{R}{29} \sqrt[4]{\frac{Rd}{1-d}}$$

à très peu près, formule qui semble indiquer qu'*à mesure que le tonnage augmente, on doit faire croître le rayon de la soupape dans une proportion un peu plus forte que le rayon du ballon.*

Dans le cas de l'*hydrogène*, $d = 0{,}154$ en moyenne, et

$$r = \frac{1}{44} R \sqrt[4]{R} \text{ à peu près.}$$

Dans le cas du *gaz d'éclairage*, $d = 0{,}465$ en moyenne, et

$$r = \frac{1}{29} R \sqrt[4]{R} \text{ à peu près.}$$

Comme

$$\frac{44}{29} = \frac{3}{2} \text{ environ,}$$

on voit que *pour deux ballons de même volume, le rayon de la soupape, suivant que le gaz aérostatique est du gaz d'éclairage ou de l'hydrogène, devrait varier dans le rapport de* 3 *à* 2, *à peu près.*

Dans la pratique, à tort peut-être, on ne se préoccupe pas de ces variations obligées du diamètre de la soupape avec le tonnage d'abord, la nature du gaz aérostatique ensuite. On donne au *diamètre réel* de la soupape une valeur égale au $\frac{1}{20}$ du diamètre du ballon, valeur qui n'est pas exagérée, étant donné que le *diamètre efficace* de l'ouverture d'une soupape est très inférieur à son diamètre réel.

Quelquefois, les ballons sont munis de *soupapes de manœuvres*, plus petites que la soupape ordinaire, qui permettent d'économiser le gaz et qui sont ordinairement placées à l'équateur. D'autres fois, et cette idée est due à Lhoste, on adapte au ballon des *ballonnets-satellites* de 40 à 50 m³ de capacité environ, munis de petites soupapes à l'aide desquelles, sans être forcé de toucher à la grande, on amène la rupture d'équilibre désirée. Soupapes de manœuvre ou ballonnets-satellites sont surtout utiles avec la soupape à clapets ordinaire, dont le lut se brise souvent lorsqu'on l'ouvre, de sorte qu'une fois un premier coup de soupape donné, il est rare que la fermeture soit complètement hermétique.

Enfin, on adapte encore assez souvent au ballon une *corde de déchirure* (corde de miséricorde), à l'aide de laquelle on peut fendre l'étoffe lorsque, par suite d'un accident quelconque, l'orifice du ballon est bouché. Cette corde est employée, dans les *ballons-sondes*, par Hermite et Besançon : ces ballons n'ont pas de soupape supérieure, ou, plutôt, elle est remplacée par un disque d'étoffe vernissée, que la corde détache au moment de l'atterrissage, de sorte que le ballon se vide instantanément et risque moins d'être endommagé.

g). — L'*appendice* ou *manche* doit avoir un *orifice* d'un diamètre tel que le ballon montant avec une vitesse de 4 mètres par seconde (ce qui est considérable), le gaz qui s'en échappe n'ait pas une vitesse supérieure à 2 mètres par seconde, la pression résultante étant, dans ces conditions, très faible.

Un calcul assez compliqué montre que pour atteindre ce but, *il faut que le diamètre de l'orifice inférieur de l'appendice soit environ* 1/20 *de celui du ballon.* C'est à peu près ce qu'il faut, aussi, pour pouvoir, au moment du vernissage et du séchage retourner l'enveloppe par l'orifice supérieur de l'appendice. Si, de plus, on veut que l'appendice forme une véritable soupape automatique, s'ouvrant ou se fermant d'elle-même suivant que le ballon se gonfle ou se contracte, l'expérience montre qu'*il est nécessaire que la longueur de l'appendice soit à peu près le triple de son diamètre.*

En somme, l'appendice présente, en général, l'aspect d'un tube cylindrique en étoffe (fig. 11), légèrement évasé par le haut, dont le volume est environ $\frac{1}{16.000}$ à peine de celui du ballon. Sa construction, son vernissage, sa jonction avec le ballon doivent être effectuées avec le plus grand soin. Le *cercle d'appendice*, destiné à empêcher l'orifice inférieur de s'obstruer, se pose comme la soupape.

Malgré le rôle de soupape que joue l'appendice, beaucoup d'aéronautes, dans les voyages de longue durée où l'on se maintient à une faible hauteur en guide-ropant, munissent leur aérostat, pour se défendre contre les pertes de gaz et, surtout, contre la diffusion de l'air à l'intérieur du ballon, d'une *soupape inférieure*, généralement une sorte de clapet très léger s'ouvrant sous une pression de 2 à 3 centimètres d'eau. Mais le dispositif est délicat et mieux vaut, alors, allonger légèrement l'appendice.

C'est ce que l'on fait dans les *ballons-sondes*, où l'appendice a toujours une longueur assez considérable (fig. 18). On cherche, ainsi, à créer, surtout, un excès de surpression permettant à l'enveloppe de résister aux énormes pressions qu'exerce sur elle l'air extérieur, pendant la montée. Dans ces ballons, en effet, il faut se résigner, à moins que l'on emploie la méthode Kovanko (Chap. III), à sacrifier d'un seul coup la quantité de lest nécessaire pour gagner l'altitude voulue : de là des vitesses, pendant la montée, considérables, et des pressions encore plus considérables, la résistance de l'air croissant proportionnellement au carré de la vitesse. L'allongement de l'appendice a aussi pour effet de diminuer les pertes de gaz qui résultent de l'*aplatissement* du ballon par l'air extérieur.

Quelquefois, dans ces ballons, l'appendice est *rigide*. Alors, pendant la descente, l'air se mélange au gaz aérostatique, et la vitesse de la chute est ainsi fortement ralentie.

h). — Le *lest* est contenu dans des sacs (fig. 19) en toile d'une hauteur de 45 à 50 centimètres à peu près, placés dans la nacelle, quelques-uns au-dehors. On les remplit de sable fin, pour éviter les accidents. Leur poids varie entre 10 et 20 kilogrammes.

Il est évident que le poids de lest à emporter dépend de la hauteur à laquelle on veut arriver, de la durée de l'ascension, des influences accidentelles que subit l'aérostat, etc. Cependant, on peut, à la rigueur, calculer à l'avance la *quantité minimum* nécessaire :

Le poids à sacrifier pour atteindre à une zone de poids spécifique a_1 est donné par la formule

$$l = V(a_0 - a_1)(1 - d), \tag{27}$$

que l'on déduit immédiatement de la formule (8). On peut regarder ce poids comme un *maximum*, car le gaz intérieur reste plus chaud que l'air extérieur, ce qui a pour effet d'augmenter la poussée que subit le ballon.

Quant au poids nécessaire à la descente, on pourrait croire, si l'on s'en rapportait à la formule (11), qu'il peut être insignifiant. Mais, abstraction faite de toute surcharge accidentelle, il faut tenir compte, de l'augmentation de force descensionnelle qui résulte de l'accroissement de température des couches d'air que le ballon traverse en descendant, augmentation qui a pour effet de diminuer la poussée qu'il subit.

Admettons que le *poids minimum* p de lest à projeter pendant la descente soit la différence entre la poussée de l'air dans la zone d'équilibre, à la température t de cette zone, et la poussée qu'éprouverait le ballon si cette zone était à la température T du sol. La poussée de l'air dans cette zone, à la température t, est, en désignant par α le coefficient de dilatation des gaz, par h_1 la pression de la zone d'équilibre,

$$V \times \frac{0{,}0013}{1 + \alpha t} \times \frac{h_1}{760},$$

V étant le volume du ballon après le coup de soupape, volume qu'on peut regarder comme sensiblement égal au volume du ballon avant, *un coup de soupape momentané*, si la soupape est bien construite, *diminuant à peine de* $\frac{1}{1000}$ *la capacité du bal-*

lon ; la poussée qu'éprouverait le ballon si la zone d'équilibre était à la température T, serait

$$V \times \frac{0{,}0013}{1 + \alpha T} \times \frac{h1}{760}.$$

La différence des deux poussées sera alors, à très peu près, en remarquant que $\frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha T} = \alpha\ (T - t)$ environ et que $\alpha = 0{,}004$, donnée par la formule

$$p = V \times 0{,}0013 \times 0{,}004\ (T - t)\ \frac{h_1}{760}.$$

Remplaçons T — t par sa valeur tirée de la formule (4) : cette différence et, par suite, le poids minimum de lest nécessaire à la descente sera

$$p = 55\ V \times 0{,}0013 \times 0{,}004 \times \frac{h_1}{760} \left(1 - \frac{h_1}{760}\right), \qquad (28)$$

expression qui montre que *le poids de lest qu'il faut conserver pour la descente est indépendant du gaz aérostatique et proportionnel au volume du ballon.*

Considérons, par exemple, un aérostat rempli d'hydrogène, de 8 mètres de rayon et, par suite, d'un tonnage de 2.140 mètres cubes. Supposons que le coup de soupape donné ne diminue que de $\frac{1}{1000}$ le volume du ballon.

Pour s'élever à 1.000 mètres, hauteur pour laquelle $h_1 = 670$ mm. et $a_1 = 0{,}00106$, il faudra projeter, d'après la formule (27), 253 kilogrammes de lest à peu près et, pour descendre de cette hauteur, il en faudra conserver, d'après la formule (28), au moins 60 kilogrammes, chiffre qu'on peut, sans inconvénient, majorer de moitié, soit, *en tout*, une provision minimum de 343 kilogrammes. Mais si l'on veut atteindre 3.000 mètres, hauteur pour laquelle $h_1 = 522$ mm. et $a_1 = 0{,}000\ 824$, il faudra projeter 680 kilogrammes de lest à peu près et, pour descendre, il faudra en conserver 112 kilogrammes, soit, *en tout*, une provision minimum de 850 kilogrammes, si l'on majore de moitié le chiffre 112. Dans le premier cas, le poids de l'enveloppe, de la nacelle et des engins d'arrêt étant au moins de 660 kilogrammes, la force ascensionnelle de l'aérostat de 2.140 kilogrammes, il restera disponible une force portative de 1.000 kilogrammes environ ; dans le second cas, la force portative sera à peine de 630 kilogrammes.

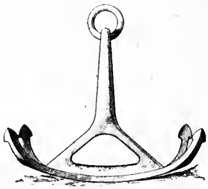

Fig. 24. — Ancre d'Yon.

k). — Parmi les engins d'arrêt, un des meilleurs, celui dont le jeu est le plus sûr, est certainement le *guide-rope*, grosse corde de 70 à 100, 150 et même 200 mètres de long, dont les détails de construction varient au gré des aéronautes et dont l'emploi a été expliqué dans le chapitre précédent.

Grâce au guide-rope, on peut, s'il n'y a pas de vent et si le lieu de l'atterrissage est bien choisi, mettre pied à terre sans secousses appréciables. Mais s'il y a du vent, le guide-rope peut ne pas suffire : l'*ancre*, alors, devient nécessaire.

L'*ancre ordinaire*, que tout le monde connaît, est encore employée par un grand nombre d'aéronautes : elle a pour avantage d'être d'une solidité à toute épreuve. Quelques aéronautes, cependant, préfèrent l'*ancre d'Yon*, à quatre pattes (fig. 24) formée de deux ancres ordinaires , dont les pattes d'arrêt sont, à chaque instant, forcément et normalement au travail. D'autres emploient l'*ancre d'Hervé* à 8 pattes.

Le poids de l'ancre, quelle qu'elle soit, doit toujours, d'ailleurs, être en rapport avec la taille de l'aérostat. On admet empiriquement que son poids doit être les 3 p. 100 de la force ascensionnelle, soit, par exemple, 30 kilogrammes pour un ballon de 1.000 mètres cubes gonflé à l'hydrogène.

Un engin plus puissant que l'ancre d'Yon, quoiqu'un peu délicat, est l'*ancre-herse* de Renard. Cette ancre se compose d'une série de cadres en fer, se reployant les uns sur les autres au repos, et munis sur leurs deux faces de dents en acier qui mordent dans le sol. Elle prend instantanément dans tous les terrains, et arrête aussitôt le ballon, si lancé qu'il soit.

La corde d'ancre, le guide-rope, sont toujours attachés au cercle, et pendent en rouleaux contre les parois extérieures de la nacelle. Ordinairement, on fixe la corde d'ancre et celle du guide-rope en croix sur le cercle, quelques instants avant le départ de l'aérostat, à l'aide de courroies que l'on coupe au moment voulu. On intercale souvent sur l'attache de la corde d'ancre, la *sangle de caoutchouc* de Giffard A (fig. 25), afin que l'élasticité de l'attache amoindrisse le choc brusque de l'arrêt, au moment où l'ancre vient en prise.

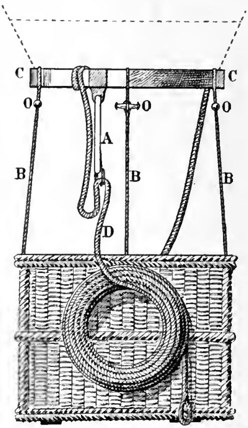

Fig. 25. — Corde d'ancre avec sangle de caoutchouc de Griffard.

La corde d'ancre doit avoir un diamètre qui lui permette de résister au moment de l'atterrissage, à un vent soufflant en tempête, c'est-à-dire animé d'une vitesse d'au moins 20 mètres par seconde, vent dont la force de traction, sur un ballon de rayon R, est donnée (Chap. VIII) par la formule

$$f = 89 \text{ R}^2,$$

R étant exprimé en mètres, f en kilogrammes.

Par exemple, étant donné un ballon de 8 mètres de rayon, il faudra, pour résister à la traction qu'exerce un vent de 20 mètres sur ce ballon au moment de l'atterrissage, traction qui est de 5.696 kilogrammes, donner à la corde d'ancre, supposée en chanvre, un diamètre que la Mécanique indique devoir être de

$32^{mm},3$ à peu près. Ce diamètre correspond à une section de $8^{cm^2},19$ et à un poids de $0^{kg}, 819$ par mètre de longueur, soit, pour une longueur de 30 mètres, une corde d'ancre d'un poids de $24^{kg},5$ à peu près.

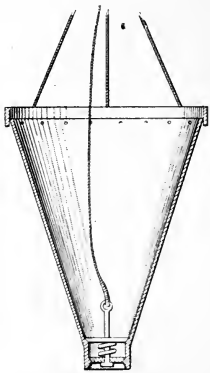

Fig. 26. — Cône-ancre.

Pour les ascensions maritimes, on se sert ordinairement du *cône-ancre* de Sivel, à clapet délesteur, que l'on fixe à l'extrémité du guide-rope (fig. 26). C'est un vaste sac conique, en toile goudronnée, d'une capacité en rapport avec le tonnage du ballon. A la mer, ce cône se remplit d'eau et permet de maintenir l'aérostat au-dessus des flots, soit pour planer, soit pour attendre du secours. Si l'on veut reprendre le voyage interrompu, on tire sur la corde qui commande le clapet : le cône se vide et le ballon reprend son mouvement ascensionnel.

La figure 11 donne une vue générale de l'ensemble du gréement d'un Aérostat, avec ses proportions exactes.

CHAPITRE III

GONFLEMENT ET LANCEMENT D'UN BALLON
INSTRUMENTS D'OBSERVATION

I. — A priori, tout gaz moins dense que l'air peut servir de gaz aérostatique. Pratiquement, il n'en est pas ainsi.

Un gaz éminemment toxique, comme l'*oxyde de carbone*, ou caustique, comme le *gaz ammoniac*, ou même trop soluble dans l'eau, comme ce même gaz ammoniac, doit être rejeté.

De plus, comme un gaz *lourd*, c'est-à-dire dont la densité est voisine de celle de l'air, rend un aérostat difficilement maniable (Chap. I), on voit qu'un gaz tel que l'*azote*, par exemple, dont la densité est 0,97, doit être rejeté comme gaz aérostatique, ce qui est à regretter, car l'azote, qu'on pourrait obtenir actuellement assez bon marché, serait précieux par suite de son incombustibilité et de son innocuité. On pourrait, il est vrai, proposer de diminuer la densité de l'azote en le chauffant; mais ce serait retomber dans les dangers d'incendie qui ont fait renoncer aux montgolfières, et la densité de l'azote diffère si peu de celle de l'air, qu'il serait presque aussi avantageux, alors, de revenir à l'air chaud. La *vapeur d'eau* serait, en tant que gaz, préférable à l'azote, sa densité étant, lorsqu'elle est saturante, de 0,645 à peu près, et E. Aimé pense, comme on le verra plus loin, qu'il serait peut-être bon de recourir, partiellement au moins, à son emploi ; mais il y a toujours cette question du danger d'incendie.

L'*hélium*, nouvellement découvert, dont la densité est à peu près 0,14 et qui n'est pas combustible, est peut-être le gaz aérostatique de l'avenir, mais, actuellement, on ignore comment s'en procurer de grandes quantités.

Les deux seuls gaz aérostatiques sont donc : 1° le *gaz d'éclairage*, que les aéronautes appellent tout simplement le *gaz*, dont la densité est, en moyenne 0,46 ; 2° l'*hydrogène*, tel que le produit l'industrie, qu'ils appellent *hydrogène pur*, dont la densité est, en moyenne, 0,154.

Le gaz d'éclairage est fourni par les usines à gaz. Nous ne parlerons donc pas de sa fabrication. Nous nous bornerons à rappeler : 1° que si le *gaz riche*, c'est-à-dire celui qui est riche en hydro-carbures, est excellent pour l'éclairage, il est mauvais pour le gonflement des ballons, tandis que le *gaz pauvre*, mauvais pour l'éclairage, est le meilleur au point de vue aérostatique, étant plus léger et moins susceptible d'éprouver des condensations partielles, dans les régions froides de l'atmosphère, que le gaz riche; 2° que la densité du gaz d'éclairage est très variable, étant comprise (au moins à Paris) entre 0,370 et 0,523; 3° enfin, que le gaz d'éclairage, même lavé et purifié, contient toujours près de 7 p. 100 d'oxyde de carbone et, par suite, est délétère.

Pour l'hydrogène, deux modes de production sont employés : la *voie humide*, et la *voie sèche*.

Dans le premier mode, le gaz est retiré de l'acide sulfurique H^2SO^4, additionné d'eau, que l'on traite par une quantité convenable de zinc ou de morceaux de ferraille. Avec le zinc, la réaction est représentée par l'équation chimique

$$H^2\,SO^4 + Zn = 2H + Zn\,SO^4. \tag{29}$$

Avec le fer, elle est représentée par l'équation

$$H^2\,SO^4 + Fe = 2H + Fe\,SO^4. \tag{30}$$

Avec le zinc, le résidu est du sulfate de zinc $ZnSO^4$; avec le fer, c'est du sulfate de fer $FeSO^4$. Dans les deux cas, le résidu a peu de valeur, à cause des frais que nécessiterait l'installation d'appareils de lessivage propres à purifier l'un ou l'autre de ces sels et à les faire cristalliser.

Il semble qu'on pourrait remplacer sans inconvénient l'acide sulfurique par l'acide chlorhydrique HCl. Les équations précédentes deviendraient alors :

$$\left.\begin{array}{l} 2HCl + Zn = 2H + ZnCl^2. \\ 2HCl + Fe = 2H + Fe\,Cl^2. \end{array}\right\} \qquad (31)$$

A la seule inspection de ces formules, l'acide chlorhydrique paraîtrait même devoir être plus avantageux que l'acide sulfurique, car pour un même poids de zinc ou de fer il suffirait, pour obtenir 2 parties d'hydrogène, de 73 parties d'acide chlorhydrique, au lieu de 98 parties d'acide sulfurique. Mais l'acide sulfurique est fourni par l'industrie presque à son maximum de concentration, tandis que l'acide chlorhydrique du commerce n'est qu'une simple dissolution dans l'eau. Il en résulte que le poids d'acide chlorhydrique commercial capable de fournir un poids donné d'hydrogène est, en réalité, beaucoup plus considérable que celui de l'acide sulfurique. D'ailleurs, les vapeurs d'acide chlorhydrique qui s'échappent toujours des bonbonnes dans lesquelles on le transporte sont gênantes et dangereuses ; il est difficile de les éliminer complètement dans la préparation du gaz, et, alors, elles corrodent l'enveloppe de l'aérostat. Cet acide doit donc être rejeté.

Cherchons maintenant quel est le plus avantageux du zinc ou du fer. Les équations précédentes montrent que pour obtenir 2 parties d'hydrogène il faut 65 parties de zinc et 56 parties de fer ; de plus, à poids égal, le zinc est plus cher que le fer ; enfin le zinc a le défaut de donner naissance, dans la préparation de l'hydrogène, à de l'hydrogène arsénié AsH^3, gaz des plus toxiques. L'avantage que présente le sulfate de zinc d'être plus soluble que le sulfate de fer n'est évidemment pas compensé par tous ces inconvénients. Le zinc doit donc être rejeté et, seuls, dans le procédé par voie humide, doivent être employés l'acide sulfurique et le fer.

Le procédé par voie sèche repose ordinairement sur la décomposition de la vapeur d'eau H^2O par le fer chauffé au rouge. Cette réaction est représentée par l'équation :

$$3Fe + 4H^2O = 8H + Fe^3O^4. \qquad (32)$$

Le fer se transformant, sous l'action de la vapeur d'eau, en oxyde magnétique de fer Fe^3O^4, il résulte du simple examen de cette équation que, pour un même poids de fer, ce procédé fournit un poids plus considérable d'hydrogène que le procédé par voie humide; de plus, il a l'avantage de ne pas exiger le transport et l'usage de liquides corrosifs. Mais de nombreux essais ont montré qu'en revanche l'installation, sur place, de fours énormes, d'une manœuvre délicate, se détruisant rapidement, le rend très coûteux et que, de plus, son dégagement est loin d'être rapide et régulier, comme par la voie humide. Aussi, quoique ce procédé ait été employé par Coutelle et Conté, pendant les guerres de la Révolution, pour gonfler leur ballon militaire *l'Entreprenant*, il a été abandonné.

Pour la même raison, on a mis de côté aussi le procédé ingénieux, dû à Giffard, dans lequel on traitait directement l'oxyde de fer (oxyde ordinaire Fe^2O^3 ou oxyde magnétique Fe^3O^4) porté au rouge, par un courant d'oxyde de carbone CO. L'oxyde était réduit, comme l'indiquent les équations

$$Fe^2O^3 + 3CO = 2Fe + 3CO^2,$$
$$Fe^3O^4 + 4CO = 3Fe + 4CO^2.$$

En faisant alors passer un courant de vapeur d'eau sur le fer ainsi obtenu, on avait de l'hydrogène :

$$3Fe + 4H^2O = 8H + Fe^3O^4.$$

Le fer, il est vrai, s'oxydait de nouveau, se transformant en oxyde magnétique Fe^3O^4. Mais un courant d'oxyde de carbone le faisait revenir à l'état métallique, et ainsi de suite. En somme, la même quantité de fer, ou plutôt de minerai, servait indéfiniment ;

il n'y avait à dépenser que le coke nécessaire à la fabrication de l'oxyde de carbone et le charbon employé à la vaporisation de l'eau.

On a obtenu, cependant, d'assez bons résultats en cherchant à obtenir l'hydrogène par la calcination d'un mélange de zinc et de chaux $Ca(OH)^2$. La réaction est représentée par l'équation

$$Ca\,(OH)^2 + Zn = 2H + CaO^2Zn,$$

qui indique que le résidu solide de l'opération est du zincate de calcium CaO^2Zn.

Renard a même montré qu'il y a avantage, dans certains cas, à remplacer la chaux par une dissolution d'un *salin* particulier (carbonate de soude Na^2CO^3 impur), car alors la réaction a lieu à la température ordinaire, le résidu solide de l'opération étant du zincate de sodium Na^2O^2Zn.

Mentionnons aussi l'emploi du *gaz d'eau* comme gaz aérostatique. A priori, ce gaz, mélange d'hydrogène, d'oxyde de carbone, de gaz carbonique et d'azote devrait être rejeté, malgré sa légèreté, à cause des propriétés toxiques de l'oxyde de carbone, Mais Longsden a prouvé qu'en ajoutant au coke qui sert à le préparer un sel de potasse ou de soude, l'oxyde de carbone disparaît presque complètement : seulement, le gaz s'alourdit.

Quoi qu'il en soit, le procédé de fabrication de l'hydrogène par le fer et l'acide sulfurique, préconisé par Charles, est encore le meilleur. C'est, du moins, le plus employé.

Le dispositif que le célèbre physicien inventa pour sa première ascension et que la figure 27 fait facilement comprendre, n'est plus en usage, malgré les perfectionnements que le temps y avait apportés. Cette méthode de fabrication, appelée *méthode des tonneaux*, présentait un grave inconvénient : le dégagement de gaz qui avait lieu dans chacun des tonneaux ou récipients où se trouvait le mélange de ferrailles et d'acide sulfurique, d'abord assez rapide, allait en effet en se ralentissant à mesure que le sulfate de fer prenait naissance avec plus d'abondance, le métal s'encroûtait, en quelque sorte, du sel formé. Après le dégagement du gaz, une cristallisation s'amoncelait au fond des récipients que, souvent, il fallait briser pour en retirer les résidus.

Lorsque, en 1875, Renard eut donné le principe des *appareils à circulation*, tous les aéronautes sérieux, Giffard, Yon, G. Tissandier, etc., s'enpressèrent de l'adopter dans la construction de

Fig. 27. — Appareil des tonneaux.

leurs appareils à hydrogène. Voici en quoi consiste ce principe :

Le *générateur* (ou *bouilleur*) dans lequel se produit l'hydrogène est divisé en deux parties superposées, par une plaque horizontale garnie de petits trous. Un gueulard déverse la tournure de fer, qui remplit la partie supérieure du générateur, tandis que l'acide sulfurique étendu d'eau, venant d'un réservoir placé à une assez grande hauteur, arrive au-dessous de la plaque et, grâce à sa pression, pénètre à travers les trous, dans la tournure. Le sulfate de fer formé, entraîné de bas en haut avec le liquide, s'écoule d'une manière permanente, et la tournure n'est pas exposée ainsi à se recouvrir d'une croûte de sel. Il n'y a plus qu'à faire passer le gaz à travers un *laveur* et un *dessiccateur* convenables, pour l'obtenir aussi pur et aussi sec que possible. On arrive ainsi, aujourd'hui, à construire des appareils donnant plus de 300 mètres cubes de gaz à l'heure.

La figure 28 permet de se faire une idée du *générateur de* *campagne Yon*, construit sur le principe des appareils à circulation, et qui ne diffère du *générateur fixe* du même ingénieur qu'en ce qu'il est porté sur un chariot à quatre roues :

Ce générateur se compose essentiellement de deux *bouilleurs* A, en tôle garnie de plomb, communiquant entre eux à la partie

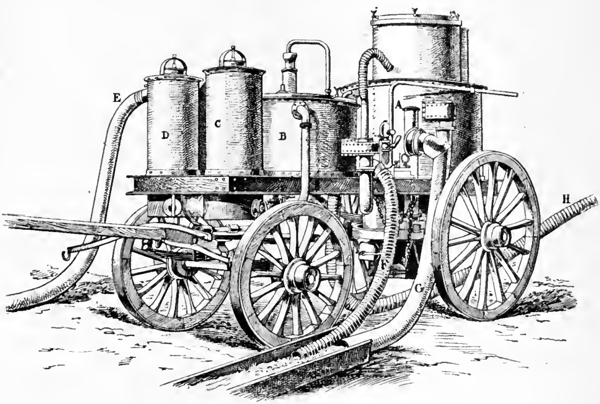

Fig. 28. — Générateur de campagne Yon.

inférieure, et surmontés chacun d'un gueulard destiné à recevoir la tournure de fer ; le tout est fermé au moyen d'une fermeture-hydraulique à boulons. L'eau et l'acide sulfurique nécessaires à la réaction, amenés par le tuyau H, sont distribués automatiquement, dans les proportions convenables, par des pompes actionnées au moyen d'un petit moteur spécial, qui reçoit sa vapeur par un tube particulier en caoutchouc. La dissolution de sulfate de fer, résidu de la réaction, s'écoule constamment au dehors par un tuyau G adapté à un siphon de déversement.

A la sortie des bouilleurs, le gaz passe dans le *laveur* B, où il barbote dans une eau sans cesse renouvelée par une pompe spéciale montée sur la bielle du moteur ; cette eau s'écoule constamment par le tuyau F, adapté comme le tuyau G. De là, le gaz arrivait primitivement dans deux *sécheurs* C et D, contenant de la soude caustique et du chlorure de calcium : le tuyau mobile E, en tissu verni, le conduisait alors au ballon. Aujourd'hui, on supprime souvent les sécheurs, l'expérience ayant montré que le gaz n'est pas très alourdi par la présence d'un peu de vapeur d'eau : le tuyau mobile E est alors adapté directement au laveur.

Il est impossible, même dans une revue aussi rapide que celle-ci des procédés de fabrication industriels de l'hydrogène, de passer sous silence les efforts qui ont été faits pour obtenir de l'hydrogène par *électrolyse de l'eau*. Renard est évidemment un de ceux qui ont étudié le mieux cette question.

L'appareil que propose l'éminent aéronaute serait composé essentiellement d'une série de grands *voltamètres* en fer, remplis d'eau distillée, alcalinisée avec de la soude caustique NaOH dans la proportion de 15 p. 100, et dans lesquels on lancerait le courant d'une dynamo mise en mouvement par un moteur quelconque.

Le courant, en traversant l'eau alcalinisée, décompose la soude caustique en sodium, qui tend à se former sur l'électrode négative (cathode), et en eau oxygénée H^2O^2, qui tend à se former sur l'électrode positive (anode) :

$$2NaOH = 2Na + H^2O^2.$$

Mais l'eau oxygénée H^2O^2 se décompose spontanément en eau et oxygène :

$$H^2O^2 = H^2O + O,$$

tandis que le sodium, réagissant sur l'eau du voltamètre, la soude caustique se reforme, en même temps qu'il y a dégagement d'hydrogène :

$$2Na + 2H^2O = 2NaOH + 2H.$$

Il y a donc, en somme, décomposition de l'eau du voltamètre, dégagement de gaz oxygène le long de l'anode, de gaz hydrogène le long de la cathode, et régénération continue de la soude caustique :

$$H^2O = 2H + O. \tag{33}$$

Chaque voltamètre (fig. 29) consiste essentiellement en un grand cylindre AA de $3^m,40$ de hauteur, à peu près, et de 30 centimètres de diamètre, à l'intérieur duquel se trouve un second cylindre en fer BB, de $3^m,29$ de haut à peu près et d'environ 17 centimètres de diamètre, percé d'un grand nombre de petits trous qui permettent l'ascension des gaz à l'intérieur du cylindre. L'eau alcalinisée remplit le voltamètre jusqu'à une hauteur de $2^m,50$. Tandis que le cylindre extérieur, mis en communication avec le pôle négatif de la dynamo, sert de cathode, le cylindre extérieur, en communication avec le pôle positif, sert d'anode. L'appareil est hermétiquement clos à sa partie supérieure, les deux électrodes étant, naturellement, isolées l'une de l'autre par une lame de caoutchouc. Au-dessus du niveau du liquide, le cylindre intérieur est continu et forme canal pour l'oxygène. Le voltamètre est muni à sa partie inférieure d'un robinet R dont l'ajutage le met en communication avec un réservoir surélevé, qui contient la solution alcaline.

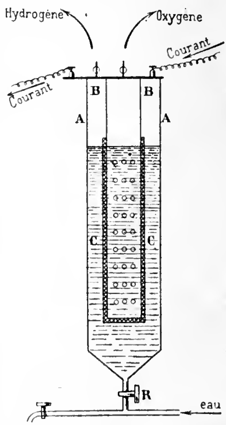

Fig. 29.

On peut se demander comment les deux gaz, oxygène et hydrogène, ne se mélangent pas : rien de plus simple que le moyen employé pour éviter ce mélange. Il a suffi d'enfiler l'électrode intérieure dans un sac en toile d'amiante CC, fermé par le bas, arrivant jusqu'au niveau de l'eau, et qui est fixé, à sa partie supérieure, à un anneau de caoutchouc. La toile d'amiante étant imperméable aux gaz, et cependant opposant une résistance relativement minime au passage du courant électrique, l'oxygène mis en liberté le long de l'électrode positive ne peut pas se mélanger à l'hydrogène et, traversant les petits trous percés dans cette électrode, monte à son intérieur jusqu'à la partie qui forme canal, l'hydrogène remplissant la partie annulaire.

Il importe de remarquer que l'amiante ne sépare complètement les deux gaz qu'autant qu'ils conservent à peu près la même pression. Aussi est-il nécessaire d'interposer pour chaque gaz, entre le voltamètre et la canalisation, un *compensateur* pouvant ramener les niveaux de l'eau à l'égalité dans les deux compartiments du voltamètre. Ce compensateur se compose de deux vases communiquant à leur partie inférieure par un large tube ; les gaz arrivent dans chaque vase par un tuyau débouchant au-dessus du niveau de l'eau. Vient-il à se produire un arrêt momentané dans l'une des conduites, l'eau se dénivelle dans le compensateur, mais la pression reste constante à l'orifice des tubes.

Il est évident que si le prix de la force motrice est à peu près nul, que si, par exemple, on utilise, pour actionner la dynamo, une chute d'eau, l'hydrogène ainsi obtenu peut revenir à bon marché. Cependant, même en employant un moteur à vapeur, Renard croit ne pouvoir compter que sur 0 fr. 50 pour le prix d'un mètre cube de gaz. Malheureusement le dégagement du gaz est excessivement lent : le grand modèle de voltamètre industriel construit par Renard, marchant sous un courant de 365 ampères et une différence de potentiel de $2^{\text{volts}},7$, ne donne que 158 litres d'hydrogène par heure, soit $3^{\text{m}^3},79$ de gaz en 24 heures. C'est à peine si les puissantes machines électriques de Neuhausen, en Suisse, qu'actionnent les rapides du Rhin, et qui fournissent un courant de 1.500 ampères sous une différence de potentiel de 30 volts. produiraient, en lançant un courant dans 10 voltamètres Renard placés en série, 150 mètres cubes d'hydrogène en 24 heures.

En revanche, la pureté du gaz obtenu, dont la densité est d'à peu près $\frac{1}{13}$ (celui de l'*hydrogène chimiquement pur* est $\frac{1}{14,4}$) et dont, par suite, la force ascensionnelle est de 1.100 grammes par mètre cube (celui de l'hydrogène chimiquement pur étant de 1.117 grammes à peu près), compense largement le défaut d'un trop lent dégagement. Aussi, en Allemagne, le procédé Renard, plus ou moins modifié, est-il employé couramment.

II. — Le gaz obtenu, le ballon construit, il n'y a plus qu'à procéder à l'opération du gonflement, opération qui se compose de deux parties : *le gonflement proprement dit* et *l'appareillage.*

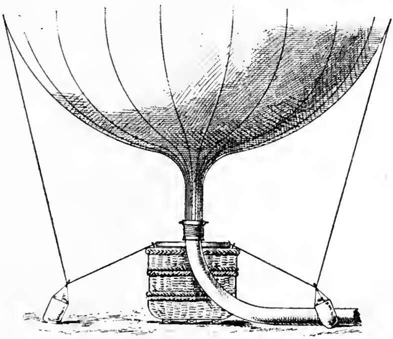

Fig. 30. — Ballon sur ses amarres.

Autrefois, on suspendait l'enveloppe entre deux mâts. Actuellement, on se contente d'étendre simplement l'enveloppe sur le sol et on la remplit de gaz suivant la *méthode en épervier*, la plus logique et la plus usitée.

On étale le ballon sur une bâche, sa soupape au centre, et l'équateur au cercle. On dispose ensuite le filet, dont on égalise les mailles, et on engage le *tuyau de gonflement*, formé ordinairement de toile vernissée, dans la manche de l'appendice, en ayant soin d'attacher solidement la manche à ce tuyau. Si, en effet, on laissait des jours, le gaz produirait des aspirations et injecterait de l'air dans l'intérieur du ballon, qui pourrait perdre ainsi une quantité notable de sa force ascensionnelle. L'assemblage étant consolidé à l'aide de ligatures en toile ou de ficelles, on laisse arriver le gaz dans le ballon, qui se soulève peu à peu, sa soupape au centre. On accroche à la circonférence du filet, de façon à le tendre obliquement, des sacs de lest, de 15 à 25 kilogrammes, qu'on descend à mesure que le gaz tend les parois de l'enveloppe et communique à l'appareil une plus grande force ascensionnelle. On conçoit maintenant pourquoi, au-dessous de l'équateur, le filet doit tomber presque verticalement, puisque c'est à ses mailles que sont attachés les sacs qui maintiennent l'aérostat contre le vent, et que ces sacs ont évidemment pour effet de le tendre suivant la verticale, à partir de l'équateur.

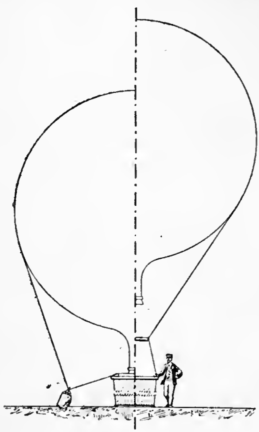

Fig. 31.

Qu'on procède suivant la méthode que nous venons de décrire ou suivant la *méthode en baleine*, sur laquelle nous n'insisterons pas, il faut que l'étoffe puisse toujours se dilater librement : sans cela, toute la pression du gaz portant sur la partie supérieure de la sphère, celle-ci pourrait crever.

Quand le *ballon est sur ses amarres* (fig. 30), c'est-à-dire quand le gonflement tire à sa fin et que les sacs de lest se trouvent aux dernières mailles du filet, à l'endroit où les cordelles de suspension s'attachent aux pattes d'oie, alors a lieu l'*appareillage*.

On fixe le cercle au filet, à l'aide des cabillots et des boucles, puis l'on attache la nacelle par le même système. Cette opération accomplie, on *cravate* le ballon, c'est-à-dire qu'on ferme la manche avec un nœud coulant, afin d'empêcher la sortie du gaz et la rentrée de l'air, phénomènes qui se produisent fréquemment lorsque le ballon s'agite sous le souffle du vent. Les sacs de lest sont alors décrochés des mailles du filet et placés, les crochets simplement à cheval, sur les cordes de suspension. Par sa puissance ascensionnelle, le ballon s'élève, les sacs glissent en avançant et arrivent près du cercle. Les aides les enlèvent, les entassent dans la nacelle, et l'aérostat dégagé se redresse entièrement comme le montre la figure 31, empruntée, ainsi qu'un grand nombre des détails qui précèdent, au *Traité d'Aérostation* de Graffigny.

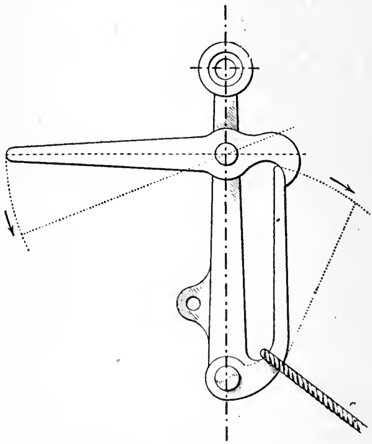

Fig. 32. — Appareil Cassé.

III. — Le gonflement achevé, on passe à l'*équilibrage* ou *pesage*.

A cet effet, les passagers et l'aéronaute conducteur prennent place dans la nacelle ; on arrime au cercle les engins d'arrêt ; on accroche les instruments aux cordelles de la nacelle, et les bagages sont attachés aux cordages. L'aéronaute monte sur le cercle, détache le tuyau de gonflement et examine minutieusement si tout va bien. On débarrasse alors le ballon du nombre de sacs de lest qui représente le poids des voyageurs à enlever et, enfin, les aides l'abandonnent à lui-même.

Comme en général, il n'a pas encore la force de s'élever, il faut le débarrasser encore d'autant de sacs qu'il est nécessaire, jusqu'à ce qu'on le sente disposé à s'envoler. Au commandement de l'aéronaute, on lâche toutes les amarres, en se servant souvent, pour plus de précision dans la manœuvre, d'un appareil à déclenchement instantané, tel que l'*avpareil Cassé* (fig. 32). L'aéronaute sacrifie un ou plusieurs sacs de lest, et le ballon prend définitivement son vol.

Mais, avant de crier « *lâchez tout* », l'aéronaute doit s'assurer que le terrain est dégagé sous le ventre du ballon, et qu'il a tout le temps nécessaire, avec la force ascensionnelle dont il dispose, pour s'élever au-dessus des maisons, des édifices, des arbres vers lesquels le vent le pousse. Il faut, pour cela, se rappeler que la trajectoire du ballon, par suite de l'action du vent, est non pas une verticale, mais une courbe, et savoir évaluer approximativement la quantité de lest qu'il est nécessaire de projeter au moment du départ, pour éviter un obstacle de hauteur donnée, placé à une distance donnée.

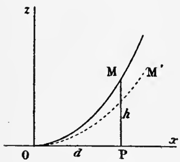

Fig. 33.

La courbe réelle, que décrit le ballon au moment où il prend son essor, est trop complexe pour être étudiée ici. Mais si le ballon s'élève avec une assez grande lenteur pour qu'on puisse négliger la résistance que l'air lui oppose, il est facile de voir que cette courbe est une parabole telle que OM (fig. 33), ayant pour axe la verticale Oz menée par son point de départ. Cette parabole a pour équation :

$$z = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{v^2} x^2, \tag{34}$$

v représentant la vitesse du vent, γ l'accélération du mouvement que prend le ballon au moment où il quitte terre, accélération qu'on peut regarder comme à peu près constante, pendant les premiers instants de l'ascension, même si le ballon est plein, l'axe des z correspondant d'ailleurs aux hauteurs, tandis que celui des x correspond à la route du ballon projetée sur le sol.

Soit alors h la hauteur MP de l'obstacle à franchir, d sa distance OP au ballon. Pour qu'il n'y ait pas rencontre, il faut que pour

$$x = d,$$

on ait, *au moins*,

$$z = h,$$

ce qui donne la condition

$$\gamma = \frac{2h}{d^2} v^2. \tag{a}$$

Mais si P est le poids total du ballon à l'équilibrage (gaz compris), λ_0 la rupture d'équilibre, g l'accélération due à la pesanteur, on a en vertu du *principe de la proportionnalité des forces aux accélérations*, la proportion

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{\lambda_0}{P - \lambda_0},$$

qui donne

$$\gamma = g \frac{\lambda_0}{P - \lambda_0}. \tag{35}$$

La condition (a) devient alors

$$\lambda_0 = \frac{2hv^2P}{gd^2 + 2hv^2}, \tag{36}$$

expression qui montre que λ_0 augmente avec v, h et P et diminue avec d : *le poids minimum de lest à sacrifier au moment du départ pour éviter un obstacle donné est* donc *d'autant plus considérable que le vent est plus violent, l'obstacle plus élevé et le ballon plus volumineux, ce poids diminuant quand la distance de l'obstacle augmente*, toutes choses évidentes à priori.

Sans attacher une importance exagérée à la formule (36), il est certain que la valeur qu'elle donne pour le poids de lest à sacrifier étant un *minimum* (car la résistance de l'air au mouvement ascensionnel du ballon a certainement pour effet de diminuer les ordonnées de la parabole OM, qui est remplacée par une courbe telle que OM'), elle peut rendre quelques services.

Ainsi, supposons qu'un ballon militaire normal de 540 mètres cubes, plein d'hydrogène, pesant, à très peu près, 540 kilogrammes au moment de l'équilibrage, se trouve à 100 mètres d'un obstacle de 25 mètres de hauteur, et admettons que la vitesse du vent soit de 5 mètres à la seconde. Cette formule donne, en remarquant que $g = 9^{m},81$,

$$\lambda_0 = \frac{2 \times 25 \times 25 \times 540}{9{,}81 \times 10\,000 + 2 \times 25 \times 25} = 6^{kg},75,$$

pour le poids minimum de lest à projeter au moment du départ. Si l'obstacle était seulement à 50 mètres, ce poids minimum serait

$$\lambda_0 = 20^{kg},2.$$

Dans la pratique ces calculs ne sont pas, d'ordinaire, possibles, à cause de la difficulté d'évaluer exactement la vitesse du vent qui, bien souvent, souffle en rafales. Le plus sûr, si l'on est trop près d'un obstacle, est de s'en éloigner le plus possible, ce qui est facile, le ballon ne pesant, pour ainsi dire, rien au moment de l'équilibrage. Si le vent est par trop violent, l'aéronaute, tenant le double d'un filin passé par-dessus le cercle et tenu de terre par plusieurs personnes, laisse le ballon s'élever captif, jusqu'à ce qu'il ait franchi l'écueil qui s'oppose à son ascension.

