dans lequel le citoyen Garnerin était placé, descendit très rapidement. Il fit un mouvement d'oscillation si effrayant, qu'un cri d'épouvante échappa aux spectateurs, et les femmes sensibles se trouvèrent mal. Cependant le citoyen Garnerin descendit tranquillement ; il monta à cheval aussitôt, revint au parc recevoir les félicitations de la foule et continua son chemin jusqu'à l'Institut national, qui était en séance, et où il annonça son succès. » Ces mouvements d'oscillation, si effrayants et si dangereux, qui accompagnent la chute de l'appa-

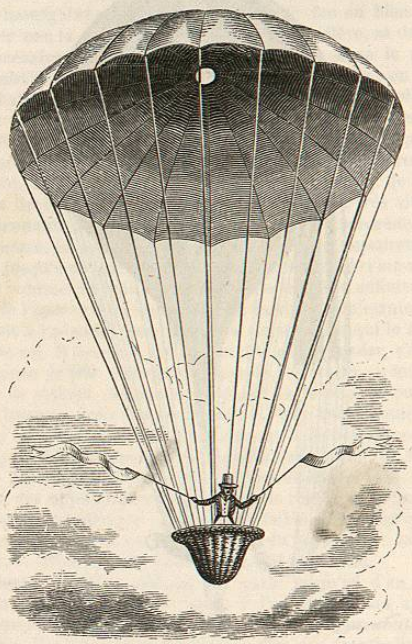

Fig. 237.

reil, furent évités ultérieurement grâce à une ouverture circulaire pratiquée au sommet du dôme (fig. 237) : cela permet à l'air comprimé de s'échapper régulièrement par le haut, au lieu de s'échapper latéralement avec des secousses plus ou moins brusques. Malgré ce perfectionnement, le parachute n'est pas entré dans la pratique des aéronautes, qui s'accordent à le considérer comme un accessoire embarrassant et une charge inutile dans la grande majorité des cas.

220. **Historique de l'invention des aérostats.** — L'invention des aérostats

entrait dans la grande nacelle du ballon. L'appareil était attaché au filet au moyen d'une corde, qui passait sur une poulie pour venir se fixer à la petite nacelle. Il suffisait de lâcher la corde pour que le système du parachute et de sa nacelle abandonnât l'aérostat (fig. 237).

est due aux frères Joseph et Étienne Montgolfier, fils de Pierre Montgolfier, riche fabricant de papier à Annonay. C'est Joseph, l'aîné, qui en eut la première idée ; il s'associa son frère Étienne pour la réaliser. Leur première expérience publique eut lieu le 5 juin 1783, devant « Messieurs des États du Vivarais ». Joseph Montgolfier a écrit lui-même une description de l'aérostat (ou *machine aérostatique*) qui fut lancé ce jour-là.

« La machine aérostatique était construite en toile doublée de papier, cousue sur un réseau de ficelles fixé aux cordes, à peu près de forme sphérique, et sa circonférence était de 110 pieds ; un châssis en bois la tenait par le bas. Ce châssis laissait libre au bas du ballon une ouverture pour l'introduction *du gaz intérieur, qui pesait moitié moins que l'air extérieur ;* la machine pouvait s'élever et entraîner un poids de 490 livres. »

Elle s'éleva environ à 1000 toises (à peu près 2000 mètres), et resta 10 minutes en l'air ; mais elle se dégonfla peu à peu et redescendit à terre, « si légèrement qu'elle ne brisa ni les épis, ni les échalas de vigne sur lesquels elle reposa. » Ce gaz intérieur, qui pesait moitié moins que l'air extérieur, et dont Montgolfier fait un mystère, c'était tout bonnement de l'air chaud, qu'il avait introduit dans l'enveloppe en allumant, au-dessous de l'orifice inférieur, un feu de paille mêlée de laine mouillée.

Cette expérience, si belle et si neuve, eut un immense retentissement, et dans ce temps où les journaux n'existaient pas, la nouvelle en fut rapidement connue dans tout le pays. Le physicien Charles se mit immédiatement en mesure de la répéter ; mais comme il ignorait la nature du gaz dont les Montgolfier s'étaient servis, il eut l'idée d'employer l'hydrogène, gaz éminemment léger, découvert quelques années auparavant par Priestley, et qu'on appelait alors *air inflammable*. Son ballon était beaucoup plus petit que celui des Montgolfier ; il n'avait que 38 pieds de circonférence, et pourtant le gonflement, commencé le 23 août, était loin d'être terminé le 25. Cependant l'enveloppe était faite d'une étoffe de soie, solide, bien cousue et vernie. On constatait donc, dès la première expérience, l'inconvénient de l'hydrogène au point de vue aérostatique : c'est son extrême *pouvoir endosmotique ;* mais on peut apprécier également la supériorité de sa force ascensionnelle spécifique, car le ballon, incomplètement gonflé, s'enleva aussi aisément que la montgolfière, aux applaudissements d'une foule immense qui se pressait dans le Champ de Mars.

« On ne peut imaginer la frénésie d'admiration qui s'empara de la population parisienne à la suite de ces premières expériences. Le roi voulut être témoin d'un départ. On prépara pour lui dans la cour de Versailles une grande montgolfière de 57 pieds (19 mètres) de hauteur ; elle était marquée à son chiffre, et ornée d'attributs et emblèmes mythologiques (dans le genre de celle qui est représentée fig. 238) [1]. » Ce fut la première qui enleva des êtres animés : c'étaient un mouton, un coq, un canard, qu'on avait mis dans la nacelle, et que l'aérostat alla déposer, sains et saufs, dans la forêt de Vaucresson, huit minutes après son départ de Versailles.

