

L'invention du ballon-sonde

Michel Rochas

Inspection générale de l'aviation civile et de la météorologie
93, boulevard du Montparnasse
75006 Paris
mrochas.igacem@wanadoo.fr

Résumé

Pour connaître les températures et les pressions qui règnent dans la haute atmosphère, Gustave Hermite est le premier à avoir conçu des ballons non montés portant des enregistreurs météorologiques : les ballons-sondes. Avec son collaborateur G. Besançon, ils effectuent alors plusieurs lancers. Quatre ans après leurs premières expériences, naît la Commission internationale d'aérostation scientifique, chargée d'organiser des ascensions internationales coordonnées.

Abstract

The invention of the sounding balloon

It was Gustave Hermite who conceived the sounding balloon, unmanned, and carrying apparatus to measure temperatures and pressures in the upper atmosphere. With G. Besançon, his partner, they launched many sounding balloons. Four years after their first experiences, an International Commission for Scientific Aeronautics was established and organized international coordinated ascents.

Attribuer la paternité de l'invention du ballon-sonde est un problème dont la solution est relativement simple, même si Labitzke et van Loon (1999) mentionnent que l'idée d'explorer l'atmosphère avec des ballons non montés était clairement exprimée dans un concours en latin de l'Académie royale des sciences du Danemark en 1809 ; même si Wilfried De Fonvielle (1898) a cité les discussions qui ont eu lieu au sein de la Société française de navigation aérienne dans les années 1870, où existaient enfin les instruments permettant de réaliser des sondages en altitude, sondages qui ne



Gustave Hermite, l'inventeur du ballon-sonde.

furent pas possibles pour deux raisons : le coût des instruments et la faible probabilité de les retrouver. On pourrait certainement trouver d'autres exemples de ce type, mais si l'on s'en tient aux seules publications présentant les résultats d'expériences effectives, le problème se simplifie considérablement. C'est ce qui conduit à considérer Gustave Hermite comme l'inventeur du ballon-sonde, alors que le commandant Renard, fondateur du Service de l'aérostation militaire de Chalais-Meudon, aurait peut-être pu, lui aussi, prétendre à cet honneur.

Les débuts

L'histoire des ballons-sondes commence réellement à la réunion du 14 novembre 1892 de l'Académie des sciences, dont le compte rendu note laconiquement : « M. L. Capazza adresse une note relative à la possibilité d'ascensions à de très grandes hauteurs, sans aéronautes, à des fins de déterminations scientifiques (renvoi à la commission des aérostats) ». Louis Capazza⁽¹⁾, aéronaute célèbre, n'a joué ici qu'un rôle de déclencheur, il n'a envoyé sa note que pour permettre au colonel Renard de publier ses travaux. À partir de là, il faut considérer deux histoires : celle des publications et celle de ce que l'on connaît des premières tentatives de lancers de ballons-sondes. En réponse à la note de Louis Capazza, Gustave Hermite a fait très rapidement, le 21 novembre, c'est-à-dire dès la séance suivante, présenter une communication dans laquelle il déclare avoir commencé ses expériences le 1^{er} juillet 1892, mais qu'il y pensait depuis longtemps, procès-verbaux de l'École supérieure de navigation aérienne à l'appui. Deux semaines après, le 5 décembre, Alfred Cornu présenta la communication du colonel Renard, qui se limitait à discuter les altitudes maximales que pouvaient atteindre des ballons de différente taille en fonction des charges qu'ils emportent. Mais, dans le numéro du 3 décembre de la revue *La nature*, Charles-Édouard Guillaume, prix Nobel de physique 1920, a donné beaucoup plus de détails sur les travaux du colonel Renard et notamment sur les différents instruments qu'il espérait lancer. On voit qu'il est vraisemblable que le colonel Renard ait

(1) Louis Capazza (Bastia, 1862 - Paris, 1928) a fait en ballon la traversée du continent vers la Corse et effectué la première traversée de la Manche en dirigeable.

lancé des ballons-sondes avant Hermite, mais que le secret défense l'a peut-être empêché d'en publier les résultats ; de toute façon, on n'entendra plus parler de lui dans la suite, alors qu'il paraît peu probable qu'il ait abandonné le programme scientifique décrit par Guillaume.