On prend des précautions analogues dans le lancement des *ballons-sondes*. Au point de réunion des suspentes se trouvent fixées : d'abord une cosse dans laquelle coulisse le *câble de manœuvre* ; puis deux cordes, l'une légère, à l'extrémité de laquelle sont suspendus les appareils, l'autre solide, que l'on attache à un plateau chargé de sacs de lest, lorsque, par le jeu du câble de manœuvre, le ballon est monté à la hauteur voulue. A ce moment, on tire le câble par une de ses extrémités, puis, lorsqu'il est tombé à terre, on tranche d'un coup de couteau le cordage de retenue.

Il est prudent de diminuer la vitesse vertigineuse de ces ballons au départ, vitesse due à l'énorme rupture d'équilibre nécessaire pour atteindre les hautes altitudes, de pareilles vitesses ayant pour effet de soumettre le ballon à des pressions énormes de la part de l'air ambiant (la résistance de l'air étant proportionnelle au carré de la vitesse). Dans ce but, on munit souvent les ballons-sondes d'un *sac de délestage*, imaginé par Kovanko, qui, à un moment donné, se détache automatiquement. Ce sac est attaché au ballon par l'intermédiaire d'un déclic, de telle sorte qu'un ressort joue et le laisse tomber lorsque, par suite de la sortie progressive du gaz par l'orifice de l'appendice, le poids du ballon est suffisamment allégé.

IV. — Les *Instruments d'observation* les plus indispensables, ceux que tout aéronaute sérieux ne peut se dispenser d'emporter pour la plus simple des ascensions, sont : en premier lieu, un *baromètre*, une *boussole*, des *cartes* au 80/000e des pays traversés, une *jumelle marine ;* en second lieu, un *thermomètre* et un *hygromètre*.

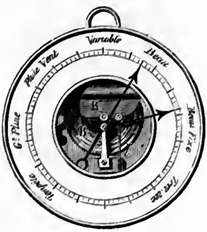

Fig. 34.
Baromètre anéroïde.

Le baromètre le plus employé est le *baromètre anéroïde* de Vidi, bien connu de tout le monde (fig. 34), auquel il est bon de joindre un *baromètre à mercure*. Grâce à la Table donnée plus haut (Chap. I), l'aéronaute, en regardant le baromètre, pourra toujours calculer, à quelques mètres près, sa position exacte au-dessus du niveau de la mer. D'ailleurs, la plupart des baromètres anéroïdes sont, aujourd'hui, à l'aide de cette Table, gradués en hauteurs.

Le thermomètre le plus en usage est le *thermomètre à mercure*. Il est bon d'y joindre un *thermomètre à alcool*, gradué avec soin, qui permet d'observer des températures inférieures à — 40°, température de congélation du mercure. Un thermomètre à maxima et à minima, le *thermométrographe de Bellani*, par exemple, peut être aussi de quelque utilité.

Le *psychromètre d'August* est presque toujours l'hygromètre qu'emploient les aéronautes (fig. 35). Son observation est facile, il est solide, mais, malheureusement, les formules que l'on emploie pour déduire de ses indications l'état hygrométrique de l'air ambiant sont mal établies, surtout au-dessous de 0°. Les plus communément employées sont :

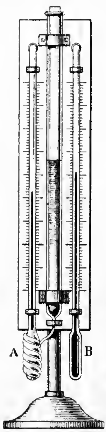

Fig. 35. Psychromètre d'August.

$$\left.\begin{array}{l} \textit{Au-dessus de } 0^\circ \ldots .\ f = f' - 0{,}00079\, h\,(t - t') \\ \textit{Au-dessous de } 0^\circ \ldots .\ f = f' - 0{,}00069\, h\,(t - t') \end{array}\right\} \quad (37)$$

f étant la tension de la vapeur d'eau cherchée, t la température de l'air ambiant, c'est-à-dire du *thermomètre sec* (qui remplace ainsi un thermomètre ordinaire), t' celle du *thermomètre humide*, lorsqu'il a pris sa température définitive d'équilibre, f' la pression maximum de la vapeur d'eau à t' degrés. L'état hygrométrique cherché est alors :

$$e = \frac{f}{F}. \qquad (38)$$

Des Tables permettent, comme pour la formule d'Halley, d'abréger les calculs.

Dans toute ascension sérieuse, on emporte aussi des *appareils enregistreurs*, baromètres, thermomètres, psychromètres, etc., (fig. 36, 37, 38), dont le principe est trop universellement connu pour que nous croyions devoir insister. Ces instruments permettent de tracer, minute par minute, indépendamment des voyageurs, le graphique de l'ascension, au triple point de vue de l'altitude, de la température et de l'humidité des couches d'air traversées. A la rigueur, un baromètre et un psychromètre suffisent, puisque l'un des deux thermomètres du psychromètre, le *thermomètre sec*, peut remplacer un thermomètre enregistreur ordinaire.

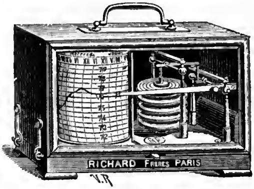

Fig. 36.
Baromètre enregistreur.

On commence à joindre à ces appareils l'*actinomètre enregistreur* de Violle (fig. 39), composé essentiellement de deux thermomètres dont les parties sensibles sont placées à l'intérieur de boules *en métal*, dont l'une est brillante et l'autre noir mat.

Quelle que soit la nature des instruments d'observation, leur principale qualité doit être une grande simplicité dans la construction et le maniement. En ballon monté, en effet, aucune

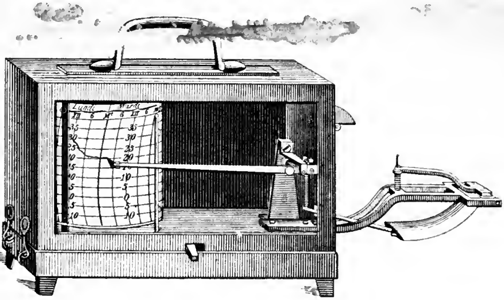

Fig. 37. — Thermomètre enregistreur.

mesure de précision n'est possible. La précision n'est même pas nécessaire, étant donné l'état perpétuel d'agitation du milieu ambiant, et, par suite, ses variations continuelles de propriétés. L'emploi d'instruments compliqués pourrait plutôt entraîner des conséquences fâcheuses, surtout en ce qui concerne les observations barométriques.

La nuit, enfin, toute observation deviendrait impossible si l'aéronaute n'emportait pas de quoi s'éclairer. Comme il ne faut

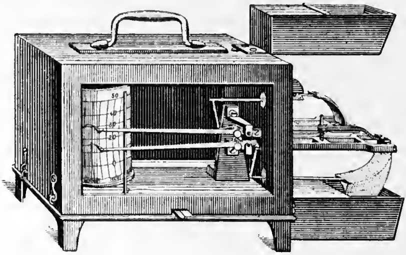

Fig. 38. — Psychromètre enregistreur.

pas, à cause des dangers d'incendie, songer à des lampes ordinaires, une *lampe électrique*, comme celle de Trouvé ou la lampe à arc de Renard, est alors absolument nécessaire.

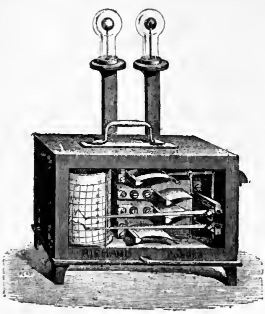

Fig. 39. — Antinomètre enregistreur de Violle.

Dans les *ballons-sondes*, afin de réduire au minimum le poids des instruments, on réunit dans la même boîte baromètre et thermomètre, de façon que les styles correspondant à ces appareils tracent leurs sillons sur le même papier : tel est le principe du *barothermographe enregistreur* de Richard. On peut faire mieux et réunir dans la même boîte un baromètre, un thermomètre sec et un thermomètre mouillé : on a ainsi le *météorographe universel* de Richard (fig. 40), comprenant à la fois un baromètre, un thermomètre et un psychromètre, le tout en aluminium (comme le barothermographe), de sorte que le poids total de l'instrument ne dépasse pas 1.200 grammes. On verra plus loin (Chap. X) comment Cailletet est arrivé à donner, pour ainsi dire, la *vue* à ces sortes d'automates, par la construction de son *enregistreur photographique*.

Ajoutons qu'actuellement le cylindre mobile des enregistreurs Richard est placé à l'intérieur d'une enveloppe cylindrique fixe, où l'on a pratiqué une fente pour le passage des styles, et dont le

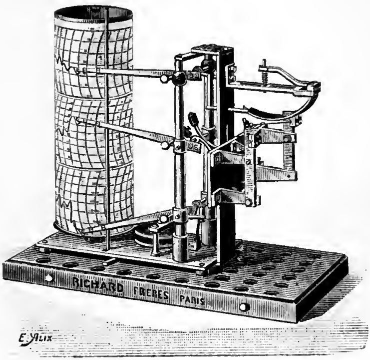

Fig. 40. — Météorographe universel.

but est de mettre les diagrammes à l'abri de toute détérioration, dans le cas où la descente aurait lieu avec traînage. De plus, comme, par suite des basses températures qui règnent dans la haute atmosphère, l'encre qui imbibait, à l'origine, les plumes traçantes, se congelait presque constamment, ces plumes ont été remplacées par une pointe creusant un sillon sur du noir de fumée disposé à la surface extérieure du papier qui enveloppe le cylindre mobile.

Tous les enregistreurs emportés par un ballon-sonde sont placés dans un petit panier en osier, à claire-voie, au milieu duquel ils sont suspendus par l'intermédiaire de *bracelets en* *caoutchouc* qui les préservent de toute détérioration à la descente (fig. 18). Le panier lui-même est accroché, par le même procédé, à l'intérieur d'un grand cylindre en osier, recouvert extérieurement d'un *parasoleil*, c'est-à-dire d'un revêtement en papier, argenté extérieurement, noirci intérieurement. Les instruments sont ainsi à l'abri, non seulement des chocs, mais encore du rayonnement solaire.

Les indications des enregistreurs étant sujettes à caution, à cause des variations de propriétés de leurs parties métalliques, on emploie souvent des instruments de contrôle. En ce qui concerne les minima indiqués par les thermomètres, Hermite et Assmann ont eu l'idée de se servir de *thermomètres photogéniques à minima*, contenant de l'alcool, construits comme il suit :

Le thermomètre est diaphragmé par deux bandes longitudinales d'émail. L'alcool est coloré par du noir d'aniline. Si l'on applique une bande de papier sensibilisé derrière la tige de ce thermomètre, la lumière agira sur le papier jusqu'au niveau de l'alcool seulement. Il en résulte que la hauteur des ordonnées noircies dans le négatif donnera la mesure du retrait produit par la contraction de la colonne thermométrique. Il ne serait pas difficile, comme le fait observer W. de Fonvielle, de transformer un pareil thermomètre en un enregistreur, au moyen d'un cylindre mobile recouvert de papier sensibilisé.

CHAPITRE IV

LE BALLON DANS LES AIRS

I. — Le départ terminé, l'aéronaute doit ranger son lest à sa portée dans le fond de la nacelle, amarrer la corde de la soupape à un cabillot du cercle, larguer le guide-rope, qui doit être prêt à tout événement, s'assurer enfin que l'ancre est relevée de manière que son extrémité ne puisse, indépendamment de la volonté de l'aéronaute, accrocher aucun objet, etc. Les instruments d'observation doivent être en position convenable, le baromètre sous l'œil du capitaine. Chacun des voyageurs doit garder la place qu'on lui a assignée, en s'étudiant à ne point faire de mouvements inutiles.

La manœuvre du ballon, surtout si l'aéronaute veut faire un voyage de longue durée, n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire, si l'on se contentait de s'en rapporter à la théorie exposée dans le Chapitre I.

On a admis, en effet, dans cette théorie, que le ballon une fois arrivé à sa zone d'équilibre, s'y maintenait de lui-même. Une pareille hypothèse n'est admissible que s'il arrive à cette zone avec une vitesse nulle. Il est clair que si l'ascension a été bien menée, cette vitesse n'est pas aussi considérable qu'on pourrait le croire, même dans le cas d'un ballon flasque : la résistance de l'air, qui croît proportionnellement au carré de la vitesse, diminue, en effet, considérablement la vitesse d'un ballon libre, que son mouvement soit ascensionnel ou descensionnel. Mais de là à la considérer comme négligeable à l'instant où l'aérostat pénètre dans sa zone d'équilibre, il y a loin. Il est donc essentiel si l'on veut avoir une idée exacte de la trajectoire suivie, d'en tenir compte.

Grâce à la vitesse acquise, le ballon, en réalité, ne fait que traverser sa zone d'équilibre et monte plus haut. Mais, dans ce mouvement, il perd constamment du gaz. Arrivé dans sa *zone d'arrêt*, il n'a plus une force ascensionnelle suffisante pour faire équilibre à son poids mort total, car ce poids est justement égal à sa force ascensionnelle dans la zone d'équilibre. Il descendra donc presque immédiatement sous l'influence d'une *force descensionnelle égale à la différence entre les forces ascensionnelles propres de la zone d'équilibre et de la zone d'arrêt*. Mais, alors, tout se passera comme par l'effet d'un coup de soupape plus ou moins prolongé, c'est-à-dire que dès le commencement de la descente, le ballon deviendra flasque et tendra à prendre un mouvement descensionnel uniformément accéléré.

Si le ballon n'est pas monté, il ne s'arrêtera qu'à terre; *s'il est monté*, il en sera de même, mais on pourra cependant, en jetant du lest, éviter un atterrissage qui pourrait être désastreux. Supposons qu'on jette du lest : le ballon rebondira. Mais comme son poids mort total est moindre qu'au départ, la zone d'équilibre à laquelle il parviendra sera plus élevée que tout à l'heure, et il en sera de même, le plus souvent, de la nouvelle zone d'arrêt. A chaque bond, le ballon s'élèvera donc de plus en plus haut. *Le mouvement normal d'un ballon non monté consiste* donc *en un bond plus ou moins gigantesque, suivi presque immédiatement du retour à terre, tandis que le mouvement normal d'un ballon monté consiste en une série de bonds à la suite desquels il s'élève à des hauteurs de plus en plus considérables.*

Dans le premier cas, à cause du vent qui le pousse, le ballon décrit une trajectoire à peu près telle que AMD (fig. 41). Dans le second cas, il décrit une sorte de *trajectoire serpentine* telle que AMNP (fig. 42), gravissant ce qu'E. Aimé appelle la *montagne* *russe des aéronautes*, jusqu'au moment où, n'ayant plus ni gaz ni lest, il retombe lourdement et définitivement à terre.

Si la perte de gaz éprouvée entre la zone d'équilibre et la zone d'arrêt est par trop considérable, il peut arriver qu'il soit impossible, même avec une forte dépense de lest, d'arrêter la chute du

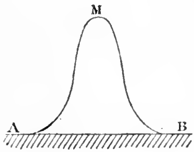

Fig. 41.

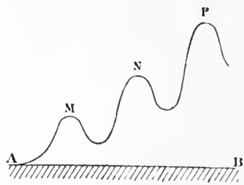

Fig. 42.

ballon : on dit alors qu'il s'est *emballé*. Ce phénomène d'emballement d'un ballon, qui bondissant trop haut au-dessus de sa couche d'équilibre tombe ensuite comme une balle de plomb, et ne se relève plus, à cause de la perte considérable de gaz qu'il a subie en dépassant cette zone, est assez fréquent, même en ballon monté, surtout dans les *ascensions en grandes hauteurs*, où l'aéronaute dépense du premier coup une grande partie du lest disponible. Gay-Lussac, Glaisher, etc., ont dû le subir, comme le montre le diagramme de la fameuse ascension des 11.000 mètres exécutée, le 5 septembre 1862, par Glaisher (fig. 43). Il arrive même souvent que les aéronautes font emballer leur ballon pour atterrir sans toucher à la soupape et, par suite, en perdant le moins de gaz possible.

Dans les ascensions ordinaires, le mouvement suivant la trajectoire serpentine est enrayé par une foule d'influences accidentelles. En manœuvrant convenablement, il est presque toujours possible, de maintenir assez longtemps le ballon dans sa zone d'équilibre normale. Un air relativement calme, une atmosphère pure, l'occultation prolongée du soleil, la nuit et, à la rigueur, un judicieux emploi du guide-rope, etc., sont les conditions que l'on doit rechercher pour ce genre de voyage aérien. C'est grâce à la réunion de toutes ces conditions que Sivel, Crocé-Spinelli, Jobert,

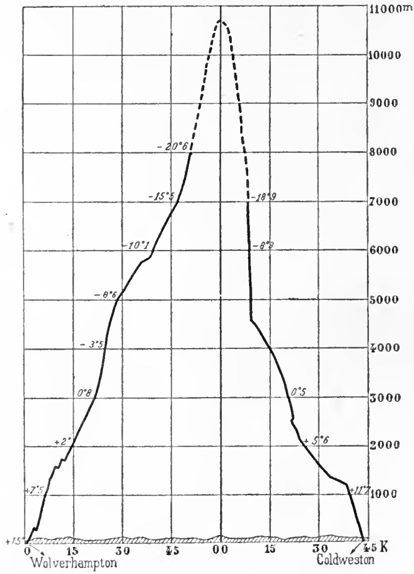

Fig. 43. — Diagramme de l'ascension des 11.000 mètres de Glaisher.

A. et G. Tissandier ont pu, à bord du *Zénith*, le 23 et le 24 mars 1875, effectuer leur fameux voyage de vingt-deux heures, de Paris à Arcachon. Le diagramme de ce voyage (fig. 44) montre qu'après avoir décrit, de 6 h. 20 à 9 heures du soir, une trajectoire serpentine, le *Zénith* est à peu près resté dans sa zone d'équilibre jusqu'au lever du soleil, à 6 heures du matin. Vient après une seconde trajectoire serpentine que les aéronautes arrivent à enrayer vers 8 heures à force de coups de soupape ; puis, à partir de 10 heures, se succèdent une série de bonds qui, convenablement enrayés encore par des coups de soupapes et des projections de lest, leur ont permis d'atterrir vers 5 heures du soir.

Quoi qu'il en soit, étant donné que l'idéal, en Aéronautique, est de maintenir une trajectoire à très peu près horizontale, on

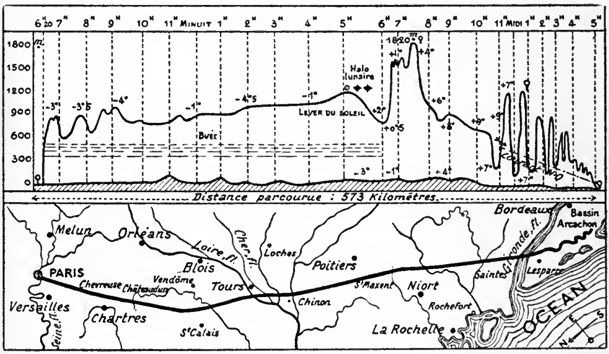

Fig. 44. — Diagramme du voyage du *Zénith*, de Paris à Arcachon.

voit que la manœuvre propre à obtenir ce résultat, quand on a atteint la zone d'équilibre, est très simple : *ne jamais toucher à la soupape, en se contentant de combattre, par de faibles projections de lest, la tendance du ballon à descendre.*

Les projections de lest ne doivent être faites que par l'aéronaute conducteur, seul. Sans sa permission aucun objet ne doit être jeté au dehors de la nacelle. D'abord, le moindre allégement peut avoir, dans certains cas, des conséquences assez graves : ainsi dans la fameuse ascension du *Neptune* au-dessus de la mer du Nord, G. Tissandier ayant jeté un os de poulet en dehors de la nacelle, alors que le ballon revenait du large et planait sur la terre, détermina son ascension jusqu'au courant supérieur qui, auparavant, l'avait entraîné vers la mer; heureusement que Duruof, le conducteur du *Neptune*, ayant ouvert la soupape, pu retrouver le courant inférieur et ramener ainsi son ballon vers la terre. Ensuite, il est évident qu'un objet, même d'un poids assez faible, projeté en dehors de la nacelle, peut, en arrivant à terre, occasionner les plus graves accidents.

Toutes les considérations précédentes ne font, d'ailleurs, que faire ressortir l'importance du lest. Aussi doit-il être employé avec la plus rigoureuse parcimonie, et, surtout, l'aéronaute doit se garder de toucher à la provision réservée pour l'atterrissage. Quelques trous dans l'enveloppe d'un ballon sont moins dangereux qu'un manque de lest : c'est la pénurie de lest qui faillit occasionner la mort de Blanchard dans sa fameuse traversée de la Manche, le 7 janvier 1785, et, cependant, il avait pour lui la chance d'un vent favorable. Bien des catastrophes auraient été évitées si l'on avait toujours été pénétré de l'importance de cette vérité.

II. — Un aéronaute n'a pas seulement à se préoccuper des indications du baromètre et de la dépense de son lest. Il faut encore qu'il ait constamment l'œil au thermomètre et à l'hygromètre. Si, une fois dans la région des nuages, il voit la température s'abaisser, l'humidité augmenter, il faut qu'il cherche à s'élever pour retrouver le soleil et alléger ainsi son ballon. Si, au contraire, le coup de soleil se fait par trop sentir, il peut y avoir avantage, pour lui, à regagner la région des nuages.

Aucun incident ne doit lui échapper. La machine qu'il monte doit être l'objet d'une surveillance de tous les instants. Il doit avoir sans cesse présent à l'esprit l'idée des dangers qu'il court (et fait courir aux autres) en cas de fausses manœuvres. Pour cette raison le capitaine-aéronaute doit être maître à son bord, quels que soient le nombre des passagers et leur expérience personnelle. Comme le fait observer W. de Fonvielle, le régime parlementaire n'est pas de mise à bord des aérostats. Il est presque inutile d'ajouter que, dans un voyage en ballon, la *défense de fumer* s'impose d'une façon absolue.

L'aéronaute ne doit pas oublier, aussi, qu'il peut faire, au cours de son excursion aérienne, des observations utiles à la science. Il doit donc inscrire à intervalles réguliers, sur son *livre de bord*, les lectures des instruments et les phénomènes dont il peut être témoin.

Il importe, d'ailleurs, de ne pas demander aux instruments d'observation que l'on a à sa disposition plus qu'ils ne peuveut donner.

Ainsi, le baromètre indique simplement la hauteur de l'aéronaute au-dessus du niveau de la mer et non sa hauteur au-dessus du sol. Pour connaître exactement cette hauteur, il faut savoir préalablement où l'on se trouve. Il ne faut pas, comme G. Tissandier, dans l'ascension du *Jean-Bart*, croire, d'après le baromètre, que l'on est à 300 mètres d'altitude au-dessus du sol, alors que l'on plane au-dessus d'un plateau à 200 mètres au-dessus du niveau de la mer, et que, par suite, on est à 100 mètres à peine de la terre. Sans le guide-rope qu'il avait eu soin de larguer à l'avance, l'éminent aéronaute et ses compagnons eussent, probablement, été broyés contre terre.

Il ne faut pas oublier, non plus, que le baromètre n'est, en somme, qu'un manomètre donnant la force élastique de la couche d'air où le ballon se trouve. Comme, en général, l'atmosphère est en mouvement et que, par suite les zones d'air d'égale pression ne sont guère de niveau qu'à 20 ou 30 mètres près, le baromètre peut très bien rester immobile lorsque le ballon, en réalité, monte ou descend.

C'est à la *banderole Loch* (fig. 11) ou, mieux, à la projection de petits fragments de papier à cigarettes, que l'aéronaute doit avoir recours pour être sûr qu'il descend ou qu'il monte. Dans le premier cas, les fragments de papier semblent s'élever au-dessus de la nacelle ; dans le second, ils semblent tomber.

Enfin, il ne faudrait pas se contenter de l'observation du baromètre pour en conclure que l'aérostat doit, par suite d'un mouvement descensionnel , perdre du gaz. Comme le montre la théorie exposée dans le Chapitre I, *c'est le poids spécifique des couches d'air qu'il traverse qui détermine l'état de mouvement ou de repos de l'aérostat dans le sens vertical.* Dans ces conditions, un aérostat pourra, sans perdre de gaz ou sans se contracter, descendre ou s'élever d'une hauteur très considérable, suivant l'état de la température ou de l'humidité des couches d'air qu'il traverse.

Ainsi, pour fixer les idées, considérons deux couches d'air dont les températures soient t et t', les pressions correspondantes étant H et H'. L'air de ces deux couches, supposé sec, aura le même poids spécifique si l'on a

$$0,0013 \times \frac{H}{1 + \alpha t} = 0,0013 \times \frac{H'}{1 + \alpha t'},$$

ou, à très peu près,

$$H' = H\,[1 + \alpha\,(t' - t)],$$

α désignant le coefficient de dilatation des gaz. Supposons, par exemple, un ballon en équilibre dans une couche d'air à 0°, à 3.108 mètres d'altitude, couche d'air pour laquelle la pression barométrique est 515 millimètres. Ce ballon se trouvera encore en équilibre dans une couche d'air de 5° plus chaude, dont la pression sera 515 $[1 + 0,004 \times 5] = 525$ millimètres à peu près (0,004 étant la valeur du coefficient de dilatation de l'air), pression correspondant à une hauteur d'environ 2.954 mètres. Le ballon pourra donc, sans perte de gaz par l'appendice, monter ou descendre, sans contraction, de près de 150 mètres.

Une variation dans l'état hygrométrique de l'air produirait, évidemment, un effet analogue.

D'ailleurs, la plupart du temps, les aéronautes, pour s'assurer s'il y a perte de gaz, ou non, par l'appendice, se contentent d'observer l'orifice du ballon. En général, dans la belle saison, l'expansion du gaz est accompagnée d'un refroidissement qui, étant donnée l'humidité qu'il contient toujours, amène la formation d'un *brouillard*. Ce phénomène, observé par Charles dès sa première ascension (Introduction), se traduit, en langage aéronautique, par le dicton : *le ballon fume sa pipe*. En hiver, le gaz est trop sec, de sorte que le brouillard ne se produit pas ; mais l'odeur suffit, alors, pour avertir l'aéronaute.

Quant au thermomètre, il ne faut pas oublier que ses indications sont toujours en retard, un certain temps étant nécessaire au liquide thermométrique pour se mettre en équilibre de température avec le milieu extérieur.

Son observation n'en est pas moins indispensable. Dans les régions où, par exemple, l'aéronaute perd de vue le sol, elle offre un moyen de s'apercevoir que l'on change de direction. En effet, si la température, après avoir subi pendant plus ou moins de temps la décroissance normale qui accompagne l'ascension, vient à augmenter brusquement, c'est une preuve que l'on quitte un courant Nord pour passer dans la direction d'un courant Sud. Au contraire, si la décroissance s'accentue sans qu'il y ait formation d'un nuage qui cache le soleil, c'est que l'on passe d'un courant Sud dans un courant Nord.

L'hygromètre, comme le thermomètre, donne des indications précieuses, car l'état hygrométrique de l'air va d'ordinaire en diminuant à mesure qu'on s'élève. Il peut même indiquer à l'aéronaute le voisinage d'un cours d'eau, d'une forêt, l'expérience ayant montré depuis longtemps combien la nature du sol influe sur les couches d'air avoisinantes. Mais, comme pour le thermomètre, ses indications sont toujours en retard.

Les baromètres enregistreurs, et, surtout, les thermomètres enregistreurs, présentent les mêmes inconvénients : leurs indications, déjà assez grossières, ont donc, en plus, le grand défaut de ne jamais coïncider avec l'instant précis indiqué par les chronomètres dont ils sont munis.

En ce qui concerne les thermomètres, von Hergessel a trouvé, heureusement, le moyen de remédier à cet inconvénient, grave surtout lorsqu'il s'agit de *ballons-sondes*, ballons non montés où l'habileté de l'opérateur ne peut corriger la défectuosité des instruments.

Si l'on admet, en effet, que *la variation de température d'un thermomètre enregistreur, dans l'unité de temps, est proportionnelle à la vitesse du ballon et à l'écart qui existe entre la température indiquée et la température réelle de l'air*, on a, en désignant par $\Delta\theta$ la variation de température du thermomètre dans un temps très court Δt, par θ la température du thermomètre à l'instant t, par θ_1, la température réelle de l'air à cet instant, par V la vitesse du ballon au même instant, la formule :

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = AV(\theta - \theta_1),$$

$\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ représentant évidemment la variation de température du thermomètre dans l'unité de temps, A une constante qu'il s'agit de déterminer. A cet effet, von Hergessel admet que, la nuit, pendant tout le temps qu'un ballon reste à peu près à la même altitude, la différence $\theta - \theta_1$, entre la température indiquée et la température réelle, reste constante. La vitesse V étant alors facilement calculable, ainsi que la variation $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ de la température du thermomètre dans l'unité de temps, à l'aide du diagramme de l'ascension, il a trouvé pour A la valeur

$$A = \frac{1}{1856},$$

la vitesse V étant exprimée en mètres par minute. De là, la formule

$$\theta_1 = \theta \pm \frac{1856}{V}\frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \tag{39}$$

qui permet de calculer à chaque instant la température réelle θ_1, dans laquelle le signe + correspond à la descente, le signe — à l'ascension, le thermomètre indiquant toujours, évidemment, à la descente, des températures trop basses, tandis qu'à la montée il indique toujours des températures trop élevées.

III. — Si l'on veut atteindre les hautes altitudes, les régions glaciales qui, été comme hiver, règnent au-dessus de 7.000 à 8.000 mètres, les précautions à prendre deviennent extrêmement nombreuses. Non seulement il faut se tenir prêt à combattre des froids terribles, mais encore on a à lutter contre le *vertige des hauteurs*, qui n'est autre chose que le fameux *mal des montagnes*.

En ballon, où la fatigue musculaire ne se fait pas sentir comme dans les ascensions en montagne, c'est seulement à partir de 4.700 mètres environ (hauteur correspondant à une pression de 420 millimètres) que ce mal commence à se produire. Comme il est dû à la raréfaction de l'oxygène, dont la tension individuelle n'est plus, dans ces régions élevées, suffisante pour entretenir la respiration, il faut éviter d'abord que l'ascension soit trop rapide : on peut alors habituer peu à peu l'organisme aux effets que produit le manque de ce gaz vital. Malgré cela, il est difficile d'éviter des bourdonnements d'oreilles, des émissions de sang par le nez et les oreilles et, enfin, quelquefois, l'asphyxie.

Glaisher qui, avant de s'aventurer dans les hautes régions, avait eu le soin de s'entraîner peu à peu, n'en a pas moins failli succomber, ainsi que son compagnon Coxwell, dans la fameuse ascension du 5 septembre 1862 dont nous avons parlé plus haut. Tout marcha bien jusqu'à 8.000 mètres ; mais, après, l'asphyxie commença son œuvre ; heureusement, le ballon était *emballé*, de sorte qu'il redescendit de lui-même assez vite pour permettre aux voyageurs de revenir à eux.

P. Bert a, d'ailleurs, indiqué le moyen de combattre ce terrible mal. Après de nombreuses expériences sur des chiens, des oiseaux, etc., soumis à des pressions excessivement faibles, il a démontré que le vertige des hauteurs étant dû à la trop faible tension individuelle de l'oxygène dans l'air raréfié où se trouvent plongés les aéronautes, il suffit, pour empêcher l'asphyxie, de respirer, dès que l'on éprouve un commencement de malaise, en quantité suffisante, un mélange convenable d'oxygène et d'air, à la pression normale.

Le mal des hauteurs n'a cependant pas pour cause unique la raréfaction de l'oxygène. Il y a lieu de tenir compte, aussi, des effets physiques dus à la dépression : si le mouvement ascensionnel de l'aérostat est par trop rapide, la décompression brusque qui en est le résultat peut produire les effets funestes dont sont souvent victimes les ouvriers qui travaillent dans l'air comprimé : elle peut amener les gaz dissous dans le sang à se dégager par bulles sur tout le parcours des capillaires, en formant ainsi, comme dit Jamin, des *chapelets* qui arrêtent la circulation et entraînent facilement la mort. Il y a lieu, enfin, de compter avec l'action que le froid et la sécheresse de l'air aux hautes altitudes peuvent exercer sur des tempéraments peu robustes.

La terrible catastrophe du *Zénith*, le 15 avril 1875, dans laquelle deux aéronautes distingués, Sivel et Crocé-Spinelli, ont trouvé la mort, a montré la nécessité, en pareille matière, d'observer scrupuleusement les prescriptions de la science. P. Bert avait calculé qu'il fallait, dans les hautes régions de l'atmosphère au moins 150 litres d'oxygène par minute pour trois personnes. Or, les malheureux aéronautes qui, au dernier moment, s'étaient adjoint G. Tissandier, avaient à peine, à eux trois, une provision de 150 litres pour un voyage dont la durée, dans ces hautes régions, devait certainement atteindre au moins une bonne heure.

Cette catastrophe n'a pas été, cependant, sans profit pour l'Aéronautique. En montrant les dangers à courir, elle a donné l'idée des ballons-sondes ; en montrant les précautions à prendre, elle a permis, un peu plus tard, de reprendre sans crainte les ascensions à grandes hauteurs.

C'est ainsi que le 4 décembre 1894, le Dr Berson, muni de ballonnets à oxygène pur en nombre suffisant, a pu s'élever à 9.156 mètres, sans éprouver le moindre malaise respiratoire, malgré un froid de — 48°, ascension qui fait de ce savant, pour ceux qui révoquent en doute les 11.000 mètres de Glaisher, le *champion du monde* pour les altitudes.

Fig. 45. — Berson.

IV. — Quand la provision de sable tire à sa fin, qu'il n'en reste qu'un peu plus de la quantité nécessaire à la descente, il est nécessaire d'atterrir. Les précautions à prendre sont alors les suivantes :

Les instruments fragiles sont rangés dans un panier, plein de paille ou de coton, attaché au cercle. On coupe la ficelle qui retient roulée la corde d'ancre, et on fait de même pour celle du guide-rope, si celui-ci, à tort, comme le prouve l'aventure du *Jean-Bart*, racontée plus haut, n'a pas déjà été largué. Seulement, on a soin que l'ancre demeure accrochée sur le bord de la nacelle. Une main sur la corde de la soupape, l'autre sur un sac de lest qui est appuyé sur le bordage de la nacelle, l'aéronaute choisit alors son point d'atterrissage.

Lorsque la vitesse du vent est inférieure à 6 mètres par seconde, le moindre emplacement vide suffit. Si cette vitesse varie entre 6 et 10 mètres, on peut descendre en plaine. Pour des ouragans filant au-dessus de 60 kilomètres à l'heure, il est presque nécessaire de choisir une forêt, si l'on veut que l'ancre puisse mordre à coup sûr.

Dans les conditions ordinaires, dès que le guide-rope touche terre, ce dont on s'aperçoit à l'inclinaison que prend alors la nacelle sous l'effort du vent (car, par suite du frottement, le ballon n'est plus libre et perd à peu près la moitié de sa vitesse) on ouvre la soupape, ce qui fait descendre le ballon. Si la descente est trop rapide, on relève le guide-rope pour le relancer à nouveau à terre à l'instant convenable, quitte à rouvrir, si c'est nécessaire, la soupape. Il peut arriver qu'on atterrisse à l'aide de l'emploi seul du guide-rope. Mais, en général, à 20 mètres à peu près de terre, on jette l'ancre en même temps qu'on maintient la soupape ouverte. Si l'ancre prend (et elle prend presque toujours si elle est bien construite) le ballon s'arrête instantanément et arrive au sol. Le choc à terre est, d'ailleurs, presque toujours assez doux si la manœuvre est bien exécutée, ce qui tient à ce que le poids de l'ancre et des cordes, délestant beaucoup, à ce moment, l'aérostat, amortit la secousse.

En somme, les efforts de l'aéronaute doivent tendre à obtenir l'arrêt immédiat du ballon, et à éviter le *traînage* qui résulte presque toujours du jeu défectueux des engins d'arrêt, ou d'une fausse manœuvre. Si on ne peut l'éviter (ce qui arrivera fatalement si l'ancre ne mord pas) il faut atténuer ses effets, souvent désastreux, et le seul moyen est d'avoir encore une quantité convenable de lest à sa disposition. On peut alors forcer le ballon à bondir au-dessus des obstacles de toute sorte qu'il peut rencontrer en traînant à terre : le traînage du *Géant*, à sa descente en Hanovre (Chap. II), a été dû surtout à la pénurie de lest au moment de la descente. Si le vent est par trop violent, le dégagement par la soupape insuffisant, on pourra user de la corde de déchirure. Mais on ne doit avoir recours à cette manœuvre que lorsqu'on a traîné assez de temps pour ne pas avoir à craindre d'être, à ce moment, enlevé brusquement de terre.

Quand l'ancre a mordu, ou que le ballon est vidé, on peut songer à sortir de la nacelle. Mais une chose qu'il faut éviter, c'est d'en sortir en sautant, alors qu'on est tout près de terre, et que d'autres voyageurs se trouvent dans l'aérostat. Cette manœuvre peu loyale, qu'on a reproché à Biot, lors de sa fameuse ascension avec Gay-Lussac (Chap. X), est d'ailleurs environnée, comme le fait remarquer W. de Fonvielle, de périls de tout genre, celui qui s'esquive étant exposé à se tromper sur la hauteur qui le sépare du sol.

Dans les circonstances normales, une fois l'atterrissage terminé, on ouvre en grand la soupape, et on procède au dégonflement du ballon, opération qui ne présente, d'ordinaire, aucun danger pourvu qu'on ait soin de ne pas approcher de corps enflammé dans le voisinage. Le dégonflement achevé, on enlève le filet, on replie l'enveloppe, fuseaux par fuseaux, on la roule, la soupape en dedans, et on la met dans la nacelle, après l'avoir enveloppée d'une bâche.

De retour à son local, le ballon doit être immédiatement déballé, déroulé, étendu et examiné. On répare ses accrocs, on le *ventile* pour arrêter l'action du vernis sur la soie et constater si quelques trous n'ont pas échappé à l'examen. Enfin, on le replie pour la dernière fois, et il est prêt ainsi pour une nouvelle ascension.

V. — Une question importante est celle de l'*estime*, c'est-à-dire de la détermination du point où l'on se trouve et de la route *suivie sur terre*.

En général, en ce qui concerne le point, une bonne carte d'état-major et une jumelle marine suffisent, pourvu, bien entendu, que la vue de la terre ne soit pas masquée par les nuages. La carte n'a pas même besoin d'être détaillée, car le paysage, à une certaine hauteur, est tellement rapetissé, que les rivières et les chemins de fer fournissent des points de repère presque toujours plus que suffisants.

En ce qui concerne la route suivie, on se sert ordinairement de la *boussole*, qui doit être suspendue à la Cardan, munie d'une rose des vents, et doit pouvoir être tenue à la main. Seulement, il y a alors une complication provenant de ce qu'il est rare qu'un ballon soit immobile autour de son axe vertical. La plus petite variation qui détruit la symétrie de la forme provoque, en effet, des mouvements giratoires du ballon autour de son axe vertical, mouvements que Charles avait parfaitement observés dès sa première ascension, comme nous l'avons vu plus haut (Introduction). Seulement, à moins de circonstances tout à fait exceptionnelles, ce mouvement est pendulaire, c'est-à-dire que le ballon n'exécute jamais une rotation complète. Il en résulte que lors du changement de sens, la vitesse de giration est nulle. Comme elle est presque nulle avant et après ce moment, on peut déterminer l'instant qu'il faut choisir pour exécuter des observations un peu précises.

Il est possible, d'ailleurs, d'atténuer les erreurs commises qui, il faut l'avouer, sont, quelquefois, si considérables, que certains aéronautes considèrent la boussole comme un objet de fantaisie.

Ainsi, l'observation du mouvement de l'*ombre* que le ballon découpe à la surface du sol, comparé à la direction de l'aiguille aimantée peut donner, très nettement l'angle de la route. On peut encore (comme l'a fait Sivel pendant l'ascension des 22 heures) laisser traîner à terre, quand la chose est possible, un guide-rope suffisamment long, qui se dirige toujours de lui-même à l'arrière de la nacelle. Le mieux serait d'employer le *gyroscope*, aujourd'hui entré dans la pratique courante : on sait que la position de l'axe de rotation de cet instrument est absolument invariable dans l'espace, de sorte que si l'on a eu soin de l'orienter dans une direction connue, celle-ci devient une ligne de repère sur laquelle on peut régler la marche du ballon.

Il ne faut pas s'illusionner, cependant, sur l'emploi de la boussole ou du gyroscope. Avec les ballons ordinaires, qui flottent au gré du vent, ils ne peuvent servir que si la terre est visible. Si le ballon est dans les nuages, ils deviennent inutiles : on est perdu dans l'espace et, à tout prix, il faut chercher à se rapprocher de terre. Il n'en serait pas de même, évidemment, avec un ballon dirigeable, dont la vitesse serait supérieure à celle du vent, car on se trouverait, alors, dans les mêmes conditions de navigabilité qu'un navire ordinaire ou un sous-marin. Il va de soi que des observations astronomiques peuvent être regardées comme presque impossibles en ballon libre.

Enfin, une question de la plus haute importance est la détermination de la *vitesse de marche.*

On peut s'en faire une idée approximative en évaluant le temps que le ballon met à traverser normalement une route, ou mieux, un fleuve, dont la largeur est donnée par la carte. Mais cette méthode ne laisse pas que de devenir embarrassante si la traversée se fait sous un angle quelconque. En somme, on est encore, aujourd'hui, à la recherche d'un *loch aéronautique* qui soit véritablement satisfaisant.

CHAPITRE V

LES MERVEILLES DE L'ATMOSPHÈRE. — IMPRESSIONS DE VOYAGE

I. — Passons rapidement en revue quelques-uns des phénomènes qui, dans une ascension un peu prolongée méritent d'attirer l'attention du voyageur.

Un de ceux qui étonne le plus l'aéronaute novice est le suivant : A une certaine hauteur, la terre, qui devrait apparaître, à

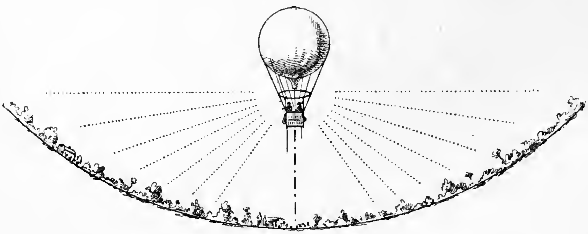

Fig. 46. — Cuvette aéronautique.

priori, comme une surface convexe, paraît au contraire, à mesure qu'on monte, se creuser de plus en plus : c'est le phénomène que Nadar a spirituellement appelé la *cuvette aéronautique*, en ce sens que la petite portion visible de notre globe prend la forme d'une cuvette dont le voyageur occuperait le centre, à la hauteur des bords (fig. 46).

Si extraordinaire que puisse paraître cette illusion d'optique, elle n'est cependant pas particulière aux ascensions en ballon. En réalité, c'est un phénomène banal, que l'on observe journellement, sans s'en rendre compte, et cela aussi bien au niveau du sol qu'à 6.000 mètres plus haut.

Considérons, en effet, un observateur placé sur le sol, au milieu d'une plaine assez grande pour que rien n'arrête le regard à l'horizon. Soit O la position des pieds, A celle de l'œil, et supposons OA $= 1^{m},75$, hauteur correspondant à un homme de taille moyenne (fig. 47). Par suite de la sphéricité du globe, la limite de la visibilité de l'observateur est, dans ces conditions, de 4.800 mètres environ. Or il est évident que les rayons qui, des divers points de cette plaine, arriveront à l'œil, se rapprocheront de plus en plus de l'horizontale à mesure que leur distance augmentera. En particulier, un rayon tel que MA, venant de l'horizon, arrivera à l'observateur en faisant avec l'horizontale AB de l'œil un angle MAB = AMO, appelé *dépression vraie*, donné par la relation

$$\text{tg MAB} = \frac{1{,}75}{4\,800},$$

d'où l'on déduit

$$\text{MAB} = \frac{1}{2} \text{ minute à peu près.}$$

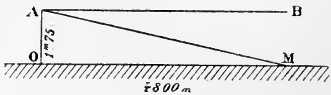

Fig. 47.

Dans ces conditions, tout se passe, évidemment, comme si le point M était situé à la hauteur de l'œil. Il en sera de même de tous les points tels que M placés à l'*horizon vrai*, de sorte que l'observateur aura la sensation d'être placé au centre d'une sorte de cuvette dont les bords s'élèvent à la hauteur de son œil. Si, d'ordinaire, le phénomène passe inaperçu, si, par exemple, une route s'étendant en droite ligne devant nous paraît horizontale, alors qu'elle devrait nous donner la sensation d'un plan qui s'élève graduellement, c'est que les effets de la perspective, dont notre œil a appris à tenir compte, corrigent la sensation visuelle. Ce qui le prouve, c'est que sur mer, où tout objet de comparaison manque, nous voyons très nettement l'immense plaine liquide s'élever autour de nous, toujours à la hauteur de l'œil qui regarde. Du rivage même, un navire dont la masse est suffisante pour cacher l'horizon, nous paraît placé sur une hauteur.