L'idée de faire servir les aérostats à transporter des voyageurs ne vint que quelques mois plus tard. C'est en novembre 1783 que Pilâtre de Rozier et le marquis d'Arlandes firent le premier voyage aérien, après y avoir préparé eux-mêmes et le public par des expériences antérieures en ballon captif. Ils partirent des jardins de la Muette (Bois de Boulogne, près Paris) dans une montgolfière (fig. 238) qui les enleva jusqu'à 3000 pieds (1 kilomètre) et alla retomber, sans accident, à 2 lieues environ du point de départ, après avoir traversé tout Paris.

Cette expérience mit nettement en évidence l'inconvénient pratique des montgolfières. Si l'air s'échauffait rapidement, il se refroidissait encore plus vite, et

1. J. Jamin, LES BALLONS, *Revue des Deux Mondes* 1er janvier 1885.

l'on ne pouvait maintenir en l'air l'aérostat qu'à la condition de forcer le feu et d'épuiser en peu de temps toute la provision de combustible. Aussi le physicien Charles, qui voulut immédiatement répéter l'ascension de Pilâtre de Rozier, employa-t-il encore une fois un ballon à l'hydrogène, mais mieux construit et surtout mieux vernissé que le premier. Il s'enleva du Jardin des Tuileries, avec un aide nommé Robert. Ce fut une remarquable ascension. En deux heures, le ballon avait atteint la petite ville de Nesles, à 9 lieues de Paris. Là Charles fit les manœuvres de descente, déposa à terre son compagnon de voyage, puis remonta

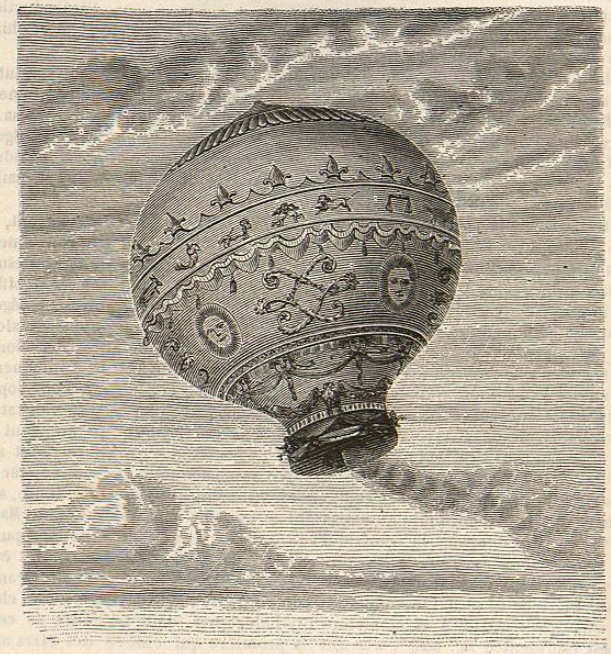

Fig. 238.

en l'air. Il eut la chance de rencontrer un courant exactement contraire à celui qui l'avait amené, et il fut ramené à Paris au point de départ.

A partir de ce moment la supériorité du ballon sur la montgolfière ne fut plus contestée, et l'usage de l'air chaud fut de plus en plus abandonné. D'ailleurs Charles avait considérablement perfectionné la construction des ballons. « Il avait inventé la soupape, le lest, le filet et la nacelle ; il avait rendu l'enveloppe imperméable et accéléré le gonflement; enfin il avait amené déjà l'art de l'aérostation à un degré de perfection qui n'a guère été dépassé. »

221. **Ascensions célèbres.** — Depuis cette époque, un nombre considérable de voyages aériens ou d'ascensions en ballons libres ont été exécutés. Quelques-unes sont restées célèbres, soit par l'importance des découvertes scientifiques

qu'elles ont amenées, soit par les catastrophes terribles qui les ont terminées.

Catastrophe de Pilâtre de Rozier et Romain. — La plus fameuse à ce dernier point de vue est celle où le premier aéronaute, Pilâtre de Rozier, trouva la mort, à l'âge de vingt-six ans. Il voulut répéter une expérience heureuse de deux autres aéronautes, Blanchard et Jeffries, qui avaient traversé la Manche, entre Douvres et Calais, au mois de janvier 1785. Il partit de Boulogne, le 15 juin 1785, en montgolfière. Il avait emporté avec lui, à titre d'essai, pour avoir une force ascensionnelle variable, des ballonnets pleins d'air inflammable. C'était une grave imprudence, à cause de la proximité du foyer de la montgolfière. Pilâtre n'ignorait pas le danger de sa tentative, car il ne prit avec lui qu'un aide nommé Romain, et refusa obstinément le concours d'un gentilhomme, le marquis de Maisonfort, qui lui offrait de l'argent pour monter avec lui. Il s'enlevèrent le soir, à deux heures. Une brise de terre les emporta à quelques kilomètres en mer, puis on vit une flamme bleuâtre surgir au sommet de l'aérostat, qui fut ensuite ramené à la côte par un vent contraire et vint tomber à trois cents pas du rivage.

Pilâtre était fracassé, et Romain respirait encore. Ce fut le marquis de Maisonfort qui leur rendit les derniers devoirs et qui raconta l'accident.

Ascension de Gay-Lussac, en 1804. — Celle-ci fut très heureuse, et de plus très fertile en résultats scientifiques. Le célèbre physicien atteignit l'altitude de 7016 mètres au-dessus du niveau de la mer. A cette hauteur, le baromètre était descendu à 32 centimètres, et le thermomètre centigrade, qui marquait + 31° à la surface du sol, était à 9°,6 au-dessous de zéro. Gay-Lussac n'eut pas seulement très froid, il eut aussi fort soif, à cause de la sécheresse de l'air; celle-ci était si extraordinaire, que les substances hygroscopiques, telles que le papier, le parchemin, se desséchaient et se tordaient comme si on les eût présentées au feu. Il éprouva aussi le malaise connu sous le nom de *mal des montagnes :* ce sont des troubles dans la respiration et dans la circulation, qui résultent de la raréfaction de l'air. Sa respiration s'activa, et son pouls, qui n'avait normalement que 66 pulsations, monta un moment jusqu'à 120. D'ailleurs il recueillit de l'air à cette hauteur, et démontra ensuite par l'analyse chimique que sa composition était la même qu'à la surface du sol. Il remarqua que le ciel prenait une teinte bleue très foncée, tirant sur le noir, et il fut frappé du silence absolu et solennel qui régnait dans ces hautes régions.