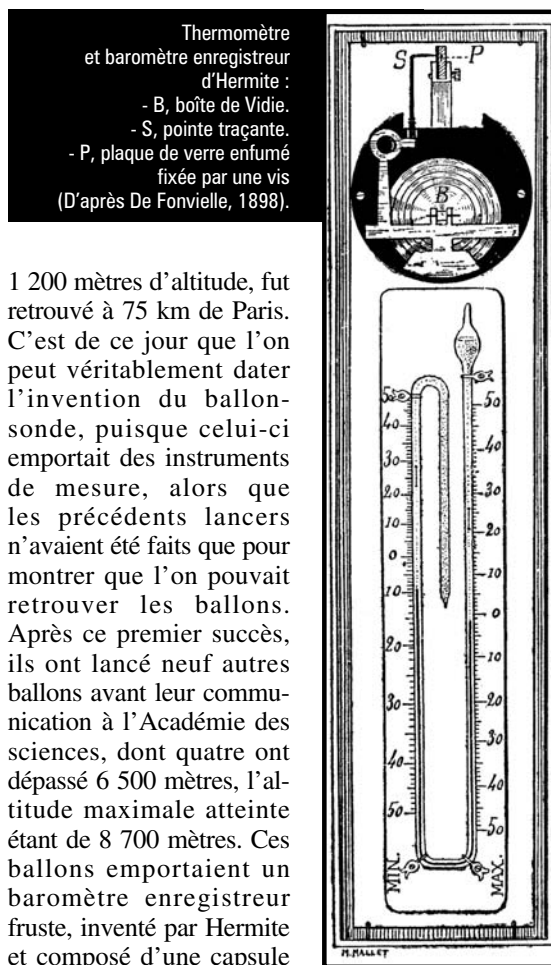


Georges Besançon (1866-1934), le collaborateur de G. Hermite.

Les premiers travaux d'Hermite et Besançon

Le livre de Wilfried De Fonvielle (1898) est une source importante de renseignements sur les origines du ballon-sonde, à condition de comparer systématiquement ses informations aux documents originaux lorsque c'est possible, mais il apporte aussi des informations inédites qu'il est difficile de récuser. Selon lui, Hermite et Besançon se sont associés en 1891 afin d'organiser une expédition en ballon pour joindre le pôle Nord à partir du Spitzberg, bien avant Andrée. Désespérant de trouver les fonds nécessaires à une telle expédition, ils se sont tournés vers une activité moins périlleuse et ont commencé à lancer de petits ballons « du balcon de l'appartement qu'ils occupaient boulevard de Sébastopol, en face du square des Arts et Métiers » (De Fonvielle, 1898). La moitié environ de ces ballons ne dépassant pas 1 m³ et n'emportant pas de charge utile (excepté une carte avec l'adresse des lanceurs pour qu'elle leur soit retournée) furent cependant retrouvés, ce qui était très encourageant.

C'est alors que les deux associés décidèrent de passer à la vitesse supérieure. Après plusieurs tentatives infructueuses avec des ballons en papier pétrolé de 113, 26, puis 5 m³ lancés de l'usine à gaz de Noisy-le-Sec, le 11 octobre 1892 seul un ballon de baudruche de 90 centimètres de diamètre, qui était monté à



Thermomètre et baromètre enregistreur d'Hermite :
- B, boîte de Vidie.
- S, pointe traçante.
- P, plaque de verre enfumée fixée par une vis
(D'après De Fonvielle, 1898).

1 200 mètres d'altitude, fut retrouvé à 75 km de Paris. C'est de ce jour que l'on peut véritablement dater l'invention du ballon-sonde, puisque celui-ci emportait des instruments de mesure, alors que les précédents lancers n'avaient été faits que pour montrer que l'on pouvait retrouver les ballons. Après ce premier succès, ils ont lancé neuf autres ballons avant leur communication à l'Académie des sciences, dont quatre ont dépassé 6 500 mètres, l'altitude maximale atteinte étant de 8 700 mètres. Ces ballons emportaient un baromètre enregistreur fruste, inventé par Hermite et composé d'une capsule de Vidie munie d'un stilet

qui frotte sur une plaque fixe recouverte de noir de fumée (le système n'est pas gradué ; après la récupération, il faut mettre le baromètre sous une cloche pneumatique et faire progressivement le vide jusqu'à obtenir l'indication portée sur la plaque), ainsi que, parfois, un thermomètre à minimum et un abri. Le tout pesait au maximum 260 grammes, lorsqu'il y avait un abri. On peut avoir des doutes sur la précision des mesures mais, à ce stade, l'important était de démontrer la faisabilité de la méthode.