Supposons maintenant l'observateur placé à une altitude quelconque au-dessus du sol. Soit A la position de l'œil sur la verticale OA de l'observateur (fig. 48), B un des points qui limitent l'horizon (abstraction faite des effets dus à la réfraction des rayons lumineux par l'atmosphère). Appelons β la *dépression vraie*, c'est-à-dire l'angle H'AB que fait l'horizontale AH' de l'œil avec la droite AB, et désignons par R le rayon CO de la terre, par h la distance AO de l'œil au sol. La droite AB étant nécessairement tangente à la sphère terrestre au point B, le triangle ABC, rectangle en B, donne, en remarquant que l'angle ACB $= \beta$, la relation

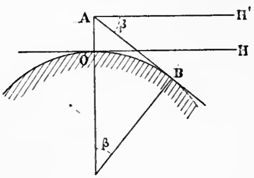

Fig. 48.

$$\cos \beta = \frac{R}{R + h},$$

d'où

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \sqrt{\frac{h}{2R + h}},$$

ou, à très peu près, h étant très petit par rapport au diamètre 2 R du globe terrestre,

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \sqrt{\frac{h}{2R}},$$

ou encore, plus simplement,

$$\beta = \sqrt{\frac{2h}{R}}, \qquad (40)$$

formule qui montre que *la dépression vraie augmente proportionnellement à la racine carrée de la hauteur*. Or R $=$ 6.371.000 mètres environ. Dès lors, pour $h =$ 969 mètres, on aura $\beta = 1°$ à peu près ; pour une hauteur quadruple, soit $h =$ 3.876 mètres, on aura $\beta = 2°$; pour une hauteur neuf fois plus grande, soit $h =$ 8.721 mètres, on aura $\beta = 3°$, etc. Avec des angles si faibles l'horizon paraîtra, évidemment, s'élever toujours à la hauteur de l'œil.

Quant aux effets de perspective, l'expérience montre qu'en l'air, à partir de 1.000 mètres d'altitude environ, il n'y a plus d'appréciation exacte de la distance ou des dimensions réelles des objets : une forêt paraît un champ de pommes de terre, un fleuve paraît un ruisseau. Ces effets ne peuvent donc pas corriger, pour ces altitudes, la sensation visuelle. Il arrive même qu'à ces hauteurs, la surface du sol prenant une teinte uniformément grise ou bleuâtre, tous les points de cette surface, aussi bien ceux qui sont directement au-dessous du ballon que ceux qui sont à l'horizon, semblent tous à égale distance de l'aéronaute, qui aperçoit ainsi la cuvette des aéronautes sous la forme d'une coupe à très peu près hémisphérique.

Si le ballon est au-dessus de la mer, le phénomène de la cuvette n'est plus seulement curieux, il devient admirable. En général, les bords de la cuvette brillent au soleil, l'eau diffusant en tous sens les rayons de la lumière qu'elle reçoit ; au-dessous, la mer est sombre, et cependant illuminée dans ses profondeurs, en ce sens que l'*on peut apercevoir le fond* par 30, 40 et même 70 mètres, selon le plus ou moins de limpidité de l'eau. Dans la direction perpendiculaire, en effet, les brusques réflexions et réfractions de lumière qui, dans les conditions où l'on cherche d'ordinaire à observer le fond, troublent la vue, sont écartées : les rayons de lumière qui viennent du fond arrivent à l'observateur avec leur intensité primitive. On s'est même servi déjà de ce phénomène pour explorer le fond de la mer à l'aide des ballons. Ainsi, il y a quelques mois, aux environs de Toulon, on a pu retrouver par ce procédé la coque d'un torpilleur coulé peu auparavant, et dont on cherchait vainement la place depuis plusieurs jours.

La réfraction atmosphérique, contrairement à une opinion assez répandue, n'intervient dans le phénomène de la cuvette aéronautique que d'une façon tout à fait secondaire :

On sait, en effet, que par suite du pouvoir réfringent de l'air, pouvoir qui augmente avec la densité des couches d'air, tout rayon lumineux provenant d'une étoile ou d'un point quelconque placé à une certaine hauteur décrit une trajectoire légèrement curviligne telle que AM (fig. 49), dont la concavité est, en général, tournée du côté du sol, de sorte que, pour l'observateur placé à terre, le point M qu'il regarde lui apparaît en M′, la droite AM′ étant tangente à la courbe AM. Dans ces conditions, le point regardé paraît plus relevé au-dessus de l'horizon qu'il ne l'est réellement, et cela d'autant plus que ce point en est plus rapproché, les points situés au zénith apparaissant seuls dans leur véritable position.

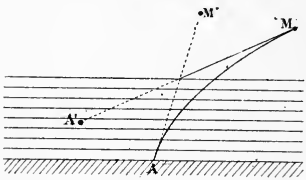

Fig. 49.

Supposons maintenant l'observateur à la place du point lumineux, c'est-à-dire placé en M et regardant un point A du sol : il verra ce point dans la direction MA′, tangente à la courbe AM au point M, c'est-à-dire que ce point lui paraîtra relevé, et d'autant plus qu'il sera plus rapproché de l'horizon. Il en sera de même de tous points situés à l'horizon de la nouvelle position M de l'observateur tous paraîtront relevés, les points situés à son *zénith* ou aux environs de son *nadir* étant, seuls, vus dans leur véritable position. Mais il ne faut pas oublier que même, à l'horizon, la réfraction atmosphérique, dans les conditions normales, relève à peine de $\frac{1}{2}$ degré les points que l'on regarde.

Si donc la réfraction atmosphérique amplifie le phénomène de la cuvette des aéronautes, ce n'est que dans des limites très restreintes. D'ailleurs, l'exactitude de la théorie précédente est prouvée par ce fait qu'au bout d'un certain nombre d'ascensions, en raison de l'éducation de l'œil, cette illusion d'optique cesse de se produire.

Le phénomène de diffraction appelé *auréole des aéronautes*, *cou-*

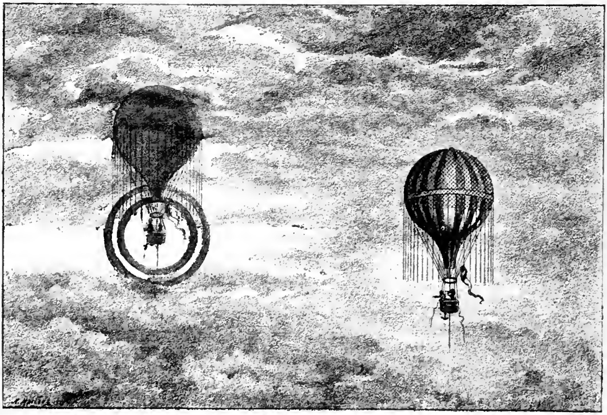

Fig. 50. — Auréole des aéronautes.

ronnes anti-solaires, et qui s'accompagne d'ordinaire d'un autre, le *spectre des aéronautes*, est, aussi, un de ceux qui émerveillent le plus les débutants :

A un moment donné, l'ombre du ballon sur les nuages, ainsi que celle des aéronautes, paraît entourée d'un certain nombre de couronnes irisées et concentriques, où l'on distingue les sept couleurs du spectre : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange, rouge, le violet étant intérieur et le rouge extérieur (fig. 50). Observé de tout temps au sommet du Brocken, la description exacte de ce phénomène a été faite, pour la première fois, par

Bouguer, qui eut l'occasion de l'étudier pendant son voyage dans l'Amérique du Sud :

« La première fois que nous le remarquâmes, dit-il, nous étions tous ensemble sur une montagne, nommée Cambamarca. Un nuage dans lequel nous étions plongés, et qui se dissipa, nous laissa voir le soleil qui se levait et qui était très éclatant ; le nuage passa de l'autre côté : il n'était pas à trente pas, lorsque chacun de nous vit son ombre projetée dessus et ne voyait que la sienne, parce que le nuage n'offrait pas une surface unie. Le peu de distance permettait de distinguer toutes les parties de l'ombre : on voyait les bras, les jambes, la tête ; mais ce qui nous étonna, c'est que cette dernière partie était ornée d'une *gloire* ou *auréole* formée de trois ou quatre petites couronnes concentriques d'une couleur très vive, chacune avec les mêmes variétés que le premier arc-en-ciel : le rouge était en dehors. Les intervalles entre ces cercles étaient égaux : le dernier cercle était plus faible ; et, enfin, à une grande distance, nous voyions un grand *cercle blanc* qui environnait le tout. C'est comme une espèce d'apothéose pour chaque spectateur ; et je ne dois pas manquer d'avertir que chacun jouit tranquillement du plaisir sensible de se voir orné de toutes ces couronnes, sans rien apercevoir de celles de ses voisins... Ordinairement le diamètre du premier iris était d'environ $5^\circ \frac{2}{3}$, du suivant d'environ 11°, de l'autre de 17°, et ainsi de suite ; celui du cercle blanc était 67°. »

Il ressort de cette description que c'est en tournant le dos au soleil que le voyageur apercevra l'auréole des aéronautes. Pour qu'elle se manifeste, il faut non pas une pluie, mais un nuage formé de gouttelettes d'eau exessivement fines, dont le diamètre, d'après Mascart, varie entre 6 millièmes et 34 millièmes de millimètre au plus. Quant au grand cercle blanc vu par Bouguer, et qu'on appelle encore *cercle d'Ulloa* ou *arc-en-ciel blanc*, on est d'accord pour le considérer comme un véritable arc-en-ciel dont les couleurs sont très pâles, et, d'ailleurs, on l'aperçoit rarement.

W. de Fonvielle a parfaitement décrit, dans son *Manuel pra-*

tique de l'Aéronaute, l'auréole des aéronautes, ainsi que l'ombre qui l'accompagne :

L'*ombre du ballon et des aéronautes* est limitée, dit-il, par des rayons qui, venant du soleil, sont parallèles : c'est donc une surface cylindrique ayant pour base la courbe de contact du ballon, de la nacelle et des objets qu'elle renferme (y compris les voyageurs), avec des génératrices de même direction. La silhouette que l'on voit sur le nuage est l'intersection de cette ombre avec le plan réfléchissant produit par les nuées : c'est donc une figure dont les dimensions linéaires sont invariables. A mesure que l'on s'éloigne du nuage, on la voit nécessairement diminuer de diamètre angulaire et, par suite, se rapetisser de plus en plus aux yeux de l'observateur, tandis qu'elle augmente où, du moins, semble augmenter à mesure que l'on s'en rapproche.

Il n'en est pas de même de l'*auréole :* le diamètre apparent des anneaux irisés qui la forment étant invariable, elle conserve toujours la même grandeur apparente, seulement son éclat, qui diminue quand on s'éloigne, augmente quand on se rapproche du nuage. C'est quand le nuage est très voisin, que le spectacle est admirable : l'ombre, étant immense, déborde du cadre lumineux que forme l'auréole, on n'aperçoit plus dans l'intérieur que le fantôme de la nacelle. Le voyageur aérien a devant lui un sosie qui répète tous ses mouvements.

Il ne faut pas confondre le phénomène de l'auréole avec celui de l'*arc-en-ciel* ou *iris*. Ce dernier, qui consiste en une bande d'apparence circulaire, dans la largeur de laquelle sont distribuées les couleurs du spectre, le rouge au dehors, est dû à la réflexion et à la décomposition des rayons de lumière à l'intérieur des gouttes d'eau, de dimensions relativement considérables, qui forment les nuages de pluie. Seulement, tandis qu'à terre on n'aperçoit qu'une partie peu considérable de l'arc-en-ciel et des arcs surnuméraires qui souvent l'accompagnent (130° à peu près), en ballon, il peut arriver qu'on aperçoive les cercles irisés à peu près complets.

De même on peut, en ballon, observer mieux qu'à terre, les *halos* et tous les phénomènes qui sont dus, comme l'avait deviné Mariotte, à la présence, dans l'air, de petites aiguilles de glace qui y flottent ou descendent très lentement à cause de leur faible masse. Ces nuages à glace ont été maintes fois, d'ailleurs,

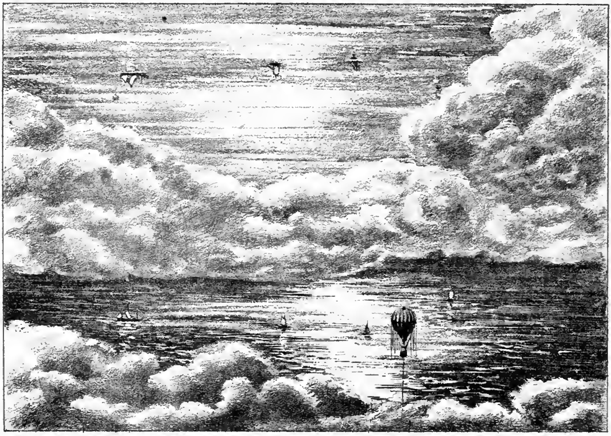

Fig. 51 — Mirage supérieur en ballon.

observés par les aéronautes, comme on le verra plus loin (Chap. X).

Les nuages peuvent aussi donner lieu à d'autres phénomènes curieux, particulièrement à des phénomènes de *mirage*.

C'est, en effet, en ballon que l'on peut apercevoir le plus fréquemment, non seulement le *mirage inférieur* décrit par Monge, mais encore le *mirage supérieur* et le *mirage latéral*. Dans le premier et dans le deuxième cas, l'aéronaute voit le ballon et tous les objets qu'il renferme comme réfléchis par une masse d'eau tranquille située soit au-dessous, soit au-dessus de lui. Ainsi la figure 51 montre un cas très étrange qui s'est produit sur le bord de la mer : les aéronautes ont pu voir les vaisseaux renversés naviguant dans le ciel au-dessus du ballon.

Dans le cas du mirage latéral, tout se passera comme si l'aéronaute avait dans son voisinage un immense miroir vertical : le ballon et les objets qu'il renferme, voyageurs compris, possède alors un sosie qui l'accompagne dans tous ses mouvements. On distingue facilement ce phénomène du phénomène de l'*ombre du ballon sur les nuages*, dont nous avons parlé à propos de l'auréole, en ce que les dimensions de ce sosie restent invariables.

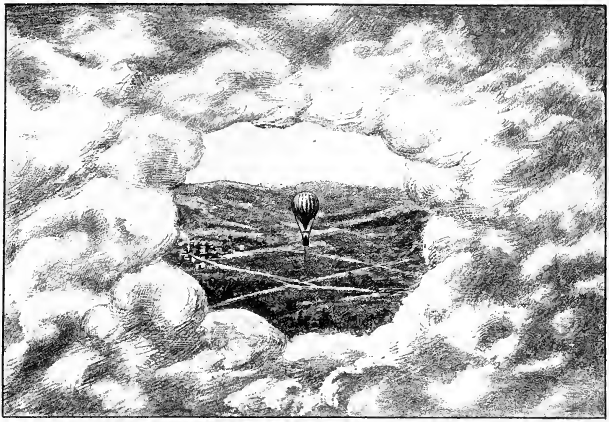

Fig. 52. — Anneau volant.

D'autres phénomènes, non moins curieux que les précédents, sont dus soit aux nuages, soit à la présence de la vapeur d'eau en gouttelettes plus ou moins fines dans l'air.

S'il est plongé au milieu d'un nuage de faible épaisseur, il semblera à l'aéronaute qu'il se trouve au centre d'une sorte d'*anneau volant* lui permettant de ne voir la terre que par-dessous, le ciel par-dessus (fig. 52). Si l'épaisseur du nuage devient plus considérable, terre et ciel disparaîtront : il se trouvera alors comme dans une immense cathédrale dont le sol, les colonnes et

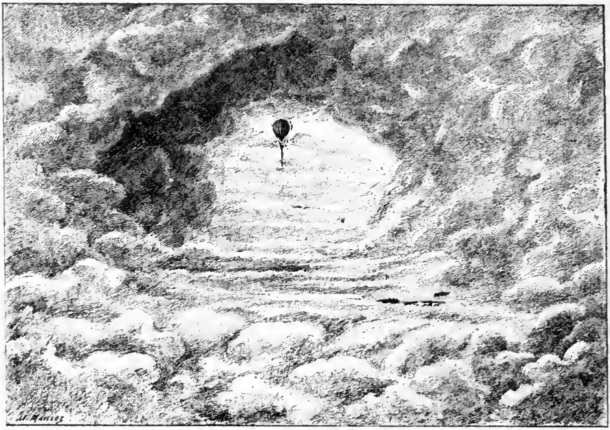

Fig. 53. — Voûte de nuages.

la nef sont formés par les masses aqueuses et flottantes qui l'environnent de toutes parts (fig. 53).

Si, dans les heures du milieu de la journée, l'air est humide et que le ballon nage dans un air homogène, la cuvette des aéronautes ne se formera pas à l'horizon, mais dans des régions plus voisines. L'aéronaute sera alors dans un véritable *puits*, qui lui montrera le ciel seulement par le haut, tandis que dans toutes les autres directions, son rayon visuel sera complètement arrêté.

Pour terminer, disons qu'en ballon, on peut encore observer certains *phénomènes acoustiques* d'un grand intérêt.

C'est ainsi qu'on peut constater facilement, en ballon, la *tendance qu'a le son à monter*, propriété qui provient de ce que la vitesse du son, par suite du refroidissement graduel de l'air, diminue avec la hauteur. Glaisher a entendu, à une hauteur de 3.000 mètres, l'aboiement d'un chien, le sifflet d'une locomotive Ce dernier put même être entendu, un jour que l'atmosphère était entièrement humide, à une hauteur de 6.500 mètres. Dans la même ascension, Glaisher entendit le vent gémir sous lui, à 3.000 mètres de hauteur (juin 1862). Au mois de mai de la même année le sourd murmure de Londres s'entendait à 5.000 mètres de hauteur. Il est vrai qu'un autre jour les cris de plusieurs milliers de personnes ne furent plus perceptibles au-dessus de 1.500 mètres.

Nombre d'aéronautes ont observé des phénomènes analogues. Ainsi C. Flammarion a constaté que, tandis qu'il entendait une voix qui lui parlait à 500 mètres au-dessous de lui, la sienne avait cessé d'être perceptible à 100 mètres au-dessus, les ondes sonores quand elles descendent, éprouvant une véritable réflexion à la surface des couches d'air plus chaudes qu'elles rencontrent.

Le phénomène de réflexion totale du son qui a lieu lorsque les ondes sonores rencontrent la surface de l'eau, d'un étang, d'une rivière, etc., permet d'observer de remarquables *échos*. Lachambre en a tiré parti, dans une de ses ascensions, pour calculer sa hauteur et contrôler les indications de son baromètre : mesurons, en effet, à l'aide d'une montre à secondes, le temps t écoulé entre la production du son et son retour par réflexion, la vitesse moyenne du son étant de 340 mètres à la seconde, la formule

$$h = 170t, \qquad (41)$$

permettra de calculer la hauteur h de l'aérostat en mètres.

II. — « Le départ lent produit chez le spectateur une émotion complexe de plaisir, de regret et de crainte : le plaisir que procure le rare et le majestueux ; le regret de n'être point soi-même acteur dans la scène ; la crainte inspirée par le sentiment du mystérieux, surtout chez les personnes dépourvues de notions scientifiques. Le départ rapide produit une commotion plutôt qu'une émotion : il arrache le cri de la compassion et de la terreur. Le sentiment du danger imminent et extraordinaire que semblent courir les aéronautes l'emporte sur toute autre considération, du moins pendant les premiers instants, jusqu'à ce que la réflexion ait remis les choses au point.

Chez l'aéronaute, le départ occasionne aussi des émotions diverses suivant son degré de vitesse ; mais que ce départ soit majestueux ou précipité, c'est toujours pour le nautonier aérien un moment sublime. Il semble rester immobile, supporté dans le vide par des ailes mystérieuses. S'il monte lentement, c'est la terre qui s'éloigne de lui comme un beau rivage s'éloigne du matelot, jusqu'à ce que tout ce qui est à sa surface ait pris des proportions diminutives. Le changement graduel, incessant et relativement rapide de la dimension des objets fait croire à un enchantement. On songe, malgré soi, aux baguettes magiques et aux pays des fées. Si l'aérostat s'élève avec une grande vitesse, les villes, les hommes, les bruits, tout semble s'engloutir au-dessous de l'aéronaute. Lui seul, dans un silence de mort, paraît survivre, après un effroyable cataclysme, sauvé comme par miracle, profondément étonné de planer au-dessus du gouffre. L'émotion est indicible (Malfroy). »

Elle redouble si un vent violent emporte le ballon : alors la course folle des sillons, la danse des vallons verts et des collines chauves, le défilé rapide des villages assis aux bords des eaux, à l'ombre des bois, etc... s'ajoutent à l'impression ressentie.

Cependant, c'est l'aérostat qui marche, c'est la terre qui reste immobile, et tous ces spectacles si enivrants ne sont, en somme, qu'une conséquence vulgaire des lois du mouvement relatif, et proviennent de ce qu'en ballon, le voyageur n'éprouve aucune sensation de mouvement.

En ballon, en effet, il n'y a pas même de vent : des bulles de savon que l'aéronaute poserait devant lui sur une planchette, y resteraient dans un état de repos complet et la flamme d'une bougie n'y vacillerait pas. L'aérostat est exactement dans les mêmes conditions, par rapport au courant aérien où il est plongé, qu'une boule de bois qui serait lestée dans le courant d'un fleuve; cette boule avance, mais ce n'est pas elle qui marche, c'est l'eau dans laquelle elle est plongée. « Par les vents les plus violents, le ballon que vous avez vu, avant le départ, fouettant l'air avec fracas de son taffetas encore assez flasque, luttant contre les cordages qui le retiennent à terre, tantôt soulevant les hommes de manœuvre cramponnés à la nacelle et aux cordes d'équateur, tantôt repoussé contre le sol avec une telle violence qu'il semble vouloir s'y écraser, ce ballon, une fois libre, part et file dans l'air sous l'ouragan, sans contre-heurt, sans secousses, sans oscillations, sans vibrations. C'est l'athlète qu'on voulait lier : il était indomptable dans l'indignation de sa force contre tout joug. Le voici libre, il est tranquille (Nadar). »

Tout au plus, lorsque le ballon s'élève avec rapidité, sent-on l'action d'un courant d'air descendant, le phénomène contraire se passant lorsque le ballon descend. Il y a cependant des exceptions à cette règle, mais seulement dans des circonstances extraordinaires, lorsque le ballon se trouve dans une zone où se produisent des remous violents. Alors l'aérostat monte, descend, va à droite, à gauche, comme s'il semblait incertain de sa direction.

A une certaine hauteur au-dessus d'une grande ville, l'impression est curieuse. « Nous sommes à 1.500 mètres au-dessus de Paris. La capitale et ses environs ne sont plus entièrement visibles, car déjà de petits brouillards, transparents comme une légère fumée blanche, forment l'embryon d'une mer de nuages au-dessous de notre nacelle. Le soleil est sans ardeur : il disparaît de temps en temps dans la brume. L'intervalle laissé par les nuages nous permet cependant de contempler le paysage lilliputien de la terre. Je dis lilliputien, car je ne puis m'empêcher de songer aux voyages de Gulliver, et de croire que, dans notre île volante, nous sommes les géants de Brobdingnag. Je dirai même que ce n'est pas sans quelque sentiment de vanité que nous jetons les regards sur les infiniment petits de la planète que nous venons de quitter. Qu'ils sont curieux ces asticots qui fourmillent sur des rubans bleus transparents ! Les terriens donnent à ces larves le nom de bateaux et à ces bandes d'étoffe les noms de Seine et de Marne. Et ces châteaux de cartes, ils les ont appelés villages ! Et ces petites plates-bandes de maraîchers, ils les nomment forêts ! Et ces petits filets blancs, il paraît que ce sont des routes ! Ces filets verts, des haies vives ! Ces galons bleus ou argentés, des rivières ! Et ces moucherons qui se meuvent au milieu des châteaux de cartes sont des hommes. Ce sont, dit-on, les êtres intelligents de la planète. Leur science a découvert que leur pays était une boule. Quelle erreur ! Il est creux comme une coupe. Et cette grande capitale, on en ferait le tour en peu de minutes ! Et on pourrait allumer son cigare à ce réverbère, dressé dans un jardinet, qui passe pour le plus haut monument de la terre ! Pourtant nous reconnaissons que l'ensemble du paysage terrestre est d'une délicatesse ravissante. C'est une merveilleuse tapisserie aux milliers de dessins divers, où tous les tons se détachent avec une incroyable netteté.

« Mais le ballon descend : nous ne sommes plus qu'à 800 mètres, qu'apercevons-nous à l'horizon ? Un gros serpent bleu étalant ses replis sur une ouate floconneuse et cachant sa tête et sa queue dans ce duvet. Un soleil rouge l'éclaire et ses écailles chatoyantes reflètent les nuances les plus variées. Sa couche élevée est légèrement irisée. Ma première impression est que les terriens ont constaté avec de puissants télescopes que nous avions l'air de nous moquer d'eux, et qu'ils ont mis là ce reptile, sur les confins de leur pays creux, pour nous effrayer et nous empêcher d'y revenir. Heureusement la réflexion détrompe nos sens abusés ; nous reconnaissons la Marne, dormant tranquillement dans son lit, orné de superbes rideaux de nuages mobiles, aux couleurs multiples et changeantes (Malfroy). »

Nous remontons, nous approchons des nuages. « L'air s'épaissit, la terre disparaît entièrement au-dessous de nous. On ne voit plus rien. On se trouve plongé au milieu de vapeurs laiteuses. Cependant, peu à peu, la masse s'éclaire, la clarté, uniforme

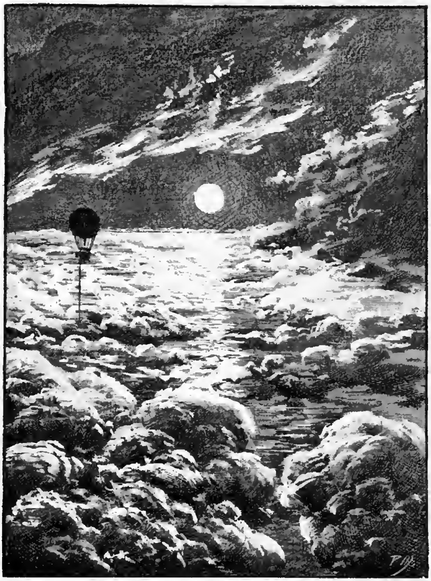

Fig. 54. — Lever de lune sur la mer des nuages.

d'abord, devient plus vive et plus brillante au zénith. Tout à coup, la masse des nuages s'enfonce sous la nacelle et le soleil nous envoie ses brûlants rayons. Où sommes-nous, grand Dieu ! Dans la mer des nuages ! une mer d'une sauvage grandeur, d'une immense étendue désolée, avec des îlots de neige, des icebergs, des rochers de glace, des rivages. L'auréole des aéronautes projette la splendeur de ses arcs-en-ciel concentriques sur les masses floconneuses en mouvement dans le lointain, et le soleil donne à l'ensemble des couleurs sans cesse renouvelées.

« Il semble que nous allons bientôt atteindre les bords féeriques de cet océan fantastique, et débarquer sur quelque sol enchanté. Mais semblables aux rivages des lacs de lumière des pays chauds, les plages fuient devant nous au moment où nous croyons nous approcher d'elles (Malfroy). »

Cette *mer des nuages*, qui est peut-être le plus beau spectacle que l'on puisse contempler en ballon, défie, en effet, toute comparaison. « Ni les mers de glace, ni les champs de neige des Alpes, dit G. Tissandier, ne donnent une idée de ce plateau de vapeur qui s'étend sous notre nacelle comme un cirque floconneux où des vallées d'argent apparaissent au milieu de mamelons de feu. Ni la mer au soleil couchant, ni les flots de l'océan éclaircis par l'astre du jour au zénith, n'approchent en splendeur de cette armée de cumulus arrondis, qui ont aussi leurs vagues et leurs montagnes d'écume, mais qui ont, en plus, une lumière d'apothéose. »

Mais la nuit arrive ! Quel silence ! Quelle solitude ! Comme les heures passent ! Quelle est cette lueur qui manifeste dans le lointain et prend des proportions de plus en plus grandes ? C'est la lune qui se lève (fig. 54).

Bien étranges sont les sentiments que l'on éprouve à être suspendu ainsi mystérieusement dans le vide infini, au sein des ténèbres et au clair de lune ; indéfinissables sont les émotions que l'on ressent en voyant cette boule de soie qui ne tient à rien, errer dans les sentiers sans traces de l'air.

Un jour, Guy de Maupassant confia au papier les impressions qu'il avait eues pendant un voyage de nuit. On se saurait mieux faire que de le citer :

« La terre n'est plus, la terre est noyée sous des vapeurs laiteuses qui ressemblent à une mer. Nous sommes seuls maintenant avec la lune, dans l'immensité, et la lune a l'air d'un ballon qui voyage en face de nous ; et notre ballon qui reluit a l'air d'une lune plus grosse que l'autre, d'un monde errant au milieu du ciel, au milieu des astres, dans l'étendue infinie. Nous ne parlons plus, nous ne vivons plus, nous ne pensons plus; nous allons délicieusement inertes, à travers l'espace. L'air qui nous porte a fait de nous des êtres qui lui ressemblent, des êtres muets, joyeux et fous, grisés par cette envolée prodigieuse, étrangement alertes, bien qu'immobiles. On ne sent plus la chair, on ne sent plus palpiter le cœur, on est devenu quelque chose d'inexprimable, des oiseaux qui n'ont pas même la peine de battre de l'aile.

« Tout souvenir a disparu de nos âmes, tout souci a quitté nos pensées, nous n'avons plus de regrets, de projets ni d'espérances. Nous regardons, nous sentons, nous jouissons éperdument de ce voyage fantastique ; rien que la lune et nous dans le ciel ! Nous sommes un monde vagabond, un monde en marche comme nos sœurs les planètes, et ce petit monde porte des hommes qui ont quitté la terre et l'ont déjà presque oubliée.

« Le silence est presque absolu, solennel. Il n'est troublé que par le faible souffle d'une locomotive, par les aboiements affaiblis de quelques chiens qui sentent qu'il y a quelque chose d'anormal dans le système général des choses et par le tic tac discordant des mouvements des chronomètres de nos enregistrateurs.

« Nous avons presque froid, car la température est basse et nous sommes immobiles ; nous ne nous plaignons point ; nous ne désirons point que le temps aille plus vite ; nous craignons même que le terme de notre voyage n'arrive trop tôt. »

La nuit se termine, cependant ! « Déjà, depuis quelque temps, se dessine à l'horizon un arc de lumière, qui imprègne l'atmosphère de sa blanche clarté. La lune pâlit et les étoiles disparaissent les unes après les autres pour céder la place à l'astre du jour.

Les prés, les vallées, les rivières sont couverts d'une légère vapeur que le soleil dissipe à ses premiers rayons. Les oiseaux chantent et envoient au ciel leurs notes les plus pures. L'azur du firmament devient plus transparent : ce n'est plus la teinte foncée de la nuit. Déjà l'aurore rougit l'horizon et le soleil va paraître ! La clarté augmente toujours et annonce progressivement l'arrivée de l'astre. Enfin, le voilà qui apparaît comme un immense globe rouge posé sur les vapeurs de la campagne ! Le silence succède au gazouillement des oiseaux, le vent cesse de souffler et, pendant quelques instants, la nature paraît se recueillir comme effrayée par la majesté de l'astre qui l'éclaire et la vivifie. Puis, tout reprend plus hardiment, les oiseaux chantent avec plus de vigueur, la brise se fait entendre dans le feuillage, les vapeurs se dissipent, et sous l'action des chauds rayons du soleil, notre ballon bondit de nouveau dans l'espace (M. Farman). »

CHAPITRE VI

L'EMPLOI DES COURANTS AÉRIENS

Les ballons étaient à peine inventés que l'on chercha à les diriger dans l'air. Les moyens que l'on a proposés successivement pour arriver à ce résultat peuvent se réduire à deux : la *navigation par l'utilisation des courants aériens* et la *navigation par un propulseur*. Ce Chapitre et le Chapitre suivant vont être consacrés à l'étude des tentatives faites dans ces deux sens.

I. — L'idée de la navigation aérienne par l'emploi des courants atmosphériques est due à Pilâtre de Rozier. Elle est fortement appuyée par ce fait que la direction des courants d'air en un même endroit n'est généralement pas la même suivant la hauteur à laquelle on se place au-dessus du sol. Il y a longtemps que l'on a observé que les nuages chassent *souvent* dans un sens contraire à celui du vent régnant à la surface. On sait que les brises de terre et les brises de mer, lesquelles alternent régulièrement le soir et le matin, coexistent à une hauteur assez faible, et que les montagnes, pendant la belle saison, produisent des brises analogues.

Lorsque le vent vient du nord, et que la pression, au lieu d'augmenter, reste basse, il est permis d'augurer que le phénomène tient à la présence d'un vent du sud, régnant dans les hautes régions de l'atmosphère. Le même raisonnement peut s'appliquer dans le cas inverse, c'est-à-dire lorsque le vent sud règne à terre par de fortes pressions. Si donc un vent n'est pas favorable à la direction que l'on désire prendre, il est possible souvent, en s'élevant plus ou moins haut, de trouver un courant se rapprochant de cette direction. Les indications du Bureau central Météorologique peuvent, aussi, rendre quelques services.

Quoi qu'il en soit, c'est à l'aide d'un courant aérien favorable que Blanchard et Jeffries, dès le 7 janvier 1785, ont pu traverser la Manche, de Douvres à Calais, quoiqu'ils n'eussent emporté que 30 livres de lest, imprudence qui faillit, d'ailleurs, leur coûter cher, car c'est par miracle qu'ils purent atterrir.

Mais, dans cette traversée restée justement célèbre, un seul et unique courant aérien fut utilisé. Il n'en fut pas de même dans la fameuse ascension du *Neptune*, le 16 août 1868, à Calais, ascension qui est peut-être, au point de vue de l'utilisation des courants aériens, une des plus remarquables que l'on puisse citer. Grâce à l'existence de deux courants superposés, l'un dirigé du N.-E. au S.-O., depuis la surface jusqu'à 600 mètres de hauteur, l'autre, du S.-O au N.-E., à partir de 600 mètres, Duruof et G. Tissandier, partant de Calais d'abord, puis d'un lieu situé aux environs du cap Gris-Nez, purent s'avancer successivement deux fois sur la mer du Nord, à 27 kilomètres du rivage, et retourner chaque fois à leurs points de départ.

Il n'est nullement prouvé, cependant qu'en un point quelconque du globe les courants aériens possèdent toujours, à des altitudes différentes, des directions opposées ou simplement obliques. Si l'expérience, montre qu'il y a parfois dans l'atmosphère des courants superposés, elle montre aussi qu'assez fréquemment il n'y en a pas, au moins dans les limites actuellement possibles des ascensions aéronautiques. Ainsi, dans une ascension faite à la Villette, G. Tissandier s'est élevé jusqu'à 2.000 mètres sans rencontrer, pendant deux heures et demie, un courant aérien capable de lui faire traverser Paris, et a dû redescendre à Clichy.

Pour la même raison, si l'on a réussi assez souvent, depuis Blanchard, à franchir le Pas-de-Calais, pour aller d'Angleterre en France, il a fallu attendre jusqu'en 1883 pour voir le trajet inverse effectué, malgré eux, d'ailleurs, par Morlan et de Costà, et ce n'est qu'en septembre 1883, après trois tentatives infructueuses, que Lhoste, en se servant des courants aériens, a pu franchir la Manche, en partant de Boulogne :

Il quitta Boulogne, poussé par un vent d'est; à 1.000 mètres, il rencontra un vent sud, et resta en l'air jusqu'à la nuit. Ne sachant,

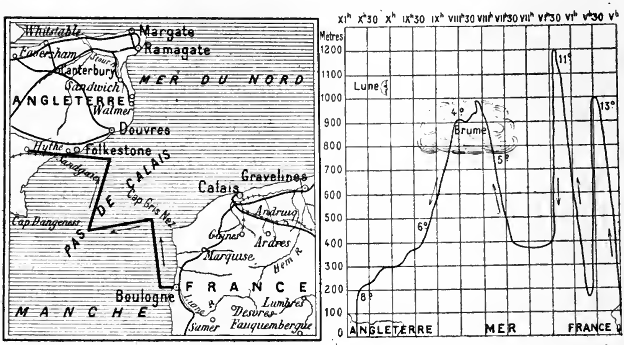

Fig. 55. — Traversée de la Manche, par Lhoste.

à cause de la brume, où il était, il descendit jusqu'à 400 mètres où il fut repris par le courant est. Il remonta alors à 1.600 mètres, où il rencontra un courant sud-ouest. Redescendant encore une fois sur la mer, il aperçut les phares de Douvres et eut la chance heureuse de rencontrer à ce moment un courant est, qui le conduisit vers la terre. Il franchit la côte anglaise, à une altitude de 300 mètres, et atterrit à 2 kilomètres de New-Rommay (fig. 55). Ainsi, pendant toute la durée de ce périlleux trajet, près de terre, soufflait un vent d'est; vers 1.000 mètres, un vent du sud-ouest.

On peut objecter que l'on découvrira un jour les lois du régime des vents dans toutes les saisons et à toutes les altitudes et qu'alors on pourra se rendre en ballon d'un point à un autre en louvoyant, la manœuvre se réduisant, en fin de compte, à *monter* ou à *descendre*. Mais l'échec de l'expédition Andrée, dans la campagne de 1896, montre qu'on ne peut même pas, actuellement, compter sur les résultats que donnent des observations prolongées, au moins pour les vents voisins de la surface du sol : les vents du sud qu'attendait le hardi voyageur pour s'élancer vers le Pôle Nord et, qui, au Spitzberg, auraient dû souffler au moins un jour sur trois pendant le mois de juillet, ont, cette année-là justement, brillé par leur absence.

La navigation en ballon libre au moyen des courants aériens ne peut donc pas, pour le moment, être considérée comme un moyen à peu près sûr de se diriger dans les airs.

II. — D'ailleurs, la condition primordiale de l'emploi des courants aériens est, évidemment, la possibilité de faire monter ou descendre l'aérostat pendant une période de temps déterminé, sans être forcé d'atterrir. Or, comme on l'a vu plus haut (Chap. I), pour faire monter le ballon, il faut dépenser du lest ; pour le faire descendre, il faut dépenser du gaz et, en même temps, du lest. Si, une fois dans une zone favorable, on se contente de suivre le lit du vent, arrivent les influences accidentelles, qui font toujours dépenser du lest ou perdre du gaz.

Cette façon de naviguer est donc éminemment vicieuse : priver le ballon à la fois de son lest et de son gaz, est une méthode absurde, que Pesce qualifie spirituellement de *méthode de la double saignée*. Par suite de cette façon de procéder, les plus longues ascensions exécutées jusqu'à nos jours n'ont pas dépassé une durée de vingt-quatre heures. Ainsi, l'ascension du *Zénith*, de Paris à Arcachon, dont il a été question au Chapitre IV, n'a pas duré plus de vingt-deux heures, et c'est pour la première fois que, dans les derniers jours d'octobre 1897, deux aéronautes, Surcouf et Godard, ont pu se vanter d'être restés vingt-quatre heures en ballon libre, sans atterrir un seul instant, au-dessus des vastes plaines de l'Allemagne du Nord, qu'ils ont parcourues, dans ces conditions, sur une longueur de plus de 1.600 kilomètres.

Un moyen, cependant, se présente immédiatement à l'esprit pour supprimer, au moins, la perte de gaz : fermer complètement le ballon. Mais, avec les enveloppes actuelles, le ballon éclaterait à quelques centaines de mètres en l'air, dès que l'excès de pression du gaz extérieur sur le gaz intérieur serait seulement de 5 p. 100 de la pression atmosphérique. On a proposé, il est vrai, des *ballons fermés en aluminium*, dont la paroi présenterait une résistance de 16 kilogrammes par millimètre carré. Mais l'expérience des bicyclettes faites de ce métal a montré qu'il est loin de présenter les qualités voulues : un ballon en aluminium se gondolerait avec la plus déplorable facilité.

Pilâtre de Rozier, qui avait parfaitement compris les inconvénients de la méthode de la double saignée, avait essayé d'y remédier par l'association de la montgolfière et du ballon à hydrogène. Il est évident que *c'était mettre le feu*, comme le lui disait Charles, *à côté de la poudre ;* mais c'était aussi le moyen de s'élever sans projection de lest, de s'abaisser sans perdre de gaz, et de recommencer avec quelques chances de succès l'aventureuse traversée de Blanchard. Malheureusement l'expérience de l'*aéro-montgolfière* se termina par une catastrophe : le 15 juin 1785, l'intrépide Pilâtre et son infortuné camarade Romain venaient se briser à quelques pas de la mer, à Boulogne, non à la suite de l'incendie de leur ballon, mais tout simplement à la suite de son explosion, l'enveloppe qu'ils avaient choisie n'ayant pas eu une résistance suffisante.

Meusnier, dès 1784, avait proposé, pour supprimer les pertes de gaz et de lest, l'emploi de ce qu'on peut appeler le *lest d'air*.

Le ballon conçu par le savant officier devait être entièrement fermé, et formé d'une double enveloppe : l'intérieure, l'*enveloppe imperméable*, en soie vernissée, très légère, assez grande pour n'être jamais complètement tendue, à sa partie supérieure, par le gaz qu'elle était destinée à contenir ; l'extérieure, l'*enveloppe de force*, en forte toile, inextensible, imperméable à l'air comprimé. L'espace compris entre les deux enveloppes et qu'on laissait assez grand, devait contenir de l'air que l'on y aurait comprimé à l'aide d'une pompe placée dans la nacelle et avec laquelle la *chambre à air* ainsi ménagée aurait communiqué par l'intermédiaire d'un tuyau fabriqué avec la toile de l'enveloppe de force.

Au départ, le ballon intérieur ne devait pas être gonflé complètement, et il devait y avoir de l'air dans la chambre. Quand, en montant, le ballon intérieur, d'abord flasque, serait devenu plein et qu'on aurait voulu monter encore, on aurait laissé échapper de la chambre l'air que la tension du gaz contenu dans l'enveloppe intérieure aurait comprimé ; cette dernière serait, alors, redevenue flasque. Pour descendre, on aurait simplement comprimé l'air de la chambre à air au moyen de la pompe. Comme, grâce à la disposition de l'enveloppe de force, le volume extérieur de l'aérostat eût été toujours à peu près invariable, la poussée de l'air sur le ballon aurait toujours été la même et, par suite, dans le premier cas, le ballon se serait allégé, dans le second alourdi. En somme, avec ce système, *il n'y a plus de perte de gaz* et le lest devient inutile, ou, plutôt, *l'air extérieur sert de lest*, et ce lest est inépuisable.

Les frères Robert simplifièrent l'invention de Meusnier, en remplaçant le ballon à double enveloppe par un ballon ordinaire ouvert à sa partie inférieure, contenant un *ballonnet compensateur*, en forte toile, dans lequel on comprimait l'air extérieur à l'aide de la pompe installée dans la nacelle. Ils essayèrent de s'assurer des avantages que l'invention de Meusnier pouvait présenter, dans une ascension faite à Saint-Cloud, le 15 juillet 1784, avec un aérostat ellipsoïdal dont il sera parlé dans le Chapitre suivant. Malheureusement, le ballonnet se détacha, boucha l'orifice du ballon, et cet essai se serait terminé par une catastrophe sans la présence d'esprit d'un des voyageurs, le duc de Chartres, qui, se servant de son épée comme corde de déchirure, n'hésita pas à éventrer la machine.

Il est facile de se rendre compte, d'ailleurs, que le ballonnet ne présente qu'à un faible degré les avantages que lui prêtait Meusnier. Comme le dit Lapointe, en admettant que l'aérostat soit complètement fermé, comme le voulait l'inventeur, son emploi ne permet que de petites variations de hauteur, et cela parce que l'usage de l'air comprimé est limité par la résistance du tissu constituant les enveloppes du ballon. Si on laisse ouvert l'aérostat à sa partie inférieure, ce qui est prudent, les avantages du ballonnet sont encore plus minces : la compression produite par le gaz sur l'air du ballonnet est insuffisante, il y a perte de gaz quand on comprime l'air du ballonnet, et la saignée est simple, voilà tout. Aussi, le ballonnet de Meusnier, malgré les perfectionnements proposés par Renard, qui a montré que la pompe n'est pas absolument indispensable, n'est-il pas employé par les aéronautes, au moins en tant que lest d'air.