Il était parti tout seul des jardins du Conservatoire des Arts et Métiers; il descendit auprès de Rouen au bout de six heures, ayant fait environ 30 lieues.

Ascension de Barral et Bixio. — En 1850, Barral et Bixio entreprirent, sur les instances de Gay-Lussac, deux ascensions ayant pour objet l'exploration scientifique des couches supérieures de l'air. Ils avaient perfectionné le vernissage du ballon, de manière à maintenir la force ascensionnelle constante en supprimant l'exosmose de l'hydrogène. Dans l'une de ces ascensions, ils s'élevèrent jusqu'à l'altitude de 7049 mètres; mais, quoiqu'on fût au mois de juillet, ils eurent un fort mauvais temps, et ils entrèrent, presque au départ, dans une brume épaisse, qui avait près de 7000 mètres de profondeur. Ce fut au sortir de cette région que se produisit la particularité la plus curieuse du voyage : le thermomètre, qui était resté stationnaire à — 9°, baissa rapidement jusqu'à — 39°, et en même temps des aiguilles de glace vinrent s'accumuler sur les carnets d'observation. Cela prouvait l'importance des nuages pour empêcher le rayonnement de l'atmosphère vers les espaces célestes et en modérer le refroidissement.

Ascensions de Glaisher. — L'Association britannique pour l'avancement des sciences, réunie à Leeds en 1858, vota les fonds nécessaires pour une série d'ascensions scientifiques, dont elle confia l'exécution à Glaisher, astronome attaché à l'Observatoire de Greenwich. M. Glaisher s'adjoignit un aéronaute de profession, M. Coxwell, et fit avec lui une trentaine d'ascensions, de 1862 à 1865. Dans

l'une d'elles on constata l'existence, en plein été, de nuages entièrement formés d'aiguilles de glace, sur une épaisseur de 4 kilomètres. Dans une autre, ils ressentirent à un très haut degré le *mal des montagnes*. Glaisher en a décrit tous les symptômes, qu'il observa sur lui-même.

« La respiration devenait de plus en plus pénible et courte, et les pulsations du cœur plus fréquentes; les tissus se gonflaient sous l'action d'une pression intérieure devenue prédominante, la face paraissait plus grosse, les lèvres plus épaisses et noires; puis la paralysie survint, élective et progressive; elle se prit aux bras, aux jambes, aux muscles du cou; la tête tomba; on était dans l'impossibilité d'agir, de soulever même un doigt pour éviter la mort; la vue s'obscurcissait et, quoique les idées fussent saines, nettes et sans souffrances, le corps peu à peu cessait de vivre; enfin l'évanouissement fut complet et dura treize minutes. Les dernières observations furent faites à l'altitude de 8833 mètres et ne furent reprises qu'au réveil. Pendant cette éclipse de l'intelligence, le ballon avait continué de monter jusqu'à son maximum et commencé de descendre. M. Glaisher croit avoir atteint 11000 mètres[1]. »

Expériences de M. Paul Bert. — La conséquence indiscutable de ces observations physiologiques, c'est que l'homme ne peut dépasser l'altitude de 8000 mètres sans perdre ses facultés, en totalité ou en partie. M. Paul Bert analysa, par l'expérience, la cause de ce phénomène. Il fit construire une enceinte en tôle de fer, assez vaste pour qu'on pût y enfermer des hommes, où l'on pût comprimer ou dilater l'atmosphère, ou bien en faire varier la composition. Or, quand on y raréfie l'air, dans les proportions où cela arrive dans les ascensions, on voit naître et se développer chez les personnes enfermées tous les troubles circulatoires observés par Glaisher. Mais si la raréfaction de l'atmosphère ne porte que sur l'élément azote, l'élément oxygène conservant sa valeur initiale, on remarque au contraire que les hommes et les animaux continuent à vivre dans cette atmosphère raréfiée. M. Paul Bert se soumit lui-même à l'expérience jusqu'à un degré de raréfaction très élevé, et sans ressentir aucun malaise. Ce n'est donc pas à la diminution même de la pression atmosphérique qu'on doit attribuer les troubles physiologiques décrits par Glaisher, mais surtout à l'insuffisance d'oxygène, c'est-à-dire d'air respirable, qui en est la conséquence.

Ascensions de Sivel, Crocé-Spinelli et Gaston Tissandier. — La conclusion pratique de ces expériences, c'est qu'il était possible de répéter sans danger les ascensions de Glaisher, dans les plus hautes régions de l'atmosphère, à la condition de se prémunir contre l'insuffisance d'air respirable. C'est ce que firent les aéronautes Sivel et Crocé-Spinelli, en mars 1874. Ils montèrent jusqu'à l'altitude de 7320 mètres, sans aucun accident. Ils avaient emporté avec eux plusieurs ballonnets remplis d'air suroxygéné à divers degrés, et qu'ils commencèrent et continuèrent à respirer dès l'altitude de 3600 mètres. La vérification des résultats de M. Paul Bert fut complète. Les premiers symptômes du mal des montagnes apparaissaient dès qu'on respirait l'air raréfié de l'atmosphère ambiante; au contraire, le retour des forces, de la vision, de la vigueur générale suivait immédiatement l'inhalation de l'air suroxygéné contenu dans les ballonnets.