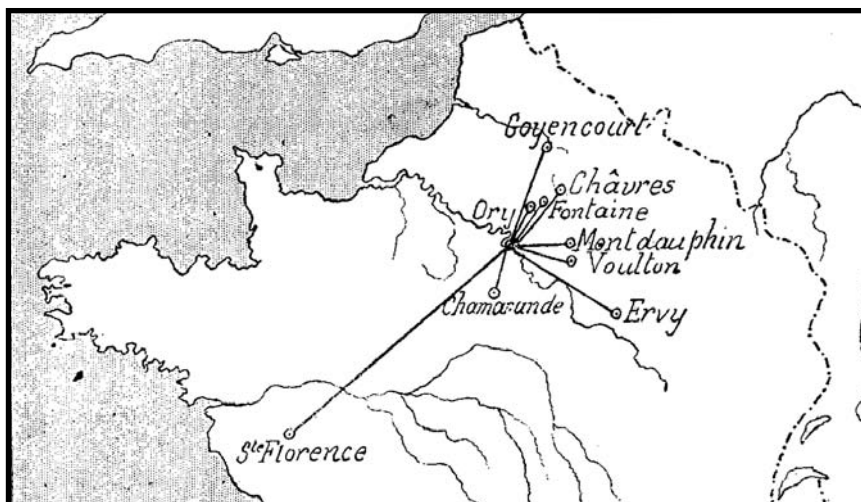
L'Aérophile

L'Union aérophile de France, société pour l'avancement de l'aéronautique et des sciences qui s'y rattachent, a été fondée en 1889⁽¹⁾, mais autorisée seulement au début de 1893 ; elle a commencé la même année la publication d'une revue mensuelle importante pour notre sujet, *L'Aérophile*, qui contient presque toutes les publications de Hermite, Besançon et De Fonvielle relatives aux ballons-sondes. C'est donc une source de renseignements très importante.

Le 21 mars 1893, Hermite et Besançon ont lancé leur premier gros ballon en baudruche de 113 m³, *L'Aérophile I*, du parc aérostatique de Vaugirard, avec l'aide de l'Union aérophile de France. Le ballon emportait deux barothermographes, dont l'un n'a pas fonctionné ; il devait emporter

aussi un appareil à prise d'air et un autre pour récolter les poussières, qui ont été finalement écartés pour ne pas surcharger cette première expérience. Les résultats de cette expérience ont été décrits ou commentés par Hermite (1893a), De Fonvielle (1893) et Hazen (1894). Le ballon a été lancé dans la précipitation et

(1) C'est au sein de l'Union aérophile de France que Gustave Hermite a rencontré Georges Besançon, qui lui a permis de faire son premier vol monté en 1889.



Points d'atterrissage des premiers ballons-sondes en papier pétrolé (D'après De Fonvielle, 1898).

sans protection contre le vent qui s'est mis à souffler en rafales. Par crainte qu'il se déchire, les instruments ont été installés rapidement et le pare-soleil a été oublié. Le ballon a atteint, selon ses lanceurs, l'altitude de 16 km, calculée avec la formule de Laplace, altitude qui a semblé excessive à Hazen (1894) mais aussi à Berson (1896), ainsi que Rochas (2002) l'a expliqué. Outre l'altitude, extraordinaire pour l'époque, atteinte par l'*Aérophile I*, ce qui est remarquable est le profil de température enregistré par le barothermographe qui a fonctionné. Vers 13 500 mètres, il enregistre sa plus basse température, $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$, et celle-ci se