On s'est plutôt bien trouvé de l'*hélice-lest*, dont l'idée est due à Van Hecke :

C'est une hélice à axe vertical (comme les hélices dont on se sert dans certains sous-marins pour descendre ou monter), en toile, qu'on attache simplement à un des bords de la nacelle, et qu'on actionne soit à bras, soit au moyen d'un moteur de puissance relativement faible (fig. 56). En la faisant tourner dans un sens ou dans l'autre, elle aspire l'air de bas en haut pour faire descendre le ballon, remplaçant ainsi la soupape, ou elle le refoule de haut en bas pour le faire monter, remplaçant ainsi le lest. Avec une hélice de $2^{m},50$ de diamètre, à laquelle il imprimait 100 tours par minute, Mallet a pu obtenir un mouvement ascendant de 100 mètres par minute.

Malgré cela, le poids de l'hélice, la difficulté de trouver un moteur léger et, en même temps, assez puissant pour la faire tourner et remplacer le travail musculaire de l'aéronaute, font que, malgré les services qu'elle paraît pouvoir rendre, elle est, en somme, fort peu employée.

E. Aimé, s'est, aussi, occupé, dans ces derniers temps, de cette question si délicate de la sustentation prolongée d'un ballon

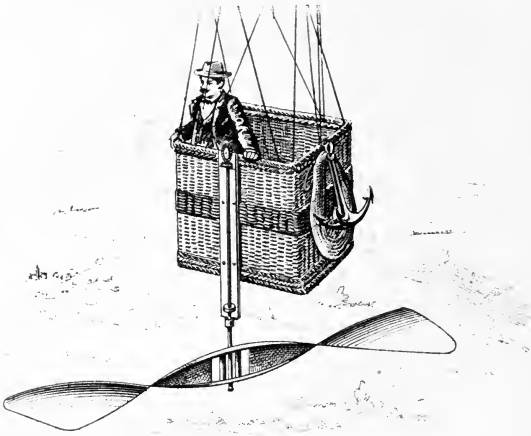

Fig. 56. — Hélice-lest.

dans l'air, et propose, pour atteindre ce but, de chauffer le gaz de l'aérostat par des injections de vapeur d'eau.

La *thermosphère* (c'est le nom qu'il donne à un ballon chauffé ainsi) est un ballon sphérique, d'une capacité de 2.500 mètres cubes, contenant seulement 2.000 mètres cubes d'hydrogène mesurés à la pression normale. Elle est donc susceptible d'atteindre, avant d'être complètement gonflée et sans perdre de gaz par son orifice inférieure, une altitude d'environ 2000 mètres. Cette thermosphère est lestée de manière à ne pouvoir être enlevée de terre par le seul effort de l'hydrogène; elle est trop lourde de 10 kilogrammes par exemple. C'est une injection de vapeur produite par un générateur

Serpollet, qui détermine et règle le mouvement ascensionnel : il suffit d'ouvrir, au moment du départ, le robinet qui fait communiquer un réservoir d'eau avec le générateur pour obtenir instantanément le délestage nécessaire. La vapeur introduite dans la masse gazeuse de la thermosphère dilate l'hydrogène, par les calories qu'elle lui cède en se refroidissant et, de plus, en augmente le volume en raison de la place qu'elle occupe elle-même sous la tension qu'elle possède à la température finale du mélange saturé : ainsi, le calcul montre qu'il suffit d'élever la température dn milieu thermosphérique de 1 à 2 degrés au-dessus de la température de l'air ambiant pour créer, avec une faible dépense de combustible, une force ascensionnelle de 10 à 20 kilogrammes. L'aéronaute dispose donc ainsi d'une force ascensionnelle qu'il peut faire varier à son gré, en cours de route, pour se maintenir en équilibre, s'élever jusqu'à 2.000 mètres, ou même descendre dans le voisinage du sol. Dès que le point de rosée est atteint, l'eau condensée se dépose sur les parois intérieures et ruisselle jusqu'à un collecteur d'où un tube de caoutchouc le ramène au réservoir placé dans la nacelle. Elle passe de là dans le générateur, et ainsi de suite.

En réglant convenablement le robinet d'alimentation et la flamme du brûleur, on pourrait, avec ce procédé, voyager jusqu'à complet épuisement de la provision de pétrole. Si l'on avait soin de se ravitailler à terre en temps voulu, le trajet pourrait même devenir indéfini.

Pesce, de son côté, reprenant une idée déjà ancienne, a proposé de placer à l'intérieur du ballon, qui serait complètement fermé, un *ballonnet-régulateur*, à l'intérieur duquel on enverrait le trop-plein de gaz.

Ce ballonnet-régulateur, en soie très résistante, serait rempli, au départ, de gaz à la pression atmosphérique. Dès le départ ou dès que le ballon serait plein, s'il partait flasque, on comprimerait le gaz à l'intérieur du ballonnet, à l'aide d'une pompe. Un robinet de détente (qu'on commanderait à la main ou à l'aide d'un petit servo-moteur électrique relié à un manomètre, et même automatique) permettrait de régler convenablement la manœuvre. Il est évident qu'après avoir sacrifié le poids de lest nécessaire pour s'élever de quelques centaines de mètres, on pourrait se maintenir en l'air, par ce moyen, presque indéfiniment. Il est clair qu'en réglant convenablement le volume du ballonnet, tout au plus arriverait-on à y avoir du gaz comprimé à 4 ou 5 atmosphères. La difficulté est de trouver une soie assez résistante. Il ne faut pas songer, en effet à un ballonnet métallique, à cause de son poids, ou il faudrait le faire de petite capacité, et on arriverait alors à être forcé d'y comprimer le gaz du ballon à 30 ou 40 atmosphères, ce qui exigerait l'emploi de puissantes pompes de compression.

Mais la thermosphère n'existe qu'à l'état de projet; la soie résistante de M. Pesce n'est pas encore trouvée et, le fût-elle, que ce système devrait encore être soumis au contrôle de l'expérience. Enfin, l'emploi d'un moteur à charbon ou à pétrole, malgré l'exemple donné par Giffard (Chap. VII) n'inspirera encore pendant longtemps qu'une médiocre confiance aux aéronautes.

Actuellement, pour obtenir une sustentation dans l'air un peu prolongée, on en est réduit à l'emploi du *guide-rope*.

Le guide-rope, d'après la théorie qui en a été faite plus haut (Chap. I), atténue, en effet, fortement les pertes de gaz et de lest et, pendant la nuit et par un temps brumeux, il donne aussi la direction du ballon. C'est grâce à lui que Mallet a pu effectuer, avec un arrêt assez prolongé, il est vrai, une ascension de 36 heures, de Paris en Allemagne. Seulement, il faut qu'un vent favorable et d'une vitesse convenable favorise l'aéronaute. De plus, son emploi présente de sérieux inconvénients : d'abord la hauteur d'une ascension se trouve limitée à quelques centaines de mètres au plus, à moins que l'on ne dispose d'une réserve de lest suffisante pour enlever complètement le guide-rope au-dessus du sol ; ensuite, le traînage de cette corde sur un terrain accidenté, où elle peut s'enrouler autour d'un arbre ou d'un rocher, peut, évidemment, devenir dangereux.

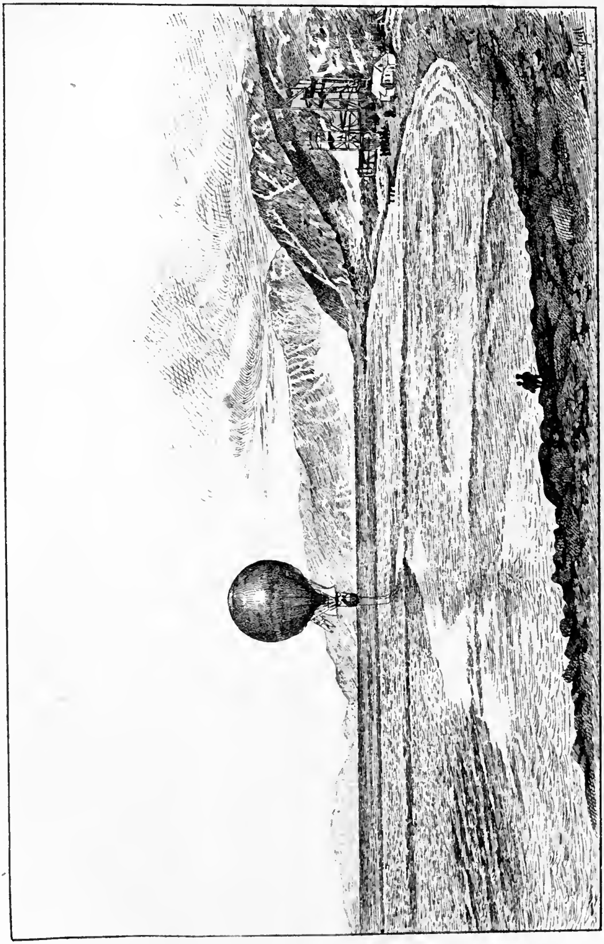

Fig. 57. — Le ballon d'Andrée.

III. — C'est en *guide-ropant,* comme disent les aéronautes, qu'Andrée, reprenant une idée de Sivel, est parti, le 11 juillet 1897, à la conquête du Pôle Nord.

Son ballon *l'Aigle* (fig. 57), construit à Paris, par Lachambre, d'un tonnage d'environ 4.500 mètres cubes et d'à peu près 20 mètres de diamètre, était à double enveloppe en ponghée au-dessous de l'équateur, à triple au-dessus. Gonflé à l'hydrogène, il pouvait porter trois voyageurs avec des approvisionnements pour quatre mois ; son imperméabilité était suffisante pour lui permettre de rester de vingt à trente jours en l'air. La descente devait s'exécuter avec une corde de déchirure, l'aérostat n'ayant pas de soupape supérieure, mais seulement de petites soupapes de manœuvre placées à l'équateur. Une *chemise* en soie, d'un poids de 40 kilogrammes, recouvrait la partie supérieure du ballon dans le but d'empêcher la neige de s'y accumuler. Une soupape de sûreté, destinée à conserver le gaz, et pouvant s'ouvrir automatiquement sous une pression de 10 millimètres d'eau, fermait la partie inférieure de l'appendice.

Le poids de l'enveloppe ne dépassait pas 1.000 kilogrammes ; celui du filet et des suspentes (qui sont au nombre de 48), 400. La nacelle, complètement close, d'une hauteur d'à peu près 2 mètres, était divisée en deux étages, l'étage inférieur contenant deux couchettes. Avec les accessoires indispensables et ses six cordes de suspension, elle pesait environ 186 kilogrammes. Elle était percée de deux ouvertures à la partie inférieure : l'une servant à descendre, à quelques mètres au-dessous de la cabine, le réchaud à l'alcool sur lequel on fera la cuisine ; par l'autre, garnie de porcelaine, on pouvait, au besoin, *cracher*, comme dit spirituellement E. Gautier. Au-dessus du cercle étaient fixés divers objets, notamment le lest, les instruments scientifiques, un traîneau, etc., sans compter le panier aux vivres. Trois guide-ropes d'un poids total de 1.000 kilogrammes, enduits de vaseline pour mieux glisser, devaient servir à maintenir le ballon à une hauteur de 250 mètres au-dessus du sol, c'est-à-dire en dessous de la région inférieure des nuages, mais en dessus des brouillards de la surface terrestre.

L'originalité du projet consistait en ce que cet aérostat était muni d'une sorte d'*appareil de direction*, composé d'une voile fixée suivant un des méridiens du ballon, appareil dont l'idée paraît due à Lhoste et Mangot, qui l'auraient essayé dans leur traversée de la Manche, de Cherbourg à Londres, le 29 juillet 1886. Il est évident que si un guide-rope est croché dans le même méridien que celui où se trouve fixée la voile, celle-ci n'a aucun effet, et le ballon dérive comme à l'ordinaire dans le lit du vent, mais avec plus de vitesse. Par contre, si le guide-rope occupe une position intermédiaire, la voile se présentera obliquement au vent, et le ballon, au lieu de suivre le lit du vent, en sera écarté, sa route pouvant faire avec lui un angle qui, d'après les expériences d'Andrée, a une valeur moyenne de 27°. En somme, on voit que, dans ce projet, le ballon n'était pas libre, mais placé dans les conditions d'un navire à voile, la résistance de la carène étant remplacée par le traînage des guide-ropes sur le sol ou dans la mer.

On a pris, comme point de départ, l'île des Danois (fig. 58). C'est là qu'a été construit le hangar où le remplissage a été effectué.

Le départ a été fixé en juillet, parce qu'alors l'air est suffisamment clair, et qu'une fois sur trois, pendant ce mois, les vents du sud règnent au Spitzberg. Le soleil qui, à cette époque, est continuellement à l'horizon, a dû éclairer continuellement la route de l'aéronaute, ce qui est un grand avantage. Sa présence aura eu encore pour effet de maintenir la température du ballon et de l'air à un chiffre assez égal pour que la force ascensionnelle de l'aérostat ne puisse subir que des variations minimes.

Une circonstance avantageuse pour les aéronautes consiste en ce que le terrain de la banquise, comme l'a démontré le dernier voyage de Nansen, ne présente que des inégalités relativement minimes, au moins jusqu'au 89e degré, de sorte que les guide-ropes pourront certainement glisser assez facilement et qu'il n'y a pas à redouter l'obstacle très sérieux que présenterait la rencontre d'une chaîne des montagnes. Une seconde circonstance favorable est qu'il ne se produit jamais de décharges électriques dangereuses dans les régions polaires.

Ajoutons, enfin, que les pluies y sont insignifiantes, et qu'il

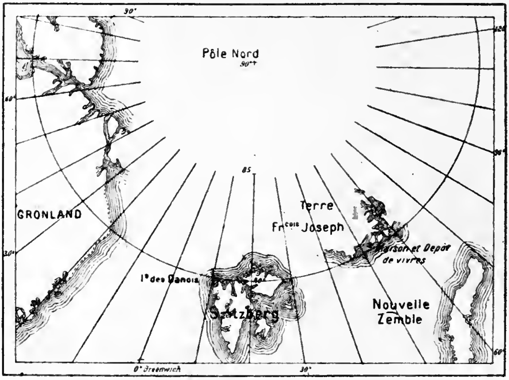

Fig. 58.

n'y a rien à craindre des tempêtes, comparativement rares à cette époque.

Des savants éminents, comme Berthelot, des aéronautes distingués, comme Lapointe et Surcouf, ont fait, au projet d'Andrée et aux moyens employés pour le réaliser, des objections plus ou moins sérieuses. Nous ne les relèverons pas, sauf une, qui est capitale, à savoir que *le régime des vents, aux environs du Pôle, est un régime de bourrasques,* comme dans l'Europe centrale. Il semble bien que l'éminent Suédois (fig. 59) n'a pas voulu tenir compte de cette loi, qu'admettent cependant tous les météorologistes.

Aussi, ne manquera-t-on pas de dire, si Andrée réussit, que c'est le hasard qui l'a favorisé. Mais n'est-ce pas le hasard qui a favorisé Hippalus lorsque cet intrépide marin a affronté le premier les vagues de l'Océan Indien pour découvrir la route de l'Inde la plus courte ? N'est-ce pas le hasard qui a favorisé Colomb ?

Cependant, l'opinion publique, inquiète à juste titre, croit peu au succès de l'expédition Andrée, et Pesce préconise, depuis quelque temps, un mode original, mais qui semble bien peu pratique, de pénétration au Pôle Nord. Il propose, pour cela, d'unir le ballon au sous-marin, le paralytique à l'aveugle.

Fig. 59. — Andrée.

En temps ordinaire, tant que la mer serait libre, le bateau submersible naviguerait à fleur d'eau. A l'approche des banquises, le sous-marin plongerait à une profondeur suffisante pour pouvoir passer en dessous et n'émergerait qu'une fois la banquise dépassée. Ce bateau aurait, dans son chargement, tout le matériel voulu pour le gonflement d'un ballon de 300 à 400 mètres cubes. Ce ballon ne serait, en réalité, qu'un simple poste d'observation, maintenu toujours à l'état captif et destiné à explorer la région, faire les observations nécessaires, prendre des vues photographiques, etc. Une fois la région bien explorée, on replierait le matériel aérostatique et, après avoir déterminé avec précision la direction du nord et orienté le gyroscope (qui, près du Pôle, doit nécessairement remplacer la boussole) dans cette direction, le sous-marin s'immergerait jusqu'au niveau inférieur de la banquise et en franchirait avec précaution l'étendue.

Dans le cas où l'ouverture la plus voisine serait trop éloignée, on pourrait choisir un point intermédiaire pour y faire, à distance, une ouverture, par l'explosion d'une torpille dirigeable. Il ne faut pas oublier, en effet, que Nansen a démontré que le banquise n'a que quelques mètres d'épaisseur.

En émergeant dans la nouvelle ouverture, qu'elle fût naturelle ou artificielle, on recommencerait la même série d'opérations. De proche en proche, par étapes successives, on finirait, croit fermement Pesce, par arriver au point tant désiré.

CHAPITRE VII

LES BALLONS DIRIGEABLES

Le Chapitre précédent montre qu'il est absolument indispensable, pour résoudre le problème de la direction des ballons, de pouvoir donner à l'aérostat une vitesse propre lui permettant de lutter contre le vent et d'en triompher. Examinons donc rapidement les efforts qui ont été faits pour résoudre ce difficile problème.

1. — Quelques aéronautes du siècle dernier avaient songé, pour rendre les aérostats dirigeables, à les munir de véritables *voiles*, comme celles des navires. Mais, quand un ballon dépourvu de tout propulseur est en équilibre dans l'air et se déplace horizontalement, ou à peu près, par rapport à la surface du sol, il se trouve, relativement à l'air ambiant, dans la plus complète immobilité : il n'a aucun mouvement qui lui soit propre ; ce n'est pas lui qui marche, c'est la masse d'air au milieu de laquelle il est immergé. Des voiles qui, nécessairement, font corps avec l'aérostat, ne pourraient lui donner aucun mouvement de translation par rapport à cette masse d'air.

Il faut donc, pour résoudre le problème de la navigation aérienne par les ballons, les munir d'un *propulseur* convenable, actionné par un *moteur*, qui soit capable de leur donner une *vitesse propre*, suffisante pour leur permettre de marcher contre le vent. Tout le système deviendra alors un navire véritable ou, comme on dit encore, un *aéronef*.

a). — Cherchons la valeur que doit avoir cette vitesse propre par rapport à celle du vent.

La question qui se pose tout d'abord est celle-ci : peut-on lutter contre le vent, avancer, en donnant au ballon une vitesse inférieure à celle du vent? ou faut-il que cette vitesse soit supérieure à celle du vent? En d'autres termes, peut-on, en louvoyant, gagner sur le vent avec une vitesse moindre, comme on

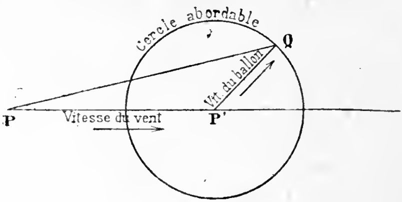

Fig. 60.

peut le faire avec un bateau? A priori, non, car, comme le fait remarquer Lapointe, un bateau, dont une partie est dans l'eau et l'autre dans l'air, n'est pas assimilable à un ballon qui, comme un bateau sous-marin, est entièrement plongé dans le fluide qui le porte. D'ailleurs l'impossibilité de louvoyer se déduit aisément du principe suivant, qu'il est impossible de ne pas admettre comme évident :

Pour un ballon dirigeable, le lieu géométrique des points abordables au bout de l'unité de temps, est, pour une même zone d'équilibre, la circonférence décrite d'un point situé sous le vent du point de départ, à une distance de ce point égale à la vitesse du vent dans l'unité de temps, avec un rayon égal à la vitesse propre du ballon (qu'on suppose constante, ainsi que celle du vent). Ainsi, P étant le point de départ (fig. 60), PP′ la vitesse du vent dans l'unité de temps (cette unité de temps étant complètement arbitraire, c'est-à-dire pouvant être une heure ou un nombre quelconque d'heures), P′Q la vitesse propre du ballon dans la même unité de temps, la circonférence P′Q est le lieu des points abordables au bout de l'unité de temps.

Supposons alors la vitesse propre P′Q du ballon plus petite que la vitesse PP′ du vent; posons $P'Q = V$, $PP' = V_1$. La circonférence abordable au bout de l'unité de temps aura pour centre P′ et pour rayon $P'Q = V$. L'*angle abordable*, c'est-à-dire la portion de l'horizon ouverte à l'aérostat (et à l'intérieur de laquelle

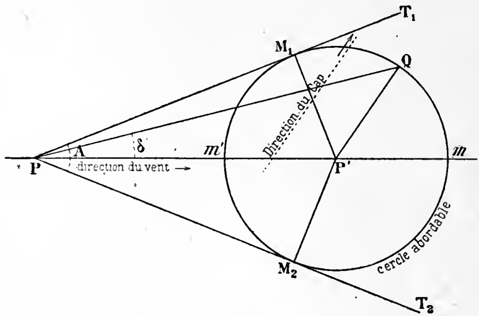

Fig. 61.

son chemin pourra être une *courbe quelconque*), sera (fig. 61) l'angle TPT_2, tangent extérieurement à la circonférence abordable et donné par la formule

$$\sin \frac{A}{2} = \frac{V}{V_1},$$

qui montre qu'il est toujours plus petit que 180°, puisque, par hypothèse, $V < V_1$. Quant à la *direction du cap*, c'est-à-dire la direction qu'il faudra donner au ballon pour aboutir en un point tel que Q, par exemple, elle sera évidemment P′Q, la direction du ballon sur le sol, c'est-à-dire le *chemin réel* parcouru, étant PQ et l'*angle de déviation* δ, c'est-à-dire l'angle du chemin réel parcouru avec la direction du vent, étant l'angle QPP′. On voit, en outre, que le *chemin maximum* que le ballon pourra parcourir, toujours dans l'unité de temps, sera $Pm = V + V_1$, le *chemin minimum* $Pm' = V_1 - V$; enfin, que la *déviation maxima* est l'angle $M_1PP' = M_2PP'$, c'est-à-dire la moitié de l'angle abordable, cette déviation étant obtenue quand les directions du cap sont $P'M_1$ et $P'M_2$, c'est-à-dire perpendiculaires à la route réelle.

Supposons maintenant $V = V_1$. Alors, la circonférence des points abordables au bout de l'unité de temps passera par le point de départ P; l'angle abordable $T_1 PT_2$ sera de 180°, car, dans ce cas,

$$\sin \frac{A}{2} = 1,$$

et l'angle de déviation maximum sera de 90°. La moitié de l'horizon, en somme, sera ouverte à l'aérostat.

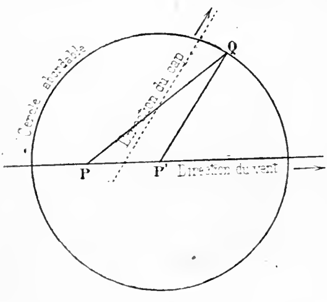

Fig. 62.

Supposons enfin la vitesse propre V plus grande que la vitesse V_1 du vent. Alors, le point de départ P du ballon est à l'intérieur de la circonférence des points abordables (fig. 62), et le ballon pourra atteindre tous les points de l'horizon, c'est-à-dire pourra suivre, dans sa marche, une *courbe fermée quelconque*. La direction du cap sera toujours P'Q, le chemin réel parcouru étant toujours P Q, et la vitesse minima $V - V_1$.

La condition d'une direction complète dans tout les sens est donc *que l'on adjoigne au ballon un moteur et un propulseur capable de lui donner une vitesse propre supérieure à celle du vent.*

Cherchons maintenant la valeur absolue à donner à cette vitesse.

Pour cela, il faut connaître, au moins approximativement, le *régime des vents* dans le parcours présumé du ballon. A Paris, par exemple à 100 mètres de hauteur à peu près au-dessus de la Seine, la vitesse du vent ne dépasse pas 10 mètres par seconde, 708 fois sur 1.000, et 12^{m}, 50 par seconde, 815 fois sur 1.000. Si l'on pouvait arriver à donner à un ballon une vitesse propre de 10 mètres par seconde, on pourrait donc, dans la région parisienne, naviguer 7 fois sur 10 contre le vent ; avec une vitesse propre de 12^{m}, 50 par seconde, on pourrait faire de même 8 fois sur 10. Enfin, avec une vitesse de 20 mètres par seconde, on pourrait se diriger à son gré contre n'importe quel vent, sauf le cas d'un ouragan. Le but à atteindre est donc bien net : une vitesse de 20 mètres par seconde ou, à défaut, une vitesse d'au moins 10 mètres.

Comment résoudre ce problème?

A priori, le choix du propulseur à employer est tout indiqué : c'est l'*hélice*, qui paraît constituer jusqu'à présent le meilleur et le plus simple des propulseurs qui sont destinés à agir sur un fluide dans lequel ils sont entièrement plongés. Il est clair que si on fixe à la nacelle d'un aérostat une hélice dont l'axe soit horizontal et qu'on la fasse mouvoir, elle avancera, grâce à la pression qu'elle exercera sur l'air, comme avance, grâce à la pression qu'elle exerce sur l'eau, l'hélice d'un bateau, et qu'elle entraînera avec elle nacelle et ballon. Seulement, il faudra, étant donné l'extrême mobilité du milieu dans lequel elle devra mordre, donner à cette hélice de grandes dimensions, et, surtout, étant donné que la résistance de l'air à une surface en mouvement augmente proportionnellement au carré de sa vitesse, lui imprimer une grande vitesse, c'est-à-dire lui faire exécuter un très grand nombre de tours dans l'unité de temps (100 à 200 tours par minute, indique l'expérience). Mais alors, il faudra développer, dans l'unité de temps, un assez grand nombre de chevaux sur l'arbre de cette hélice, et comme un ballon enlève au plus 1 kilogramme par mètre cube, on voit qu'il est nécessaire d'obtenir le cheval à un poids bien moindre que dans les moteurs de construction courante. Par suite, la condition qui domine le problème est l'emploi d'un *moteur extrêmement léger*.

Soit, maintenant, T la *puissance* à obtenir, c'est-à-dire le travail à développer dans l'unité de temps, V la vitesse propre, constante en grandeur et en direction, que l'on cherche à acquérir, R la résistance à l'avancement due à la résistance de l'air. Le mouvement du ballon étant supposé uniforme, le travail moteur est égal au travail résistant ; or ce dernier est mesuré, dans l'unité de temps, par le produit de la force résistante R par la vitesse V. En valeur absolue, le travail moteur est donc donné par la formule

$$T = RV. \tag{E}$$

Mais si l'on appelle S la *section maîtresse* de l'aérostat, c'est-à-dire la section d'aire maxima faite dans le mobile perpendiculairement au déplacement, K un coefficient qui dépend de la forme du ballon et de la pression du gaz ambiant, mais qui, en somme, est constant si le ballon se meut horizontalement, l'expérience montre que pour des vitesses telles que celles qu'il s'agit de donner à un aérostat, c'est-à-dire pour des vitesses ne dépassant pas 50 mètres, la *résistance*, égale et opposée à la *force propulsive* nécessaire, dans l'hypothèse où le mouvement uniforme est établi, peut être représentée par la formule

$$R = KSV^2. \tag{42}$$

Remplaçons, R par cette valeur dans la relation précédente, et l'on aura la formule fondamentale :

$$T = KSV^3, \tag{43}$$

qui permet, K et S étant connus, de calculer à l'avance la puissance T du moteur à employer pour obtenir une vitesse propre V.

Cette formule montre aussi que *le travail à développer croît comme le cube des vitesses*. Or, si l'on augmente le tonnage d'un ballon, la résistance, pour la même vitesse, croît à peu près comme le carré des dimensions; mais la force ascensionnelle augmente plus que le cube de ces dimensions, car le poids mort d'un aérostat n'augmente pas, à beaucoup près, proportionnellement au tonnage. Le poids disponible du moteur est donc augmenté dans des proportions encore plus grandes. Il en résulte *qu'au point de vue de la vitesse, il y a intérêt*, pour les ballons dirigeables comme pour les bateaux, *à employer les gros tonnages*.

b). — Il est évident que la résolution du problème de la vitesse à imprimer à un ballon sera grandement facilitée par la réduction à leur minimum, pour un tonnage donné, des résistances à l'avancement. Examinons donc les moyens que l'on peut employer pour atteindre ce but.

L'énorme résistance qu'un ballon sphérique présente au vent, pour un volume donné, doit d'abord faire abandonner la forme sphéroïdale et, à priori, la forme allongée ou en fuseau, est préférable, comme l'avaient compris Meunier et Brisson, dès 1784. En donnant, en effet, au navire aérien une proue et une poupe, il est évident que la proue aura pour effet d'écarter l'air sans brusquerie, d'éviter son emprisonnement et les remous qui en résultent, tandis que la poupe empêchera l'aspiration à l'arrière, en remplissant le vide partiel créé par le passage de la proue. De cette façon, la compression à l'avant ne s'augmente pas de l'aspiration sur la face postérieure.

Pour fixer les idées, considérons un ballon fusiforme comme le ballon *la France*, de Renard et Krebs. La résistance de cet aérostat, était, dans le voisinage du sol, donnée par la formule

$$R = 0{,}0215\ SV^2,$$

S étant la section maîtresse de la carène (ou *maître-couple*), V la vitesse du vent qui le frappe. Un ballon sphérique de même section éprouverait, dans les mêmes conditions, comme le montre l'expérience, une résistance

$$R' = 0,032\ SV^2,$$

c'est-à-dire une fois et demie plus grande, à très peu près. Pour que la résistance du ballon sphérique fût la même, il faudrait donc que sa section fût réduite du tiers. Pour *la France*, on avait $S = 55^{m^2},4$; il faudrait donc que la section du ballon sphérique fût de 37 mètres carrés, ce qui correspond à un rayon de $3^m,44$ et à un tonnage de 270 mètres cubes. Or le tonnage de *la France* était de 1.864 mètres cubes. Grâce à sa forme en fuseau, un ballon de 1.864 mètres cubes n'éprouve donc pas, de la part de l'air, une résistance supérieure à celle qu'éprouverait un ballon sphérique de 270 mètres cubes, c'est-à-dire près de sept fois plus petit.

Il semble même que le rôle de la poupe est plus efficace, encore, que nous venons de le dire. En effet, non seulement elle remplit le vide creusé par la proue, mais encore elle doit pénétrer dans les couches fluides en les coupant sous un angle convenable ; de cette façon, elle se fait serrer, comme le coin par les lèvres qu'il a écartées, et elle provoque la naissance, dans le sens de la marche, d'une composante qui permet de récupérer une partie du travail dépensée par la proue.

Quoi qu'il en soit les oiseaux et surtout les poissons à marche rapide des profondeurs pélagiques (*Bathypteroïs dubins*, *Centrophorus*, etc., qui vivent entre 1.000 et 2.000 mètres de profondeur) nous donnent un exemple de ce mode de conformation.

Aussi, sans s'attacher à copier servilement la Nature, ce qui est contraire aux règles d'une saine raison, Jullien d'abord, en 1850, Renard et Krebs, en 1884, n'ont pas hésité, pour déterminer la forme à donner à leurs aéronefs, à étudier le mouvement dans l'eau de solides de formes différentes, rappelant celles des poissons. En particulier, pour déterminer approximativement le rapport de la proue à la poupe, et, par suite, la position la plus avantageuse à donner au maître-couple, non seulement au point de vue du minimum de résistance, mais aussi pour éviter les mouvement giratoires de *tête à queue* qui se produisent presque toujours avec des ballons à forme symétrique, Renard et Krebs ont construit des solides en ébonite, de même longueur, mais dans lesquels le maître-couple avait des positions différentes. On les fit tomber dans l'eau avec la même vitesse, et l'on choisit comme modèle du dirigeable, le solide dont la descente eut lieu sans mouvements de lacets. C'est ainsi que l'on constata qu'un dirigeable doit marcher le gros bout en avant, la meilleure position à donner au maître-couple étant au tiers de la longueur à partir de la pointe avant, et que l'on mit fin à la fameuse querelle des *petits-boutiens* et des *gros-boutiens.*

Mais il ne suffit pas de donner au ballon une forme allongée pour diminuer la résistance du fluide ambiant. Les effets de cet allongement ne se feront sentir que si l'étoffe est toujours parfaitement tendue. Dans le cas contraire, des poches se formeraient à l'avant, aux points où la résistance serait maximum, et l'air, au lieu de glisser sur l'étoffe, s'arcbouterait en quelque sorte contre le ballon : la résistance à la marche augmenterait en d'énormes proportions et il pourrait même arriver que l'enveloppe soit étranglée dans les mailles du filet, ce qui ne laisserait pas d'être dangereux.

Les aéronautes n'ont trouvé jusqu'à présent, pour maintenir parfaitement tendue l'étoffe d'un aérostat, qu'un seul et unique moyen, proposé par Dupuy de Lôme, l'emploi du *ballonnet* de Meusnier. L'air que l'on insuffle à son intérieur, dès que l'aérostat, pour une raison ou une autre, devient flasque, en augmentant le volume du ballonnet, a, du même coup, pour effet de comprimer le gaz et de le forcer à tendre l'enveloppe, qui conserve ainsi son invariabilité de forme.

Le calcul permet facilement, d'ailleurs, de déterminer les dimensions à donner au ballonnet pour que l'aéronef, après s'être élevé à une hauteur déterminée, puisse être maintenu complètement gonflé jusqu'à l'atterrissage. Soit h_n la pression de l'air à cette hauteur, V le volume occupé alors par le gaz aérostatique, h_0 la pression au niveau du sol. Supposons le ballon arrivé à terre : le gaz, qui s'est contracté depuis le commencement de la descente, n'occupe plus, en vertu de la loi de Mariotte, qu'un volume $V \frac{h_n}{h_0}$. Dès lors, si l'on veut que l'enveloppe ne devienne pas flasque à l'atterrissage, il faut que ce volume soit égal au volume $V - v$ auquel se trouve réduite la chambre à hydrogène quand le ballonnet contient son volume d'air maximum v. De là la relation

$$V \frac{h_n}{h_0} = V - v,$$

qui donne

$$v = V \left(1 - \frac{h_n}{h_0}\right). \qquad (44)$$

Réciproquement, v étant donné, la hauteur maxima qu'on pourra atteindre sans craindre que le ballon se déforme, sera donnée par la relation

$$h_n = h_0 \left(1 - \frac{v}{V}\right). \qquad (45)$$

L'allongement du ballon, l'invariabilité de forme donnée à l'enveloppe, ne suffisent pas, évidemment, pour réduire à son minimum la résistance de l'aéronef à l'avancement. Il faut encore que la nacelle et le filet, par leur forme et leur disposition, concourent à cette diminution : c'est à quoi l'on arrive en diminuant autant que possible le nombre des cordages et en donnant à la nacelle elle-même une forme allongée.

c). — La résistance à l'avancement réduite au minimum, il faut encore, si l'on veut rendre pratique la navigation aérienne, que le dirigeable employé présente toutes les conditions de stabilité possibles au point de vue de la sécurité des passagers et de la route à suivre.

Dupuy de Lôme a. le premier montré, en 1871, que pour qu'un ballon réunisse des conditions de stabilité le rendant habitable, il faut d'abord que le système entier de l'aéronef, *ballon-filet-nacelle*, forme un tout rigide.

Supposons, en effet, qu'il n'en soit pas ainsi. Chacun des mouvements des passagers, en déplaçant le centre de gravité de l'appareil, fait porter l'effort principal, tantôt sur l'une, tantôt sur l'autre des suspentes. Il en résulte, d'une part, que chaque suspente peut, à un moment donné, avoir à supporter presque à elle seul le poids total de la nacelle et, par suite, doit avoir une résistance plus grande que si la suspension était solidarisée; d'autre part, que les passagers ne peuvent se déplacer sans produire des oscillations désagréables.

Abstraction faite, d'ailleurs, de ce genre d'oscillations, il faut encore remarquer que tout changement dans la vitesse du ballon (et ces changements sont inévitables) a pour effet de provoquer aussi des oscillations, la proue se relevant ou s'abaissant suivant qu'il y a ralentissement ou accélération du mouvement. Considérons, quelle que soit la cause qui la produise, une de ces oscillations : quand la proue se relève, le dessous du ballon offre au vent plus de surface à l'avant, moins de surface à l'arrière ; en même temps, le gaz monte vers la proue et la permanence de forme n'est plus assurée. Quand la proue s'abaisse, les mêmes phénomènes se produisent à l'arrière. Donc, quelle que soit la cause des mouvements de tangage du ballon, ces mouvements tendent à s'accentuer, et peuvent devenir dangereux. Il est vrai que ces oscillations se produiront encore si le système forme un tout rigide ; mais alors, comme il constitue une sorte de bloc de forme invariable et que le centre de gravité est toujours au-dessous du point d'application de la force ascensionnelle, elles ne tardent pas à s'amortir d'elles-mêmes.

Le principe de la méthode employée par Dupuy de Lôme pour arriver à faire de l'aéronef un tout rigide, est le suivant :

On relie chaque point P de la nacelle (fig. 63), non à un point unique, comme dans les ballons ordinaires, mais à deux points A et B choisis de telle façon que la verticale PV du point P soit toujours comprise à l'intérieur de l'angle APB. Quand ce système APB s'incline pour une cause quelconque, le poids de la nacelle tend simultanément les deux cordages AP, BP, et il est évident que le système possède, dès lors, la même rigidité que s'il était formé de barres métalliques solidement rivées à leurs articulations. Si P et Q désignent deux points placés aux extrémités de la nacelle, les suspentes extérieures, AP et BR constituent ce qu'on appelle le *filet porteur*, les suspentes intérieures AQ et BP constituant ce qu'on appelle le *filet des balancines*.

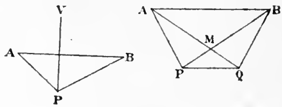

Fig. 63.

Ces conditions de stabilité ne sont pas, d'ailleurs, suffisantes. La *stabilité de route*, c'est-à-dire la stabilité dans la direction, est absolument nécessaire pour le problème dont on poursuit la réalisation.

Pour l'obtenir, il faut d'abord éviter les mouvements de tête à queue : on a vu plus haut comment on y arrive en donnant aux dirigeables une forme dissymétrique. Il faut ensuite pouvoir maintenir ou modifier à volonté, et par un moyen simple, la direction suivie : c'est ce que l'on obtient, comme dans les bateaux, à l'aide d'un *gouvernail*. Seulement, comme le gouvernail serait évidemment impuissant à maintenir la stabilité de route, si la résistance variait à chaque instant (ce qui serait le cas avec un ballon qui ne se maintiendrait pas complètement gonflé), on voit que la permanence de la forme doit être considérée non seulement comme un moyen de diminuer les distances à l'avancement, mais encore comme un moyen d'assurer la stabilité de route.

Un autre genre de stabilité encore plus important et, par suite, dont il faut encore se préoccuper, c'est la *stabilité verticale*.

Le principal obstacle à la stabilité verticale est causé par les ruptures d'équilibre qui, comme on l'a vu dans le Chapitre précédent, sont, actuellement, presque impossibles à éviter. Non seulement, grâce à ce défaut commun à tous les ballons, la longueur du voyage est toujours fortement diminuée, mais, de plus, une rupture d'équilibre, si petite qu'elle soit, donne toujours naissance à des mouvements de tangage plus ou moins désagréables. Supposons, en effet, que cette rupture d'équilibre donne, par exemple, une vitesse ascendante v au ballon (fig. 64); cette vitesse se composera avec la vitesse V du ballon, et la résistance à l'avancement s'exercera suivant la direction α, ce qui augmentera d'abord, de beaucoup, la résistance et fera naître, inévitablement, des oscillations qui pourront devenir dangereuses avec des ballons très allongés. Toutefois le calcul montre qu'en augmentant la vitesse propre de l'aéronef, on améliorerait de plus en plus sa stabilité dans le plan horizontal. Il n'en est pas moins vrai que toute disposition qui empêcherait le déplacement suivant la verticale serait très précieuse.

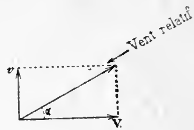

Fig. 64.

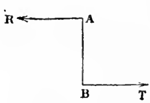

Fig. 65.

Enfin, il est évident qu'il faudrait aussi s'arranger de façon que la distance qui sépare les *centres de traction* et *de résistance* B et A de l'aérostat (ce dernier étant un point placé entre le centre de gravité de l'aérostat et son centre de poussée, lequel coïncide à peu près avec le centre de gravité du ballon proprement dit) fût nulle ou, au moins, aussi petite que possible. On réduirait ainsi à son minimum l'effet que produit le *couple de renversement* que forment les deux forces de traction et de résistance, couple dont le bras de levier AB (fig. 65) est la distance des points d'application de ces deux forces, égales et opposées puisque le mouvement de l'aéronef est supposé uniforme. Malheureusement, la difficulté que l'on éprouve à placer l'arbre de l'hélice en dehors et au-dessus de la nacelle rend très difficile l'exécution de cette condition.

d). — Examinons, maintenant, la question du moteur.

Les moteurs actuellement en usage peuvent se ramener à trois types principaux : les *machines à vapeur*, les *moteurs à gaz* (parmi lesquels les *moteurs à pétrole*), les *machines électriques*, (piles, accumulateurs, etc.). Reste à savoir lequel de ces trois types est appelé à fournir le moteur, à la fois léger et puissant, que l'on désire.

Mais il y a deux façons d'envisager la question de légèreté : ou la durée pendant laquelle le travail doit être dépensé n'importe pas, ou il faut que l'on puisse compter sur un débit de travail de longue durée.

Dans le premier cas, il suffira de s'enquérir d'un moteur dont l'unité de puissance soit aussi légère que possible, c'est-à-dire qui donne le plus de chevaux possible, pour le poids le plus petit possible. C'est ce qu'a fait Giffard, en 1852, comme on le verra plus loin.

Dans le second cas, et c'est le seul intéressant, car un dirigeable doit pouvoir naviguer, pour être pratique, pendant au moins dix heures consécutives, il faut tenir compte de la provision à emporter pour faire fonctionner le moteur pendant ce temps : de l'eau si c'est une machine à vapeur, des liquides convenables si c'est une pile, du pétrole si c'est une machine à hybrocarbures. Il faut alors, non seulement un moteur léger par unité de puissance, mais encore il faut que la dépense de l'unité de travail pendant l'unité de temps corresponde à une addition de poids aussi faible que possible.

L'étude des différentes sortes de machines montre qu'actuellement ce sont les moteurs à pétrole qui paraissent présenter le plus d'avantages et, qu'à défaut, une machine à vapeur vaut encore mieux qu'une machine électrique comme celles qu'ont employé Baumgarten et Wölfert, A. et G. Tissandier, Renard et Krebs.

Cependant ces machines, piles ou accumulateurs ont un immense avantage : conservant le même poids, à très peu près, pendant la durée de l'ascension, elles aident fortement à la stabilité verticale, tandis que les machines à vapeur ou à gaz s'allègent continuellement. Aussi, n'est-il pas douteux que si l'on trouvait un jour une source d'électricité pouvant fournir une grande somme de travail pour un poids assez faible, par exemple, des accumulateurs beaucoup plus légers que ceux que l'on fabrique actuellement, on reviendrait à ce genre de moteurs.

II. — Ce n'est pas du premier coup que l'on est arrivé à établir une théorie rationnelle des dirigeables : c'est à la suite d'une longue série d'efforts souvent incohérents.

Ainsi le dirigeable construit en 1784 par les frères Robert, d'après les idées de Meusnier et de Brisson, ne présentait de remarquable que sa forme ellipsoïdale et une nacelle allongée. Le moteur, formé de rames en taffetas, était plus qu'insuffisant et ce n'est probablement que grâce à son gouvernail que, dans l'ascension du 19 septembre 1784, les aéronautes parvinrent à dévier de quelques degrés de la ligne du vent.

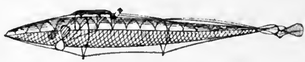

Fig. 66. — Dirigeable de Jullien.

Le modèle de dirigeable que Jullien, en 1850, fit marcher contre le vent, dans l'enceinte de l'Hippodrome de Paris, constituait un progrès à cause de sa forme en fuseau et de sa dissymétrie (fig. 66). Les ailes que l'inventeur avait placées de chaque côté de l'aérostat, avaient aussi le mérite de constituer de véritables hélices; mais le moteur qui les actionnait, un simple mouvement d'horlogerie, était évidemment insuffisant.