Cette expérience personnelle, si concluante, aurait dû détourner ces mêmes aéronautes de l'ascension qu'ils firent l'année suivante, en avril 1875, dans des conditions défectueuses et avec des idées préconçues qui amenèrent une terrible catastrophe. Leur ballon s'appelait *le Zénith*[2]; ils s'adjoignirent, pour le

1. C'est une hauteur supérieure à celle du *Gaurisankar* (8889 mètres), montagne du Népaul, le plus haut sommet du globe (J. Jamin, *les Ballons*).

2. Ce nom a été illustré par un petit poème que M. Sully-Prudhomme a dédié « aux victimes de l'ascension du ballon *le Zénith* », et qui est une de ses plus belles inspirations.

diriger, un autre aéronaute très expérimenté, M. Gaston Tissandier. Mais ils n'emportèrent avec eux que 150 litres d'oxygène, provision notoirement insuffisante, puisque, dans les hautes régions, il en eût fallu 150 litres par minute pour suffire à la consommation de trois personnes. De plus, ils partirent avec l'intention bien arrêtée de n'avoir recours à leur provision qu'à la dernière extrémité. C'est ce qui causa leur perte. Quand ils sentirent la nécessité d'employer le remède, il n'était déjà plus temps, leurs bras étaient paralysés, et ils ne purent lutter contre le mal des montagnes, qui les envahit complètement. M. Gaston Tissandier s'évanouit le premier. « Quand il revint à lui, après une heure de sommeil léthargique, il se rappelle avoir vu ses deux amis évanouis au fond de la nacelle; puis, quelque temps après, Crocé, qui s'était réveillé, jeta par-dessus bord les instruments, les couvertures, tous les objets à sa portée, sans qu'on pût savoir à quelle ivresse il obéissait. Aussitôt le ballon remonta jusqu'à une hauteur inconnue, et quand finalement il redescendit et que M. Tissandier fut revenu de son évanouissement, ses deux compagnons étaient sans vie. Sivel avait la figure noire, les yeux ternes, la bouche ouverte et remplie de sang; Crocé les yeux à demi fermés et la bouche sanglante. M. Tissandier survécut seul à ce lamentable événement, qu'un peu de prudence aurait conjuré. Il évalua à 8600 mètres, grâce à des tubes témoins qu'ils avaient emportés, l'altitude à laquelle leur ballon s'était élevé. »

On paraît avoir renoncé, depuis cette catastrophe, aux ascensions dans les hautes régions. Tous les efforts des aéronautes se sont portés sur le problème de la navigation aérienne ou de la direction des ballons dans les hauteurs moyennes de l'atmosphère.

222. **Navigation aérienne ou direction des ballons.** — 1° *Définitions.* — Nous avons dit que l'aéronaute, avec les moyens dont il dispose, ne peut qu'agir sur la force ascensionnelle de l'aérostat, de manière à ralentir ou à accélérer son mouvement dans le sens vertical, mais que les mouvements de progression ou de recul dans le sens horizontal sont soustraits à sa volonté et entièrement soumis aux vents qui règnent dans la région où il se trouve. Or le problème de la *navigation aérienne* ou de la *direction des ballons* consiste précisément dans la possibilité de pousser l'aérostat horizontalement dans tous les sens, quelle que soit la direction du vent, comme on fait d'un bateau sur l'eau. Ce problème est-il donc insoluble?

Nous allons montrer, au contraire, que la solution en est parfaitement possible au point de vue théorique, et qu'il n'y a de difficultés — presque insurmontables d'ailleurs — que dans la réalisation pratique de la solution rationnelle.

2° *Historique.* — Le problème s'est posé dès l'origine même de l'invention des aérostats, et la solution en a paru tout d'abord très simple. Un certain docteur van Hecke avait affirmé qu'il existe toujours dans l'atmosphère, à des altitudes plus ou moins grandes, mais accessibles, des courants d'air soufflant dans toutes les directions, et qu'il suffit de monter assez haut pour trouver la bonne direction, c'est-à-dire celle qu'on veut donner à l'aérostat. En se fondant sur cette assertion, — qu'aucune expérience n'avait justifiée, — Meusnier, officier distingué des armées de la République, proposa la construction d'un aérostat parfaitement dirigeable. Il aurait été constitué par un ballon à double enveloppe, dont on aurait pu faire varier à volonté la force ascensionnelle, de manière à monter ou à descendre jusqu'à la rencontre des vents favorables. Mais la construction de cet appareil n'était pas plus pratique que son emploi n'était légitime : cette première solution n'eut pas de suites.

Après Meusnier, qui était un homme instruit et fort intelligent, il n'y eut guère, pendant longtemps, que des ignorants qui s'occupèrent du problème.

Toutes les solutions proposées étaient fondées sur une assimilation complètement illégitime de la navigation aérienne à la navigation terrestre. On partait de cette idée fausse que, si les vents suffisent à diriger les vaisseaux, ils peuvent rendre le même service aux ballons. Or les conditions ne sont pas du tout les mêmes pour ceux-ci et pour ceux-là. Les navires peuvent être dirigés par le vent, parce qu'ils prennent un point d'appui sur l'eau, en dehors du vent, tandis que les aérostats, n'ayant aucun point d'appui en dehors du vent, ne peuvent que céder au vent, et se laisser emporter sans aucune résistance.