met à croître jusqu'à $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 14 500 mètres. Hermite (1893a) interprète cette croissance de la température comme une « erreur instrumentale » : le pare-soleil n'ayant pas eu le temps d'être installé, le soleil chauffe le thermomètre. Hazen (1894) a toutefois fait remarquer que le ballon était encore en ascension (à une vitesse de l'ordre de 5 m/s selon Hermite, 1893a) et donc que l'explication pourrait bien ne pas être la bonne. Ainsi, dès le premier lancer d'un ballon-sonde muni d'enregistreurs, la stratosphère aurait pu être découverte. Les enregistrements de la température et de la pression ont toutefois été interrompus par le gel de l'encre fournie par Jules Richard, qui ne devait geler qu'à $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lorsqu'ils ont repris, celui de la température est assez incohérent, mais une découverte a été manquée.

Hermite et Besançon effectuent le deuxième lancer de leur ballon-sonde, l'*Aérophile I*, le 27 septembre 1893 de l'usine à gaz de La Villette (Hermite, 1893b). Il n'y a pas grand chose à dire de ce vol sinon que les enregistrements ont été à nouveau interrompus, beaucoup plus bas, à 8 600 mètres, altitude à laquelle le thermomètre indiquait $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, et que le ballon a été détruit dans la Forêt noire sans que les instruments aient été endommagés, mais qu'ils n'ont pas révélé d'informations importantes.

Le troisième lancement du « ballon explorateur » n'a eu lieu que le 20 octobre 1895, car il a fallu fabriquer un autre ballon, l'*Aérophile II*, et mettre au point un dispositif d'enregistrement qui résiste au froid des grandes hauteurs pour ne pas renouveler les erreurs des lancers précédents. Le ballon



Ascension de l'*Aérophile I* à l'usine de Vaugirard, le 21 mars 1893 (D'après De Fonvielle, 1898).

emportait deux barothermographes et un appareil à prise d'air, qui n'a pas fonctionné. Selon ses promoteurs, le ballon serait monté à 15,4 km d'altitude, mais en corrigeant cette estimation de la température moyenne enregistrée, elle se réduit à 14,3 km. L'un des deux thermomètres, celui qui était le plus enfermé dans le panier pare-soleil en osier entouré de feuilles d'argent, a enregistré une température minimale de $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$, alors que le ballon était déjà redescendu à 11 km. L'autre thermomètre, « l'enregistreur exposé le plus possible à l'air libre », a enregistré $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les deux barothermographes n'étaient pas identiques et, de plus, le premier « était protégé de l'action directe du froid par un léger grillage métallique qui l'entourait de toutes parts » (Hermite, 1896). Les deux appareils avaient préalablement été étalonnés dans la chambre frigorifique de M. de La Baume Pluvinel. Hermite (1896) fait donc confiance aux indications du second, mais il oublie de discuter ce qui

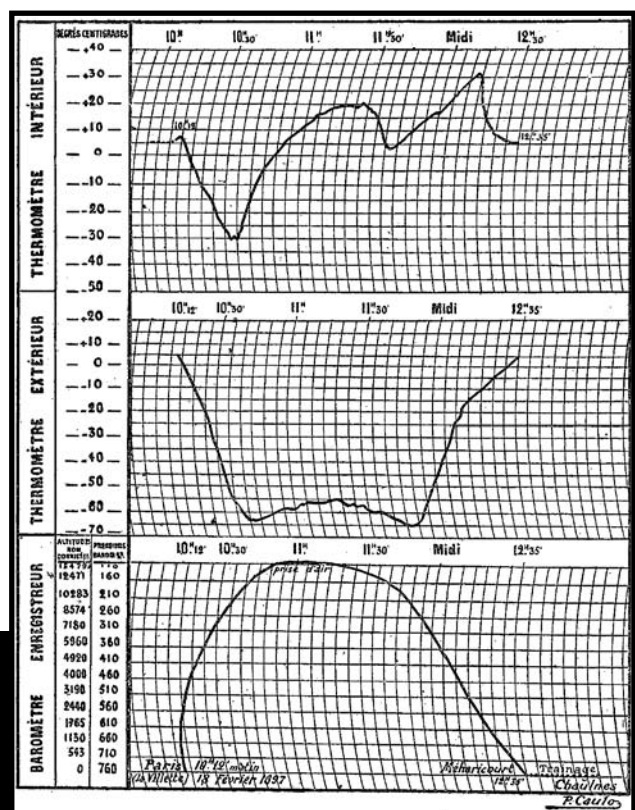
Diagramme de température et de pression au cours du septième vol de l'*Aérophile*, le 18 février 1897 (D'après Hermite, 1897).

se passe au-dessus du minimum de température. Ce minimum a été obtenu vers 13 km, mais la température remonte jusqu'à $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ à 15,5 km et baisse à nouveau lorsque le ballon redescend. Ensuite, le mouvement d'horlogerie s'est bloqué et l'enregistrement n'est donc plus utilisable.

Le quatrième *Aérophile*, lancé le 22 mars 1896, n'a pas donné les résultats espérés. Il est monté à 14 km (non corrigés) où la température était de $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais le mouvement d'horlogerie s'est bloqué alors que le ballon était encore en pleine ascension. En outre, l'appareil à prise d'air ne s'est pas déclenché comme prévu à 11 km.

Le Cirrus

Le Dr Assmann, à Berlin, a commencé, immédiatement après l'annonce du lancement des premiers ballons-sondes de Hermite et Besançon, à développer les instruments qui pourraient être embarqués sous le premier ballon-sonde allemand. Deux points ont été particulièrement étudiés : celui des enregistreurs, puisque toute encre finit par geler, et



celui de l'élimination de l'influence du rayonnement solaire sur le thermomètre. Assmann était l'inventeur du psychomètre à aspiration et il a appliqué la même méthode à la mesure de la température, méthode déjà utilisée par Welsh en Grande-Bretagne en 1852 lors de vols montés. L'enregistrement de la température et de la pression était effectué à l'aide d'un procédé photographique développé par la société Fuess. Le ballon *Cirrus* était fabriqué à l'aide de soie vernie et avait un volume de 250 m³.

Le premier lancement du ballon *Cirrus* a eu lieu le 11 mai 1894 en présence du Kaiser. Ce premier vol a été un échec puisque le ballon n'a atteint que l'altitude de 700 mètres. La deuxième tentative a eu lieu le 7 juillet de la même année et s'est beaucoup mieux déroulée. Le ballon a atteint l'altitude de 16,3 km, altitude calculée en utilisant la loi de Laplace, mais en utilisant le profil réel de température mesuré, avec un minimum de -58 °C. Malheureusement, il semble que le système d'aspiration ait mal fonctionné (la corde portant le poids qui entraînait le mécanisme d'aspiration se serait emmêlée avec celle qui portait l'ancre chargée de crever le ballon après son arrivée au sol, pour éviter qu'il ne soit traîné sur une longue distance par le vent, préservant ainsi son intégrité et celle des instruments) et qu'une source imprévue de perturbations ait entraîné des oscillations de l'ordre de la dizaine de degrés dans l'enregistrement de la température. Bien que le ballon soit monté à plus de 16 km, aucune trace évidente de stratosphère n'était visible sur les enregistrements. En fait, le ballon est sans doute monté plus haut, car l'enregistreur de pression n'était pas prévu pour enregistrer au-dessous de 85 mm de mercure. Néanmoins, un profil de température a été publié dans le *Zeitschrift für Luftschiffahrt* de juillet 1894 et repris dans *l'American Journal of Meteorology* de janvier 1895 ; ce profil montre un début de croissance de la température au-

dessus de 15 km (à peine 1 °C), qui paraît difficilement croyable à cause des oscillations de 10 °C qui avaient parasité l'enregistrement auparavant.

Le troisième lancement du *Cirrus* a eu lieu le 6 septembre 1894 et a permis d'atteindre l'altitude de 18,5 km, altitude à laquelle se trouvait le minimum de température : -68 °C. Le quatrième, le 4 décembre, n'a donné aucun résultat.

Ascensions internationales

Le Congrès météorologique, à sa réunion de Paris en septembre 1896, a décidé la création d'une Commission internationale d'aérostation scientifique, chargée de coordonner les efforts dans la discipline naissante de l'exploration de la haute atmosphère et d'organiser des ascensions internationales coordonnées. Hergesell (Service météorologique d'Alsace-Lorraine, Strasbourg) la présidait, avec De Fonvielle (France) comme

secrétaire et avec Pomortseff (Saint-Pétersbourg, Russie), Rotch (Observatoire de Blue Hill, États-Unis), Hermite (France), Assmann (Allemagne), Cailletet (membre de l'Institut, France), Jaubert (directeur des services météorologiques de la ville de Paris), Andrée et Erk (Munich) comme membres⁽¹⁾, Glaisher (Grande-Bretagne) et Tissandier (France) étant membres honoraires. La Commission a travaillé rapidement et le premier lancer international a eu lieu dans la nuit du 13 au 14 novembre 1896.

Le ballon-sonde *Strasbourg*, lancé par Hergesell, est monté à 8 km, altitude à laquelle il a mesuré une température de -30 °C ; il ne présente donc aucun intérêt. Le *Cirrus* d'Assmann offrait la particularité d'emporter un barothermographe Richard, en plus de celui de Fuess. Les enregistrements de l'instrument de Richard sont propres et indiquent une altitude de 5,8 km et une température minimale de -26 °C. L'enregistrement du thermographe Fuess est très bruité, mais indique quand même une température minimale identique à celle du Richard. Enfin, le ballon-sonde lancé par

Rykatcheff à Saint-Pétersbourg n'est monté qu'à 1,5 km. Seul le sixième vol de l'*Aérophile* a été un succès. Il est monté à 13,7 km où régnait une température de -52 °C, après avoir mesuré

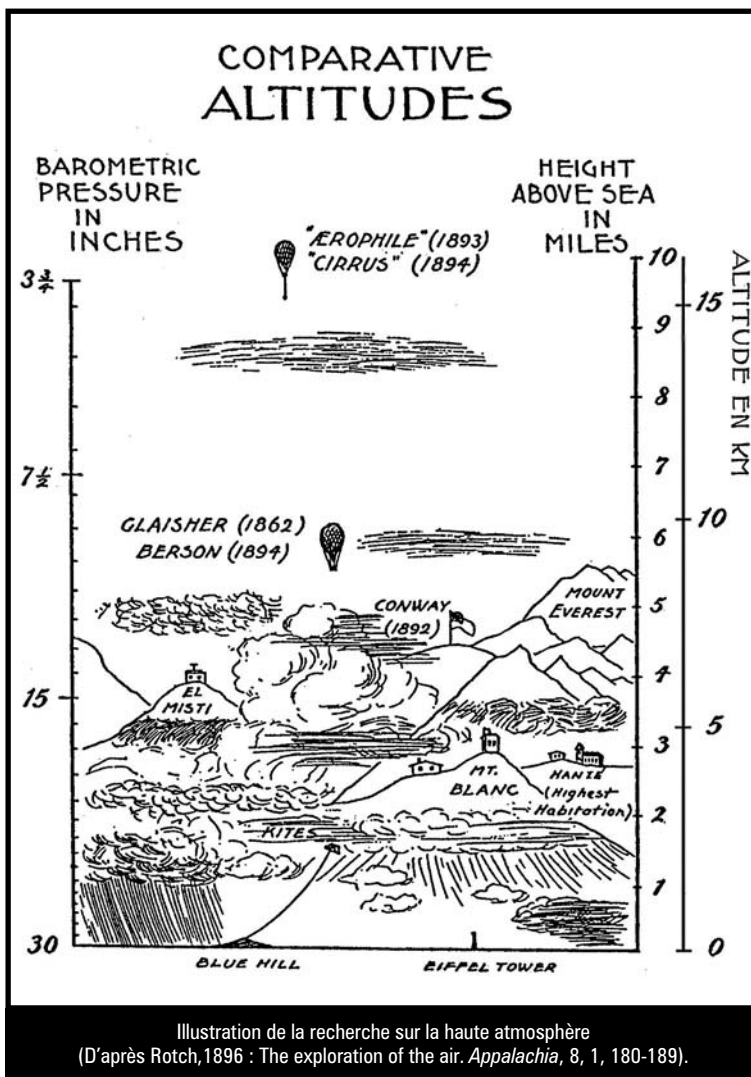


Illustration de la recherche sur la haute atmosphère (D'après Rotch, 1896 : *The exploration of the air. Appalachia*, 8, 1, 180-189).

(1) Contrairement à ce qu'a écrit Hoinka (1997), si Teisserenc de Bort ne fait pas partie de cette commission, ce n'est pas à cause d'une animosité envers Assmann. Teisserenc de Bort a participé au Congrès météorologique de Paris en tant que représentant de la Société météorologique de France et il a invité les participants à venir visiter l'observatoire qu'il venait de fonder à Trappes. Il l'a fondé en 1896 (Rochas, 1996) pour assurer la participation française à l'Année internationale des nuages, à laquelle il a consacré beaucoup d'énergie et d'argent. Cette année a duré un peu plus d'un an, pour cause de non disponibilité de l'Atlas international des nuages dont Teisserenc de Bort a fini par financer l'édition et la vente. Il ne s'était donc pas encore soucié des sondages par ballon-sonde ; ce n'est qu'en 1898 qu'il a commencé à en faire effectuer à Trappes.

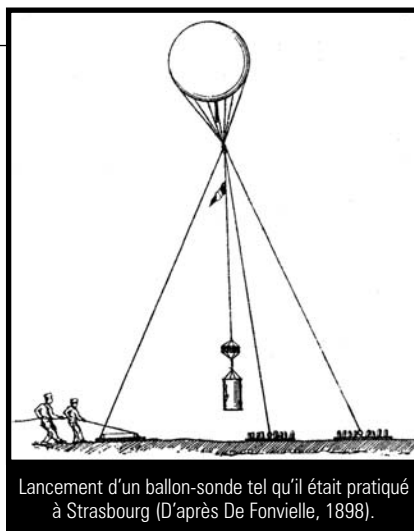
-54 °C à 12,7 km, valeur qu'il retrouvera à la descente. Mais, ensuite la température continue à baisser jusqu'à -59,8 °C à 11 km. La descente a été particulièrement lente. Au sol, le thermomètre a mesuré deux degrés de moins qu'au départ, ce qui ne paraît pas absurde pour un vol parti à 2 heures et se terminant à 7 heures, à 430 km de son point de départ. Mais aucune mesure de température indépendante n'a été faite au sol. En outre, plusieurs vols montés ont eu lieu à Saint-Petersbourg, Varsovie et Munich.

La deuxième ascension internationale a eu lieu le 18 février 1897 et n'a pas donné de résultats intéressants. Le ballon *Strasbourg* a atteint 10,8 km et mesuré -55 °C ; l'*Aérophile* est sans doute monté plus haut, mais il a heurté un poteau télégraphique en arrivant au sol, ce qui a rendu inutilisable la partie de l'enregistrement au-dessus de 10 km. Quant aux ballons de Berlin et de Saint-Petersbourg, ils n'ont pas dépassé 3 km.

Les premiers lancers internationaux n'ont donc pas apporté grand chose.

Terminologie

Le terme ballon-sonde⁽¹⁾ a été employé par le commandant Renard dans sa communication à l'Académie des sciences (Renard, 1892). Toutefois, son usage n'a pas été immédiat. Gustave Hermite (1896) discute de la terminologie à utiliser et trouve que le terme « ballon explorateur » sonne moins bien que celui de « sonde aérienne » cité par le comman-



dant Renard, mais je n'ai pas trouvé trace de cette appellation. Le terme ballon-sonde se trouve chez Labrousse (1894), chez Mascart (1896) et chez Hermite (1897). Il semble qu'ensuite il n'y ait plus eu de réticence à son emploi.

Conclusion

On a vu que la technique des ballons-sondes a eu du mal à être mise au point. Cependant, le vol de l'*Aérophile* de novembre 1896 a donné lieu à de nombreux commentaires. Il mettait en évidence quelque chose qui était peut-être la stratosphère, ce qui n'était pas acceptable pour Assmann et Hergesell. Ce dernier (Hergesell, 1897) a même développé une théorie qui permettait de corriger les mesures de l'*Aérophile* et qui conduisait à une température de -68 °C à 14 km, au lieu de -53 °C. Il faut dire qu'Assmann avait par deux fois lancé des ballons au-delà de 16 km, avec un thermomètre à aspiration, donc théoriquement affranchi des problèmes de rayonnement, et qu'il

n'avait rien trouvé de suspect : la température décroissait de façon continue avec l'altitude. Mais c'est là que se trouvait l'erreur : on a vu que, tant dans son premier vol qui a atteint 16 km qu'au cours du premier lancer international, des oscillations de température atteignant la dizaine de degrés polluaient les enregistrements. Il faudra encore cinq ans et le lancement de plusieurs centaines de ballons-sondes pour que la stratosphère soit enfin découverte et encore de nombreuses années pour que son existence soit acceptée par tous (Khrigian, 1970).

Au cours des six premières années de l'existence du ballon-sonde, de 1892 à 1897, Hermite et Besançon ont lancé sept gros ballons, Assmann en a lancé six ; si l'on ajoute ceux lancés par Hergesell et Rykatcheff, cela fait moins de vingt dont seulement cinq sont montés à plus de 11 km. Ce n'est pas beaucoup, mais comme on les a tous retrouvés, c'est déjà un résultat très positif. À lui seul, Teisserenc de Bort en a lancé ensuite un grand nombre, dont 236 à plus de 11 km au cours des quatre années qui vont du début des sondages par ballon-sonde à l'observatoire de météorologie dynamique (1898) à la présentation de sa communication sur la découverte de la « couche isotherme » à l'Académie des sciences (1902). On voit l'ampleur des moyens qui étaient nécessaires pour arriver à une certitude expérimentale de l'existence d'un phénomène qu'aucune théorie ne prévoyait.

(1) Le Dictionnaire historique de la langue française, publié sous la direction de Alain Rey, fait remonter à 1875 l'origine du mot.

Bibliographie

- Berson A., 1896 : Lettre de M. A. Berson à M. Gustave Hermite. *L'Aérophile*, 4, 222-224.
- De Fonvielle W., 1893 : Thermometer soundings in the high atmosphere. *Nature*, 48, 1233, 160-161.
- De Fonvielle W., 1898 : *Les ballons-sondes de MM Hermite et Besançon et les ascensions internationales*. Gauthier-Villars, Paris, 113 p.
- Hazen H. A., 1894 : Ten miles above the earth. *The American Meteorological Journal*, X, 423-427.
- Hergesell H., 1897 : Der Ergebnisse der ersten internationalen Ballonfahrt in der Nacht vom 13. Zum 14. November 1896. *Meteor. Zeit.*, 14, 141-143.
- Hermite G., 1893a : L'exploration de la haute atmosphère. Ascension du ballon l'*Aérophile*. *L'Aérophile*, 1, 45-55.
- Hermite G., 1893b : L'exploration de la haute atmosphère. Deuxième ascension du ballon l'*Aérophile*. *L'Aérophile*, 1, 165-170.
- Hermite G., 1896 : L'exploration de la haute atmosphère. Troisième ascension du ballon l'*Aérophile*. *L'Aérophile*, 4, 5-21.
- Hermite G., 1897 : Ascensions internationales pour l'exploration de la haute atmosphère. *L'Aérophile*, 5, 6-25.
- Hoinka K. P., 1997 : The tropopause: discovery, definition and demarcation. *Meteor. Zeit., Neue Folge*, 6, 281-303.
- Khrigian A. K., 1970 : *Meteorology. A historical survey*. Israel Program for Scientific Translation, 389 p.
- Labitzke K. et H. van Loon, 1999 : *The stratosphere phenomena, history and relevance*. Springer, 179 p.
- Labrousse C., 1894 : Les hautes régions de l'atmosphère. *Revue scientifique*, 4^e série, 1, 450-459.
- Mascart E., 1896 : Exploration scientifique en ballon. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 123, 918-919.
- Renard C., 1892 : Sur l'emploi des ballons non montés à l'exécution d'observations météorologiques à très grande hauteur. *Compte rendu de séances de l'Académie des sciences de Paris*, 115, 1049-1054.
- Rochas M., 1996 : L'atlas international des nuages. *La Météorologie*, 8^e série, 15, 35-42.
- Rochas M., 2002 : Il y a un siècle : le contexte scientifique de la surprenante découverte de la stratosphère. *La Météorologie*, 8^e série, 37, 57-69.