Le grand dirigeable, d'un tonnage de 2.500 mètres cubes, que Giffard, encouragé par les expériences de Jullien, lança dans les airs, le 25 septembre 1852, était loin d'être sans défauts (fig. 67). Il ne réalisait (comme le remarque R. Soreau dans le *Bulletin* *de la société des Ingénieurs civils de France*, auquel nous avons fait de nombreux emprunts) ni la permanence de forme, ni la dissymétrie nécessaire pour éviter les mouvements de tête à queue, ni la rigidité du système, ni la stabilité verticale ; enfin, son constructeur avait eu le tort de le remplir de gaz d'éclairage, au lieu d'hydrogène, et de se servir d'une nacelle de forme

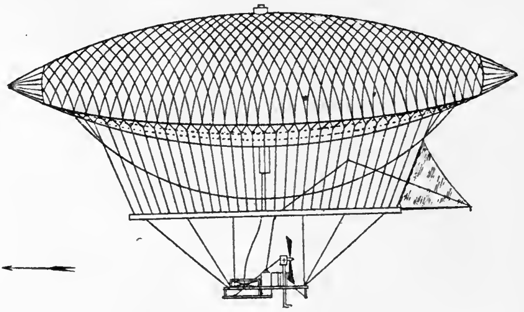

Fig. 67. — Dirigeable de Giffard.

ordinaire. En revanche, le moteur, une machine à vapeur à cylindre vertical et à tirage forcé, était, pour l'époque, admirable : non seulement, elle avait été agencée de manière à éliminer presque mathématiquement tout danger d'incendie, mais encore, quoique d'une force de 3 chevaux, elle ne pesait que 53 kilogrammes par cheval, pour une heure de marche. La bielle de cette matière actionnait, d'ailleurs, à raison de 110 tours par minute, un hélice à 3 branches de $3^{m},40$ de diamètre.

Néanmoins, à cause des défauts que nous venons de signaler, le dirigeable de l'éminent ingénieur ne put atteindre, le 25 septembre 1852, qu'une vitesse propre de $2^{m},50$. Lorsque, en 1855, Giffard voulut atteindre une vitesse de 5 mètres en augmentant la force de sa machine et l'*allongement* de son ballon, c'est-à-dire le rapport de la longueur à la hauteur, les mouvements de tangage devinrent si violents que son constructeur n'échappa que par miracle à la mort.

Le dirigeable de Dupuy de Lôme (fig. 68), quoique non dissymétrique, était bien supérieur, comme construction, à ceux de Giffard. Grâce à l'emploi du ballonnet ABC, la rigidité de forme était parfaitement obtenue. La présence de deux filets, le *filet*

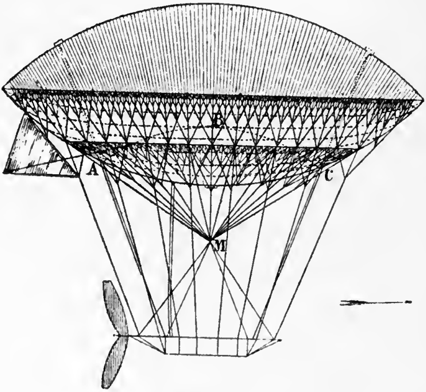

Fig. 68. — Dirigeable de Dupuy de Lôme.

porteur et le *filet des balancines*, assurait la stabilité. La forme allongée de la nacelle, le remplacement de la partie supérieure du filet par une simple *housse*, remplacement qui avait pour conséquence la suppression du capitonnage du filet, contribuaient grandement à diminuer la résistance à l'avancement. Enfin, l'éminent ingénieur avait eu la prévoyance de gonfler son ballon à l'hydrogène.

Malheureusement, par excès de prudence, peut-être aussi par le désir de maintenir autant que possible la stabilité verticale (car la machine humaine, comme la pile, conserve toujours à peu près le même poids) et d'assurer à ses expériences, effectuées en 1871 et 1872, la plus grande durée possible, Dupuy de Lôme perdit, en partie, l'avantage de la force ascensionnelle considérable que possédait son ballon en employant, pour actionner l'hélice, au lieu d'un moteur à vapeur, une équipe de huit hommes.

Le 11 février et le 2 mars 1882, Baumgarten et Wölfert essayèrent, à Charlottenburg, un aérostat allongé, à propulsion électrique, qui présentait le caractère particulier d'être sans force

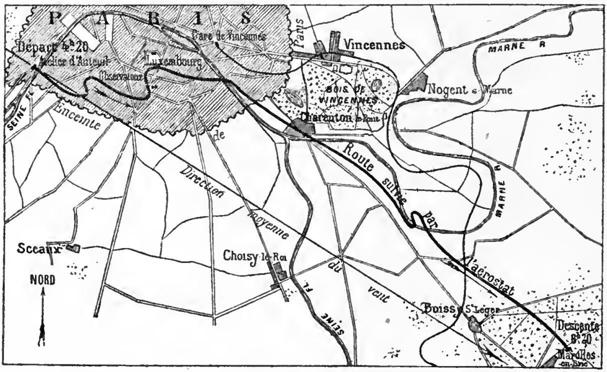

Fig. 69. — Ascension en dirigeable de A. et G. Tissandier. (26 septembre 1884).

ascensionnelle au départ, étant muni de deux hélices destinées, l'une à lui assurer un mouvement ascensionnel, l'autre un mouvement de propulsion. Les expériences faites ne donnèrent aucun résultat.

Il n'en fut pas de même des expériences de A. et G. Tissandier.

Comme Baumgarten et Wölfert, A. et G. Tissandier furent séduits par les avantages que présente l'emploi d'une pile comme source de force motrice au point de vue de l'absence presque complète de tout danger d'incendie, de la stabilité verticale et de la facilité de la mise en marche (puisqu'un simple commutateur suffit pour lancer le courant). Après un premier essai infructueux, le 8 octobre 1883, ils exécutèrent, le 26 septembre 1884, une très belle ascension, pendant laquelle, à trois reprises différentes, (fig. 69) ils luttèrent victorieusement contre le vent, dont la vitesse était d'environ 3 mètres à la seconde, avec un dirigeable

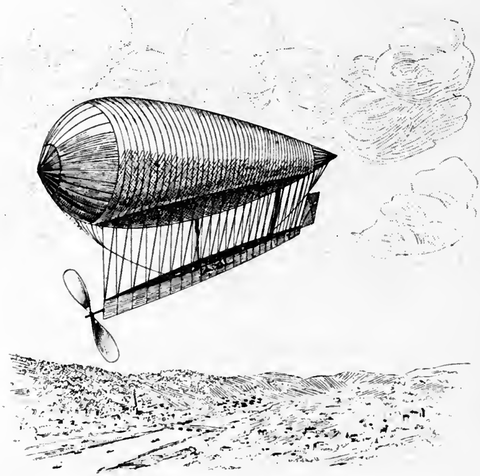

Fig. 70. — Le dirigeable *la France* dans les airs.

qui, d'ailleurs, ne différait pas essentiellement de ceux de Giffard.

Mais, un mois auparavant, le 9 août 1884, Renard et Krebs, attachés aux ateliers militaires de Chalais-Meudon, avaient exécuté, à l'aide de leur aéronef *la France*, un des beaux voyages aériens qui ont établi leur réputation.

En gros, *la France* avait la forme d'un énorme cigare ou d'un énorme poisson, marchant le *gros bout en avant*, en dessous duquel serait suspendue une périssoire servant de nacelle (fig. 70).

Le tonnage de ce ballon, gonflé à l'hydrogène, était d'à peu près 1.864 mètres cubes, sa longueur de 50^{m},40, son diamètre maximum de 8^{m},40. La section maîtresse (ou maître-couple) de la carène, de 55 mètres carrés de superficie environ, était placée au tiers de la longueur, à partir de la pointe avant. La méridienne du ballon se composait de deux arcs paraboliques ayant pour axe l'intersection du maître-couple avec le plan méridien. La forme dissymétrique adoptée était conforme aux expériences indiquées plus haut. Elle est, d'ailleurs, celle qu'indique le calcul pour les *sous-marins à grande vitesse et à tirant d'eau constant*, c'est-à-

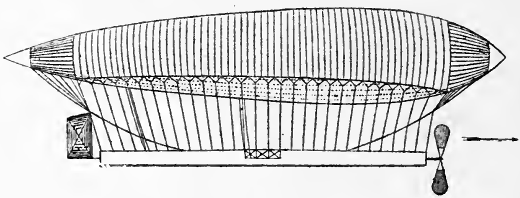

Fig. 71. — Dirigeable de Renard (*la France*).

dire pour les sous-marins qui doivent se mouvoir dans un plan à peu près horizontal.

Le ballon, comme celui de Dupuy de Lôme, était muni d'un ballonnet. Deux tuyaux partant du ballon descendaient dans la nacelle : l'un destiné à remplir d'air le ballonnet au moyen d'un ventilateur; l'autre servant à assurer une issue à l'excès de gaz produit par la dilatation. Une housse, comme dans le ballon de Dupuy de Lôme, remplaçait le filet; mais elle était formée simplement de fuseaux transversaux, ce qui permettait de la rendre proportionnellement plus légère que celle employée par l'éminent ingénieur. La nacelle était rattachée au ballon par des suspentes, légères et courtes (fig. 71) qui la reliaient presque verticalement à la housse, en dessinant à peu près deux plans parallèles à l'axe, disposition qui avait pour effet de diminuer de moitié la résistance du filet, comparée à celle de celui de Dupuy de Lôme, mais qui a pour effet aussi de diminuer la stabilité du système, par suite du rapprochement du centre de gravité et du centre de poussée de l'aérostat.

L'allongement de la *France* étant très considérable, le mode de suspension par réseaux triangulaires, indiqué par Dupuy de Lôme, n'était plus suffisant. Renard et Krebs en imaginèrent un autre : au lieu de passer par un même point nodal, les balancines furent groupées en deux faisceaux et venaient s'attacher sur deux traversières qui, partant des pointes des faisceaux, s'attachaient vers le milieu de la nacelle.

Celle-ci était formée de quatre perches rigides de bambou, reliées entre elles par des montants transversaux ; sa longueur était d'environ 33 mètres, et sa hauteur au milieu de 2 mètres. Elle était recouverte de soie de Chine tendue sur ses parois, ce qui donnait une résistance bien moindre qu'avec des parois d'osier. Des fenêtres étaient ménagées sur les côtés.

Le moteur était constitué par une machine Gramme, qui ne pesait que 100 kilogrammes pour 8,5 chevaux, et une *pile légère*, très puissante, que les lecteurs trouveront décrites dans les *Sources d'énergie électrique*, par E. Estaunié : cette pile pouvait donner un cheval-heure par 20 kilogramme de poids à peu près. Le moteur transmettait son mouvement, par l'intermédiaire d'un pignon engrenant avec une grande roue, à l'arbre de l'hélice. Cet arbre, creux afin d'être plus léger, d'une longueur de 15 mètres, était installé sur des paliers oscillants, maintenus en place par des tendeurs : il y avait ainsi rapprochement des centres de traction et de résistance et, par suite, augmentation de la stabilité verticale.

L'hélice, formée deux palettes évidées au centre, d'un diamètre de 7 mètres, était faite de deux tiges de bois reliées entre elles par des lattes convenablement recourbées et recouvertes d'un tissu en soie vernie, aussi tendu que possible. Au lieu de la placer à l'arrière, comme dans tous les aéronefs précédents, on l'avait placé *à l'avant*, ce qui augmente, il est vrai, la résistance au déplacement, mais ce qui facilite, par contre, la manœuvre, du gouvernail et, paraît-il, la bonne tenue du ballon contre le vent, l'hélice mordant ainsi dans un milieu qui n'a pas été encore troublé par le passage de la machine.

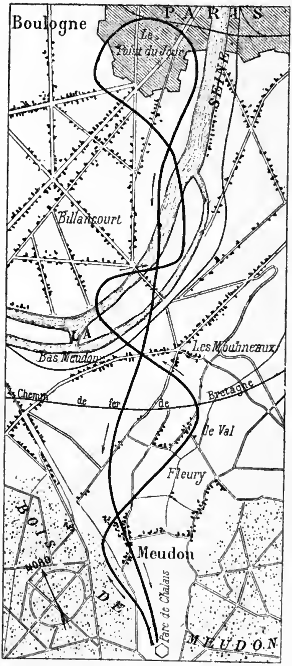

Fig. 72. — Ascension en dirigeable de Renard et Krebs (23 septembre 1885).

L'évaluation du travail nécessaire pour imprimer à l'aérostat une vitesse donnée avait été faite de deux manières : 1° en partant de la formule générale donnée plus haut et des données posées par Dupuy de Lôme à propos de la résistance de l'air, dans ses expériences; 2° en appliquant la formule admise dans la marine pour passer d'un navire à un autre de forme très peu différente, et en supposant que, dans le cas du ballon, les travaux sont dans les rapports de densité des deux fluides, air et eau. On arriva ainsi à admettre la nécessité d'un travail d'au moins 5 chevaux par seconde pour obtenir une vitesse propre de 8 à 9 mètres ; d'où, en tenant compte du rendement de la machine, un travail électrique sensiblement double, mesuré aux bornes de la machine, soit de 12 chevaux.

Le *gouvernail*, directement fixé à l'arrière de la nacelle, comme dans les bateaux, différait de ceux employés jusqu'alors, et par sa forme et par sa position. Il était fait de deux étoffes de soie, bien tendues sur un même cadre, mais très légèrement éloignées l'une de l'autre, de façon à constituer deux pyramides quadrangulaires, de très faibles hauteurs, accolées l'une à l'autre. Cette forme a pour effet de rendre la résistance de l'air sur le gouvernail sensiblement perpendiculaire au cadre, tandis qu'avec la forme ordinaire, cette résistance produit, surtout aux grandes vitesses, une concavité plus ou moins accentuée du côté le plus éloigné du ballon, d'où une résistance oblique qui a pour effet de diminuer l'action du gouvernail.

Le 9 août 1884, le ballon *la France*, ayant à son bord ses deux constructeurs, partait des ateliers militaires de Chalais-Meudon par un temps calme, évoluait avec la plus grande docilité dans le voisinage de l'établissement, puis rentrait à Chalais, où il descendait sur la pelouse même du départ, malgré les écueils dont elle est entourée. Il avait parcouru 7.600 mètres en 20 minutes.

Cette expérience eut un retentissement considérable, et provoqua le plus vif enthousiasme. Ce n'était cependant qu'une ascension d'essai, dans laquelle les aéronautes n'avaient pas osé employer toute leur force motrice, et s'étaient hâtés de rentrer au port, désireux simplement de se donner à eux-mêmes la démonstration pratique qu'ils avaient préparée pour les autres.

Les ascensions ultérieures, exécutées sur de plus longs parcours et dans des conditions atmosphériques moins favorables, furent souvent contrariées par des accidents de machine.

La dernière, celle du 23 septembre 1885, fut celle qui donna, le plus long parcours et les plus beaux résultats : le ballon partit *vent debout* et vint jusqu'à Paris, décrivant une courbe élégante dont les inflexions régulières prouvent d'une manière frappante la puissance relative du moteur et la sûreté de la manœuvre (fig. 72). Après avoir franchi les fortifications, il retourna vent arrière à Chalais, qu'il gagna en moins d'un quart d'heure. C'est dans cette ascension que la vitesse moyenne atteignit sa plus grande valeur, soit $6^{m},50$.

III. — Peut-on dire, après les belles expériences de Chalais-Meudon, que le problème de la navigation par les ballons est résolu au point de vue pratique ? Non !

D'abord la vitesse maximum de $6^{m},50$ obtenue avec la *France* est évidemment insuffisante : il faudrait la doubler et, par suite, rendre le moteur huit fois plus léger, toutes choses égales d'ailleurs, pour pouvoir lutter contre le vent au moins 7 fois sur 10 ; il faudrait, ensuite, porter au moins à 10 heures la durée du trajet qui, avec la pile légère Renard, aurait pu, tout au plus, être de 2 heures. Enfin, toutes les tentatives faites depuis les expériences de Renard, à l'aide de ballons fusiformes et de propulseurs différant plus ou moins de l'hélice, pour obtenir des vitesses supérieures, n'ont pas donné des résultats supérieurs à ceux obtenus par l'éminent officier.

D'ailleurs, on peut se demander si le jour où on atteindra des vitesses de 10 à 12 mètres par seconde, l'étoffe d'un dirigeable sera assez solide pour résister aux pressions contre lesquelles elle aura à lutter à la moindre déformation, même quand on provoquerait une surpression intérieure par l'allongement de l'appendice.

En réalité, la question n'est pas là. Il ne s'agit pas, pour faire entrer victorieusement les dirigeables dans la pratique, de leur donner une vitesse propre de 10 à 11 mètres. Pour qu'ils puissent faire, comme un train de chemin de fer, leurs 60 kilomètres à l'heure, c'est à une vitesse propre d'au moins 30 mètres qu'il faut arriver, et, dans ces conditions, une enveloppe d'acier ne serait pas de trop pour garantir la sécurité des voyageurs. Mais un pareil aérostat, quand même on le remplirait d'*hydrogène chimiquement pur*, serait alors *plus lourd que l'air*, c'est-à-dire plus lourd que la masse d'air qu'il déplace, d'où une nouvelle complication dans la résolution du problème poursuivi.

Il est vrai que, comme on le verra dans le chapitre suivant, à mesure que la vitesse augmente, la question de sustentation perd une partie de son importance, la résistance produite par les grandes vitesses pouvant, en effet, donner lieu, si le ballon est convenablement disposé, à des réactions verticales de bas en haut, c'est-à-dire à des composantes de soulèvement capables de suppléer à l'insuffisance de plus en plus marquée de la force ascensionnelle. Mais alors, on arrive fatalement à cette conclusion que, seuls, des *appareils plus lourds que l'air* fourniront la solution du problème de la navigation aérienne, l'Aviation devenant ainsi le prolongement naturel de l'Aérostation.

Remarquons, pour finir, que même si l'expérience démontrait que les enveloppes telles que celles dont on se sert actuellement pour les ballons peuvent résister aux fortes pressions que fait naître une vitesse de 10 à 12 mètres, le problème de la navigation aérienne par les dirigeables, même restreint dans ces faibles limites, ne serait pas pour cela résolu. Comme le dit très bien E. Aimé, on ne possédera jamais, dans un dirigeable, que l'*illusion de la direction*, tant qu'on n'aura pas trouvé un moyen efficace d'empêcher la double saignée : on sait combien on en est encore loin.

Ce n'est pas à dire, cependant, que les ballons dirigeables soient pour l'instant, complètement inutiles. Ils pourront être précieux, au contraire, à une armée en campagne, à une ville assiégée, comme engins d'exploration. Mais, même à ce point de vue spécial, leur supériorité sur les ballons captifs n'est point encore tellement marquée que l'on ait pu les substituer dans ce service.

CHAPITRE VIII

LES LOIS DE L'AVIATION

En 1864, l'aéronaute Nadar (fig. 73), frappé des échecs de toutes les tentatives de navigation aérienne à l'aide des aérostats, n'hésitait pas à publier dans la *Presse* un manifeste, devenu fameux dans l'histoire de l'Aéronautique, et qui commençait par ces mots : *ce qui a tué, depuis quatre-vingts ans, tout à l'heure qu'on la cherche, la direction des ballons, ce sont les ballons.*

Fig. 73. — Nadar.

On s'est moqué de Nadar, de ses partisans G. de La Landelle, Ponton d'Amécourt et Babinet. Il faut bien reconnaître, cependant, que les essais infructueux des Giffard, des Dupuy-de-Lôme, des Tissandier et des Renard leur ont donné raison.

Depuis ce manifeste, d'ailleurs, les hommes de science les plus sérieux, *jetant*, pour ainsi dire, *par-dessus bord*, la découverte des Montgolfier, au lieu de s'attacher à diriger « la vessie flottante de Charles », comme on l'avait fait jusqu'alors, croyant que là était la solution (quoique la Nature, qui a créé l'oiseau, n'ait jamais rien fait qui ressemble à un aérostat), ont essayé de faire la conquête de l'air à l'aide d'appareils *plus lourds que l'air*, c'est-à-dire formés, comme les oiseaux (qui ne sont, en somme, que des mécaniques volantes), de parties plus lourdes que l'air. C'est ce problème qui constitue ce qu'on appelle le *Problème de l'Aviation.*

I. — La sustentation et le mouvement dans l'air d'un corps *plus lourd que l'air* ne pouvant s'expliquer, comme l'avait pressenti Léonard de Vinci (Introduction), que par suite de la résistance que ce fluide oppose au mouvement de ce corps, il est clair que toute recherche relative à l'Aviation doit se baser sur les *lois de la résistance de l'air* au mouvement d'un corps qui y est entièrement plongé. Il est donc essentiel, pour avoir une idée de la nature du problème de l'Aviation, de connaître ces lois, au moins dans le cas le plus simple, c'est-à-dire celui du mouvement dans l'air d'une surface plane d'épaisseur négligeable, un *carreau*, pour parler le langage technique.

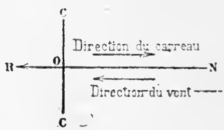

Fig. 74.

Supposons d'abord que le carreau CC possède un mouvement orthogonal, c'est-à-dire un mouvement dirigé suivant sa normale ON ou, ce qui revient au même, supposons que le carreau soit frappé normalement par le vent (fig. 74). Dans ce cas, l'expérience montre que la résistance R éprouvée par le carreau, normale à sa surface, augmente proportionnellement à cette surface et au carré de sa vitesse, de sorte qu'elle peut être représentée par la formule

$$R = KSV^2, \qquad (46)$$

dans laquelle R désigne la résistance en kilogrammes, S la surface du carreau en mètres carrés, V la vitesse du vent en mètres par seconde, et K un coefficient que l'on peut regarder comme constant lorsque le mouvement du carreau a lieu dans une couche d'air de poids spécifique à peu près constant, et que sa vitesse ne dépasse pas 50 mètres à la seconde. On s'accorde généralement aujourd'hui à donner à ce coefficient la valeur

$$K = 0{,}071, \tag{47}$$

quoique Otto Lilienthal penche pour la valeur $K = 0{,}13$.

Supposons maintenant que le carreau CC possède un mouvement oblique, ou, ce qui revient au même, soit frappé par le vent sous un angle quelconque α, *l'angle d'attaque*, comme on l'appelle (fig. 75). L'expérience montre alors que, non seulement la résistance normale R que supporte le carreau est proportionnelle à sa surface et au carré de la vitesse, mais encore qu'elle varie avec l'angle d'attaque, étant proportionnelle, à très peu près, au sinus de cet angle, au moins lorsqu'il n'est pas trop grand. On peut alors la représenter, à l'aide de la formule

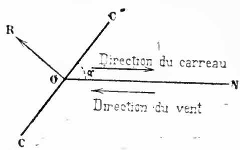

Fig. 75.

$$R = K'SV^2 \sin \alpha, \tag{48}$$

K' désignant encore un coefficient, constant dans les mêmes limites que le précédent, mais dont la valeur, à peu près double de la précédente, est

$$K' = 0{,}15. \tag{49}$$

Ici une remarque importante s'impose. Quand le mouvement du carreau est orthogonal, c'est-à-dire a lieu normalement à la direction du vent, le point d'application de la résistance ou *centre de pression* coïncide avec le centre de gravité du carreau et, par suite, si le carreau a une forme régulière, avec son centre de figure. Mais si le mouvement est oblique, il en est autrement : *le centre de pression ne coïncide plus avec le centre de gravité* G, mais est placé un peu au-dessus, comme Bertinet, un des premiers, l'a fait remarquer et comme Pottier l'a vérifié directement dans ses expériences sur les cerfs-volants.

La théorie du parachute, celle du mode de mouvement des aérostats dans l'air et, enfin, celle du cerf-volant, dont les applications prennent, tous les jours, une importance de plus en plus grande, sont des conséquences directes des lois précédentes.

a). — Considérons un carreau de surface S, de poids P, abandonné à l'action de la pesanteur et assujetti à se maintenir horizontal pendant sa chute. Tout d'abord le carreau tendra à prendre un mouvement uniformément accéléré dont la vitesse serait, à chaque instant, donnée par la formule :

$$V = gt,$$

g désignant l'accélération due à la pesanteur, soit $9^{m},81$, t la durée de la chute. La résistance de l'air intervenant, le poids du carreau sera, à chaque instant, contre-balancé par une force, verticale aussi, dirigée de bas en haut, augmentant proportionnellement au carré de la vitesse, qui finira par devenir égale au poids du carreau. A partir de cet instant, aucune force n'agira plus sur le carreau et on peut admettre (ce qui n'est pas tout à fait exact) que celui-ci, en vertu de la vitesse acquise, continuera sa descente d'un mouvement uniforme au lieu d'un mouvement uniformément accéléré. Soit V la vitesse de ce mouvement uniforme, vitesse qu'on appelle la *vitesse de régime*. A l'instant où le carreau a atteint cette vitesse, son poids est égal à la résistance de l'air. On a donc, à cet instant,

$$P = R,$$

ou

$$P = KSV^2,$$

d'où la formule :

$$V = \sqrt{\frac{1}{K} \frac{P}{S}}, \qquad (50)$$

qui montre que *la vitesse de régime d'un carreau qui tombe orthogonalement sous l'influence de son propre poids est proportionnelle à la racine carrée de ce poids et en raison inverse de la racine carrée de sa surface.*

Supposons $P = 1$ kilogramme, $S = 1$ mètre carré. Alors, comme $K = 0{,}071$,

$$V = \sqrt{\frac{1}{0{,}071}} = 3^{m},75.$$

Une surface pesant 1 kilogramme par mètre carré prend donc, sous l'influence de son poids et par suite de la résistance de l'air, une vitesse de régime de $3^{m},75$ par seconde environ.

Ceci posé, considérons une surface horizontale *gréée en parachute*, par exemple un cercle de toile AB, bien tendu, que des cordelettes de même longueur, disposées régulièrement, attachent à un point central C situé au-dessus et auquel nous supposons appliqué un certain poids P (fig. 76). Supposons que ce poids soit de 80 kilogrammes (c'est-à-dire celui d'un homme moyen, avec la nacelle qui le contient), que le poids du parachute proprement dit, c'est-à-dire de la surface sustentatrice AB, soit de 20 kilogrammes pour une surface de 100 mètres carrés, surface qui correspond à un rayon de $5^{m},64$. Négligeons la résistance opposée par l'air à la nacelle et aux autres engins du parachute. La vitesse de régime, d'après le calcul précédent, sera donc de $3^{m},75$ seulement, c'est-à-dire relativement assez faible, ce qui permettra, quelle que soit la hauteur d'où on s'est élancé, d'atterrir sans trop de danger. Le temps que met la vitesse de régime à s'établir est d'ailleurs donné par la formule

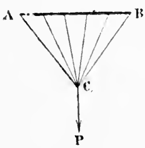

Fig. 76.

$$t = 2{,}3 \times \frac{V}{2g} \log \frac{V + V_1}{V - V_1}, \tag{51}$$

dans laquelle g désigne l'accélération due à la pesanteur, V_1 la vitesse réelle du parachute à chaque instant, V sa vitesse de régime, la résistance du poids qu'il soutient étant négligée.

Cette formule qui montre que, rigoureusement, la vitesse de régime n'est atteinte qu'après un temps infini, permet cependant de calculer approximativement le temps qu'elle met à s'établir. Si l'on veut, par exemple, dans le cas considéré, calculer ce temps à $1/100^e$ de seconde près, il suffira d'y faire $V = 3^m,76$, $V_1 = 3^m,75$. On verra facilement qu'elle est atteinte après $1^s,2$ à peu près de chute.

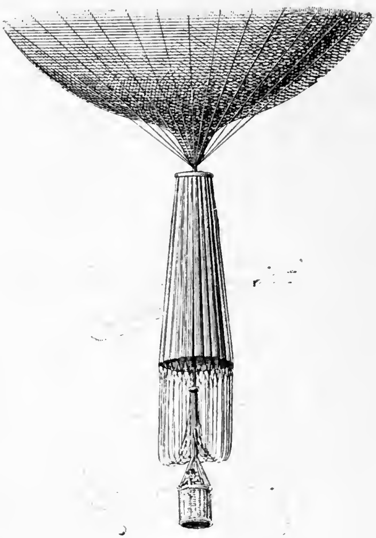

Fig. 77. — Parachute de Garnerin (fermé).

D'ailleurs, pratiquement, les valeurs que donne la formule (51) sont trop grandes. En réalité, dans un parachute la surface de sustentation a toujours une forme concave, afin d'augmenter la résistance de l'air (c'est pour cette raison qu'on donne de l'*embue* aux voiles des navires), et, par suite, la vitesse à l'atterrissage est toujours moindre que la vitesse calculée. Ainsi, Duté-Poitevin, avec un parachute de 12 mètres de diamètre (ce qui fait 108 mètres carrés de surface) auquel il avait donné 7 mètres de profondeur, est arrivé à terre avec des vitesses de $1^m,30$ à $1^m,50$ seulement par seconde, le poids du parachute étant de 30 kilogrammes, et celui de l'homme de 72 kilogrammes, soit un poids total de 102 kilogrammes pour 108 mètres carrés de surface.

Tel que l'a employé Garnerin, son véritable inventeur, et tel qu'on l'emploie encore aujourd'hui, le parachute est, en somme, une sorte de parasol d'au moins 5 mètres de rayon, formé d'un certain nombre de fuseaux de taffetas cousus ensemble et réunis au sommet à une rondelle de bois. C'est cette rondelle qui porte les cordes qui soutiennent la nacelle, à laquelle sont attachées aussi les cordelettes fixées au bord du parasol, dont le rôle est d'empêcher le parachute de se retourner par l'effort de l'air (fig. 77). La distance de la corbeille au sommet de l'appareil est d'environ 10 mètres. Lors de l'ascension, l'appareil est fermé, mais seulement aux 3/4 environ; un cercle de bois léger de $1^m,50$ de rayon, concentrique au parachute, le maintient un peu ouvert de manière à favoriser, au moment de la descente, lorsque l'aéronaute a coupé la corde qui le suspendait au ballon, l'ouverture et le développement de la machine par l'effet de la résistance de l'air (fig. 78).

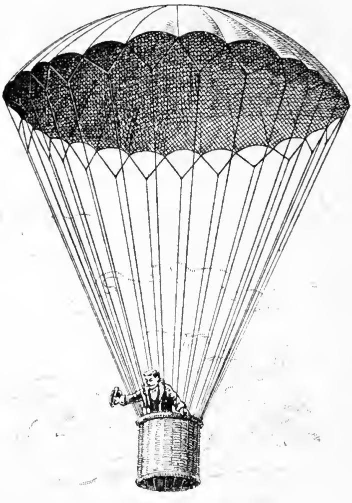
Fig. 78. — Parachute de Garnerin (ouvert).

Garnerin plaçait son parachute entre le ballon et la nacelle, ce qui augmentait considérablement la hauteur de l'aérostat et rendaient difficile la manœuvre de la soupape ainsi que les manœuvres d'atterrissage. Capazza a fait disparaître cet inconvénient en transformant le filet du ballon lui-même en parachute.

Mais, même avec la modification de Capazza, la hauteur de l'aérostat est encore assez grande, et, d'ailleurs, les aéronautes n'aiment guère le parachute qui, par son poids, alourdit beaucoup le ballon. Comme ils disent (avec raison), quand un ballon est bien construit et formé d'un bon tissu, il n'a aucune chance de crever. De plus, comme, pendant la descente, il devient toujours flasque, sa partie inférieure tend à se creuser et fait ainsi fonction de parachute.

Notons qu'après sa premiere descente, au parc Monceau, le 22 octobre 1797, Garnerin, sur le conseil de Lalande, apporta au parachute un perfectionnement indispensable, qui lui donna toutes les conditions nécessaires de sécurité. Il pratiqua, à son sommet, une ouverture circulaire assez étroite, *le trou de Lalande*, surmontée d'un tuyau de 1 mètre de hauteur, qui permit à l'air qui s'accumulait dans la concavité du parachute, de s'échapper. De cette manière, sans nuire aucunement à l'effet de l'appareil, on évite les oscillations dangereuses auxquelles Garnerin n'avait échappé que par miracle dans ses premières expériences.

b). — Passons à l'étude du mode de mouvement d'un aérostat dans l'air, lorsqu'on fait entrer en ligne de compte la résistance de ce fluide.

Dans le cas d'un ballon sphérique, la résistance de l'air exprimée en kilogrammes, le rayon r et la vitesse v étant exprimés en mètres, est donnée approximativement (abstraction faite de la nacelle et des suspentes), par la formule

$$R = 0{,}012\, hr^2v^2, \qquad (52)$$

h étant la pression de l'air ambiant exprimée en atmosphères. On voit qu'*elle croît proportionnellement au carré du rayon*, c'est-à-dire à la section du ballon, *et au carré de la vitesse, et qu'elle diminue proportionnellement à la pression de l'air ambiant*, c'est-à-dire à mesure que le ballon s'élève.

Cette formule permet d'abord de calculer l'effort qu'exerce le vent sur le ballon au moment du départ. Dans ce cas, $h = 1$, et

$$R = 0{,}102\, r^2 v^2. \tag{53}$$

Par exemple, une *grande brise*, de 10 mètres de vitesse par seconde, exerce sur un ballon normal d'un tonnage de 540 mètres cubes et d'un rayon d'environ 5 mètres, un effort

$$R = 255 \text{ kilogrammes environ.}$$

Elle permet ensuite de se rendre un compte relativement exact de la nature des mouvements d'ascension ou de dimension d'un aérostat, lorsque la vitesse de régime est établie.

Si f est la force ascensionnelle du ballon à un instant donné, R la résistance de l'air à cet instant, v la vitesse de régime correspondante, on a, en effet, en remarquant que

$$f = R,$$

la relation

$$f = 0{,}102\, hr^2 v^2,$$

d'où

$$v = \frac{3{,}13}{r}\sqrt{\frac{f}{h}}. \tag{54}$$

Dans le cas d'un ballon flasque, la force ascensionnelle f est constante, $\sqrt{h}$ diminue assez lentement, et, d'ailleurs, r augmente, puisque le ballon se dilate à mesure qu'il s'élève : *la vitesse de régime d'un ballon flasque, peut* donc *être regardée comme constante et, par suite, le mouvement d'ascension d'un ballon flasque comme sensiblement uniforme.* — Si le ballon est plein, ou si de flasque il devient plein, alors f diminue, et, par suite, la vitesse de régime diminue rapidement : *le mouvement d'un ballon plein est* donc *un mouvement retardé*, dont l'étude est trop complexe, d'ailleurs, pour être abordée ici.

Remarquons qu'un ballon étant toujours flasque pendant la descente, son mouvement descensionnel serait toujours sensiblement uniforme, si l'augmentation considérable de température des couches d'air qu'il rencontre, n'augmentait à chaque instant la force descensionnelle.

L'effort exercé par le vent sur un ballon, lors de l'atterrissage, au moment où celui-ci est ancré, est précieux aussi à connaître, au moins approximativement. En général, pour le calculer, on admet qu'à cet instant le ballon est à peu près dégonflé et, par suite, réduit à une surface plane circulaire ayant pour diamètre le diamètre du ballon, que le vent est supposé frapper orthogonalement. Si r est le rayon du ballon, V la vitesse du vent, les formules (46) et (47) donnent

$$R = 0{,}071 \times \pi r^2 V^2,$$

ou, en remplaçant π par sa valeur 3,1416,

$$R = 0{,}222\, r^2\, V^2. \qquad (55)$$

Pour un vent de 20 mètres à la seconde, vitesse qu'on peut regarder comme un *maximum* dans nos pays, cette formule donne

$$R = 89\, r^2 \text{ environ.} \qquad (56)$$

Il serait peut-être préférable d'adopter pour ce calcul, la valeur que Lilienthal attribue à la constante K. On aurait alors :

$$R = 163\, r^2 \text{ environ.} \qquad (56\ bis)$$

c.) — Abordons maintenant la théorie du *cerf-volant*, que de nombreux travaux, particulièrement ceux de Bertinet, ont singulièrement élucidée dans ces dernières années.

Un cerf-volant, en somme, est un carreau CC, relié par une corde inextensible et de poids négligeable, à un point fixe O. Admettons que ce carreau soit constamment incliné d'un angle aigu α sur l'horizon et supposons qu'il reçoive, sur sa face inférieure, un vent horizontal régulier, soufflant dans la direction VG, c'est-à-dire venant du côté où se trouve le point fixe O (fig. 79). L'action du vent se réduit à une pression qui, puisque la vitesse du vent est constante, ainsi que l'incidence, est elle-même constante. Supposons la corde attachée au centre de gravité G du carreau et, pour simplifier les raisonnements, admettons (ce qui n'est pas exact) que ce point coïncide avec le centre de pression, c'est-à-dire que la résistance du vent s'exerce suivant GR, perpendiculairement, d'ailleurs, au carreau CC.

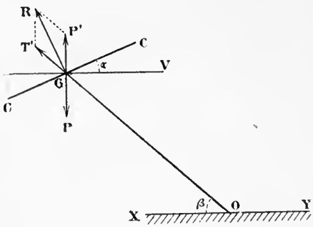

Fig. 79.

Le carreau étant supposé avoir une position donnée dans l'espace, cherchons d'abord à expliquer comment il peut se maintenir en l'air.

A cet effet, décomposons la résistance GR en deux forces, le première GT′, dirigée dans le prolongement de la corde OG, la seconde GP′, dirigée verticalement de bas en haut. Il est clair que la composante G T′ sera détruite par la résistance de la corde; mais il n'en sera pas de même de la composaute GP′ : celle-ci aura pour effet de combattre l'action G P de la pesanteur sur le carreau, et, par suite, de le soutenir, d'où le nom qu'on lui donne de *composante de sustentation* ou *composante de soulèvement*. Désignons par P′ cette composante, par R la résistance du vent, par P le poids du carreau ; soit $\beta = \mathrm{GOX}$ l'angle de la corde avec l'horizontale XY. Le triangle RGP′ donne, en remarquant que l'angle $\mathrm{RP'G} = 90° + \beta$ et que l'angle $\mathrm{P'RG} = 90° - (\alpha + \beta)$, la proportion

$$\frac{P'}{\cos(\alpha+\beta)} = \frac{R}{\cos\beta},$$

d'où

$$P' = R\,\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta},$$

ou, en remplaçant R par sa valeur donnée par la formule (48),

$$P' = KSV^2 \sin\alpha \frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta},$$

formule qui montre que *la composante de soulèvement, pour une valeur donnée de l'angle d'attaque et une position donnée du carreau, est proportionnelle au carré de la vitesse du vent.* Il est clair, par conséquent, que la sustentation du carreau dans l'air sera toujours possible si la vitesse du vent est assez considérable : il suffira qu'on ait

$$P' = P,$$

ou

$$R \frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta} = P,$$

d'où, pour la vitesse minimum que doit avoir le vent, la valeur

$$V = \sqrt{\frac{P}{KS} \frac{\cos\beta}{\sin\alpha\cos(\alpha+\beta)}}.$$

Cherchons maintenant à nous rendre compte de l'*effet du vent sur le carreau.* Pour cela, décomposons la résistance GR en deux forces, l'une GT_1, dirigée dans le prolongement de la corde OG, l'autre GR_1, perpendiculaire à cette direction (fig. 80). Faisons de même pour le poids GP, décomposé ainsi suivant G*r* et G*t*, forces directement opposées aux précédentes. La composante $GR_1 = R\cos(\alpha+\beta)$; la composante $Gr = P\cos\beta$. La différence de ces deux forces est

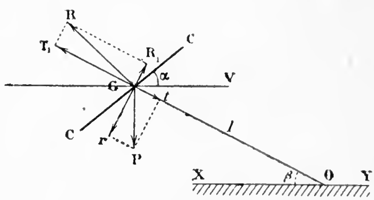

Fig. 80.

$$\rho = R\cos(\alpha+\beta) - P\cos\beta.$$

Pour que cette différence soit toujours dirigée dans le sens de la composante GR_1, il suffit qu'on ait

$$R > P \frac{\cos \beta}{\cos (\alpha + \beta)},$$

ce qui sera toujours possible, si le vent a une vitesse assez considérable. Mais, alors, cette force aura pour effet de *faire monter le carreau*, en faisant décrire au point d'attache G une circonférence de centre O, ayant pour rayon la longueur OG de la corde. Ainsi, *avec un vent de vitesse convenable, non seulement le carreau considéré peut se soutenir dans l'espace, mais encore il pourra s'élever dans l'air.*

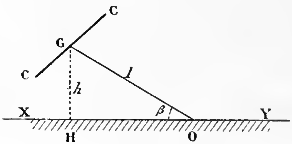

Fig. 81.

Il est facile, d'ailleurs, de calculer la *hauteur limite* GH qu'il pourra atteindre (fig. 81). On a, à chaque instant,

$$GH = OG \sin \beta,$$

ou, en posant $GH = h$, $OG = l$,

$$h = l \sin \beta$$

Or, il est évident que la hauteur cherchée sera atteinte quand la force ρ sera nulle, c'est-à-dire quand on aura

$$R \frac{\cos (\alpha + \beta)}{\cos \beta} = P.$$

Tirons de cette formule la valeur de β, substituons-la dans la formule précédente, et nous aurons la hauteur cherchée.

On peut encore se demander quelle est la *condition nécessaire pour que le carreau puisse s'enlever.* Pour répondre à cette question, il suffit de supposer $\beta = 0$, c'est-à-dire la corde horizontale. On a alors

$$\rho = R \cos \alpha.$$

Mais, à cet instant, la force ρ est verticale et dirigée de bas en haut. La condition cherchée est donc

$$R \cos \alpha > P,$$

formule qui donne, en remplaçant R par sa valeur, la vitesse minimum que doit avoir le vent pour enlever le carreau, soit

$$V = \sqrt{\frac{2P}{KS \sin 2\alpha}}.$$

Cherchons, enfin, la *tension de la corde*. Il est évident qu'elle est, à chaque instant, égale à la différence des deux composantes $GT_1 = R \sin(\alpha + \beta)$ et $Gt = P \sin \beta$. Elle est donc donnée par la formule

$$T = R \sin(\alpha + \beta) - P \sin \beta.$$

Il va de soi que si le carreau peut monter sous l'action du vent cette tension est toujours positive, c'est-à-dire que la corde est toujours tendue. Mais l'inégalité

$$R > P \frac{\cos \beta}{\cos(\alpha + \beta)},$$

étant toujours satisfaite quand le carreau monte, il en est de même, à fortiori, de l'inégalité

$$R > P \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)},$$

qui exprime que la tension de la corde est positive, c'est-à-dire dirigée suivant GT_1.

On peut construire des cerfs-volants de toutes les formes : quadrangulaires ou pentagonaux, plans ou concaves, etc. La plupart du temps on les munit d'une *queue* qui, si elle est suffisamment légère et longue, leur permet, comme l'a démontré Bertinet, tout alourdis qu'ils soient ainsi, de monter plus facilement et plus haut, en même temps qu'elle augmente leur stabilité.

Remarquons qu'on pourrait faire monter un cerf-volant dans un air calme. Mais alors, en tenant l'extrémité de la ficelle, il faudrait courir sur le sol pour créer le vent artificiel nécessaire.

II. — Le problème de l'Aviation semble se subdiviser, au premier abord, en deux parties, correspondant chacune à l'étude des moyens à employer pour fournir les forces nécessaires : 1° pour soutenir en l'air un corps plus lourd que l'air ; 2° pour donner à ce corps un mouvement horizontal. En d'autres termes, ce problème semble se composer de deux problèmes, celui de la *sustentation* et celui de la *direction*, et, dès lors, il apparaît infiniment plus difficile que celui de la direction des ballons puisque, dans ceux-ci, la question de sustentation est toute résolue. Il paraît de plus évident, à priori, que la solution du problème du plus lourd que l'air exigera des moteurs encore plus puissants que ceux que nécessitent les ballons dirigeables, car au travail de la direction s'ajoute forcément celui de la sustentation. Cependant comme, ainsi qu'on l'a vu plus haut (Chap. VII), l'impossibilité de la navigation par les dirigeables a tourné actuellement tous les chercheurs vers l'aviation, il importe d'avoir au moins une idée approximative de la question et des solutions qu'elle semble comporter.

Remarquons d'abord que les moyens que l'on emploie ou que l'on a employés pour résoudre le problème en question résident, en fin de compte, dans le mouvement horizontal (rectiligne ou circulaire) d'une surface convenablement inclinée, la propulsion amenant par elle-même la sustentation. Par suite, les deux parties du problème n'en font, en réalité, qu'une.