Qu'on observe, en effet, un ballon captif : on le voit, sous l'action du vent, s'incliner et osciller, ainsi que la corde qui le retient, autour du point d'attache; il résiste au vent et peut alors être orienté par le vent, comme la voile d'un navire. Qu'on vienne à lâcher le câble, le ballon captif devient un *ballon libre*, libre d'obéir à l'air qui l'entraîne et d'en suivre tous les mouvements. « Le vent peut être fort ou faible, l'aéronaute ne le sent plus, parce que lui-même et son aérostat en font partie. Il voit la fumée d'un cigare, la flamme d'une bougie monter tranquillement, les cordes du ballon pendre verticalement sans bouger, les plis d'un drapeau rester au repos. *En ballon, il n'y a pas, il ne peut y avoir de vent* [1]. » Il est donc absurde de songer à l'utiliser, au moyen d'un organe quelconque, pour diriger l'aérostat.

3° *Solution rationnelle.* — La solution du problème de la navigation aérienne se trouvera dans une imitation plus rationnelle de la navigation terrestre. Analysons, en effet, le cas simple d'un bateau à vapeur, ou même d'un bateau à rames, se mouvant, voiles carguées, sur une nappe d'eau sans courant. Il n'y a pas de vent, ou son action est négligeable, puisqu'il n'y a pas de voiles. La seule force motrice, c'est la vapeur, actionnant soit une hélice, soit des roues à aubes, ou bien c'est la force musculaire de rameurs, actionnant les rames. Cette force motrice prenant son point d'appui sur la masse liquide, qui est relativement fixe, pousse en avant le bateau, qui est mobile. C'est par le même mécanisme que la force explosive d'une charge de poudre, s'appuyant d'une part sur la pièce, corps relativement fixe, se détend d'autre part comme un ressort et lance en avant le boulet, qui est mobile. L'eau, même tranquille, intervient donc de deux manières dans la navigation : 1° elle soutient le bateau et annule son poids par sa poussée propre; 2° elle fournit à la force motrice le point d'appui qui lui est indispensable pour produire son effet. Telle est la cause et tel est le mécanisme du mouvement d'un bateau sur l'eau. Quant à la direction, elle est obtenue à l'aide du gouvernail.

Pour passer du cas simple d'une nappe d'eau tranquille, — cas théorique, à peine réalisable sur les lacs, — au cas général de la navigation sur l'eau en mouvement des fleuves et de l'Océan, il suffit d'appliquer les règles mécaniques de la composition des vitesses (30). Si le bateau descend le courant, sa vitesse propre v (c'est-à-dire celle qui lui vient de sa force motrice propre) et la vitesse v' du courant seront deux vitesses parallèles et de même sens qui s'ajouteront : le bateau prendra donc, dans le sens même du courant, une vitesse résultante V, égale à $v + v'$.

Si le bateau remonte le courant, il prendra, pour la même raison, une vitesse résultante V, égale à la différence $(v - v')$, et qui sera positive ou négative suivant que v sera $\gtrless v'$. Dans le premier cas le bateau avancera contre le courant, et dans le second cas il sera entraîné par le courant. Dans le cas particulier où l'on aurait $v = v'$, le bateau resterait en place, sans avancer ni reculer.

1. J. Jamin, *les Ballons*.

Enfin, dans le cas où la vitesse propre v est trop faible pour qu'on puisse lutter avantageusement contre le courant, on peut du moins pousser le bateau dans une direction OY_1, inclinée sur le courant (fig. 239). En effet, si l'on manœuvre le gouvernail de manière que la vitesse propre du bateau prenne une direction perpendiculaire au courant, il n'avancera pas pour cela suivant Ov, mais il ne sera pas davantage emporté suivant Ov' : il prendra une direction intermédiaire OV, déterminée par la diagonale du rectangle construit sur Ov' et Ov. La déviation α de cette direction sera évidemment donnée par l'équation $\tan \alpha = \frac{v}{v'}$: on voit que la déviation sera d'autant plus forte pour un même courant que la vitesse propre du bateau sera plus grande.

La solution du problème de la navigation aérienne est contenue dans cette discussion. Il suffit de remarquer qu'un aérostat flottant dans une couche d'air, où son poids est équilibré par la poussée, est dans les mêmes conditions mécaniques qu'un bateau sans voiles flottant sur l'eau à l'abri du vent.

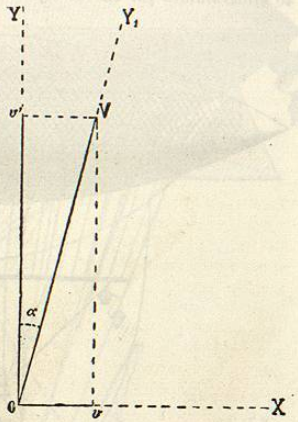

Fig. 239.

Si l'air est en repos, et l'aérostat dénué lui-même de force motrice propre, il demeurera éternellement dans la position d'équilibre qu'il aura une fois prise. Il n'en pourra sortir que s'il est animé d'une vitesse propre, par l'action d'un moteur intérieur quelconque. Si, par exemple, l'on fixe à la nacelle une hélice à axe horizontal et qu'on la fasse mouvoir avec une rapidité suffisante, elle poussera l'aérostat, en prenant son point d'appui sur la masse d'air, exactement comme fait l'hélice d'un bateau en prenant son point d'appui sur l'eau. Quant à la direction de ce navire aérien, elle sera obtenue à l'aide d'un gouvernail, placé à l'arrière, qui fonctionnera dans l'air comme celui des bateaux fonctionne dans l'eau et d'après le même mécanisme.

Dans la navigation aérienne, on retrouvera les trois cas de la navigation ordinaire :

1° $v > v'$: la vitesse propre v de l'aérostat est supérieure à la vitesse v' du courant aérien, c'est-à-dire du vent ;

2° $v = v'$ } : la vitesse propre est égale ou inférieure à celle du vent.
3° $v < v'$ }

Dans le premier cas, un aérostat, *construit et gréé convenablement*, sera parfaitement dirigeable, et la manœuvre se fera dans l'air comme dans l'eau ; dans le second cas, l'aérostat ne pourra que lutter contre le vent, sans bouger de place ; dans le troisième cas, il sera nécessairement entraîné par le vent, mais il pourra encore louvoyer, c'est-à-dire manœuvrer de manière à prendre une direction plus ou moins inclinée sur celle du vent.