Ceci posé, le premier des moyens employés, c'est-à-dire la résolution du problème de l'aviation par le mouvement horizontal et rectiligne d'une surface plane, sert de base à la construction des appareils appelés *aéroplanes*, appareils qui ne sont, en réalité, que des cerfs-volants libres et dont la marche rappelle ce qu'on désigne, chez les oiseaux, par le *vol à la voile*. Le second des moyens proposés par les aviateurs, c'est-à-dire le mouvement circulaire d'une surface à peu près plane et convenablement inclinée, sert de base à la construction des appareils appelés *hélicoptères*. Quant aux *machines à ailes* ou *orthoptères*, dont le but est d'imiter le *vol ramé* des oiseaux, ce sont tout simplement une combinaison des deux précédents.

a). — Donnons d'abord une idée du principe des aéroplanes.

Considérons, à cet effet, un carreau CC animé dans l'air, grâce à un moteur convenable, d'une vitesse horizontale et constante V, sous un angle d'attaque α (fig. 82). Supposons ce carreau relié à un corps, une nacelle, qu'il s'agit de soutenir et de faire propulser en même temps. Soit P le poids de l'ensemble du système, S la surface du carreau. Admettons (ce qui n'est pas exact) que le centre de poussée coïncide avec le centre de gravité du carreau, comme nous l'avons supposé plus haut à propos du cerf-volant. La composante de soulèvement P′ que fournit la résistance R du vent est, comme le montre la figure, telle que

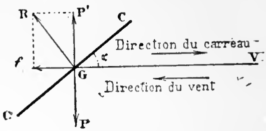

Fig. 82.

$$P' = R \cos \alpha.$$

Mais, comme on l'a vu plus haut,

$$R = KSV^2 \sin \alpha.$$

Par suite, la valeur de la composante de soulèvement peut s'écrire sous la forme

$$P' = \frac{1}{2} KSV^2 \sin 2\alpha. \qquad (57)$$

qui montre que P′ croît avec S, V et α, tant que α ne dépasse pas 45°, bien entendu. *La composante de soulèvement, ou, ce* *qui revient au même, le poids supporté par une surface de sustentation est* donc *proportionnel à l'aire de cette surface, au carré de la vitesse dont elle est animée, et augmente avec l'angle d'attaque*, de sorte qu'en donnant à la vitesse de propulsion du carreau une valeur convenable, on pourra toujours arriver à soutenir le système, *la propulsion accompagnant la sustentation, et réciproquement.* Cette vitesse s'obtiendra, d'ailleurs, en écrivant qu'il y a équilibre entre la composante de soulèvement P′ et le poids P du système, ce qui donne la relation

$$\frac{1}{2}\,\mathrm{KSV}^2 \sin 2\alpha = \mathrm{P},$$

d'où

$$\mathrm{V} = \sqrt{\frac{2\,\mathrm{P}}{\mathrm{KS}\sin 2\alpha}}, \tag{58}$$

le coefficient K ayant ici la valeur K = 0,15 de la formule (49).

On s'explique dès lors pourquoi, en ce qui concerne les dirigeables, la question de leur sustentation à l'aide d'un gaz plus léger que l'air passerait immédiatement au second plan, comme nous l'avons dit dans le Chapitre précédent, si l'on arrivait à leur donner des vitesses de 15 à 20 mètres par seconde, et comment l'étude des dirigeables a forcément entraîné les aéronautes dans la voie du plus lourd que l'air.

Cherchons maintenant le travail qu'il faut dépenser dans l'unité de temps, ou, ce qui revient au même, la puissance qu'il faut donner à un moteur, quel qu'il soit, pour obtenir la vitesse indiquée par la formule (58). Ce travail est évidemment donné par la relation

$$\mathrm{T} = f \times \mathrm{V},$$

f étant la composante horizontale Gf de la force GR, composante égale et opposée à la *force propulsive* que doit imprimer au carreau le moteur employé, puisque le mouvement du carreau est supposé uniforme. Mais

$$f = \mathrm{R}\sin\alpha.$$

Par suite, le travail moteur cherché est donné par la relation

$$T = R \sin \alpha . V,$$

ou, en remplaçant R par sa valeur,

$$T = KSV^3 \sin^2 \alpha. \tag{59}$$

En remarquant que

$$V^4 = \frac{4}{K^2 \sin^2 2\alpha} \frac{P^2}{S^2},$$

cette formule peut s'écrire

$$T = \frac{P^2}{KSV \cos^2 \alpha}. \tag{60}$$

On voit alors que T augmente proportionnellement au carré de P, diminue proportionnellement à S et V, et diminue aussi avec l'angle α. De là, les trois principes suivants :

1° *Toutes choses égales d'ailleurs, la puissance nécessaire à la propulsion et à la sustentation d'un carreau est proportionnelle au carré de son poids et en raison inverse de la surface sustentatrice.* Cette surface doit donc être à la fois aussi vaste que possible et cependant très légère.

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, la puissance nécessaire à la propulsion et à la sustentation d'un carreau est inversement proportionnelle à la vitesse*, qui doit donc être aussi grande que possible ;

3° Enfin, *toutes choses égales d'ailleurs, la puissance nécessaire à la propulsion et à la sustentation d'un carreau est d'autant plus petite que l'angle d'attaque est plus faible.*

Ces conclusions s'appliquent aussi, à peu près, à la *force propulsive* ou *force de traction*, cette force, égale et opposée à la résistance de sustentation R sin α, étant, en effet, donnée par la formule

$$f = \frac{T}{V} = \frac{P^2}{KSV^2 \cos 2\alpha}. \tag{61}$$

On peut se demander alors comment le problème du plus lourd que l'air n'est pas résolu depuis longtemps, puisque, en somme, le travail et la force de traction peuvent être réduits à volonté par la réduction de l'angle d'attaque et, surtout, par l'augmentation de la vitesse.

Qu'est-ce, en effet, qu'un *aéroplane?* Tout simplement, un système formé par une *surface sustentatrice* à la fois vaste, légère, rigide, et un *esquif*, c'est-à-dire une *nef* avec son *moteur*, système auquel il suffit d'adapter, pour le rendre gouvernable, *deux gouvernails :* le premier, le *gouvernail de direction*, vertical, le second, le *gouvernail de profondeur*, horizontal, ce dernier jouant plus particulièrement le rôle de la *queue des oiseaux*, c'est-à-dire permettant de régler facilement l'atterrissage, par suite des composantes de soulèvement ou d'abaissement que l'on fait naître en abaissant ou en relevant la queue. Malheureusement, c'est justement l'adjonction à la surface sustentatrice de l'appareil dont nous venons d'indiquer les organes principaux, qui change complètement les conditions du problème. Le mouvement horizontal de l'esquif fait naître, en effet, une résistance qui, étant donné que les organes de l'appareil d'un aéroplane sont infiniment plus compliqués que ceux d'un ballon, est au moins égale, sinon supérieure, à la résistance de la surface de sustentation proprement dite.

Désignons d'ailleurs par S' une surface idéale de même résistance que l'esquif, par K' un coefficient constant. La résistance de l'esquif sera représentée par la formule

$$R' = K'S'V'^2,$$

le travail nécessaire pour la vaincre, par la formule

$$T' = K'S'V^3,$$

et le *travail total* nécessaire pour mettre en mouvement l'aéroplane en entier sera

$$\mathcal{T} = KSV^3 \sin^2 \alpha + K'S'V^3, \qquad (62)$$

ou

$$\mathcal{T} = \frac{P^2}{KSV\cos^2\alpha} + K'S'V^3. \tag{63}$$

Si, comme on l'a vu plus haut, le premier terme de cette expression, qui représente le travail nécessaire à la sustentation, décroît jusqu'à zéro quand la vitesse V s'accroît jusqu'à l'infini, le second terme, qui représente le travail nécessaire pour vaincre les résistances passives, croît indéfiniment avec cette vitesse. Le travail nécessaire à la propulsion et à la sustentation est donc susceptible d'un *minimum* que le calcul montre être atteint quand

$$\frac{P^2}{KSV^2\cos^2\alpha} = 3K'S'V^2.$$

Il en est de même de la force de traction, égale et opposée à la résistance de sustentation,

$$f = \frac{\mathcal{T}}{V} = \frac{P^2}{KSV^2\cos^2\alpha} + K'S'V^2. \tag{64}$$

qui atteint son *minimum* quand

$$\frac{P^2}{KSV^2\cos^2\alpha} = K'S'V^2.$$

De là, les deux THÉORÈMES DE RENARD :

1° *Le travail nécessaire à la propulsion et à la sustentation d'un aéroplane, dans l'unité de temps, est minimum lorsque la résistance du sustentateur est égale à trois fois la résistance de l'esquif.*

2° *La force de traction nécessaire à la propulsion et à la sustentation d'un aéroplane est minimum lorsque la résistance du sustentateur est égale à la résistance de l'esquif.*

Tout en réduisant au minimum, dans un aéroplane, les résistances passives, la valeur du travail et de la force de traction que l'on doit chercher à obtenir, ne peuvent donc pas être abaissés au-dessous d'une certaine limite. L'analyse minutieuse des diverses conditions de la question amène à conclure, en ce qui concerne le travail, que le poids du moteur ne devrait pas dépasser 10 kilogrammes par cheval environ, c'est-à-dire qu'il n'y a rien à attendre des aéroplanes tant que l'on ne trouvera pas moyen de leur adapter des moteurs tels que le poids du cheval, par heure, ne dépasse pas 10 kilogrammes environ.

b). — Considérons maintenant les appareils du genre *hélicoptères*, où la surface de sustentation reçoit un mouvement non plus rectiligne, mais circulaire. Ici, comme le fait remarquer Espitallier, on doit avouer que la théorie est impuissante à dégager les inconnues de la question, car il n'existe pas de théorie complète de l'*hélice marine*, et, encore moins, de l'*hélice aérienne*. Aussi, l'expérience seule peut-elle fixer les termes de cette étude.

Cependant, Renard a essayé de combler cette lacune, au moins en ce qui concerne la question des *hélices sustentatrices*, comme l'*hélice-lest*, par exemple (Chap. VI). Si l'on désigne par R la poussée de l'hélice sur l'air, par n le nombre de tours par seconde, par d le diamètre de l'hélice, par T le travail résistant, le célèbre ingénieur a montré que pour obtenir les meilleurs résultats possibles, il faut s'arranger de façon à donner à n et à d les valeurs qui sont indiquées par les deux formules empiriques :

$$R = 0{,}0234\, n^2 d^4,$$
$$T = 0{,}007\, n^3 d^5.$$

Si l'on voulait, par exemple, installer dans un ballon dirigeable deux hélices de 4 mètres de diamètre. tournant autour d'un axe vertical et destinées à parer aux variations de la force ascensionnelle, en limitant à 100 kilogrammes, dans un sens ou dans l'autre, l'effort vertical à produire, on trouverait pour chaque hélice

$$n = 1{,}28 \text{ tour et } T = 278 \text{ kilogrammètres},$$

c'est-à-dire 77 tours à la minute, et, pour le travail total des deux hélices, $278 \times 2 = 556$ kilogrammètres, ou 7,4 chevaux.

Malheureusement, on ne sait encore presque rien en ce qui concerne les *hélices propulsives*, quoique cette question ait été étudiée par Renard, Langley et bien d'autres. Le seul résultat qui semble acquis, c'est qu'une hélice propulsive ne doit posséder jamais qu'un petit nombre d'ailes.

Quant aux *orthoptères*, c'est-à-dire aux appareils munis d'ailes battantes, à l'aide desquelles on cherche à résoudre le problème de l'aviation en imitant ce qu'on appelle le *vol ramé* des oiseaux, leur théorie est encore moins avancée que celle des hélicoptères. Comme on le verra dans le Chapitre suivant, la théorie du vol ramé n'est pas encore parfaitement établie : il est donc impossible qu'il n'en soit pas de même pour les appareils qui cherchent à imiter ce mode de propulsion.

CHAPITRE IX

LES VOLATEURS

I. — L'échec de toutes les tentatives de navigation aérienne remit, dès 1796, l'aviation en honneur. A cette époque, Cayley inventa son hélicoptère, petit appareil analogue à celui de Launay et Bienvenu, et d'une facilité de construction telle que nous croyons devoir en donner la description, d'après Nicholson :

Un bouchon est fixé à l'extrémité d'un arbre arrondi (fig. 83); un autre bouchon est attaché sur le milieu d'une baleine, avec un petit trou dans lequel pivote l'extrémité libre de l'arbre arrondi; deux cordes égales relient les extrémités de la baleine à l'arbre arrondi ; dans chaque bouchon sont plantées quatre plumes d'ailes d'oiseaux, légèrement inclinées, comme dans un moulin à vent, mais en sens inverse pour chaque bouchon. En tournant les deux bouchons en sens contraire, les deux cordes s'enroulent autour de l'arbre, en faisant fléchir la baleine ; si l'on abandonne alors l'appareil, les deux cordes se déroulent sous l'action de la baleine, qui fait ressort, les deux bouchons tournent en sens contraire du premier mouvement, et l'on voit la petite machine s'élever rapidement.

En 1842, M. Phillips construisit un appareil de ce genre en métal, pesant deux livres, consistant en un générateur de vapeur et quatre palettes inclinées de 20°, soutenues par huit bras recourbés. La vapeur, en s'échappant par les extrémités des bras, les faisait tourner, comme l'eau fait tourner les bras d'un tourniquet hydraulique. Cet appareil, dit-on, s'éleva à une assez grande hauteur et parcourut une certaine distance avant de tomber.

En 1843, Henson et Stringfellow imaginèrent un aéroplane consistant en un chariot contenant la machine et son combustible, à côté des passagers ; à ce chariot était fixé un grand cadre, immobile, en bambou, tendu de taffetas et de soie, dont le bord antérieur était faiblement relevé, et qui s'étendait de chaque côté du chariot comme les ailes déployées d'un oiseau. A l'arrière se trouvait un gouvernail ; des rames ou plutôt des roues de moulin à vent, placés de part et d'autre de la machine, devaient servir de propulseur. L'aéroplane, au moment de voler, était lancé sur un plan incliné ; en descendant, il atteignait une vitesse suffisante pour quitter ce plan et se soutenir sur l'air ; les rames ou roues, mises en mouvement, devaient alors entretenir la propulsion et, par conséquent, la sustentation. Mais cet appareil ne fonctionna jamais convenablement.

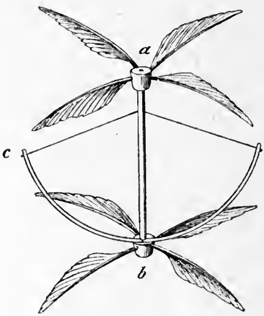

Fig. 83. — Hélicoptère de Cayley.

En 1861, Du Temple avait fait connaître les résultats des recherches qu'il poursuivait depuis plusieurs années sur l'aviation, et qui l'avait conduit à l'invention de sa remarquable chaudière. Son volateur, du genre orthoptère, était une sorte de canot léger qui portait à son avant deux ailes battantes, mues par une machine à vapeur. Le canot prenait vent en descendant un plan incliné, et les ailes devaient continuer à la maintenir en l'air. Aucun résultat sérieux ne fut obtenu.

Depuis longtemps, c'est-à-dire depuis la tentative de Phillips, les hélicoptères n'étaient plus considérés que comme des jouets d'enfants, sous le nom de *spiralifères* ou de *stropheors*, quand, en

1865, Nadar, après son manifeste de 1863, projeta la construction d'un navire aérien basé sur leur principe. Ce navire comportait un bâti sur lequel étaient placés les voyageurs et les machines motrices ; celles-ci actionnaient plusieurs groupes d'hélices montées en batteries sur des arbres verticaux, et qui, par leur action sur l'air, soulevaient l'appareil ; une hélice supplémentaire, à arbre horizontal, servait de propulseur. La difficulté de trouver un moteur léger et assez puissant empêcha la réalisation de ce projet. Seuls des modèles très réduits, comme ceux de Pénaud, Forlanini, etc., parvinrent à se soutenir pendant quelques secondes.

II. — La *sainte hélice*, comme l'appelait Nadar, n'a donc donné aucun résultat sérieux et nous exposerons plus loin les raisons pour lesquelles il est probable qu'elle n'en donnera jamais. Mais, comme nous l'avons déjà dit, le manifeste du célèbre aéronaute n'en a pas moins produit des effets immenses au point de vue des progrès de l'aviation, en donnant lieu à une infinité de recherches sur la résistance de l'air, le vol des oiseaux, les volateurs, etc.

Les études de Marey, qui sont celles dont le retentissement a été le plus grand, ont conduit cet éminent physiologiste, en ce qui concerne le rôle que jouent les ailes des oiseaux, alors qu'elles agissent comme ailes battantes, à des conclusions à peu près identiques à celles de Borelli. D'après Marey, en effet, l'abaissement des ailes donne naissance à une réaction verticale de bas en haut qui joue le rôle de composante de soulèvement ; la remontée donne lieu à une réaction contraire, mais beaucoup plus faible, de sorte qu'en définitive il y a sustentation permanente. Quant à la propulsion, elle doit être attribuée à ce que la pointe de l'aile se retournerait de façon à frapper l'air comme une rame.

Il semblait dès lors naturel d'essayer de résoudre le problème de l'aviation à l'aide d'appareils à ailes battantes. De là, la construction d'une foule d'oiseaux artificiels, parmi lesquels celui de

Pénaud (1871), un des élèves de Marey, mérite une mention spéciale :

Cet oiseau (fig. 84) se compose d'une tige rigide *ab* servant de colonne vertébrale à l'appareil; au-dessus de cette tige se trouve un *caoutchouc-moteur cd* qui donne le mouvement aux ailes battantes, ainsi qu'à un volant régulateur *ef*. A la partie postérieure est une queue régulatrice, formée par une longue plume de paon, que l'on peut incliner vers le haut, le bas ou par le côté, et que l'on peut aussi charger de cire, de façon à amener le centre de gravité de tout l'appareil au point convenable. Les gauchissements des ailes pendant leurs oscillations (gauchissements analogues à ceux que l'on observe dans le vol des oiseaux) sont obtenus par la mobilité du voile de l'aile et de petits doigts qui le supportent, autour d'une grande nervure. Un petit tendeur en caoutchouc part de l'angle intéro-postérieur de la surface de l'aile et vient s'attacher d'autre part vers le milieu de la tige centrale de l'appareil. Quand ce caoutchouc était bien tendu, on abandonnait le système à lui-même : les ailes battaient et l'oiseau artificiel pouvait parcourir, en air libre, de 2 à 15 mètres, en s'élevant d'une façon continue par un vol accéléré, suivant une rampe de 15 à 20°.

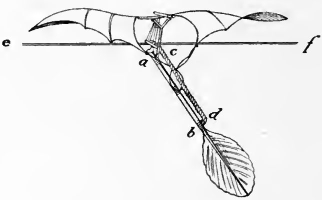

Fig. 84. — Oiseau de Pénaud.

Mais il est clair que, si ingénieux qu'il soit, cet appareil n'est encore qu'un jouet d'enfant, comme ceux d'Hureau de Villeneuve, V. Tatin, Tissandier, etc. Les orthoptères n'ont donc pas mieux réussi que les hélicoptères.

III. — Les aviateurs revinrent donc aux aéroplanes.

En 1894, Wellner a présenté les plans d'une machine volante basée sur le fait que le poids supporté par une surface de sustentation donnée, croissant rapidement avec la vitesse de l'air qui frappe cette surface, le poids supporté par mètre carré peut, avec une vitesse de 40 mètres par seconde, normale à cette surface, atteindre 100 kilogrammes.

Pour arriver à réaliser cette vitesse de 40 mètres, Wellner a choisi comme propulseur un certain nombre de *roues à voiles*. Ces roues tournent autour d'un axe horizontal et portent un certain nombre de palettes formées par des cadres en acier avec nervures, sur lesquels on tend une étoffe solide et légère. Elles sont articulées, d'une part, sur des bras invariablement reliés à l'arbre de rotation ; de l'autre, sur des bras semblables reliés à un excentrique. Cet excentrique tourne autour de cet arbre, de telle façon que lorsque l'appareil est en marche, la palette supérieure présente son arête antérieure en haut, et la palette inférieure, par un mouvement produit par l'excentrique, présente également son arête antérieure en haut. Dans les positions intermédiaires, les palettes n'agissent point, coupant l'air par leurs arêtes ou à peu près.

Quant à la machine volante elle-même, elle se compose essentiellement d'un esquif en forme de cigare, contenant le moteur et les passagers, et d'un certain nombre de roues à voiles disposées par paire et symétriquement, pour avoir l'équilibre. La propulsion est obtenue par des surfaces hélicoïdales placées dans les roues elles-mêmes et tournant avec elles, et par une hélice indépendante. Pour diminuer la résistance, les nervures des cadres sont recourbées suivant le pas de ces hélices : la propulsion se fait ainsi suivant l'axe des roues à voile.

Le projet de Wellner n'ayant jamais été mis à exécution, il est difficile de se prononcer d'une façon définitive sur cette machine, ainsi que sur la valeur des roues à voiles comme propulseurs.

H. Phillips, reprenant, vers la même époque, une idée due à Wenham et que Stringfellow, dès 1868, avait songé à utiliser, a donné les plans d'un aéroplane dont la surface sustentatrice serait formée de *lames de persiennes*, en bois, placées sur un cadre vertical en acier, chacune de ces lames affectant à sa partie inférieure la forme d'une surface légèrement concave vers le sol. L'avantage de ces sortes de surfaces sustentatrices est qu'on peut déterminer le profil général des lames qui les composent de façon que la composante de soulèvement soit juste égale à la force de résistance du vent, au lieu d'être plus faible, comme dans le cas d'une surface sustentatrice plane. Quant à la forme concave donnée à chacune des lames, elle a pour effet, non seulement d'augmenter la composante de soulèvement, mais encore de diminuer considérablement les variations de position du centre de pression qui accompagnent celles de l'angle d'attaque. Mais aucun essai sérieux, il faut le dire, n'a été tenté dans ce sens.

En somme, la machine qui se rapproche le plus des conditions qu'exige l'industrie, est, sans conteste, actuellement, la *machine volante* de Maxim, à laquelle le célèbre ingénieur travaille depuis 1889.

Cette machine (fig. 85) est un immense *aéroplane*, formé à l'origine d'une vaste *surface sustentatrice* de 48 pieds anglais de large, prolongée par des *ailes fixes* de 36 pieds chacune, puis, comme dans l'aéroplane conçu par Stringfellow, de *cinq paires d'ailes superposées*, disposées au-dessous de la grande surface sustentatrice, d'égale amplitude, inclinées d'environ 12°, qui assurent, avec elle, la sustentation de la machine quand elle progresse horizontalement sous l'effort de deux hélices actionnées par une machine à vapeur.

Mais la machine d'un aéroplane, pour qu'un appareil puisse être considéré comme véritablement pratique, doit emporter au moins trois voyageurs : un pour la manœuvre des gouvernails horizontaux, un autre pour manœuvrer les gouvernails verticaux et un troisième chargé de la surveillance et du fonctionnement du moteur et de ses accessoires ; d'un autre côté, le poids des voyageurs ne peut évidemment être qu'une faible partie de celui de la machine. Dès lors, Maxim a été amené à amplifier considérablement les dimensions de sa machine volante, à lui donner 100 pieds de long, du gouvernail-avant au gouvernail-arrière, 120 pieds de largeur, 35 pieds de haut. Le poids total est alors de plus de 7.000 livres et la machine à vapeur employée comme moteur, très légère et très puissante, a une force de 363 chevaux, le cheval correspondant environ à $14^{kg},4$ pour une durée

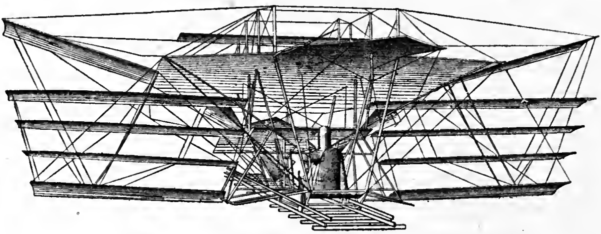

Fig. 85. — Aéroplane de Maxim.

de 10 heures (d'après les données de l'inventeur lui-même, données qui semblent sujettes à caution). Les deux hélices, qui tournent à raison de 400 tours à la minute, ont une force de traction de 2.000 livres, ce qui, étant donnée l'inclinaison des plans de sustentation, doit assurer une force de sustentation d'au moins 10.000 livres, plus que suffisante pour porter l'appareil. La vitesse est, au moins, de 40 milles à l'heure.

La chaudière, chauffée par la gazoline, est portée par le plancher de la cabine. Quant au moteur proprement dit, il est établi sur un bâti de quelques pieds de haut, afin de lui permettre d'atteindre le niveau nécessaire pour actionner les arbres des hélices. Afin d'assurer une marche de longue durée, la vapeur est condensée dans les tubes très légers et très minces, le refroidissement se faisant au simple contact de l'air, que la marche de la machine renouvelle à chaque instant et qui, par suite, est toujours suffisamment froid. Ces tubes servent, du reste, à renforcer la construction et forment une partie des cadres de sustentation.

Pour enlever cette immense machine, Maxim lui fait parcourir sur des rails une distance assez grande, afin de donner d'abord une vitesse suffisante. Une fois animé de cette vitesse, l'appareil peut alors planer. Mais l'atterrissage est une opération dangereuse, car si la machine motrice vient à s'arrêter, l'aéroplane tombera suivant un plan incliné, avec une vitesse de haut en bas très faible, mais en conservant une vitesse horizontale très grande, l'équilibre étant maintenu par les gouvernails horizontaux. Il faut donc, pour éviter tout accident, que le terrain choisi pour l'atterrissage soit uni, bien dégagé, et il y a lieu de se demander, avec Lapointe, si l'atterrissage ne sera pas toujours très dangereux, aussi bien pour la machine que pour les voyageurs.

Quoi qu'il en soit, sans se préoccuper par trop de cette difficulté, Maxim a tenté, en septembre 1894, un essai avec l'appareil tel que l'on vient de le décrire. Il l'avait placé sur des rails d'une longueur de 600 mètres ; au-dessus se trouvaient deux contre-rails de 200 mètres de longueur, destinés à empêcher tout soulèvement prématuré, et aussi à mesurer la force de soulèvement. L'expérience réussit en ce sens que les rails supérieurs cédèrent sous l'effort. Mais l'appareil fut sérieusement avarié par suite de la rupture d'un essieu, rupture qui prouve que les efforts étaient mal répartis et que, malgré le talent de son inventeur, la machine laissait encore beaucoup à désirer. Depuis, aucune nouvelle tentative n'a été faite.

En somme, comme Ader, comme Stentzel, comme tant d'autres, dont la liste serait trop longue à donner, Maxim a échoué.

Langley en 1896, V. Tatin et Richet, en 1897, sont arrivés à des résultats qui, à première vue, paraissent plus satisfaisants :

L'aéroplane de Langley (fig. 86) était, en majeure partie, en acier ; néanmoins, il rentrait dans sa construction assez de matériaux plus légers pour que la densité de l'ensemble fût voisine de l'unité. Son poids total, y compris celui du combustible et de l'eau, était de $13^{kg},6$; son poids absolu de 11 kilogrammes seulement. L'envergure des surfaces de soutien, qui étaient légèrement courbées, en soie, était de $4^m,27$; la longueur de l'aéroplane dépassait $4^m,50$. La force motrice était fournie, non par un caoutchouc moteur, mais par une machine à vapeur, très légère, d'une puissance approximative d'un cheval, actionnant deux hélices de $1^m,22$ de diamètre, et tournant à raison de 1000 tours

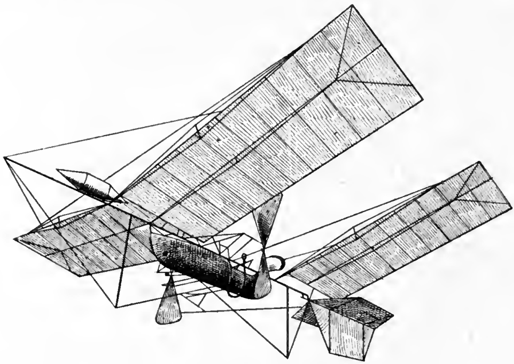

Fig. 86. — Aéroplane de Langley.

par minute. Le combustible était de la gazoline, transformée en gaz avant sa combustion.

Lancé d'une hauteur d'environ 8 mètres au-dessus du Potomac, cet aéroplane a pu, sous la seule impulsion de sa machine, marcher contre le vent, s'élevant lentement et sans secousses. Décrivant de grandes courbes en s'approchant d'un promontoire voisin et boisé, qu'il franchit néanmoins, il passa sans encombre les arbres les plus élevés, à une hauteur de 8 à 10 mètres au-dessus de leur cime, et descendit lentement, de l'autre côté du promontoire, à 276 mètres de distance du point de départ, au bout de 1 minute 31 secondes, après avoir, d'après Graham Bell, qui assistait à l'expérience, parcouru dans sa course une longueur totale de 900 mètres environ.

Quant à l'aéroplane de V. Tatin (fig. 87 et 88), il consiste essentiellement en une carcasse de bois de sapin munie de deux ailes fixes de 8 mètres carrés de surface et d'une envergure de $6^{m},60$, d'une queue, et portant une petite machine à vapeur qui actionne deux hélices. Cette machine, avec tout l'appareil, ne pèse pas plus

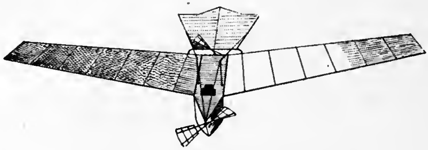

Fig. 87. — Aéroplane de V. Tatin (face).

de 33 kilogrammes, et, dans ce chiffre, sont comprises les quantités d'eau et de charbon nécessaires pour une course de 5.000 mètres, soit, environ, 3 litres d'eau et 600 grammes de charbon. La puissance de la machine est de 100 kilogrammètres. Quant

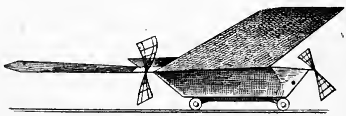

Fig. 88. — Aéroplane de V. Tatin (profil).

aux hélices, elles tournent en sens inverse : l'une est à l'avant, l'autre à l'arrière du corps principal.

Lancé du haut d'une falaise avec une vitesse horizontale de 18 mètres, vitesse qu'on obtenait en le faisant descendre le long d'une piste convenablement inclinée, d'une hauteur de 9 mètres, en même temps qu'on actionnait les hélices, cet aéroplane a pu, en juin 1897, sous un angle d'attaque de 2° à 3°, parcourir, à plusieurs reprises, 140 mètres dans l'air, en ligne horizontale, avant de tomber dans la mer. On avait, d'ailleurs, prévenu les soulèvements prématurés qui auraient pu compromettre les expériences, en fixant solidement, avec des cordes, la machine volante à un lourd chariot qui lui servait de support et roulait avec elle sur les rails de la piste jusqu'au bord de la falaise. A cet endroit, le chariot rencontrait des couteaux affilés qui sectionnaient les cordes et mettaient l'aéroplane en liberté, tandis que le chariot tombait au pied de la falaise.

Il est clair que les résultats obtenus par V. Tatin paraissent, au premier abord, très inférieurs à ceux de Langley. Mais il faut remarquer que l'aéroplane de V. Tatin pèse trois fois plus que celui du savant américain, ce qui complique beaucoup le problème.

Pour la même raison, il faudrait se garder de conclure, d'après ce qui précède, à la supériorité des travaux de V. Tatin et de Langley sur ceux de Maxim. Il y a entre les aéroplanes des deux premiers et la machine de Maxim la même différence qu'entre les locomotives à moteur très léger que l'on met entre les mains des enfants et les locomotives des voies ferrées. Si la question des *aéroplanes-oiseaux*, comme R. Soreau appelle, avec raison, les aéroplanes de Tatin et Langley (avec d'autant plus de raison que le poids de l'aéroplane Tatin est exactement celui des plus gros volateurs animés), peut être considérée comme approchant de la solution, il n'en est pas de même des *aéroplanes-navires*, comme celui de Maxim. Or, le seul point de vue qui ait un véritable intérêt pour l'ingénieur (et pour le public) est celui de l'aéroplane-navire, c'est-à-dire d'une machine capable de transporter des voyageurs dans les airs, dans des conditions raisonnables de sécurité, d'habitabilité et de durée.

IV. — On ne saurait finir cette courte étude sans parler des expériences d'aviation d'Otto Lilienthal.

Ces expériences n'avaient pas pour but immédiat la construction d'un volateur; elles étaient simplement destinées à permettre, un jour, à l'homme de voler en pratiquant d'abord le *vol plané*, c'est-à-dire celui dans lequel l'oiseau, après avoir éteint ses battements d'une façon progressive et complète, se laisse glisser sur l'air, les ailes, immobiles et largement étendues, formant un véritable parachute incliné sur la direction du vent, dont la pression sert alors à les maintenir en l'air. De là, Lilienthal espérait passer à la pratique du *vol à la voile*, dont l'importance est considérable, puisque ce modèle de vol est celui qui permet aux oiseaux le mouvement de translation le plus rapide et le plus prolongé, pour le minimum d'effort musculaire.

L'appareil sustentateur de Lilienthal était construit en toile, avec une ossature en osier, et sa forme se rapprochait de celle de la chauve-souris (fig. 89 et 90).

Deux surfaces, légèrement concaves vers le vol, formaient en quelque sorte les ailes de la machine; cependant, quoique pouvant s'abaisser ou se relever à volonté, elles n'étaient point battantes. Ces ailes se raccordaient du milieu jusqu'à l'arrière, mais étaient séparées à l'avant par une large échancrure où se plaçait l'aéronaute, s'appuyant par les bras dans des gouttières garnies, tandis que ses mains tenaient solidement une barre transversale. L'envergure des ailes était de 7 mètres et leur largeur de 2^{m}, 50. L'appareil ne pesait que 20 kilogrammes : avec le poids de l'expérimentateur, le poids à porter était ainsi d'environ 100 kilogrammes pour une surface de sustentation de 14 mètres carrés, soit 7 kilogrammes par mètre carré, au lieu de 1 kilogramme. Une queue était adaptée à la machine. Cette queue était formée de deux gouvernails : l'un, vertical, de forme ovale, qui servait à prendre le vent et à faire tourner l'appareil quand le vent changeait; l'autre, horizontal, perpendiculaire au premier, qui servait à empêcher l'appareil de plonger en avant. Ce dernier était surtout utile pour l'atterrissage.

Il n'y avait, bien entendu, aucun moteur.

Pour arriver, avec une machine de cette sorte, à pratiquer le vol plané, on court, en abaissant les ailes, contre le vent et en descendant la pente douce d'une colline de hauteur convenable

(30 mètres à peu près); au moment convenable on relève un peu la surface de sustentation, de manière à la rendre à peu près horizontale (fig. 89). Dans l'air, pendant le planement descendant, on cherche à donner, par tâtonnement, au centre de gravité une position telle que l'appareil soit projeté rapidement en avant, mais descende aussi peu que possible (fig. 90). Le difficile est de maintenir son équilibre : comme le vent frappe la surface supérieure

Fig. 89. — Appareil de Lilienthal (départ).

Fig. 90. — Appareil de Lilienthal (planement descendant).

des ailes, il faut toujours porter les pieds en avant, de façon à forcer la machine à remonter contre le vent; sinon, l'appareil tendrait à tomber en piquant une tête en avant, et il en serait de même de l'aéronaute.

Dans ces conditions, et avec ces précautions, on peut arriver, comme Lilienthal, à parcourir des distances de 300 mètres, sans toucher terre, avec une vitesse de 15 mètres à la seconde, soit 54 kilomètres à l'heure (la vitesse d'un express); mais, en moyenne, la vitesse obtenue par Lilienthal était d'environ 9 mètres par seconde, soit 32 kilomètres à l'heure. Avec un vent debout de 4 à 5 mètres, l'action soulevante était de 118 kilogrammes, et la chute de $0^m,50$ seulement par seconde.

Dans certaines circonstances spécialement favorables, Lilienthal a pu s'élever, pendant le trajet, à un niveau supérieur à celui du point de départ. Il avait même réussi, en déplaçant le centre de gravité sur l'un ou l'autre côlé, par un mouvement d'extension de ses jambes, à dévier la trajectoire de son vol, et il arriva même à ce résultat merveilleux de revenir, *pendant un certain temps* du trajet, vers son point de départ.

Il songeait à imiter le vol à la voile, en adaptant à son appareil un moteur à vapeur très léger, pouvant produire plus d'un cheval pour 20 kilogrammes de poids, lorsque, le 9 août 1896, dans une expérience de planement, il se cassa les reins en tombant d'une hauteur de près de 80 mètres.

Cette catastrophe ne doit pas, d'ailleurs, être attribuée à une fausse manœuvre du célèbre aéronaute, mais à une forte embardée, qu'il ne réussit pas à contre-balancer et qui inclina sa machine de telle sorte qu'elle était frappée en dessus par le vent.

Peut-être aussi cette machine était-elle défectueuse : ce n'était pas, en effet, la machine que nous venons de décrire, mais un appareil compliqué, formé de deux surfaces sustentatrices superposées, au lieu d'une. Il ne semble pas que l'emploi de deux plans de sustentation superposés, emploi qui a pour effet d'éloigner le centre de gravité du centre de poussée, compromette par lui-même, au point de vue théorique, la stabilité de l'appareil, quoique chez les oiseaux le centre de gravité soit toujours très près du plan de sustentation ; mais il est certain que la vitesse du vent étant très différente dans les différents points successifs d'un même courant d'air, s'il est déjà difficile de conserver la stabilité avec un seul plan sustentateur, le problème devient presque impossible avec deux.

Les expériences de Lilienthal n'en n'ont pas moins une grande importance pratique. Elles montrent que, quoi qu'en pensent beaucoup d'hommes distingués, il est peu probable que l'homme, même aidé d'un moteur quelconque, puisse, à la suite d'une éducation spéciale, arriver à voler avec sécurité, par lui-même, sans l'aide d'un navire aérien et de tous les organes de sûreté et de mesure que les machines modernes comportent. Mais elles montrent aussi que l'atterrissage d'un aéroplane, si sa voilure est assez puissante, pourra toujours se faire sans danger.

V. — Si peu probantes que soient, au point de vue industriel, les expériences de Tatin et de Langley ; si peu encourageant qu'ait été l'essai de la machine de Maxim, une conclusion s'impose : c'est que l'aéroplane est le volateur de l'avenir, l'appareil sur lequel doivent porter les efforts de tous les aviateurs sérieux, car il est le seul capable de répondre un jour aux besoins de l'industrie.

Quant aux hélicoptères, comme nous l'avons déjà dit, leur théorie n'est pas faite. Mais en admettant qu'elle le soit, au point de vue navire, ce système sera probablement toujours très inférieur à l'aéroplane. Comme le fait remarquer R. Soreau, si les hélices sont verticales, elles n'arriveront qu'à soutenir les voyageurs sans les déplacer horizontalement dans le courant aérien : un ballon ordinaire serait infiniment plus simple et moins dangereux. Si les hélices sont inclinées, l'habitabilité et la sécurité seront bien précaires. S'il y a un jeu d'hélices verticales et une hélice horizontale, la propulsion troublera singulièrement l'action des hélices sustentatrices : celles-ci agiront, en somme, comme des surfaces aéroplanes de formes compliquées qui auront sur la voiture immobile l'inconvénient d'exiger des calculs très compliqués et qui, à l'atterrissage, priveront la machine et les passagers du parachute formé par une grande voilure.

Reste la question des orthophères.

Cette question a passionné de tous temps les aviateurs, parce que, disaient-ils, l'homme doit chercher à imiter la Nature.

On peut d'abord observer que si l'étude de la Nature est la seule féconde en résultats, il ne s'ensuit pas qu'il en soit forcément de même de son imitation. L'industrie de l'homme emploie, en général, des moyens radicalement différents de ceux qu'emploie la Nature : c'est ainsi que la locomotion sur terre a été obtenue, non pas en réalisant un cheval automate, mais en transformant le mouvement de va et vient d'un piston, mû par la vapeur, en un mouvement de rotation.

Les moteurs animés, par des phénomènes de disposition inconsciente, transmettent la force motrice, instantanément et avec des variations à l'infini, aux innombrables muscles qui la mettent en œuvre. Ils constituent une machine qui, comme le dit très bien Espitallier, se règle d'elle-même, une machine automatique instinctive, et sa régulation se fait sentir jusque dans les parties les plus infimes, avec une promptitude et une sensibilité telles qu'il faut renoncer à copier le modèle sous ce rapport. On ne pourra donc obtenir qu'une imitation beaucoup plus apparente que réelle, une approximation plus ou moins grossière, puisqu'il y manquera toujours cette adaptation et cette souplesse des organes. Si l'on supprime ces qualités essentielles de la machine animée, il ne reste plus qu'un moteur d'un faible rendement, compliqué d'organes sans nombre, et c'est pour cela que toutes les tentatives faites avec des orthophères ont pitoyablement échoué.

Il ne faut donc demander à la Mécanique que ce qu'elle peut donner. Au lieu d'organes complexes, auxquels il faut distribuer la force, il faut la laisser chercher à réduire et à décomposer le problème de l'Aviation en éléments simples par les moyens qui lui sont propres.

D'ailleurs, en admettant qu'on doive chercher à imiter la nature, quel genre de volateurs imiter ? La mouche, le pigeon ou l'aigle?

S'il y a un fait patent, c'est que si les volateurs animés de petite taille, comme le pigeon, pratiquent le vol ramé, les volateurs animés de grande taille, comme l'aigle, pratiquent de préférence le vol à la voile, c'est-à-dire se servent de leurs ailes comme d'une surface aéroplane, trouvant dans les mouvements de l'air l'énergie suffisante pour entretenir leur vitesse.

Peut-on affirmer d'ailleurs que le vol ramé est si différent que cela du vol à la voile? R. Soreau ne le pense pas. Pour lui, l'abaissée et la relevée de l'aile ont simplement pour effet de permettre à l'oiseau la sustentation, en même temps qu'elles fournissent une composante de propulsion qui entretient la vitesse acquise par le volateur. Quant à cette vitesse, rien ne prouve qu'elle soit due particulièrement au *coup de rame* que donne l'aile à la fin de l'abaissée quand elle se porte en arrière, comme l'enseignent Marey et son école. D'après R. Soreau, elle est due surtout à la projection de l'aile en avant au moment de l'abaissée, projection assez forte non seulement pour entraîner les ailes par rapport au corps, mais aussi pour faire propulser en avant l'ensemble de l'animal.

Quant à la queue, qui peut, à volonté, s'étaler ou se fermer comme un éventail, s'incliner ou se relever, elle joue plutôt le rôle d'un gouvernail de profondeur, destiné à compenser les variations de la surface sustentatrice.

L'aéroplane s'impose donc par le raisonnement comme par l'expérience : simplicité, sécurité, rapidité, tout se trouve réuni dans son emploi.

Que l'on trouve un moteur à la fois léger et puissant pouvant fournir 1 cheval par 10 kilogrammes pendant un nombre d'heures suffisant, 10 à peu près, et la *moitié du problème* sera résolu. La moitié seulement ! car tout porte à croire qu'une fois le problème résolu au point de vue dynamique, c'est un problème de statique, aussi difficile peut-être, qui se posera. Ce qui a manqué, en effet, dans les expériences de Maxim et de V. Tatin, ce n'est pas la force motrice : le grand défaut de leurs appareils a été plutôt un défaut d'équilibre. « Toujours à la même distance de 140 mètres, dit ce dernier, mon aéroplane, après avoir paru, dès le départ, se comporter parfaitement sous tous les rapports, équilibre, direction, etc., a manifesté des tendances à s'élever qui lui ont fait perdre l'équilibre et l'ont fait choir. »

Si l'air était un fluide entraîné d'un mouvement uniforme, la stabilité longitudinale serait facile à obtenir : les changements d'inclinaison de la surface sustentatrice, en changeant la position du centre de pression, donneraient simplement naissance à des oscillations qu'il serait facile d'amortir. Mais l'air est le siège, tout au moins près de terre, d'embardées répétées et violentes donnant naissance à des oscillations heurtées des plus dangereuses. On parviendra certainement à les amortir par des moyens convenables, par exemple en plaçant le centre de gravité le plus loin possible du centre de pression, et en donnant à la surface sustentatrice la forme préconisée par Phillips. Mais à côté de la stabilité longitudinale, il y a lieu de tenir compte encore de la stabilité transversale. Or, on ne connaît, pour l'instant, aucun dispositif réellement capable d'assurer cette dernière.

En attendant la résolution de la *seconde moitié* du problème des aéroplanes, il faut bien constater, avec R. Soreau, que la stabilité et la sécurité, si précaires dans ces appareils, sont admirablement résolues par l'emploi du ballon comme sustentateur. Aussi, pour terminer, jugeons-nous utile de dire un mot des *ballons-planeurs*, prônés très anciennement par Scott et par Dupuis-Delcourt.