En résumé, il résulte des considérations précédentes que la navigation aérienne est toujours possible *théoriquement*. Tout aérostat sera *théoriquement* dirigeable, s'il satisfait aux conditions suivantes :

1° Être muni d'un moteur, à la fois léger et puissant, capable de lui imprimer une vitesse notable sans trop diminuer sa force ascensionnelle ;

2° Être gréé comme un bateau à vapeur, c'est-à-dire être pourvu d'une hélice

et d'un gouvernail, qui soient appropriés au milieu gazeux où le mouvement doit se produire.

Dans la pratique, un tel aérostat ne sera réellement dirigeable qu'au sein d'une atmosphère calme, ou contre un vent de vitesse inférieure à sa vitesse propre or ces conditions pratiques sont très rares et très difficiles à réaliser. C'est ce que prouve l'insuccès relatif des tentatives de navigation aérienne qui ont été faites jusqu'à ce jour d'après la méthode rationnelle que nous venons d'exposer.

4° *Essais de réalisation de la solution rationnelle. — Expériences de Giffard.* — Les premiers essais sérieux de navigation aérienne sont dus à l'ingénieur Giffard. Il fit deux expériences, l'une en 1852, l'autre en 1855. Dans l'une et l'autre, il se servit de ballons à hydrogène, construits d'après les règles précédentes. Le moteur était une petite machine à vapeur de 3 chevaux, d'un système perfectionné au point de vue de l'aérostation ; elle ne pesait que 30 à 40 kilogrammes par cheval-vapeur; elle avait un foyer intérieur et une che-

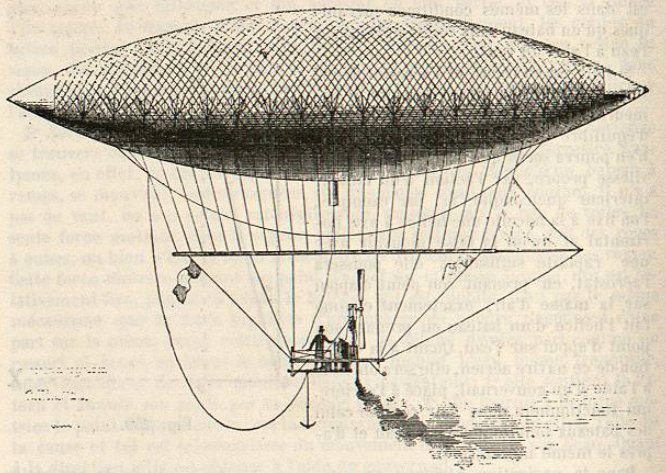

Fig. 240.

minée renversée du haut vers le bas, de manière à diminuer les dangers d'incendie. Ce moteur pouvait actionner une hélice, dont les branches effectuaient 110 tours à la minute; le gouvernail était constitué par une voile triangulaire tendue à l'arrière de l'aérostat, sur la traverse horizontale que soutenait le filet du ballon (fig. 240). Ce ballon jaugeait 2400 mètres cubes, mais il n'avait pas, suivant l'usage, la forme sphérique : c'était une espèce d'ellipsoïde, terminé en pointe aux extrémités de son grand axe. Giffard, guidé par l'analogie des bateaux, avait établi que la résistance de l'air serait moins forte sur cette surface que sur une sphère de même volume.

« L'ascension de cet aérostat se fit heureusement, la machine évolua ; mais pendant la descente elle ne put garder son équilibre; elle tomba sur pointe et le ballon, s'échappant du filet, se perdit [1]. »

1. Jamin, *les Ballons.*

Expériences de Dupuy de Lôme. — Ces expériences sont très coûteuses. Aussi ne furent-elles reprises que vingt ans plus tard, aux frais du gouvernement de la Défense Nationale, qui en 1870 confia à Dupuy de Lôme la construction d'un ballon dirigeable.

L'appareil ne fut prêt à essayer que deux ans plus tard, en 1872. Il n'avait plus d'intérêt au point de vue pratique, mais son importance était énorme au point de vue théorique, car il réalisait d'une manière plus complète que le ballon Giffard toutes les conditions théoriques de la navigation aérienne.

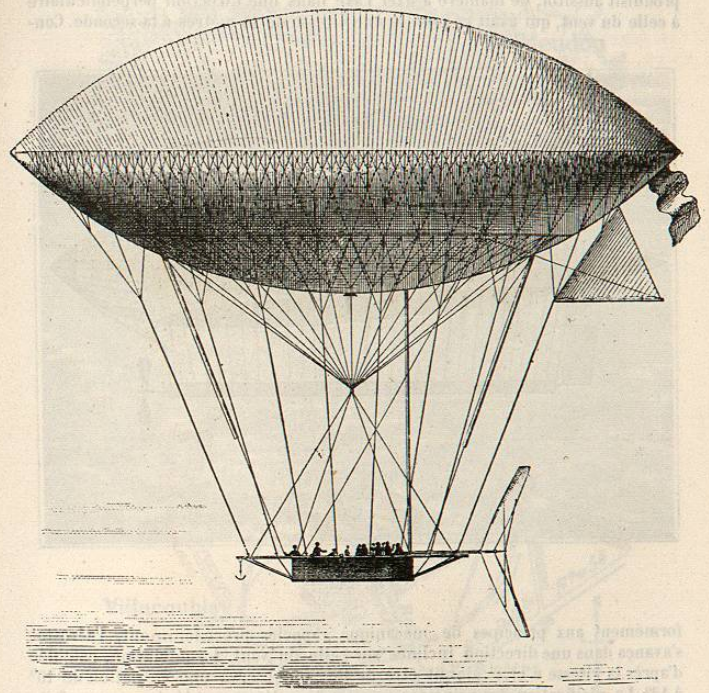

Fig. 241

C'était un ballon gonflé au gaz de l'éclairage, de forme ovale et oblongue, comme celui de Giffard (fig. 241), mais beaucoup plus gros (environ 3500 mètres cubes), ce qui permettait d'enlever un moteur plus puissant. Celui-ci se composait d'un treuil à manivelle manœuvrée à bras d'homme, qui actionnait une hélice à deux ou quatre branches, à ailes de taffetas. On pouvait ainsi donner à l'aérostat une vitesse propre de 2m,5 par seconde. Le gouvernail était formé d'une voile triangulaire, placée à l'arrière, sous le ballon. Le perfectionnement principal consistait dans l'adjonction, à l'intérieur du grand ballon, d'un petit ballon, d'une capacité dix fois moindre, qu'on pouvait à volonté remplir

d'air, à l'aide d'un ventilateur porté et manœuvré dans la nacelle. Ce ballonnet, sorte de vessie natatoire, avait pour rôle de conserver au grand ballon une forme permanente, quelles que fussent les variations de la pression atmosphérique, pendant l'ascension ou la descente. Dupuy de Lôme avait reconnu que cette permanence de forme était nécessaire pour assurer à l'aérostat la stabilité qui avait fait défaut au ballon Giffard.

Dupuy de Lôme partit lui-même dans son appareil, le 2 février 1872, malheureusement par un assez mauvais temps. Après avoir marché d'abord en suivant le vent, il mit l'hélice en fonction, puis il fit agir le gouvernail, dont l'effet se produisit aussitôt, de manière à fixer l'axe dans une direction perpendiculaire à celle du vent, qui avait ce jour-là une vitesse de 15 mètres à la seconde. Con-

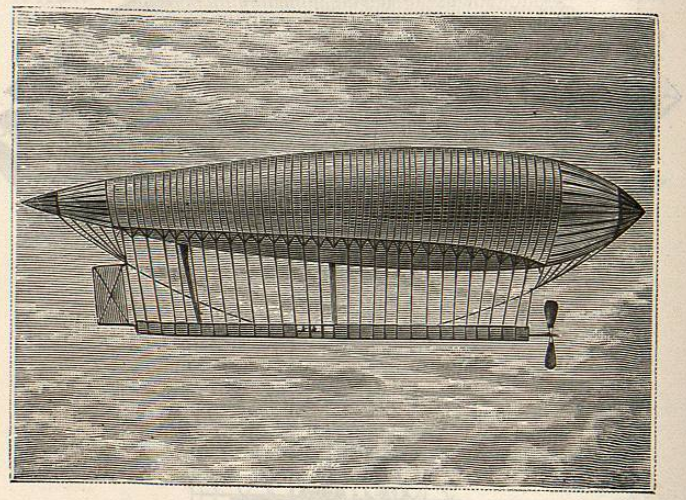

Fig. 242.

formément aux principes de mécanique rappelés précédemment, l'aérostat s'avança dans une direction inclinée sur celle du vent. La déviation, calculée d'après la vitesse v et v', devait être de 15° : on observa une déviation de 10° à 12°. La vérification des principes pouvait donc être considérée comme faite par cette expérience.

Expériences des capitaines Renard et Krebs. — Le principal desideratum du ballon Dupuy de Lôme, c'était l'insuffisance de la force motrice et par suite de la vitesse propre. Un grand progrès dans ce sens a été réalisé récemment par M. Renard, capitaine du génie, et par son collaborateur le capitaine d'infanterie Krebs [1]. Grâce à l'emploi d'un moteur électrique, actionné par des piles légères, ils ont obtenu une vitesse propre de 5m,6. Ils avaient été précédés, il est vrai, dans l'emploi d'un moteur électrique par MM. Tissandier (expérience du 8 octobre 1883) ; mais ceux-ci n'avaient obtenu qu'une vitesse de 2m,8. Au point de

1. Le capitaine Renard est directeur d'un établissement d'études aérostatiques fondé par le ministère de la guerre, à Chalais (Meudon).

vue pratique, le perfectionnement dû aux capitaines Renard et Krebs est énorme, car cette vitesse leur a suffi dès le premier jour pour vaincre la vitesse du vent et pour assurer le plein succès de leur premier essai de navigation aérienne.

Leur aérostat était un ballon de 1800 mètres cubes, pouvant enlever une charge totale de 2000 kilogrammes. Il était de forme allongée, et muni d'une hélice et d'un ballonnet (fig. 242), d'après les règles posées par Dupuy de Lôme pour la construction des aérostats dirigeables. La nacelle avait la forme d'une

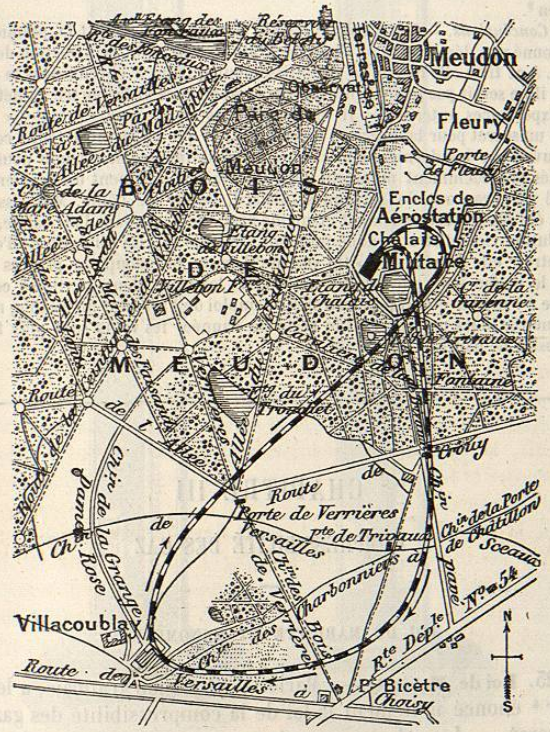

Fig. 243.

longue yole de canotage, avec une place laissée au milieu pour les aéronautes; l'hélice était placée à l'avant et le gouvernail à l'arrière du navire aérien. L'appareil tout entier pouvait être remisé, dans un vaste hangar, à l'établissement militaire de Chalais, en attendant un temps favorable : *condition indispensable de succès* pour toutes les expériences de ce genre.