D'après ces aéronautes, ces machines volantes devaient en quelque sorte imiter l'oiseau planant dans l'air, avec cette différence essentielle qu'elles n'étaient pas plus lourdes que l'air. En particulier le projet de Dupuis-Delcourt comportait un véritable *dirigeable*, c'est-à-dire un aérostat de forme allongée, avec nacelle et hélice propulsive, portant un châssis horizontal recouvert d'une toile résistante et bien tendue. Une fois le dirigeable à la hauteur voulue et en marche, on baissait la partie arrière du châssis, de façon que l'air qui se glissait en dessous donnât une composante de soulèvement; quand on voulait descendre, on abaissait au contraire la partie avant du châssis. Jullien, dans son modèle de dirigeable (chap. VII), avait utilisé cette idée : l'arrière de son ballon était muni d'un châssis horizontal, pouvant, à volonté, s'abaisser ou s'élever. Mais comme le fait remarquer Lapointe, ce châssis n'était qu'un gouvernail de profondeur, pouvant tout au plus faire varier un peu le niveau d'équilibre.

Cependant, rien ne prouve que cette combinaison du plus lourd et du plus léger que l'air ne puisse pas donner des résultats, et que l'on ne passera pas des *dirigeables* aux *ballons-planeurs* ou *ballons-aéroplanes*, avant d'arriver aux *aéroplanes*. On verra d'ailleurs plus loin (chap. XI) que les Allemands commencent à employer, pour leurs ballons captifs militaires, de véritables ballons-planeurs.

CHAPITRE X

LA SCIENCE ET LES AÉROSTATS

I. — Aucune découverte n'a excité, autant que celle des aérostats, la surprise, l'admiration, l'émotion universelle. L'homme venait, disait-on, de marcher à la conquête de l'atmosphère; ces espaces infinis, dont l'œil est impuissant à sonder l'étendue, devenaient, désormais, son domaine. On le voyait déjà parcourir à son gré son nouvel empire et régner en maître sur ces régions inexplorées. Enfin, les aérostats semblaient appeler à régénérer la Science, en lui ouvrant des moyens d'expérimentation d'une portée toute nouvelle.

Comme Figuier le fait remarquer, de tout cet éclat et de tout ce retentissement, de cet enthousiasme qui, d'un bout à l'autre du monde, enflammait les esprits, qu'est-il resté? Presque rien.

Tout cela, en effet, était bien exagéré. Abstraction faite de la Géographie et de la Météorologie (particulièrement en ce qui concerne la *prévision du temps*), la Science pure n'a que relativement peu à attendre de l'Aérostation, et cela se conçoit aisément.

En somme, l'atmosphère, prise dans son ensemble, n'est qu'un mélange d'azote, d'oxygène, d'argon, avec un peu de vapeur d'eau, de gaz carbonique, des traces d'ozone, de gaz ammoniac, etc., et des poussières minérales ou organiques. Rien d'extraordinaire ne peut donc sortir de son exploration, et une preuve à l'appui résulte de ce qui a été dit plus haut (chap. v) à propos des merveilles de l'atmosphère. Tous ces phénomènes, à peu d'exceptions près, étaient parfaitement connus avant l'invention des ballons :

Mariotte a expliqué les halos par la présence de petites particules de glace en suspension dans l'air, cent cinquante ans avant les célèbres ascensions scientifiques de Barral et Bixio. Ajoutons que le découragement général qui suivit presque immédiatement la découverte des aérostats, lorsqu'on eut reconnu l'impossibilité de les diriger et les dangers à courir dans tout voyage aérien, le prix élevé de ces machines, les mouvements incessants dont elles sont animées et qui rendent presque impossible toute observation précise, ne pouvaient que refroidir l'ardeur des savants.

Tout limité que soit le champ ouvert à la Science par l'aérostation, il ne faudrait pas, cependant, le dédaigner. Dans l'ordre des Sciences physiques et chimiques, les variations avec la hauteur de la température, de l'état hygrométrique et du potentiel électrique de l'air, ainsi que celles de l'intensité du magnétisme terrestre (et, peut-être, de la déclinaison et de l'inclinaison), sont des questions très importantes. Il en est de même des variations que l'air atmosphérique peut éprouver dans sa composition chimique, physique ou bactériologique, et des variations du rayonnement solaire avec la hauteur, cette dernière question se rattachant à l'une des plus importantes de l'Astronomie physique, l'étude de la Chaleur solaire.

C'est à Robertson que revient le mérite d'avoir, le premier, tiré les savants de leur torpeur, en ce qui concerne l'emploi scientifique des aérostats.

Le 18 juillet 1803, vingt ans après la découverte des Montgolfier, il exécutait, à Hambourg, la première ascension qu'on puisse équitablement qualifier d'ascension scientifique, ascension qui ne dura pas moins de cinq heures et demie, et dans laquelle il put atteindre une altitude de près de 7.400 mètres. Entre autres faits d'observation, il crut reconnaître qu'à une certaine altitude : 1° le verre, le soufre, etc., ne s'électrisent que très faiblement par le frottement; 2° l'énergie de la pile électrique diminue; 3° l'aiguille aimantée oscille avec beaucoup plus de lenteur, ce qui l'amena à admettre un affaiblissement notable de l'intensité du magnétisme terrestre avec la hauteur. Les expériences auxquelles, après avoir été appelé à Saint-Pétersbourg, il se livra avec l'assistance de Saccharof, semblèrent confirmer ces résultats.

Il était cependant impossible de les admettre à titre définitif, avant de nouvelles observations. Aucune raison sérieuse ne pouvait faire croire que l'électricité développée par le frottement ou celle que fournit une pile peut être moins intense à 6.000 mètres qu'au niveau du sol : la différence de potentiel qui s'établit entre deux corps que l'on frotte l'un contre l'autre n'a rien à voir avec l'altitude, et de même le débit d'un générateur d'électricité tel que la pile. Quant à l'affaiblissement de l'intensité du magnétisme terrestre à quelques kilomètres seulement au-dessus du sol, il ne concordait guère avec la loi d'Euler, admise encore aujourd'hui comme très vraisemblable, et d'après laquelle cette intensité ne décroît, le long d'une même verticale, qu'en raison inverse, seulement, du cube de la distance au centre de la terre.

Fig. 91. — Biot.

L'Académie des Sciences de Paris jugea donc nécessaire de refaire les expériences de Robertson, et désigna, pour remplir cette tâche, Biot et Gay-Lussac. Conté, le Renard de l'époque, se chargea de construire l'aérostat, dont le départ eut lieu, au jardin du Conservatoire des Arts-et-Métiers, le 20 août 1804.

L'examen attentif auquel les deux savants soumirent, pendant presque toute la durée du voyage, les mouvements de l'aiguille aimantée, les amena à conclure que la propriété magnétique ne perd sensiblement rien de son intensité, depuis le sol jusqu'à 4.000 mètres de hauteur. Ils expliquèrent l'erreur de Robertson et de Saccharof par la difficulté que présente l'observation de l'aiguille de la boussole au milieu des oscillations continuelles de l'aérostat. Biot et Gay-Lussac ignoraient que l'intensité d'aimantation d'un barreau augmente quand la température diminue, comme l'a démontré Kupffer, et cela indépendamment de toute variation dans l'intensité propre du magnétisme terrestre. Ils auraient donc dû, si leurs observations avaient été aussi bien faites qu'ils aimèrent à le croire, constater une légère augmentation dans la vitesse des oscillations de leur aiguille de déclinaison, puisque la température décroît d'au moins 20° de 0 à 4.000 mètres, et le fait que cette vitesse reste à peu près la même, aurait dû les amener à conclure à un léger affaiblissement de l'intensité du magnétisme terrestre avec la hauteur.

Ils constatèrent aussi, contrairement aux assertions de Robertson, et cette partie de leurs expériences ne prête à aucune critique, que la pile et les appareils d'électricité statique fonctionnent aussi bien à une grande hauteur dans l'atmosphère qu'au niveau du sol. Ils profitèrent aussi de leur voyage pour étudier les variations de température, d'état hygrométrique et de potentiel électrique de l'air avec la hauteur. L'électricité qu'ils recueillirent fut négative, et sa tension s'accroissait avec la hauteur. L'observation de l'hygromètre leur fit reconnaître que la sécheresse s'accroissait, aussi, avec la hauteur. Quant aux observations thermométriques, elles ne furent pas suffisantes pour amener à quelque conclusion rigoureuse.

Dans un second voyage qu'il exécuta seul (au grand contentement de Biot, dit-on) le 16 septembre 1804, par un ciel vaporeux, mais sans nuages, Gay-Lussac confirma et étendit les résultats du premier.

Il prit un assez grand nombre d'observations thermométriques, essaya de déterminer, avec leur aide, la loi de décroissance de la température avec l'altitude et admit qu'en moyenne une diminution de température de 1° correspondait à une différence de hauteur de 174 mètres. L'observation de l'hygromètre n'amena aucune conclusion satisfaisante, au moins en ce qui concerne les variations de l'état hygrométrique : contrairement à ce qui s'était passé dans son premier voyage, l'humidité alla en augmentant jusqu'à 3.000 mètres, diminua ensuite jusqu'à 5.267 mètres, pour augmenter de nouveau jusqu'à 7.000 mètres. Il resta acquis, cependant, que la quantité absolue de vapeur d'eau répandue dans l'atmosphère diminue avec la hauteur suivant une progression extrêmement décroissante.

Fig. 92. — Gay-Lussac.

A 6.500 mètres d'altitude, Gay-Lussac recueillit de l'air à l'aide d'un ballon bien bouché, dans lequel il avait préalablement fait le vide, et qu'il lui suffit d'ouvrir au moment voulu. L'analyse de cet air, faite le lendemain à l'aide de la *méthode eudiométrique* (inventée par l'illustre savant), montra qu'il avait la même composition que l'air pris à la surface de la terre. C'était, pour l'époque, un résultat d'une importance capitale, quand on pense qu'un savant de l'envergure de Berthollet soutenait l'existence de l'hydrogène libre, dans l'air, à une hauteur de quelques milliers de mètres seulement. Aujourd'hui ce résultat paraît tout naturel, car l'air, dans ces régions relativement basses, subit, évidemment, l'effet d'un brassage qui doit rendre uniforme sa composition.

Quant aux variations d'intensité du magnétisme terrestre, ses observations confirmèrent les résultats de sa première ascension. Il faut cependant dire qu'il constata à 3.000 mètres, une très légère augmentation dans la vitesse des oscillations de son aiguille de déclinaison, conformément à la loi de Kupffer.

Pendant près de cinquante ans, personne ne songea sérieusement à renouveler les exploits de Biot et de Gay-Lussac. Mais, en 1850, grâce à Arago, les ascensions scientifiques, remises en honneur, recommencèrent, pour se suivre désormais sans interruptions.

Le 29 juin 1850, un ballon, construit par Dupuis-Delcourt et monté par Barral et Bixio, s'éleva de la cour de l'Observatoire de Paris. L'ascension avorta : à une hauteur de 6.000 mètres à peu près, le ballon, dont l'appendice était beaucoup trop long et beaucoup trop étroit, gonflé outre mesure sous l'influence du soleil, menaça d'éclater. Il fallut crever l'enveloppe avec un couteau et redescendre précipitamment.

Une seconde ascension, le 27 juillet de la même année, quoique faite avec le même ballon qui, cette fois, se déchira spontanément à 3.750 mètres de hauteur, mais faiblement, réussit mieux, les aéronautes ayant eu l'audace, malgré cet accident, de pousser jusqu'à 7.000 mètres. Ils purent constater : 1° que la décroissance de la température avec la hauteur suivait à peu près la loi donnée par Gay-Lussac; 2° que si la lumière du ciel est polarisée, celle des nuages ne l'est point; 3° enfin que, même en été, il peut exister, à des hauteurs de 6.000 à 7.000 mètres, des nuages formés par une infinité de petits particules de glace, ce qui permet d'expliquer la formation, dans cette saison, des nuages de grêle et ce qui justifie l'hypothèse, due à Mariotte, dont nous avons parlé plus haut. A 2.000 mètres d'altitude, en effet, ils pénétrèrent, dans un nuage de 5.000 mètres d'épaisseur à peu près, à l'intérieur duquel ils furent couverts de petits glaçons, en aiguilles extrêmement fines, qui s'accumulaient dans leurs vêtements. Cependant, ils étaient déjà à 6.000 mètres et la température, de — 10°, ne présentait rien d'anormal, lorsque, brusquement, le thermomètre s'abaissa à — 39° : pour la première fois, on put exactement se faire une idée des froids terribles que l'on rencontre, à toute époque de l'année, dans les hautes régions de l'air.

Barral et Bixio ne réussirent pas, dans ces deux ascensions, à prendre de l'air vers 6.000 mètres, afin de contrôler les résultats de Guy-Lussac. Welsh, mieux outillé, mena cette entreprise à bien, dans ses quatre ascensions de l'année 1852, ce qui permit d'affirmer encore une fois l'identité de composition de l'air atmosphérique, au moins jusqu'à 6.000 mètres. Il put aussi, aux observations ordinaires de température et de pression, ajouter des observations hygrométriques qui, d'ailleurs, ne donnèrent aucun résultat nouveau.

Fig. 93. — Glaisher.

Au mois de juin 1861, commencèrent les trente ascensions scientifiques de l'astronome Glaisher, parmi lesquelles la fameuse ascension des 11.000 mètres.

Les résultats obtenus par ce savant sont surtout concluants en ce qui concerne la variation de la température avec la hauteur. Il a parfaitement établi que la diminution de la température, pour une même différence d'altitude, s'accuse d'autant moins qu'on s'élève davantage, la variation, toutes choses égales d'ailleurs, étant plus rapide en été qu'en hiver. Quelques-unes de ses observations relatives à l'état électrique de l'air et aux raies telluriques ayant été infirmées par des observations postérieures, nous n'en parlerons pas. Comme ses prédécesseurs il a aussi constaté la diminution, avec l'altitude, de la quantité absolue d'eau que renferme l'air.

Douze voyages aériens, exécutés en 1867 par C. Flammarion, ont donné des résultats que l'on doit considérer comme notables, si les observations de l'éminent écrivain scientifique n'ont pas été, malgré lui, influencées par des idées préconçues. C'est, en effet, à C. Flammarion que l'on doit la première vérification, en ballon, de la loi de Saigey et de Mendeléeff, et c'est avec les chiffres qu'il a donnés qu'a été établie la formule (4), qu'on regarde comme suffisante jusqu'à 4.000 mètres (Chap. I). Quant à l'état hygrométrique de l'air, d'après lui, il augmente à partir du sol jusqu'à une certaine hauteur, pour décroître ensuite et diminuer constamment, résultat assez conforme aux observations faites par Welch. C. Flammarion a aussi constaté l'accroissement du pouvoir diathermane de l'air et de la radiation solaire avec l'altitude et avec le décroissement de la quantité de vapeur d'eau atmosphérique : à 4.150 mètres d'altitude il a observé une différence de température de 20° entre le soleil et l'ombre. (Notons qu'à 9.000 mètres, Berson en a trouvé une de 24°.) Quant aux courants aériens dans lesquels se meuvent les ballons, ils semblent, d'après lui, déviés, au moins en Europe, dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur qui regarde le Nord, c'est à-dire dans le sens de la loi de Dove. On lui doit aussi des observations intéressantes sur la répartition de la chaleur et de l'humidité dans les nuages : conformément à ce que le raisonnement peut faire prévoir, il a trouvé qu'à l'intérieur de ces masses aqueuses, l'état hygrométrique diminue avec la hauteur, le contraire ayant lieu pour la température.

Comme tous les aéronautes, comme tous les observateurs de montagnes, C. Flammarion a rencontré, dans l'atmosphère, des régions plus chaudes ou plus froides que la moyenne de l'altitude, et qui traversent l'air comme de véritables *fleuves aériens*. G. Tissandier, lui aussi, a souvent observé de pareils phénomènes : ainsi, le 7 février 1869, alors que la température, au niveau du sol, était de 3° seulement, il a pénétré, à 1.000 mètres, dans un courant d'air chaud, d'une épaisseur de 600 mètres, dont la température était de 28°. On a vu plus haut comment Barral et Bixio ont rencontré vers 7.000 mètres, un courant d'air froid à 29° au-dessous de la température normale.

Les ascensions plus récentes de G Tissandier, Sivel, Crocé-Spinelli, W. de Fonvielle, etc., ont confirmé la plupart des résultats précédents. En particulier, dans les deux ascensions du *Zénith*, Crocé-Spinelli a parfaitement constaté, contrairement à Glaisher, la disparition des raies telluriques avec la hauteur, disparition concordant avec la diminution de la quantité de vapeur d'eau atmosphérique.

Enfin, dans ces derniers temps, André d'abord, Lecadet ensuite, ont commencé une série d'expériences aérostatiques très intéressantes sur l'électrisation de l'air. Il semble résulter de ces observations, faites autant que possible par un ciel pur et serein, à l'aide de l'électromètre Thomson convenablement modifié, que si le potentiel électrique de l'air croît avec la hauteur, l'augmentation de potentiel par unité de hauteur, c'est-à-dire la *force électrique en chaque point du champ terrestre*, décroît à mesure qu'on s'élève : égale à 150 volts par mètre, en moyenne, au niveau du sol (conformément à des expériences déjà anciennes de Mascart et Joubert), cette augmentation ne serait plus que de 22 volts à 2.370 mètres, de 13 volts à 4.000 mètres. Lecadet croit pouvoir affirmer que le maximum de potentiel doit se présenter vers 9.000 mètres, résultat qui semble ne devoir être accepté qu'avec une certaine réserve, ses expériences n'ayant été poussées que jusqu'à 4.000 mètres.

II. — La catastrophe du *Zénith* avait jeté un froid dans le monde des aéronautes scientifiques. Après avoir soutenu que seules les explorations aux hautes altitudes pouvaient aider aux progrès de la science, on soutint le contraire, sans trop de conviction d'ailleurs. Aussi est-ce avec un véritable soulagement que fut accueilli, en 1892, le projet, dû à Capazza, d'explorer les hautes régions de l'atmosphère à l'aide de ballons libres, doués d'une force ascensionnelle suffisante et emportant des instruments enregistreurs.

. Le temps nécessaire pour démontrer à Capazza qu'il avait emprunté son idée à C. Jobert, et on se mit à l'œuvre.

Pour faire mieux comprendre les conditions du problème que les *ballons-sondes* (comme Hermite et Besançon ont baptisé les ballons-explorateurs de Capazza) doivent résoudre, examinons d'abord le cas où un de ces ballons n'aurait que son enveloppe à enlever. Supposons-le complètement gonflé au départ, ce qui a l'avantage d'éviter à l'étoffe les brusques efforts auxquels, à un instant donné, elle est toujours assujettie lorsque le ballon est lancé flasque. Soit a_1 le poids spécifique de la zone d'équilibre que l'on veut atteindre, ϖ le poids de l'enveloppe par unité de surface, d la densité du gaz aérostatique, R le rayon à donner au ballon pour atteindre l'altitude voulue. Le poids de l'enveloppe, dont la surface est $4\pi R^2$, sera $4\pi R^2 \varpi$ et la formule (17) du Chap. I donne immédiatement, pour R, en y remplaçant P par $4\pi R^2 \varpi$, la valeur

$$R = \frac{3\varpi}{a_1(1-d)}. \qquad (65)$$

Comme R est d'autant plus grand que a_1 est plus petit, d'autant plus petit que d et ϖ sont plus grands, *le rayon nécessaire à un ballon-sonde pour atteindre une zone d'équilibre déterminée est* donc *d'autant plus considérable que cette zone est à une altitude plus élevée ;* mais, par contre, *il est d'autant plus petit que le poids de l'enveloppe par unité de surface est plus faible et le gaz aérostatique moins dense.*

Il semble alors, à première vue, qu'avec une étoffe suffisamment légère, un gaz peu lourd et un rayon assez grand, on puisse lancer un ballon-sonde à n'importe quelle altitude. En réalité, la question n'est pas aussi simple, et cela parce qu'il faut tenir compte des effets dus à la surpression intérieure (Chap. I). Si l'on admet comme exacte la formule (19), on voit, en effet, que le poids spécifique a_2 de la *zone d'équilibre de hauteur maxima* qu'un ballon-sonde peut atteindre, sans que l'enveloppe se déchire, est donné, abstraction faite de l'appendice, par la relation

$$a_z = \frac{3\varpi}{1 - d}\sqrt{\frac{\varphi_0}{T}},$$

que l'on obtient en remplaçant, dans la formule précédente, R par la valeur limite qu'en donne la formule (18), et qu'il est plus commode d'écrire sous la forme

$$a_z = 3\varpi\sqrt{\frac{a_0}{T(1 - d)}}. \tag{66}$$

Or, d'après cette formule, a_z est d'autant plus faible que ϖ, d et a_0, sont plus petits et T plus grand. *La zone limite que peut atteindre un ballon-sonde est* donc *d'autant plus élevée que l'étoffe employée est plus légère, le gaz aérostatique moins dense et le poids spécifique de l'air de la zone de départ plus faible*, ce qui revient à dire qu'*il y a avantage à lancer les ballons-sondes en été, ou, encore, d'un point aussi élevé que possible au-dessus du niveau de la mer.*

Pour fixer les idées, cherchons la hauteur maxima que pourrait atteindre un ballon-sonde, rempli de gaz hydrogène et n'enlevant que son enveloppe, en supposant que ce ballon parte du niveau de la mer (ou d'un lieu peu élevé, comme Paris). Admettons que l'enveloppe du ballon soit faite avec la soie particulière dont se servent Hermite et Besançon, soie dont le poids, une fois qu'elle est vernie (et en tenant compte des coutures) est de 0 kg., 122 par mètre carré, la résistance à la rupture étant de 550 kilogrammes par mètre de longueur. On aura

$$a_z = 3 \times 0{,}000122 \times \sqrt{\frac{0{,}0013}{0{,}550 \times (1 - 0{,}154)}} = 0{,}000019,$$

poids spécifique qui correspond à une pression de 11 millimètres et à une hauteur de plus de 33 kilomètres, en appliquant, pour le calcul de cette hauteur, la formule d'Halley. — On gagnerait 2 kilomètres en lançant le ballon d'un point élevé, comme l'Observatoire du Pic du Midi (2.877 mètres).

Quant au rayon nécessaire pour atteindre cette hauteur, il sera

$$R = \sqrt{\frac{0{,}0013 \times 0.846}{0{,}550}} = 24 \text{ mètres,}$$

correspondant à un aérostat de 48 mètres de diamètre environ, c'est-à-dire de dimensions presque gigantesques et d'un prix fort élevé.

On peut objecter à ses calculs : 1° qu'il faut tenir compte de la *surcharge :* filet, nacelle, enregistreurs, etc. ; 2° que la hauteur trouvée correspond au maximum de tension que peut supporter l'étoffe.

Voyons d'abord l'effet de la surcharge. Soit C cette surcharge, V le volume du ballon, S sa surface. Sans surcharge, le ballon arrive jusqu'à la zone d'équilibre a_z pour laquelle la formule (16) donne l'équation d'équilibre

$$Va_z (1 - d) = S\varpi.$$

Avec la surcharge, il n'affleurera plus qu'à une zone d'équilibre de poids spécifique a_x donné par l'équation d'équilibre

$$Va_x (1 - d = S\varpi + C.$$

Ces deux relations donnent immédiatement

$$a_x = a_z \left(1 + \frac{C}{S\varpi}\right), \tag{67}$$

et un calcul simple montre que *si le poids* C *de la surcharge ne dépasse pas le centième du poids* S *de l'enveloppe*, la différence de hauteur entre les deux zones d'équilibre ne dépasse pas 80 à 100 mètres, c'est-à-dire est pratiquement négligeable.

Quant à la tension de l'étoffe, si on la fait travailler à moitié de sa résistance, ce qui revient à remplacer T par $\frac{T}{2}$ dans la formule (66), on trouvera, pour la valeur du poids spécifique de la zone limite,

$$a_z = 0{,}0000268,$$

valeur correspondant à une hauteur de 31 kilomètres et à un rayon de 17 mètres cubes environ, soit 34 mètres de diamètre au lieu de 48. Le tonnage nécessaire pour atteindre une hauteur d'une trentaine de kilomètres n'en est pas moins énorme et il y aurait de quoi décourager les expérimentateurs les plus audacieux, si l'on ne réfléchissait que, si intéressantes que soient les formules précédentes, elles ne répondent pas à la réalité des faits.

D'abord la surpression intérieure n'atteint la valeur maximum sur laquelle sont basés les calculs précédents qu'au sommet du ballon : on peut donc se contenter de renforcer cette région, ce qui donne le moyen d'alléger de beaucoup le poids des enveloppes. Ensuite, et c'est là un point capital, en établissant la formule (66) nous avons supposé que la température intérieure du ballon était égale à la température extérieure. Or, c'est ce qui n'a pas lieu. Un ballon étant, comme nous l'avons déjà fait remarquer, un thermomètre très paresseux, il existe des différences considérables de température entre son intérieur et l'extérieur, différences qui peuvent atteindre près de 72° en faveur du gaz, comme l'a montré l'ascension de l'*Aérophile* du 5 août 1896, et cela malgré le refroidissement qui accompagne nécessairement l'expansion du gaz pendant la montée, refroidissement qui, dans l'ascension dont nous venons de parler, a atteint jusqu'à 51°. Enfin, il faut tenir compte de l'extrême énergie de la radiation solaire dès que le ballon a dépassé la région des nuages, soit 9.000 à 12.000 mètres.

On comprend ainsi comment l'*Aérophile* n° 1, ballon de

3 mètres de rayon et d'un tonnage de 113 mètres cubes, gonflé simplement au gaz d'éclairage, dont l'enveloppe, en baudruche, pesait 11 kilogrammes et dont la surcharge était de 7 kilogrammes, ait atteint une hauteur de 15 kilomètres, alors que les formules que nous avons indiquées au chapitre II indiquent, pour le poids spécifique de la zone d'équilibre la valeur

$$a = \frac{0{,}018}{113\,(1 - 0{,}461)} = 0{,}000295,$$

correspondante, d'après la formule d'Halley, à une hauteur de 12 kilomètres seulement.

W. de Fonvielle se demande même, et avec raison, s'il n'y aurait pas lieu, pour les ascensions de jour, afin d'augmenter l'effet de la radiation solaire, de teindre les ballons-sondes en *noir*.

Quoi qu'il en soit, depuis le 21 mars 1893 jusqu'au 1er juin 1897, Hermite et Besançon, adoptant, avec un enthousiasme digne des plus grands éloges, l'idée de Capazza, n'ont pas hésité à lancer dans l'espace moins de 10 ballons-sondes, soit en baudruche, soit en soie, d'un tonnage de 48 à 460 mètres cubes, et sont arrivés ainsi à prouver, qu'été comme hiver, règnent aux hautes altitudes de 14 à 18 kilomètres, des températures de — 51° à — 70°, et des courants aériens d'une vitesse pouvant dépasser 160 kilomètres à l'heure. La figure 94 donne, d'ailleurs, une idée des diagrammes obtenus dans ce genre d'expérience. Elle montre que dans l'ascension du 14 novembre 1896, leur ballon l'*Aérophile* s'est élevé de 15 kilomètres et a subi, vers 6 heures du matin, une température minima de — 60°. Quant à la figure 95, elle montre jusqu'où l'homme a pu, d'une façon générale, pousser ses explorations au sein de l'Océan atmosphérique.

Les aéronautes étrangers, allemands, russes, américains, etc., n'ont pas tardé à imiter Hermite et Besançon. Grâce à la générosité et à l'initiative intelligentes de Guillaume II, Assman et Berson, à Berlin, Mœdebeck et von Hergessel, à Strasbourg, ont pu rivaliser avec les aéronautes français : il y a même lieu de croire qu'un des ballons-sondes d'Assmann est parvenu à une altitude de 19 kilomètres environ, l'aréonautique allemande tenant ainsi le record des hautes altitudes, aussi bien pour les ballons-sondes que pour les ballons montés. Le gouvernement français n'a rien voulu faire et n'a rien voulu accorder, mais l'Institut de France, le prince Roland Bonaparte, le prince de Monaco, le baron

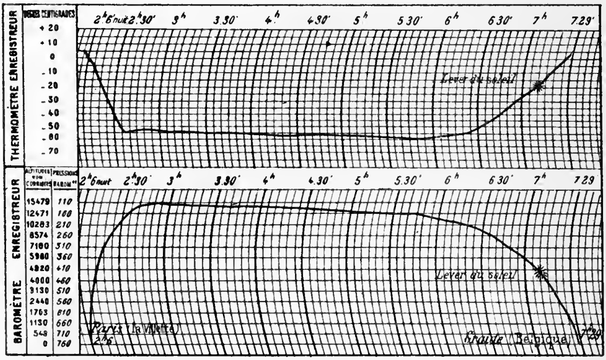

Fig. 94. — Diagramme de l'ascension de l'*Aérophile* (14 novembre 1896).

Edm. de Rothschild ont permis, heureusement, de suppléer à l'insuffisance des ressources qu'avaient à leur disposition Hermite et Besançon.

Enfin, en septembre 1896, une Commission internationale a décidé de procéder à des lancements exécutés le même jour, au même instant, de Paris, Berlin, Munich, Saint-Pétersbourg, Varsovie, etc., de façon à pouvoir étudier sérieusement la direction et la force des courants de la haute atmosphère. Comme le fait remarquer Jamin, le ballon est le seul instrument qui se transportant, en un instant, dans toutes les couches de l'atmosphère, nous donne le détail des actions en chaque point, au moment qu'elles s'accomplissent, et nous permette, ensuite, d'en reconstituer l'ensemble. Tandis que les observatoires de montagne,

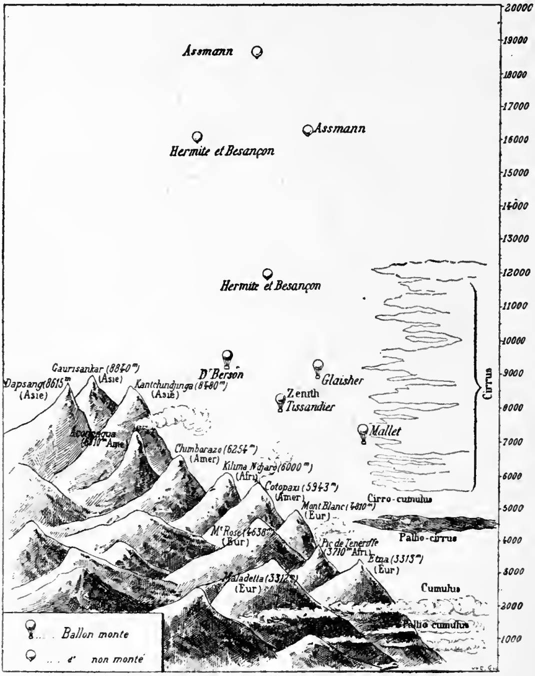

Fig. 95. — Les explorations de l'atmosphère.

tant prônés il y a quelques années au point de vue météorologique, sont des lieux d'exception, entourés de sommets perturbateurs, qui n'observent les mouvements aériens qu'après en avoir modifié les conditions, les ballons sont de simples témoins sans action, dont le seul rôle est de surprendre les éléments dans leur travail.

Les ballons-sondes, leur gréement, les instruments d'observation qu'ils emportent, ont été suffisamment décrits dans les chapitres précédents. Il ne nous reste plus, pour être à peu près complet, qu'à donner une idée de l'*appareil à prise d'air* imaginé par Cailletet, pour l'étude de l'air des hautes altitudes.

Cet appareil (fig. 96), dont le poids total ne dépasse pas 12 kilogrammes, se compose essentiellement d'un réservoir cylindrique en cuivre étamé, A, d'une capacité de 7 litres environ, dans lequel on fait le vide aussi parfaitement que possible. Ce réservoir communique, par un robinet E, dont un puissant mouvement d'horlogerie C fait mouvoir la clef, avec un tube G de 2 mètres de long, qui sert à puiser l'air atmosphérique. Il est facile de fixer à l'avance l'instant où par l'intermédiaire d'un pignon *g* agissant sur un secteur S, le robinet doit s'ouvrir, puis se fermer, ce robinet ne devant rester ouvert, d'ailleurs, que pendant quatre minutes environ. Afin d'éviter la rupture des soudures par l'effet d'un choc violent, le récipient communique avec le robinet par une spirale de cuivre rouge F, très élastique.

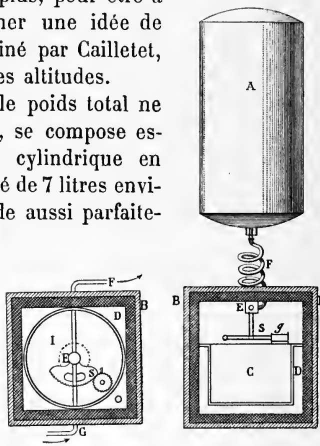

Fig. 96.
Appareil à prise d'air de Cailletet.

Comme on le conçoit aisément, le robinet est l'organe délicat par excellence de cet appareil. Il faut que son étanchéité soit parfaite, ce que Ducretet, son constructeur, n'a obtenu qu'après de longs efforts. Il est facile, d'ailleurs. de s'assurer de la perfection du robinet à l'aide d'un indicateur du vide adapté au réservoir.

Il a fallu songer aussi à soustraire les huiles lubréfiantes employées, soit dans le robinet, soit dans le mouvement d'horlogerie, aux températures extrêmement basses de la haute atmosphère. A cet effet, on renferme le robinet et son mouvement d'horlogerie dans une boîte intérieurement capitonnée par une couche de feutre de 2 centimètres d'épaisseur, entourant une cassette de fer-blanc remplie d'une dissolution sursaturée et chaude d'acétate de soude. Cette dissolution conserve une température élevée pendant une heure ou deux, temps plus que suffisant pour permettre au ballon de gagner son altitude maximum.

C'est avec cet appareil que l'on a pu, le 18 février 1897, ramener à terre, pour l'analyser, de l'air recueilli à 15.500 mètres, et constater que sa composition était, à très peu près, identique à celle de l'air du sol, résultat qui semble établir qu'à cette altitude l'air subit encore les effets du brassage continuel des différentes couches de l'atmosphère.

III. — Résumons les connaissances que nous devons aux ballons, sur la constitution de notre atmosphère.

Tout d'abord la disparition presque absolue de l'eau, soit à l'état de vapeur, soit à l'état solide ou liquide, au-dessus de 9 à 12.000 mètres, c'est-à-dire au-dessus de la région des nuages, puis les basses températures que l'on rencontre à partir de ces hauteurs, doivent nous faire considérer l'enveloppe gazeuse de notre globe comme divisée en deux zones : l'inférieure, formant l'*atmosphère proprement dite*, d'une hauteur variable de 9.000 à 12.000 mètres, qui, seule, constitue un milieu où se trouvent réunies les conditions nécessaires à la vie ; la supérieure, qu'on peut appeler *super-atmosphère* ou *haute atmosphère*, où la vie, dans les conditions normales, est à peu près impossible.

Nous pouvons, ensuite, regarder comme à peu près établi :

1° Que la température, à partir du sol, décroît régulièrement à mesure que l'altitude augmente, et proportionnellement à la diminution de pression.

Jusqu'à 9.000 mètres, à peu près, cette loi paraît même rigoureusement exacte, sauf les perturbations accidentelles dues au voisinage du sol, à la présence des nuages, etc. Mendeléeff croit même pouvoir affirmer son exactitude jusqu'aux extrêmes limites de la superatmosphère. Mais ce qu'on ignore encore, même pour les couches inférieures de l'atmosphère, c'est la valeur exacte du rapport qui existe entre la différence des pressions et la différence correspondante des températures.

2° Que la quantité absolue de vapeur d'eau décroît régulièrement à partir du sol, suivant une loi encore inconnue, l'état hygrométrique paraissant croître d'abord, puis décroître, à mesure qu'on s'élève, mais qu'en tout cas, en toute saison, l'atmosphère contient assez de vapeur pour fournir à la terre la quantité de pluies dont elle a besoin (avouons que le contraire serait étonnant).

3° Que la vitesse des courants aériens croît rapidement avec la hauteur, et qu'elle peut atteindre près de 160 kilomètres à l'heure à la limite inférieure de la superatmosphère.

4° Que l'intensité de la radiation solaire augmente notablemént avec l'altitude, les mesures faites jusqu'ici n'ayant conduit à aucun résultat, et devant être reprises bientôt par Violle, avec les actinomètres enregistreurs dont il a été parlé au Chapitre III, et qu'on se propose de lancer dans l'espace, attachés à des ballons-sondes.

5° Que les différentes constantes du magnétisme terrestre (intensité, déclinaison, inclinaison) ne changent pas sensiblement de valeur, au moins dans la zone d'air d'épaisseur relativement faible qui a pu être étudiée.

6° Que le potentiel de l'air croît, dans des conditions normales, avec la hauteur, la force électrique du champ terrestre décroissant régulièrement suivant une loi qui ne peut être que mal connue, puisque, dans ce genre d'expériences, on ne s'est pas élevé à plus de 4.000 mètres.

Le fait du décroissement régulier de l'augmentation du potentiel par mètre de hauteur, n'en est pas moins, d'ailleurs, d'une grande importance. Il permet de penser qu'à partir d'une certaine altitude le potentiel de l'air reste constant le long de la même verticale, conformément aux idées d'Edlund relativement à l'état électrique de notre atmosphère. D'après ce savant, en effet, le potentiel de l'air croît jusqu'à une hauteur qui, voisine de la surface de la terre aux environs des pôles magnétiques, augmente à mesure qu'on se rapproche de l'équateur. C'est dans cette zone de potentiel maximum, où l'air est excessivement raréfié, que se produiraient les décharges électriques qui donnent lieu aux *aurores polaires*. Seulement, tandis que d'après les calculs les plus dignes de foi, la zone de ces décharges et, par suite, la zone de potentiel minimum, serait, sous nos latitudes, à 500 ou 600 kilomètres au-dessus du sol, Lecadet croit, d'après ses propres expériences, pouvoir affirmer que, sous nos latitudes, cette zone ne dépasse pas 9 à 10 kilomètres. L'avenir, seul, donnera la solution du problème.

Une question plus importante, celle qui préoccupe en ce moment tous les aéronautes physiciens, est la *mesure des hauteurs à l'aide du baromètre*.

Rigoureusement, la loi du nivellement (Chap. I) est fausse, car indépendamment de l'état de calme parfait qu'elle suppose, elle admet à priori, pour l'atmosphère, une hauteur infinie, comme le montre la formule d'Halley, alors que les calculs les plus dignes de foi montrent qu'elle ne peut dépasser, au plus, 36.000 kilomètres, soit moins de 6 fois le rayon de la terre. Comme l'hypothèse d'une atmosphère de hauteur infinie est inadmissible, il en résulte que toutes les corrections ou modifications qu'on peut apporter à cette formule, qu'elles soient de Laplace ou d'un autre, n'en feront jamais une relation mathématiquement exacte. Pour obtenir la formule désirée, il faudrait avoir, sur la constitution des gaz et de l'air aux hautes altitudes, c'est-à-dire à l'état radiant et aux basses températures, des notions qui, pour l'instant, nous manquent absolument. Il y a même là, pour un physicien, une mine à explorer et à exploiter.

Il faut donc se contenter de chercher une formule de nivellement pour les régions moyennes, qui nous permette d'évaluer exactement les hauteurs, au moins jusqu'aux 40 ou 50 kilomètres que les ballons-sondes vont permettre bientôt d'atteindre.

Laplace, comme l'expérience l'a démontré, a fort bien résolu la question pour des altitudes de quelques kilomètres. Tenant compte de l'abaissement de température avec la hauteur, il a admis que par suite du brassage, on pouvait remplacer la colonne d'air verticale à 0° que l'on suppose, dans l'établissement de la formule d'Halley, séparer les deux stations dont on cherche la différence d'altitude, par une colonne d'air dont la température $\frac{t_0 + t_n}{2}$ serait la moyenne des températures t_0 et t_n des points extrêmes. Il est ainsi arrivé (abstraction faite des corrections secondaires dues à l'humidité de l'air, aux variations de la pesanteur, etc.), à la formule connue

$$z = 18.400 \left(1 + \alpha \frac{t_0 + t_n}{2}\right) \log \frac{h_0}{h_n}, \tag{68}$$

la hauteur z étant exprimée en mètres et α étant le coefficient de dilatation des gaz. Pour améliorer cette relation, qui a été cependant reconnue suffisamment exacte jusqu'à 8.800 mètres de hauteur, il suffirait de tenir compte de la loi de Saigey et de Mendeléeff, en admettant, bien entendu, que cette loi soit exacte au moins jusqu'à 40 ou 50 kilomètres. Un calcul facile montre que, dans ces conditions, la *formule du nivellement* (abstraction faite toujours des corrections secondaires) prendrait la forme

$$z = A \log \frac{h_0}{h_n} + B\,(h_0 - h_n), \tag{B}$$

A et B étant deux coefficients constants qu'il serait facile de calculer si l'on connaissait la valeur exacte de la constante a de la formule (A) donnée au Chapitre I.

Il n'y a évidemment que deux moyens d'arriver à la détermination de ces coefficients : 1° la recherche directe de la valeur de la constante *a*, à l'aide de ballons, montés ou non, emportant des baromètres suffisamment précis ; 2° la mesure directe, à un instant donné, de la hauteur exacte d'un ballon, monté ou non, comparée avec les indications du baromètre.

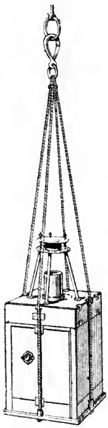

Fig. 97. — Enregistreur photographique de Cailletet.

On a proposé, à cet effet, d'avoir recours à la photographie. Un ballon-sonde, par exemple, enlèverait un appareil photographique, avec un mouvement d'horlogerie réglant à des intervalles de temps fixés à l'avance la prise de vues photographiques du terrain situé immédiatement au-dessous de l'aérostat. Par la simple comparaison avec la carte des clichés ainsi obtenus, on pourrait tracer avec exactitude l'itinéraire du ballon, déterminer sa vitesse à chaque instant, et, surtout, en comparant les dimensions réelles d'objets ou de distances connus aux dimensions de leurs images, en déduire la hauteur de l'appareil au moment de l'obtention de la photographie.

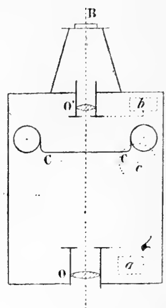

Fig. 98. — Schéma de l'enregistreur photographique.

L'*enregistreur photographique* imaginé dans ce but par Cailletet, mais qui n'a été essayé jusqu'à présent qu'en ballon monté, le 21 octobre 1897, se compose d'une boîte prismatique en bois, suspendue au-dessous de la nacelle du ballon, par l'intermédiaire d'un anneau et d'un mousqueton, de manière à assurer à son axe une position toujours sensiblement verticale (fig. 97). Sur la partie inférieure de la boîte, qui regarde le sol, est disposé un objectif O à long foyer ; sur la paroi opposée, est un second objectif O′, destiné à photographier le baromètre anéroïde B (fig. 98). Un mouvement d'horlogerie fait mouvoir les obturateurs qui, en s'ouvrant de deux minutes en deux minutes, permettent aux rayons lumineux de pénétrer dans l'appareil.

Une pellicule de celluloïd sensible CC reçoit sur ses deux faces les rayons ainsi transmis et se déroule devant les objectifs, en obéissant à un ressort contenu dans un barillet c indépendant des barillets a et b des obturateurs. Lorsqu'on connaît : 1° la distance focale f de l'objectif photographique O ; 2° la distance d de deux points situés sur le sol ; 3° la distance de ces deux points sur l'épreuve photographique, la proportion

$$\frac{h}{f} = \frac{d}{\delta},$$

que l'on déduit immédiatement de la similitude des triangles O_1AB, $O_2A'B'$ (fig. 99), donne la hauteur cherchée h, soit

$$h = f\frac{d}{\delta}. \qquad (69)$$

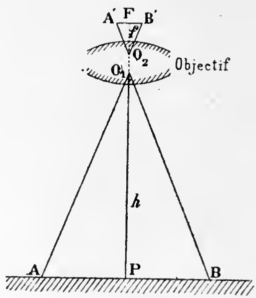

Fig. 99.

Comme l'épreuve donne également l'image du baromètre et, par conséquent, la pression au moment de la prise, on peut donc contrôler les indications de cet instrument et il y a lieu de croire qu'on pourra arriver ainsi à résoudre le problème cherché. La figure 100 donne, d'ailleurs, une idée des photographies ainsi obtenues.