L'ascension eut lieu le 9 août 1884, à quatre heures du soir, par un temps calme « L'aérostat, laissé libre et possédant une très faible force ascensionnelle, s'éleva lentement jusqu'à la hauteur des plateaux environnants. La machine

fut mise en mouvement, et bientôt, sous son impulsion, l'aérostat accélérait sa marche, obéissant fidèlement à la moindre indication de son gouvernail [1]. » Arrivés au-dessus du village de Villacoublay (fig. 243), à 4 kilomètres environ de Chalais, les aéronautes décidèrent de rebrousser chemin, et d'essayer de descendre au lieu même du départ. Ils exécutèrent donc, par une manœuvre convenable du gouvernail, un demi-tour sur la droite, puis plus loin un nouveau changement de direction sur la gauche, et bientôt ils vinrent planer à 300 mètres au-dessus du point de départ, où la descente s'effectua sans aucun accident. La figure 243 représente approximativement le tracé de ce voyage aérien [2].

5° *Conclusions.* — L'expérience de MM. Renard et Krebs est la première qui ait donné une démonstration expérimentale complète de la direction des aérostats. A ce titre elle mérite le retentissement qu'elle a obtenu dans le public; mais il ne serait pas juste d'en exagérer l'importance et la portée au détriment des expériences antérieures. Il ne faudrait pas croire, par exemple, « qu'il y avait un secret pour la direction des ballons, et que ce secret a tout à coup été découvert par les derniers chercheurs. » Les développements que nous avons donnés précédemment montrent « qu'il y avait simplement un problème travaillé par beaucoup de personnes (Giffard, Dupuy de Lôme, MM. Tissandier) qui a été résolu théoriquement et même pratiquement, dans l'air calme, et que la solution vient d'être étendue jusqu'au cas où la vitesse du vent est d'environ 5 mètres : elle s'arrête là [3]. » On voit qu'il reste beaucoup de progrès à faire dans le même sens, puisque, à Paris même, les vents dont la vitesse est inférieure à 7 mètres et qui permettraient l'emploi de l'aérostat dirigeable, règnent à peine 108 jours par an ; tout le reste de l'année, les vents sont plus forts et l'aérostat ne pourrait pas servir.

CHAPITRE III

COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

LOI DE MARIOTTE ET MANOMÈTRES.

223. **Loi de Mariotte.** — Mariotte, physicien français, a le premier [4] énoncé nettement la loi de la compressibilité des gaz.

ÉNONCÉ. — *Les volumes occupés par une masse donnée de gaz, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.*

1. *Comptes rendus*, communication de MM. Renard et Krebs.
2. Cette carte a été dressée par MM. Tissandier, d'après la note scientifique de MM. Renard et Krebs.
3. J. Jamin, *les Ballons*.
4. *Essai sur la nature de l'air*, de l'abbé Mariotte (1676). — Quelques années auparavant (1662), en Angleterre, Boyle avait publié des expériences sur le même sujet (*Nova experimenta de vi aeris elastica*) qui conduisent à la même conclusion.

Vérification expérimentale. — 1° *Cas des pressions supérieures à une atmosphère. Tube de Mariotte.* — Cette loi fut vérifiée sur l'air au moyen d'un petit appareil qu'on appelle encore aujourd'hui le *tube de Mariotte*. Il est employé dans le cas où l'on soumet la

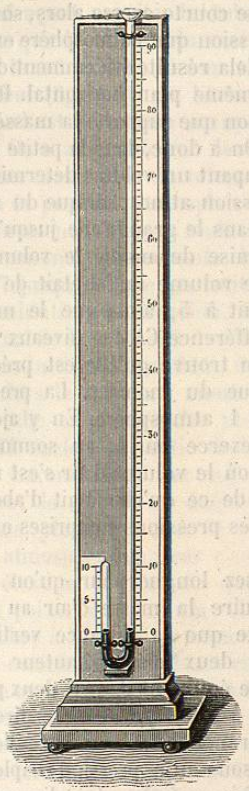

Fig. 244.

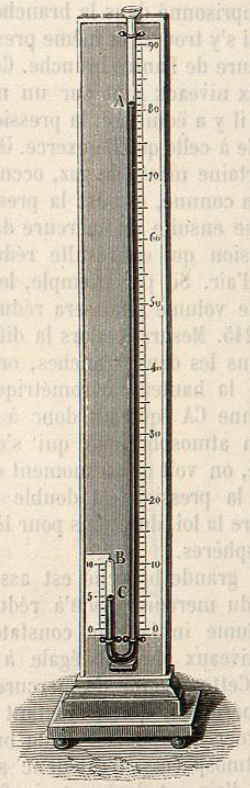

Fig. 245

masse gazeuse à des pressions qui croissent au delà d'une atmosphère.

Sur une planchette de bois, maintenue verticalement, est fixé un tube de verre recourbé, à branches très inégales (fig. 244 et 245). Le long de la petite branche, qui est fermée, est une échelle indiquant des capacités égales, tandis que l'échelle placée le long de