On est, d'autre part, arrivé à des résultats remarquables en opérant d'après les méthodes employées en Géodésie pour obtenir la hauteur d'un point inaccessible. En suivant le ballon, dans son voyage, au moyen de plusieurs lunettes dont les visées, faites avec soin, se coupaient aux mêmes instants, on a pu déduire sa position et sa hauteur à l'aide d'un calcul simple, que nous croyons utile d'indiquer ici :

Soit $AA' = b$ une *base* horizontale convenablement choisie, B le

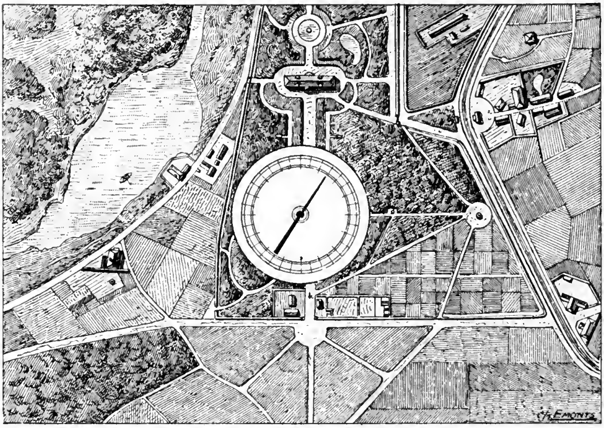

Fig. 100. — Photographie donnée par un enregistreur Cailletet.

centre du ballon à un instant donné (fig. 101). Déterminons au même instant les angles $BAA' = A$, $BA'A = A'$. Le triangle ABA' donne

$$AB = b\,\frac{\sin A'}{\sin A}.$$

Déterminons, en même temps, l'angle $ZAB = z$ de la base AB avec la verticale AZ, et soit $BB' = h$ la hauteur demandée : alors le triangle rectangle BAB' donnera

$$h = b\cos z\,\frac{\sin A'}{\sin A}. \tag{70}$$

C'est en opérant ainsi que les savants qui suivaient la marche aérienne de Pilâtre de Rozier et du marquis d'Arlandes, dont la montgolfière était dépourvue de baromètre, purent constater que les deux voyageurs s'étaient élevés à 1.000 mètres C'est encore ainsi que les aéronautes de Strasbourg ont pu, dans ces derniers temps, vérifier l'exactitude relative de la formule de Laplace jusqu'à 9.000 mètres.

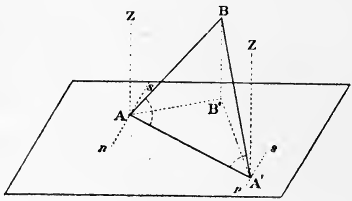

Fig. 101.

La détermination des angles A et A' est d'ailleurs facile. Pour l'angle A, par exemple, appartenant au trièdre (A,B'AA'), dans lequel on connaît l'angle $BAB' = 90^\circ - z$, l'angle $B'AA' = \alpha - a$, α désignant l'azimut de la base AA', c'est-à-dire son angle avec l'axe *ns* de la boussole, a l'azimut du ballon, c'est-à-dire l'angle *s*AB', une formule connue de Trigonométrie sphérique donne, en remarquant que l'angle dièdre opposé à l'angle A, c'est-à-dire l'angle du plan vertical BAB' avec le sol, est de 90°, la valeur

$$\cos A = \sin z \cos (\alpha - a). \tag{71}$$

De même, on a

$$\cos A' = \sin z' \cos (\alpha - a'), \tag{71 bis}$$

z' et a' étant les distances zénithales et azimutales du ballon pour le point A'.

La seule difficulté (et elle est grande) que présentent ces observations provient du mouvement du ballon. Hermite l'a en partie résolue par l'invention de son *dromographe*, sorte de théodolite enregistreur à l'aide duquel, tout en ne perdant pas de vue le ballon, on peut, d'un point convenablement choisi, déterminer, à chaque instant, ses distances azimutale et zénithale, avec une approximation relative, bien entendu :

Cet instrument (fig. 102) se compose d'un plateau PP mobile autour de l'axe vertical *ab* d'un plateau fixe AA, dont l'horizontalité est assurée par des vis calantes V'. Sur le plateau mobile se trouvent le cylindre enregistreur H, puis deux tiges T et T' qui, tout en servant de guides aux plumes *x* et *y*, forment un cadre vertical rigide sur le sommet duquel est placé une boussole B et, latéralement, une lunette astronomique L placée dans un collier mobile, dans un plan vertical, autour de l'axe horizontal O. L'ensemble du plateau mobile et du cylindre correspond au cercle azimutal d'un théodolite ordinaire. La rotation de cet ensemble permet d'inscrire à chaque instant l'angle que fait la direction du ballon

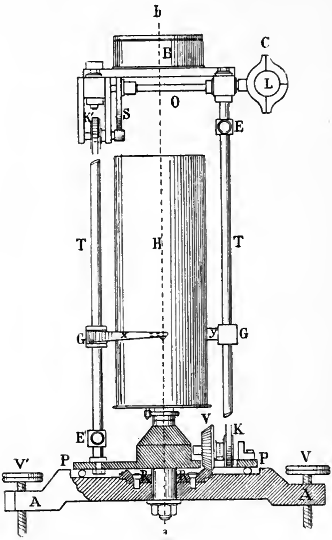

Fig. 102. — Dromographe d'Hermite.

avec la direction nord-sud de la boussole, grâce à un pignon V engrenant avec une roue dentée fixe R, et ensuite à une chaîne de Galle K tendue par une poulie E; le mouvement de rotation horizontal du plateau mobile est alors transformé en un mouvement vertical qu'inscrit la plume *y* sur le cylindre enregistreur, les lignes verticales inscrites étant proportionnelles aux angles de déplacement. L'inscription de la distance zénithale s'obtient d'une façon analogue : la rotation de l'axe mobile O qui porte la lunette se transforme encore, sur le cylindre de papier, en un mouvement vertical qu'inscrit la plume x, les lignes verticales inscrites étant proportionnelles à ces distances.

Pour terminer, signalons le service de cerfs-volants que le Bureau météorologique des Etats-Unis a institué dans ces derniers temps à l'Observatoire de Blue-Hill :

Ces cerfs-volants sont accouplés en tandem les uns au-dessus des autres, à peu près comme le cerf-volant Hargrave, que représente la figure 103, de façon à augmenter leur force de soulèvement. On leur confie des enregistreurs : baromètres, thermomètres, etc. Une corde ne suffisant pas à les maintenir, on la remplace par un mince câble d'acier, déroulé au moyen d'un treuil mû à la vapeur.

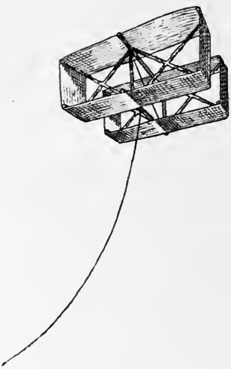

Fig. 103.
Cerf-volant Hargrave.

Ces appareils ont pu atteindre des altitudes très élevées. Prenons, par exemple, l'expérience faite le 19 septembre 1897, jour où s'est effectuée la plus haute ascension du nouvel engin scientifique. Vers midi, on avait lancé un cerf-volant qui est resté en l'air jusqu'à sept heures, se maintenant pendant plus de cinq heures à 1.500 mètres, au moins, au-dessus de l'Observatoire ; vers 4 heures ils s'était même élevé à 2.860 mètres. Il n'a pas fallu moins de deux heures, d'ailleurs, pour enrouler sur le dévidoir à vapeur les 6.500 mètres de câble qui rattachaient l'appareil au sol.

Comme il serait prouvé que les sautes de vent se produisent entre 1.600 et 3.000 mètres, de douze à seize heures avant que le changement de direction se manifeste à la surface du sol, on espère arriver, à l'aide de ces engins, à pronostiquer le temps d'une façon à peu près satisfaisante, en même temps qu'ils serviront à examiner une partie des problèmes qu'on étudie avec les ballons-sondes. Par exemple, quand la température descend normalement d'environ 1 degré par 200 mètres, comme dans l'ascension du 19 septembre, l'équilibre atmosphérique est satisfaisant, et le temps fixé au beau. Mais si la température, en haut, offre des anomalies, c'est l'annonce d'une prochaine perturbation atmosphérique.

CHAPITRE XI

LA GUERRE ET LES AÉROSTATS

I. — Avant de tenter la fameuse ascension du 21 novembre 1783, Pilâtre de Rozier s'était d'abord aventuré plusieurs fois dans une montgolfière retenue par des câbles de plus en plus longs. Giroud de Vilette, qui l'accompagnait dans l'une de ces premières ascensions captives, fut frappé de la netteté avec laquelle il découvrait les moindres détails du terrain environnant, et signala immédiatement au public combien une telle machine serait utile dans une armée « pour découvrir la position de l'ennemi, ses manœuvres, ses marches, ses dispositions, et les annoncer par des signaux aux troupes alliées de la machine ».

Aussi, dès les premiers temps de la Révolution française, plusieurs propositions avaient surgi pour appliquer les aérostats aux opérations militaires. Mais comme il ne s'agissait que de ballons plus ou moins dirigeables, on y fit peu d'attention.

Les aérostats furent employés, pour la première fois pendant le siège de Condé, en 1793, par le commandant Chanal, qui chercha à faire passer, par ce moyen, des dépêches au général Dampierre. Par malheur, la tentative alla directement contre le but proposé, car le ballon, au lieu de parvenir au général français. tomba dans le camp ennemi.

Ce fut Guyton de Morveau, qui eut le mérite de trouver l'emploi, vraiment pratique, des aérostats dans les armées. Il proposa de se servir d'aérostats retenus captifs au moyen de cordes, dans la nacelle desquels des observateurs, placés comme en sentinelles perdues au haut des airs, observeraient les mouvements de l'ennemi.

La proposition de Guyton de Morveau une fois agréée par le Comité de Salut public, le physicien Coutelle, aidé de Charles

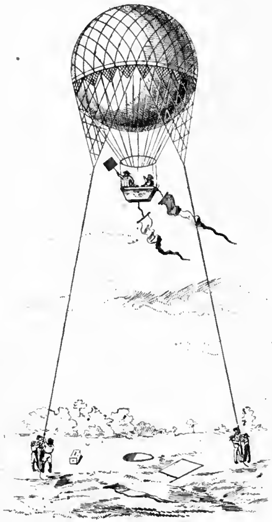

Fig. 104.
Ballon captif de Coutelle et Conté.

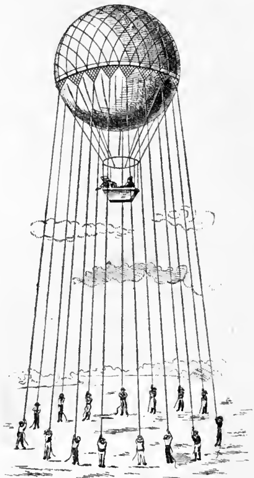

Fig. 105.
Transport du ballon-captif de Coutelle et Conté.

et de Conté, fut chargé des premiers essais pour la production de l'hydrogène en grand, au moyen de la décomposition de l'eau par le fer chauffé au rouge (Chap. III).

Ces essais ayant réussi, Coutelle fut immédiatement créé directeur de la première Ecole militaire d'aérostation qui, comme celle qui existe aujourd'hui, fut établie à Meudon.

Perfectionnant sans cesse leurs appareils de production, Coutelle et Conté arrivèrent à produire en quelques heures la quantité d'hydrogène nécessaire au remplissage d'un aérostat dont le tonnage fut, dès les premiers jours, reconnu devoir ne pas excéder 500 à 540 mètres cubes (tonnage actuel des ballons captifs militaires français). Ils trouvèrent aussi un vernis si parfait (la formule a été perdue depuis) que leur aérostat *l'Entreprenant* demeura deux mois entiers plein de gaz et qu'il n'était pas rare, à l'école de Meudon, d'en conserver pleins pendant trois mois.

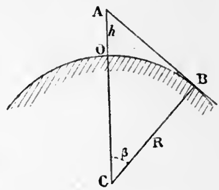

Fig. 106

En présence de Guyton de Morveau, Monge, Fourcroy et de tous les membres du comité du Salut public, Coutelle s'éleva, à diverses reprises, à une hauteur de 500 mètres dans le ballon retenu captif. Le câble n'était pas attaché à la nacelle, car, par l'effet du vent, le ballon et son câble pouvant être rabattus jusqu'à terre, la nacelle, en suivant le mouvement, aurait précipité les observateurs dans l'espace : le ballon était simplement retenu par deux cordes attachées, par l'intermédiaire de deux larges pattes d'oie, à l'équateur du filet, et retenues par une quarantaine d'hommes placés à terre (fig. 104). Pour le transporter d'un point à un autre, Coutelle imagina de le munir de *cordes équatoriales*, dont sont munis encore aujourd'hui les ballons captifs militaires français (fig. 105).

On constata que l'on pouvait, du haut de la nacelle, embrasser un espace fort étendu et reconnaître très nettement les objets, soit à la vue simple, soit avec une lunette d'approche. Si l'on se rapporte, en effet, à la formule démontrée au Chapitre V, et qu'on désigne par r le *rayon de visibilité* OB (fig. 106), comme

$$r = R\beta,$$

on a, en remplaçant β par sa valeur, la formule

$$r = \sqrt{2Rh},$$

qui montre que *le rayon de visibilité augmente proportionnellement à la racine carrée de la hauteur.* Comme le rayon de la terre $R = 6.371.000$ mètres environ, d'où $\sqrt{2R} = 3.570$ mètres, il suffira, pour avoir le cercle de visibilité en mètres, à une hauteur quelconque exprimée aussi en mètres, d'appliquer la formule

$$r = 3.570\sqrt{h}, \tag{72}$$

dans laquelle le coefficient 3.570 représente, en mètres, le rayon de visibilité qui correspond à une hauteur de 1 mètre. Pour une hauteur de 500 mètres, le rayon de visibilité serait de 79.820 mètres, soit 80 kilomètres à peu près.

En même temps, on étudiait les moyens de transmettre les avis aux personnes restées à terre. Par l'emploi de petits drapeaux respectivement bleus, blancs et rouges, que manœuvraient les aéronautes et les conducteurs du ballon restés à terre, on arriva à des résultats satisfaisants relativement aux mouvements à exécuter : *monter, descendre, avancer, aller à droite,* etc. Pour transmettre au général en chef les notes résultant des observations, le commandant des aérostiers jetait sur le sol de petits sacs de sable, surmontés d'une banderole, auxquels la note était attachée.

On s'aperçut toutefois que, par les grands vents, il serait difficile de se livrer à des observations efficaces, à cause des balancements continuels et dangereux que le vent imprimait à la machine.

Par arrêté du 9 avril 1794, une compagnie d'aérostiers fut instituée sous le commandement de Coutelle, et le ballon *l'Entreprenant,* gonflé à Maubeuge, puis transporté devant Charleroi, put prendre part au siège de cette ville (dont il hâta la reddition, par la sûreté de ses indications), puis à la bataille de Fleurus, durant laquelle, d'après Jourdan et Carnot, il rendit les plus grands services.

Plus tard, les aérostats rendirent encore d'excellents services à Mayence et à Wurtzbourg. Mais ni Hoche, ni Bonaparte (on ne sait comment expliquer cette aberration) ne prisaient l'emploi des aérostats dans les armées. Ce dernier, après la campagne d'Égypte, ferma l'école d'aérostation de Meudon, et l'*Entreprenant* fut acheté par Robertson pour les expériences scientifiques dont il a été question plus haut (Chap. X).

En 1812, Rostopchine proposa d'écraser l'armée française à l'aide des projectiles explosibles, lancés du haut d'un aérostat : on dut renoncer à cette idée. Le même projet, repris par les Autrichiens en 1849, eut un résultat inattendu : les deux cents petits aérostats, chargés de bombes explosibles, qui furent alors dirigés sur Venise assiégée, furent ramenés par un vent contraire vers le camp autrichien, de sorte que les bombes firent plus de mal aux assiégeants qu'aux assiégés.

La guerre civile des États-Unis remit l'aérostation en honneur, au point de vue militaire. En septembre 1861, l'aéronaute La Mountain fournit d'importants renseignements au général Mac Clellan, qui défendait contre les rebelles les abords de Washington. Peu après, Allan eut l'idée de faire communiquer par un fil électrique l'observateur placé dans la nacelle avec le corps d'armée pour lequel il faisait ces reconnaissances.

Commes les observations en ballon captif à l'aide de longues-vues ou jumelles sont longues et difficiles, à cause des mouvements de giration de l'aérostat, le même aéronaute, dès le mois de mai 1862, eut l'idée de se servir de la photographie pour prendre, en perspective, sur une carte, tout le terrain environnant la ville de Richmond, occupée alors par les confédérés. Quelques jours après, grâce à ce ballon, planant à une altitude de 333 mètres et que les assiégés essayèrent vainement d'atteindre avec un canon à longue portée, Mac Clellan put repousser toutes leurs attaques.

S'inspirant de ces exemples, la garnison de Metz, puis les habitants de Paris songèrent, en 1870, à communiquer avec le reste de la France par la voie des ballons montés. C'est le 23 septembre 1870 que partit le premier aérostat parisien, *le Neptune*. Le soixante-cinquième et dernier, le *Général Cambronne*, parti le 28 janvier 1871, alla porter à la France la nouvelle de l'armistice. Sur ces 65 ballons, deux seulement, le *Jacquard*, monté par Prince, le *Richard Wallace*, monté par Lacaze, furent perdus en mer, corps et biens ; cinq furent pris par l'ennemi ; un, la *Ville d'Orléans*, monté par Bezier et Rolier, alla descendre à Krodschered, en Norvège (24 nov. 1870). Tous les autres atterrirent dans de bonnes conditions.

Mais aucun des aéronautes en renom de l'époque, à l'exception des frères Tissandier, n'essaya sérieusement de suivre le chemin inverse, c'est-à-dire de partir d'un point convenablement choisi en France pour descendre à Paris, ce qui n'est pas pour encourager les partisans de la navigation aérienne par l'emploi des courants atmosphériques. Il fallut, pour faire communiquer la province avec Paris, avoir recours aux pigeons voyageurs.

Néanmoins, les aérostats avaient rendu de tels services que, la guerre terminée, l'attention resta attachée à ces utiles auxiliaires et que l'on s'empressa de rendre définitives, pendant la paix, les études commencées pendant la guerre. D'ailleurs, l'augmentation de la portée des armes, qui oblige, désormais à entamer la lutte à des distances considérables et à élargir le champ de bataille, a rendu indispensables des observatoires élevés. Or, à ce point de vue, le ballon captif, avec les progrès de la télégraphie et de la téléphonie, est certainement sans rival.

En 1872, le gouvernement français créa, à Meudon-Chalais, un établissement analogue à l'école aérostatique de 1794, et on mit à sa tête des officiers d'une aptitude spéciale, tels que Laussedat, Renard. Krebs, etc.

En même temps, l'industrie privée s'organisait, pour fournir le matériel militaire aérostatique aux nations étrangères ; car l'aérostation militaire est maintenant une institution reconnue partout d'utilité publique. Toutes les nations civilisées ont aujourd'hui des parcs aérostatiques militaires, dans lesquels on s'occupe de la construction des ballons captifs, de la levée des plans en ballon par la photographie et de la recherche de la direction aérostatique.

II. — Les ballons captifs sont construits d'après les mêmes principes que les ballons libres.

a). — La forme sphérique est la forme adoptée par toutes les nations.

Le gaz employé est de l'hydrogène. Le tonnage le plus ordinaire

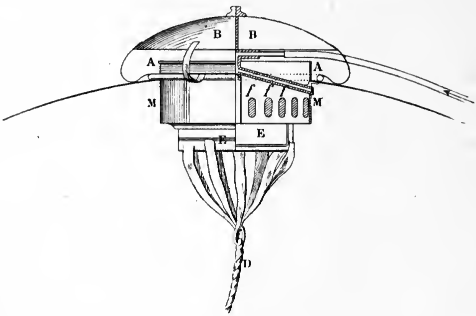

Fig. 107. — Soupape de Renard (fermée).

est de 500 à 540 mètres cubes, suffisant pour que le ballon puisse enlever deux personnes. Mais, en Angleterre, il est réduit à 290 et 300 mètres cubes, par suite de la substitution de la baudruche au ponghée, l'économie de gaz réalisée sur chaque opération de gonflement étant assez notable pour compenser jusqu'à un certain point l'accroissement de dépense dû à l'emploi de la baudruche.

L'appendice constituant une soupape inférieure très sensible et automatique, on se dispense d'ordinaire de fermer l'orifice inférieur du ballon. Dans le cas contraire, la soupape qu'on y adapte s'ouvre toujours sous une très faible pression, et pour plus de sûreté, on la détache, si l'on est forcé, pour une raison quelconque, de transformer l'ascension captive en ascension libre.

En France, la soupape adoptée pour les ballons militaires est la *soupape de Renard*, une des plus parfaites que l'on connaisse (fig. 107 et 108) :

Cette soupape est à deux actions : l'une *momentanée*, pour les manœuvres de routes, et à *débit gradué ;* l'autre *définitive*, pour

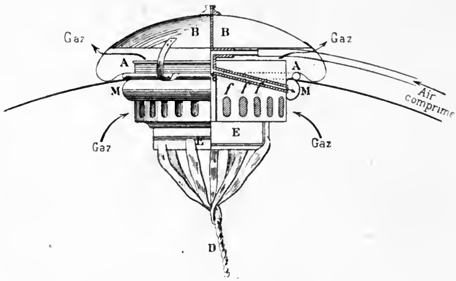

Fig. 108. — Soupape de Renard (ouverte).

l'échappement complet du gaz à l'atterrissage. Cette dernière manœuvre consiste à arracher, par une traction opérée sur une cordelette spéciale D (*corde de miséricorde*), attachée assez haut pour la mettre à l'abri des mouvements irréfléchis, une calotte de caoutchouc obturant la base d'un cylindre en carton EE, sorte de cheminée par laquelle le gaz s'échappe alors à flots.

Cette manœuvre est subite et définitive, puisque la cheminée ne peut plus se refermer : l'aéronaute n'a plus à s'occuper de la soupape et peut alors se consacrer aux divers soins que comporte l'atterrissage. Cependant il est bon de ne se servir de la corde de miséricorde que lorsqu'on ne peut guère faire autrement.

Quant à l'action momentanée de l'appareil, elle est réglée par le jeu d'une commande pneumatique, composée d'une poire à clapet placée sous la main du pilote et d'un tube de caoutchouc qui la relie à la soupape, mais *en dehors* du ballon. L'air comprimé détermine le gonflement (fig. 108), d'un anneau creux en caoutchouc MM, ou *clapet à boudin*, qui démasque une série de fenêtres *f*, *f*,... percées dans le corps cylindrique de la soupape, et produit une ouverture momentanée et graduelle à l'intérieur de laquelle le gaz s'engouffre pour sortir par l'ouverture AA de la partie supérieure de la soupape. Un manomètre en communication directe avec la commande pneumatique indique à chaque instant la pression et une expérience préalable permet d'en déduire le débit correspondant. Il suffit d'ouvrir un robinet convenable pour déterminer l'échappement de l'air, et la soupape se referme instantanément. Un toit BB protège la soupape contre la pluie, le givre, etc.

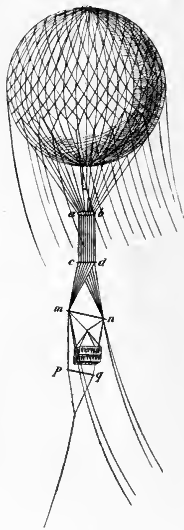

Fig. 109.
Suspension Renard.

b). — Un des inconvénients des anciens ballons captifs était l'inclinaison que prenait la nacelle lorsque le ballon s'inclinait sous l'action du vent. On l'évite aujourd'hui à l'aide du mode de suspension imaginé par Renard (fig. 109) :

La nacelle est attachée par un système à balancines, très simple, aux deux extrémités de la barre supérieure *m n* d'un trapèze *m n p q*, dans l'intérieur duquel elle peut se mouvoir librement et *se maintenir verticale*, quelle que soit l'inclinaison suivant laquelle s'exerce la traction sur le câble qui est amarré à la base inférieure du trapèze. Le trapèze est lui-même relié au filet par l'intermédiaire d'un organe spécial de torsion, une sorte de *conoïde* ayant pour base un cercle *a b*, et pour sommet une barre *c d* d'où partent deux faisceaux de suspentes qui s'attachent aux extrémités *m* et *n* de la partie supérieure du trapèze. Grâce à ce mode de suspension, analogue au bifilaire de Gauss, on obtient la *permanence de l'orientation*, c'est-à-dire l'amortissement presque complet des mouvements de giration. Mais cette disposition a l'inconvénient de rendre difficile la manœuvre de la soupape, lorsque les circonstances forcent à changer l'ascension captive en ascension libre.

Le mode de suspension des ballons militaires Yon, figuré ci-contre (fig. 110), moins parfait, plus simple, est peut-être préférable. Un dynamomètre, reliant le câble d'ascension à l'ensemble du système, permet de mesurer la force ascensionnelle au départ, et d'avoir, à chaque moment de l'ascension, la traction que produit l'aérostat sur le câble.

Les câbles que l'on emploie d'ordinaire ont à peu près 500 mètres de longueur. D'ordinaire, ils sont en chanvre ; la soie, quoique coûteuse, serait plus avantageuse, sa résistance étant beaucoup plus grande que celle du chanvre. En Angleterre, ils sont conditionnés avec des cordes métalliques. En tout cas, leur résistance est calculée de façon que le ballon puisse lutter contre un vent de 20 mètres à la seconde.

Quelquefois, le câble porte, dans son toron, des fils téléphoniques qui permettent aux officiers à terre d'être en communication permanente avec les observateurs dans la nacelle. Il est préférable d'enrouler le fil téléphonique autour du câble en le logeant entre deux torons : on le visite ainsi très aisément et les avaries sont immédiatement découvertes.

Le câble est ordinairement relié à un *treuil à vapeur*, qui permet de faire monter ou descendre le ballon à volonté, et dont la disposition varie d'un constructeur à l'autre. En particulier, le *treuil à vapeur d'Yon*, monté sur un chariot à quatre roues (fig. 111), comprend une chaudière verticale (que l'on voit à la droite de la figure), qui fournit la vapeur à une machine motrice à deux cylindres actionnant un arbre dont les manivelles sont conjuguées à angle droit. Sur cet arbre est un système d'engrenages qui actionnent les poulies de touage ou de traction ; le câble, en se déroulant de la bobine placée sous le siège du conducteur du chariot, circule dans le mécanisme, et se trouve enfin relié à l'aérostat par l'intermédiaire d'une *poulie à mouvement universel* A, qui

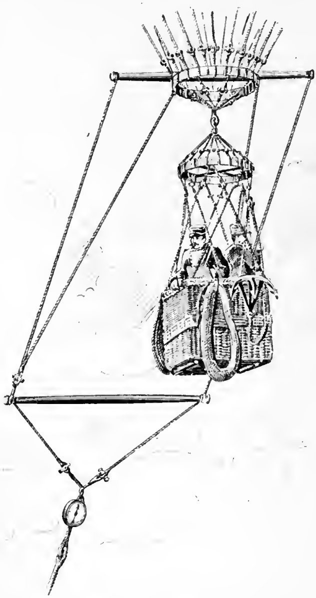

Fig. 110. — Suspension d'Yon.

obéit à tous les mouvements du ballon, sans que le câble ait à s'en ressentir. Un frein à air, modérateur de la vitesse d'ascension du ballon, un frein de sûreté pour l'arrêt, complètent la partie mécanique de l'appareil. L'ensemble de ce mécanisme complet pèse 2.500 kilogrammes et la puissance effective développée par la machine motrice est de 5 chevaux.

L'*appareil à gaz* est celui qui a été décrit plus haut (Chap. III) Son poids est d'environ 2.800 kilogrammes ; la production du gaz hydrogène est de 250 à 300 mètres cubes par heure. Un *chariot-porteur*, dans lequel on place le ballon, la nacelle et ses accessoires et qui, avec ce matériel, ne pèse pas plus de 2.200 kilogrammes, constitue, avec la voiture à treuil et l'appapareil à gaz, un *parc aéronautique* complet.

En France, particulièrement, un *parc aérostatique de campagne* se compose, outre les fourgons à vivres, d'une voiture-treuil, une voiture d'agrès et neuf voitures chargées de *bouteilles à hydrogène* (bouteilles dont il sera question tout à l'heure), chacune de ces voitures étant conduite par six chevaux. Quant au matériel ascensionnel proprement dit, il est composé d'un ballon normal de 540 mètres cubes, verni, monté pour ascensions captives ou libres ; d'un ballon normal non verni, avec bâche, filet et câble de rechange ; d'un ballon auxiliaire de 260 mètres cubes, monté pour ascensions captives ou libres; enfin, d'un petit *ballon-gazomètre* spécial, de 50 à 60 mètres cubes, servant à parer aux pertes de gaz par diffusion ou par dilatation. Chaque parc aérostatique dispose de dix gonflements. Quatre-vingt-un hommes y sont attachés : 1 capitaine, 2 officiers, 5 sous-officiers (dont 1 comptable et 1 adjudant), 8 caporaux, 65 sapeurs aérostiers (dont 1 infirmier, 2 brancardiers, 4 mécaniciens).

c). — Les aérostiers anglais ont fait faire un grand pas à la question de la production de l'hydrogène en campagne, en imaginant, en 1880, de comprimer le gaz, sous une pression de 120 à 150 atmosphères, dans des tubes d'acier appelés *bouteilles*.

Au Soudan, en Abyssinie, à Madagascar, ce système a donné les meilleurs résultats : la fabrication de l'hydrogène par le procédé Charles nécessite, en effet, une grande quantité d'eau et, en campagne, on n'est pas toujours à proximité d'un réservoir ou d'une rivière.

En particulier, les tubes d'acier livrés par Yon au gouvernement italien pesaient, chacun, 30 kilogrammes. Ils avaient $2^m,40$ de longueur, 13 centimètres de diamètre et une épaisseur de 13 millimètres. Le gaz y était comprimé à la pression de 135 atmosphères, de sorte que 70 à 75 de ces tubes, pesant en tout de 2.000 à 2.250 kilogrammes, suffisaient pour gonfler un ballon

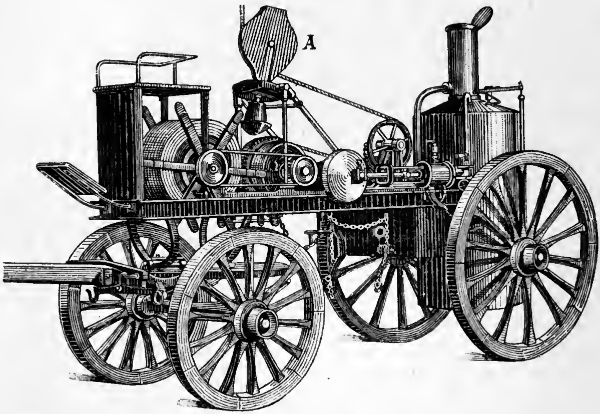

Fig. 111. — Voiture-treuil d'Yon.

cubant 300 mètres. Au moment voulu, on les range en batterie, et on a soin d'ouvrir tube par tube pour éviter le danger d'un refroidissement subit.

Actuellement, les bouteilles à hydrogène sont seules employées dans les armées en campagne, les générateurs à hydrogène étant laissés dans les places fortes.

d). — Les instruments d'observation employés dans les ballons captifs militaires sont, en premier lieu, une *jumelle marine* et *deux flammes*, de couleur voyante, qui suffisent pour les signaux de manœuvres. Comme une jumelle à fort grossissement a toujours un champ très réduit, on se contente de jumelles marines ne grossissant que trois fois.

Pour abréger la durée des observations, on a recours à la *photographie instantanée*. La chambre noire, dont l'objectif doit être à long foyer (50 centimètres à 1 mètre), car les objets que l'on veut représenter sont d'ordinaire à une distance de quelques kilomètres, est montée sur une fourchette à pivot, qu'il est facile d'adapter en un point quelconque de la nacelle, au gré de l'observateur.

On se sert encore de *longues-vues photographiques*, d'un grossissement de 16,6 à 17 environ, ce qui est suffisant pour qu'à une distance de 10 kilomètres, une barre de paratonnerre, par exemple, devienne visible.

Il est évident qu'on peut se servir des ballons captifs comme de postes élevés, pour la *télégraphie optique*. Comme les appareils employés d'ordinaire exigent une fixité que ne présente jamais la nacelle d'un aérostat, il faut alors donner aux faisceaux lumineux des angles d'ouverture très grands, ce qui diminue fortement la visibilité. Aussi, n'est-ce que la nuit que la correspondance est possible à l'aide de lampes à arc alimentées par une dynamo placée sur la voiture-treuil et qu'actionne le moteur de cette voiture. Renard a, d'ailleurs, inventé, pour cet usage, une lampe à arc d'une solidité à toute épreuve.

On a aussi songé à illuminer l'intérieur du ballon à l'aide d'une lampe à incandescence. Il est facile de prévoir qu'indépendamment de l'opacité de l'enveloppe, qui diminue dans une forte proportion l'intensité lumineuse, l'étalement sur une vaste surface de la lumière émise par la source ne peut que réduire beaucoup la portée lumineuse d'un semblable appareil.

e.) — Il est clair que les ballons captifs ne sont pas à l'abri des coups de l'ennemi.

Pendant le siège de Paris, les Allemands se sont servis d'un *mousquet à ballons*, imaginé par Krupp, dont le canon pouvait osciller dans le sens de la verticale. Ce mousquet était adapté sur un cylindre de bronze, solidement fixé à un léger chariot à quatre roues traîné par deux chevaux, et pouvant lancer des balles à une hauteur de 800 à 1.000 mètres. Mais cet engin rendit peu de services, et c'est plutôt aux balles de leurs fusils que les Allemands durent la prise du ballon *le Daguerre* qui, le 12 novembre 1870, percé de trous, fut forcé de descendre à Ferrières.

Les balles, ou plutôt l'*obus à balles*, tel est, en effet, l'ennemi le plus redoutable des ballons libres ou captifs. Un ballon libre, malgré cela, est hors de danger à partir d'une hauteur de 800 mètres et d'une distance de 8 à 10 kilomètres. Mais on ne saurait songer à maintenir un ballon captif ni à cette hauteur ni à cette distance de l'ennemi : ses indications n'auraient presque aucune valeur. Il faut donc se résoudre à voir les ballons captifs, en temps de guerre, plus ou moins criblés de balles à l'altitude de 200 à 300 mètres, la plus favorable indiquée par l'expérience. Cependant, il est rare que quelques trous de balles puissent les endommager de façon à rendre la descente dangereuse. Il faut, d'ailleurs, un très long temps à l'artillerie pour régler son tir, et les reconnaissances en ballon sont toujours de courte durée. Enfin, en déplaçant à chaque instant la voiture-treuil, on peut dépister facilement les obus ennemis.

Le véritable point faible des ballons captifs est de devenir complètement inutilisables lorsque la vitesse du vent dépasse 12 mètres, parce qu'alors la machine est rabattue vers le sol avec une force telle que les observations, abstraction faite du danger couru, sont rendues impossibles.

Aussi, en Allemagne, on songe sérieusement, en ce moment, à associer le cerf-volant au ballon captif, ou mieux, comme l'a fait von Parseval, à donner au ballon captif une forme allongée telle que le ballon constitue, par lui-même, un véritable cerf-volant, mais un cerf-volant qui serait doué d'une force ascensionnelle propre. Comme on l'a vu plus haut (Chap. VIII), le cerf-volant possède la précieuse propriété de se soutenir et de monter d'autant mieux que le vent est plus violent. Les expériences faites ont montré que cette espèce de *ballons-planeurs* fonctionne parfaitement, par tous les temps, et n'a que le défaut d'avoir un poids élevé.

f). — Disons un mot des ballons captifs qui servent à des ascensions publiques.

Le plus célèbre est celui de l'Exposition universelle de 1878, construit par Giffard, et dont il a déjà été question (Chap. I). Son installation ne présentait rien d'extraordinaire, mais ses dimensions étaient remarquables : 55 mètres de hauteur totale et 30 mètres de diamètre, soit un tonnage de 24.000 mètres cubes à peu près, et, par suite, une force ascensionnelle de 24.000 kilogrammes lorsqu'il était complètement gonflé.

Ces ballons n'ont pas de manche ; leur orifice inférieure est fermé afin de dépenser le moins de gaz possible. Quant à leur nacelle, elle est annulaire, afin de laisser passage au câble qui est attaché directement au cercle.

L'aérostat de Giffard était complètement gonflé, ce qui compliquait inutilement les manœuvres. Actuellement, on laisse ces aérostats un peu flasques, ce qui permet de parer facilement aux dangers que pourrait faire courir l'excès de pression intérieure sur la pression extérieure, surtout lors du coup de soleil.

III. — Les ballons captifs sont employés aussi par toutes les marines de guerre. Non seulement ils permettent d'observer facilement et de loin les mouvements d'une flotte ennemie, mais ils sont surtout précieux pour se garer des attaques des torpilleurs, qui perdent leur incognito devant ces redoutables vigies. Dans le cas où il est nécessaire que le ballon monté, de captif devienne libre, le cône-ancre de Sivel permet à l'aérostat de guide-roper ou, encore, d'attendre que l'on vienne à son secours.

Pesce a, dans ces derniers temps, proposé d'unir les ballons captifs aux sous-marins pour éclairer leur route :

« Le bateau sous-marin, dit-il, est aveugle, mais il peut se déplacer facilement; le ballon, au contraire, voit admirablement, mais il ne peut se mouvoir comme il le voudrait. Ne sont-ce pas là l'*aveugle* et le *paralytique* de la Fable et ne peuvent-ils, en se prêtant un naturel appui, en unissant leurs efforts et leurs dons personnels, devenir, par cette union, plus forts que ne l'est chacun d'eux pris isolément? Quelques minutes de réflexion suffisent pour comprendre tous les avantages que la stratégie navale pourrait retirer de l'accouplement de ces deux éléments, en apparence dissemblables.

« Les bateaux sous-marins sont actuellement munis de tubes optiques pour l'exploration de l'horizon. Mais que sont ces postes d'observation, qui émergent à peine de quelques décimètres au-dessus de la surface de l'eau et auxquels la moindre vague cache la vue de l'ennemi que l'on veut surveiller, par rapport à ces merveilleux postes-vigies que l'on peut lancer en l'air, à la hauteur que l'on veut, dans une région presque inaccessible aux projectiles ennemis, d'où l'on plane au-dessus de tout? De là-haut, et de là seulement, on pourrait observer à merveille les moindres mouvements de l'ennemi et transmettre ensuite les ordres à ces pauvres *taupes marines* (comme les a si bien dénommés l'ingénieur Toselli), qui deviennent alors simplement des instruments passifs et dociles : les bras qui frappent, tandis que le ballon est la tête qui commande parce qu'elle voit et pense. »

« Pour donner à cette association du ballon et du sous-marin une plus grande efficacité, il serait préférable, ajoute Pesce, d'avoir une flottille de sous-marins sous le commandement d'un même aéronef, l'un des sous-marins étant spécialement organisé et affecté au service de l'aérostat dont il porterait le treuil d'enroulement. Il servirait également de poste central de communication vers lequel convergeraient tous les câbles d'attache des sentinelles sous-marines dont les différents fils téléphoniques iraient jusqu'à la nacelle. Les différents sous-marins deviendraient pour le commandant autant de bateaux dirigeables, comme les torpilles de ce genre.

Cette énorme et puissante pieuvre aérienne, qui aurait des torpilles à l'extrémité de chacun de ses tentacules, grouperait et réaliserait certainement, pour le moment, le summum des *desiderata* de la *défense mobile* et de la *défense fixe* des postes et des côtes, les croiseurs restant à l'avant-garde comme éclaireurs, et les batteries de côte comme la dernière ligne de défense du littoral maritime.

Au lieu de commander, du niveau fixe d'un fort, des torpilles dormantes coulées en des points fixes, comme cela se pratique actuellement pour la défense des rades et des ports, on pourrait, grâce au concours simultané des ballons et des sous-marins, commander, d'un point mobile de l'espace, aussi élevé qu'on peut le désirer, une série de torpilles, mobiles en tous sens, que l'on peut changer de place à volonté à tout instant et lancer, au moment voulu et dans toutes les directions, contre l'ennemi.

On arriverait de la sorte à tenir les flottes ennemies éloignées des côtes, à des distances telles que la portée de leurs canons serait insuffisante pour causer le moindre dommage aux cités paisibles, grâce au concours simultané de ces engins des guerres navales futures. »

CONCLUSION

Arrivés au terme de cette étude, jetons un coup d'œil d'ensemble sur le chemin parcouru par la science de l'Aéronautique.

Jusqu'à la fin du siècle dernier, on peut dire que les efforts des chercheurs, dans le domaine du plus lourd et dans celui du plus léger que l'air, ont été pratiquement infructueux, mais il serait injuste de ne pas reconnaître que ces mêmes efforts ont contribué à créer un ordre spécial de préoccupations auquel nous sommes certainement redevables de la découverte des Montgolfier. Dans le profond saisissement causé par le spectacle du premier appareil sorti de la main de l'homme et quittant le sol pour se lancer à l'aventure dans les profondeurs inexplorées de la mer aérienne, tout le monde crut le fameux problème résolu ou, du moins, sur le point de l'être. Plus de cent ans se sont écoulés et la solution reste encore à trouver. Pendant ce lâps de temps, aucune découverte sensationnelle, de nature à frapper fortement l'imagination des masses, n'a surgi, il est vrai. Mais faut-il compter pour rien cette somme imposante de perfectionnements et de progrès réalisés sur tant de points ?

Dans le domaine de l'aérostatique, le navire aérien, s'il est encore indirigeable, est pourvu de tous les instruments qui peuvent assurer la sécurité de ses passagers, et le dernier mot n'est certes pas dit. Dans le domaine du plus lourd que l'air, c'est par centaines de mètres qu'il faut compter les espaces parcourus et par minutes les temps de sustentation. Nous voilà loin des quelques mètres et des quelques secondes des premiers essais.

Que l'on se reporte, pour juger de la question avec impartialité, aux multiples transformations par lesquelles a dû passer la machine à vapeur, dont les progrès ont été si lents jusqu'à James Watt, qui, par le dispositif aussi simple que général du tiroir, a créé la machine à double effet et, du coup, changé la face du monde. Peut-être n'est-il pas éloigné le moment où la navigation aérienne recevra une impulsion analogue, aussi fertile en conséquences de tous genres! Ce sera vraisemblablement, comme nous l'avons dit, le plus lourd que l'air qui triomphera : le problème est difficile, mais non insoluble. Mais, dût la navigation aérienne n'être jamais pour l'homme qu'un splendide rêve irréalisé, les ballons ont encore, en somme, un beau rôle à remplir comme auxiliaires de la Science, de la Météorologie principalement.

C'est donc par des paroles d'encouragement adressées à tous les chercheurs qui creusent sans cesse les questions précédemment exposées que nous nous faisons un devoir et un plaisir de terminer cet ouvrage. Qu'ils poursuivent leurs recherches ! La sympathie universelle ne leur fera jamais défaut... C'est que l'essor d'un aérostat ou d'un volateur saisira toujours, et cela par de multiples raisons, l'esprit du plus savant comme du plus ignorant. Ce voyage, qui semble avoir pour but les mondes inconnus qui brillent sur nos têtes et peuplent l'immensité, aura toujours l'attrait mystérieux d'un symbole et d'une protestation contre la tyrannie de la pesanteur, qui semble river à jamais l'humanité à la surface de la planète.

TABLE DES MATIÈRES

ERRATA

Pages	Lignes				
20	25	*lire* :	$t_0 - t_n = 55\left(1 - \frac{h_n}{760}\right)$	*au lieu de* :	$t_0 - = t_n\, 55\left(1 - \frac{h_n}{760}\right)$
35	13	—	$V' a_p\, d$	—	$V a_p\, d$
39	10	—	brusque	—	presque
45	6	—	110°	—	111°
50	5	—	$Z = 2R$	—	$P = 2R$
87	18	—	intérieur	—	extérieur
98	(Fig. 39)	—	Actinomètre	—	Antinomètre
141	9	—	intérieur sur le gaz extérieur	—	extérieur sur le gaz intérieur
149	11	—	moins	—	plus
164	13	—	BQ	—	BR
164	30	—	résistances	—	distances
182	15	—	au-dessous	—	au-dessus
186	9	—	descente	—	dimension
195	28	—	$\cos^2\alpha$	—	$\cos 2\alpha$
231	7	—	17 mètres	—	17 mètres cubes

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY