



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus

Mécanique

Christophe Béesau

Le fond plat, avenir prometteur de l'aérostation

Volume 352, Numéro spécial S1 (2024), p. 61-67

En ligne depuis le 15 novembre 2024

Numéro publié le 15 novembre 2024

Numéro spécial : Hommage à Denis Papin

Rédacteur en chef invité : Bruno Chanetz (Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), BP80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)

<https://doi.org/10.5802/crmeca.255>

 Cet article est publié sous la licence
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Article de synthèse / *Review article*

Hommage à Denis Papin / *A tribute to Denis Papin*

Le fond plat, avenir prometteur de l'aérostation

Flat bottom, a promising future for aerostation

Christophe Béésau ^a

^a DIRISOLAR, France

Courriel: christophe.beesau@in-works.com

Résumé. Les projets d'aérostats innovants se sont multipliés ces dernières années, à la faveur de l'augmentation du coût du kérosène mais aussi parce que le transport aérien « classique » est devenu l'un des accusés du réchauffement climatique. Le « plus léger que l'air » est en effet économique par nature, puisque n'utilisant de l'énergie que pour se déplacer, et non pour se maintenir en l'air. Mais l'instabilité à l'atterrissage reste un point faible historique des dirigeables. Cependant, un brevet modifiant le profil du fond de l'appareil apporte une solution aussi élégante qu'efficace à ce problème et change la donne en conférant à l'appareil des propriétés aérodynamiques hors normes.

Abstract. Innovative aerostat projects have proliferated in recent years, fueled by the rising cost of kerosene, but also because “conventional” air transport has become one of the culprits of global warming. The “lighter-than-air” is indeed economical by nature, since it only uses energy to move, not to stay aloft. But landing instability remains a historical weakness of airships. However, a patent modifying the profile of the aircraft's bottom provides a solution to this problem that is as elegant as it is effective, and changes the game by giving the aircraft outstanding aerodynamic properties.

Mots-clés. Dirisolar, Aérostation, Dirigeable, Brevet, Fond plat, Aérodynamique, Effet Venturi.

Keywords. Dirisolar, Aerostation, Airship, Patent, Flat bottom, Aerodynamics, Venturi effect.

Manuscrit reçu et accepté le 27 mai 2024.

1. Un écosystème en mutation

Depuis une vingtaine d'années, les projets d'aérostats innovants se sont multipliés et leur possible retour dans les airs a fait les gros titres de la presse. Cette effervescence autour d'une idée ancienne — rappelons que le premier vol d'un dirigeable, alors mû par un moteur à vapeur¹, date de 1852 — est principalement liée aux objectifs de réduction des émissions de CO₂ issues de la consommation de kérosène.

Car le transport aérien « classique » est devenu l'un des accusés du réchauffement climatique. D'un mal à un mot, il n'y a qu'un pas et les Suédois ont ainsi forgé le néologisme *flygskam*, « la

¹Équipé d'un moteur à vapeur de 3 chevaux, le dirigeable du Français Henri Giffard effectue son vol inaugural le 24 septembre 1852.

honte de voler », pour désigner la culpabilité que devrait éprouver chaque voyageur montant dans un avion.

Dans ce contexte, les propriétés des aérostats apparaissent salutaires, et ont entraîné l'écosystème de l'aéronautique dans un élan de mutation. La portance aérostatique offre en effet l'avantage de ne pas utiliser d'énergie pour se maintenir en l'air, mais seulement pour se déplacer². Il en résulte donc une grande efficacité énergétique du vol, déclenchant ainsi un regain d'intérêt pour les dirigeables, ces oubliés du début du XX^e siècle que la Seconde Guerre mondiale d'abord, puis les flottes commerciales d'avions de ligne des années 1950, avaient rapidement relégués au rang de « dinosaures de l'air ».

2. 1950–2000 : les années *fast is beautiful*

Dès lors, le marché de l'aviation commerciale n'a cessé de croître avec une incroyable régularité. Le nombre de passagers annuel est multiplié par 8 entre 1950 et 1970, franchit la barre des 500 millions en 1973 et atteint 1 milliard en 1986³

L'aérien progresse à une rapidité fulgurante, offrant toujours plus de confort et de vitesse. Le Concorde (qui ne cessera ses vols qu'en 2003) est le point d'orgue de ces années où le leitmotif *fast is beautiful* fait figure de modernité, et où le lancement du TGV, battant record après record, permet même au transport terrestre d'y faire écho.

Le dirigeable classique et ses images en noir et blanc illustrant les livres d'histoire apparaît alors définitivement démodé. C'est oublier que l'hydrogène a été remplacé par l'hélium, gaz porteur parfaitement sûr, et qu'en dépit de ses inconvénients d'encombrement et de relative lenteur, le dirigeable présente la capacité inégalée de rester en vol beaucoup plus longtemps qu'un avion, et qui plus est pour un coût beaucoup plus faible. Les militaires ne se priveront d'ailleurs pas d'exploiter ces caractéristiques, surtout aux États-Unis où la marine utilisera de tels engins d'abord pour détecter les sous-marins allemands guettant et torpillant les Liberty Ships au début de leur traversée vers l'Europe⁴, puis jusqu'au début des années 60 avec par exemple des missions de radar volant.

Mais, qu'il soit rigide ou souple (le fameux « Blimp », connu pour son usage avant tout publicitaire), le dirigeable à profil classique reste pénalisé par son instabilité à l'approche du sol. Plus encore que sa lenteur ou son encombrement, cette instabilité porte préjudice à l'appareil car elle complexifie l'atterrissage et rend l'engin particulièrement sensible aux turbulences au sol, même légères. Ainsi, un tel appareil ne peut se poser sans risque que si le vent est inférieur à 20–25 km/h, une limite faible qui restreint d'autant plus l'usage de l'appareil. Cette instabilité rend également le dirigeable classique incapable de se poser seul, une équipe au sol étant indispensable pour stabiliser l'engin et l'arrimer à un mât.

Dès lors, le concept même de dirigeable est-il irrémédiablement condamné, en dépit de ses avantages indéniables, au premier rang desquels une utilisation parcimonieuse de l'énergie ?

C'est la question qu'explore Dirisolar dès 2010, en faisant le pari d'utiliser les lois de l'aérodynamique *pour maîtriser* l'effet combiné du vent et de la proximité du sol sur la stabilité de l'engin. Et cela, en s'appuyant sur un phénomène aérodynamique bien connu mais jamais exploité de façon contrôlée sur un dirigeable, l'effet Venturi.

²Certains engins sont cependant à *flottabilité partielle*, et dans ce cas une partie de l'énergie embarquée doit aussi être utilisée pour compléter la portance aérostatique.

³Et 3 milliards en 2011. Source : portail de l'Organisation de l'aviation civile internationale.

⁴250 dirigeables Goodyear ont ainsi joué un rôle décisif pendant la Seconde Guerre mondiale.

3. L'effet Venturi au secours du dirigeable ?

L'effet Venturi, c'est ce phénomène aérodynamique qui permet aux voitures de Formule 1 de rester littéralement « collées » sur la piste en dépit des très hautes vitesses atteintes. C'est encore l'effet Venturi qui est utilisé tous les jours par les ouvriers du bâtiment pour projeter la peinture à l'aide de leurs pistolets pneumatiques. Et chacun de nous se trouve être un peu *le Monsieur Jourdain de l'effet Venturi*, lorsque, sans même que nous sachions comment, le bec de la pompe à essence arrête miraculeusement le remplissage de carburant avant tout débordement du réservoir.

Rappelons que du point de vue de la mécanique des fluides, l'effet Venturi correspond au phénomène par lequel, *dans le cas d'un écoulement horizontal, la réduction de la section d'écoulement entraîne l'augmentation de la vitesse du fluide et la diminution de sa pression.*

La démonstration est assez simple et s'appuie d'abord sur le principe de conservation du débit, *avant* et *après* la réduction de la section. Cette conservation du débit exprime que le rapport des sections est en rapport inverse des vitesses, ce qui s'écrit :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

où S_1 et V_1 sont respectivement la section et la vitesse d'écoulement *avant réduction de section*, et S_2 et V_2 les paramètres correspondants, *après la réduction de section.*

Or, d'après le théorème de Bernoulli, la quantité $(1/2)V^2 + (p/\rho) + gz$ se conserve le long d'une ligne de courant du fluide, p étant la pression, ρ la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur et z l'altitude du point considéré. Pour un écoulement horizontal, z est constant et l'expression de conservation de la *quantité de Bernoulli* s'écrit plus simplement :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2. \quad (2)$$

On en déduit l'expression de la différence de pression avant et après réduction de section, en fonction de la vitesse du fluide :

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 \left(\frac{V_1^2}{V_2^2} - 1 \right). \quad (3)$$

C'est-à-dire, en remplaçant le rapport des vitesses par le rapport inverse des sections :

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 \left(\frac{S_2^2}{S_1^2} - 1 \right). \quad (4)$$

Enfin, comme la réduction de la section implique que $S_2 < S_1$, il en découle que la différence de pression $p_2 - p_1$ est négative : on constate donc bien *une dépression* au niveau de la section réduite S_2 .

Comment tirer parti d'un tel phénomène sur un dirigeable en approche du sol ? Les appareils actuels ne sont-ils pas déjà soumis à un tel effet ?

4. Des problèmes de couple

Nous ne parlerons pas ici de relations humaines mais bien de physique et d'aérodynamique ! Et pour commencer, il nous faut revenir sur le profil des dirigeables classiques. Historiquement, les dirigeables présentent une *section transversale circulaire* afin d'optimiser leur traînée aérodynamique pour un volume donné de gaz porteur. Leur enveloppe, allongée de façon caractéristique dans le sens de la marche, permet de faciliter la progression en vol et leur confère cette silhouette typique que tout le monde connaît. Comme pour tout aéronef motorisé, la manœuvre d'approche du sol est effectuée en propulsant l'appareil contre le vent. En ajustant sa propre vitesse avec celle du vent, le dirigeable réduit sa vitesse horizontale par rapport au sol et commence alors sa descente.

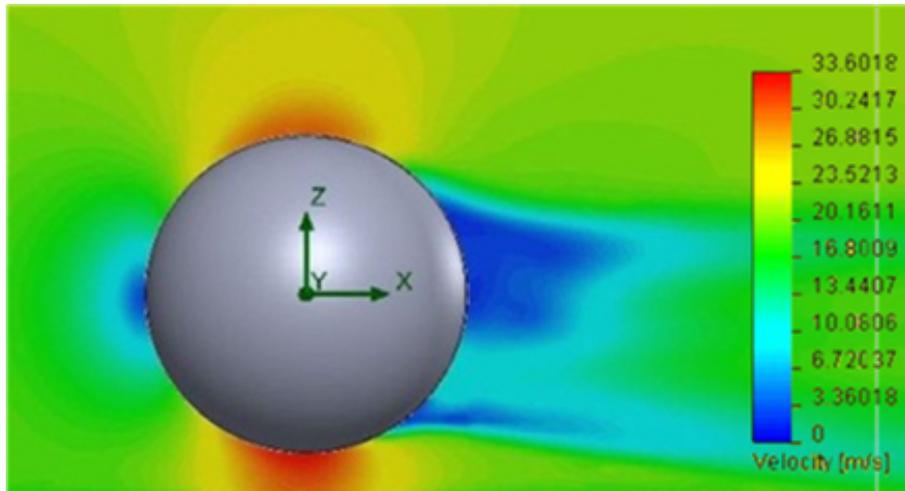


FIGURE 1. Section longitudinale circulaire d'un ballon sphérique. Le courant d'air arrive de la gauche, les couleurs indiquent les variations de vitesse de l'air.

- (1) Dans le cas du *dirigeable à profil classique* évoqué ci-dessus, une dépression entre le sol et l'enveloppe apparaît par effet Venturi et génère une force aérodynamique (appelée rabattance) dirigée vers le sol. Mais au fur et à mesure que l'appareil s'approche du sol apparaît en contrepartie un phénomène de compression de l'air sur l'avant de l'enveloppe, compression qui exerce alors une force opposée, dirigée vers le haut, et s'opposant à la rabattance.
- (2) Cette force vers le haut s'exerçant d'abord sur la partie frontale de l'enveloppe, elle crée *en permanence* un couple cabreur qui modifie l'incidence et donc l'équilibre de l'appareil. Ce changement d'incidence augmente la portance de l'enveloppe face au vent, et donc tend à éloigner le dirigeable du sol, tout en réduisant aussi l'effet Venturi.

C'est donc la combinaison de ces deux phénomènes qui rend *intrinsèquement instable* l'approche au sol d'un dirigeable à profil classique. Il en découle une inévitable complexité de la manœuvre d'atterrissage et la nécessité de disposer au sol d'une équipe capable d'attraper les élingues et d'arrimer l'appareil.

Dès 2010, Dirisolar a étudié très méthodiquement ces inconvénients issus de la forme classique du dirigeable, et ceci en considérant d'abord l'objet volant aérostatique le plus simple qui existe, le ballon sphérique (voir Figure 1). Le ballon est ainsi placé dans un courant d'air horizontal près du sol. Les logiciels de CFD disponibles analysent alors très finement l'écoulement de l'air autour de ce ballon, et notamment quand il est près du sol.

Ce sont alors les mêmes phénomènes que ceux décrits aux (1) et (2) précédents qui s'appliquent à cette sphère, c'est-à-dire un effet Venturi conjugué à une force dirigée vers le haut et s'exerçant sur sa partie frontale (c'est à dire sur la partie à gauche du graphique).

Considérons maintenant *un objet à section longitudinale hémisphérique ou quasi hémisphérique* (voir Figure 2), le fond de l'appareil étant constitué de la partie quasi plane de ce profil.

- (1) Comme dans le cas précédent, à l'approche du sol apparaît par effet Venturi une dépression générant une force de rabattance, tirant l'appareil vers le sol.
- (2) Mais en raison de la forme aplatie du fond, cette force croît beaucoup plus rapidement, et ceci jusqu'à atteindre *3 fois la force de rabattance du profil standard* pour la même altitude au sol.

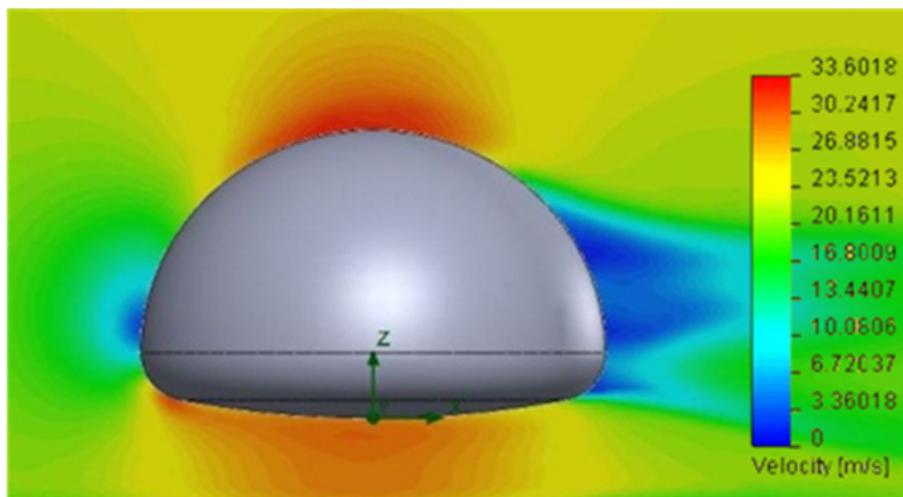


FIGURE 2. Section longitudinale quasi-hémisphérique. Le courant d'air arrive de la gauche, les couleurs indiquent les variations de vitesse de l'air.

- (3) Parallèlement, la forme particulière de l'avant réduit considérablement l'importance du couple cabreur, ce qui permet de contrôler l'incidence.

À l'approche au sol, on obtient donc la conjugaison d'un effet Venturi considérablement renforcé et d'un couple cabreur limité, la combinaison de ces deux effets permettant le contrôle de la manœuvre d'atterrissage.

Transposé sur la forme allongée du dirigeable, ce profil permet donc d'obtenir, à l'approche au sol, un effet du vent inverse de celui que l'on a sur un dirigeable à profil conventionnel : le vent fait descendre l'appareil doucement vers le sol, avec une incidence qui reste maîtrisée. Les effets du profil à fond plat ont été expérimentés dès 2011 sur un dirigeable de taille réduite, le DS 0.6. Cette « proof of concept » a permis de valider d'abord physiquement les bénéfices du fond plat, avant de les explorer et d'en améliorer encore les effets à l'aide de simulations multiphysiques.

Ce principe du profil « à fond plat » est breveté en Europe et aux États-Unis par Dirisolar, et exploité sur son tout premier appareil, le DS-1500.

5. Le DS-1500 : des caractéristiques hors normes

Des milliers de simulations multiphysiques ont permis de quantifier précisément les forces et le couple s'appliquant à un appareil à fond plat lors de l'approche au sol. De façon complémentaire, une simulation dynamique d'atterrissage incluant la prise en compte en temps réel des commandes de vol a également permis de démontrer la capacité du pilote à poser l'appareil entièrement seul, du jamais vu dans toute l'histoire des dirigeables.

Ces simulations ont aussi permis d'optimiser le profil de l'appareil pour tirer au mieux parti des propriétés du fond plat (voir Figure 3). Ainsi, des empennages spécifiques accentuent la manœuvrabilité de l'engin et améliorent encore la maîtrise en douceur de l'angle d'incidence et de l'altitude. Ainsi optimisé, l'appareil devient particulièrement simple à piloter : 4 commandes de vol seulement, alors qu'il en faut 10 pour un dirigeable conventionnel.

Le DS-1500 de Dirisolar est donc un appareil hors du commun. De par ses caractéristiques aérodynamiques, il est capable de repousser les limites d'utilisation des dirigeables classiques et de se poser, sans assistance au sol, avec des vents jusqu'à 50 km/h. Propulsé par des hélices

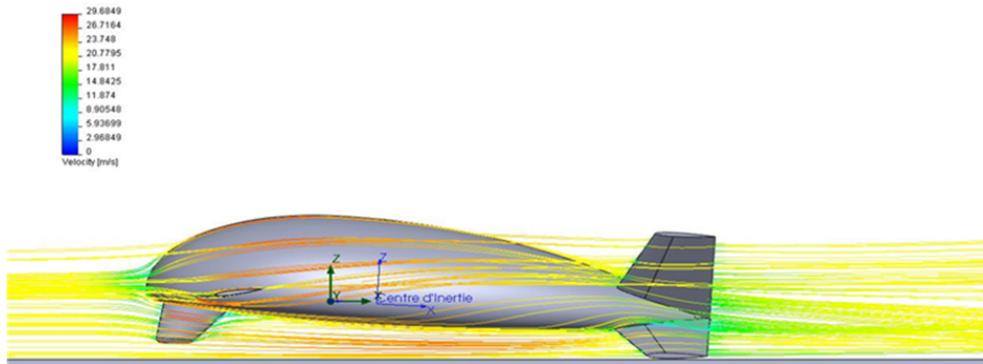


FIGURE 3. Calculs d'optimisation du profil de l'appareil, tirant parti du fond plat.

spécifiques à bas bruit entraînées par des moteurs électriques brushless, l'appareil est ultra-silencieux, inaudible à 100 m. Des panneaux photovoltaïques placés sur les empennages arrière permettent la recharge des batteries embarquées et assurent un vol à l'énergie solaire, sans consommation d'énergie fossile et sans aucune émission de CO₂ ni de polluant. Enfin, les passagers bénéficient d'un confort de vol exceptionnel, placés dans un cockpit frontal leur offrant une large visibilité panoramique à plus de 180°.

Le projet a été présenté à la DGAC et à l'EASA. Au stade actuel de sa conception (TRL 6), aucun point n'a mis en cause sa faisabilité et le processus de certification de type est prêt à être engagé auprès de l'EASA. Dirisolar a d'ailleurs rejoint le groupe de travail des projets de dirigeables qui a pour objectif d'établir une spécification type de certification des dirigeables, non encore établie à ce jour.

6. L'avenir est à la multiplicité des solutions volantes

Certaines Cassandra prévoient la fin pure et simple du transport aérien de tourisme, pour des raisons environnementales évidentes. D'autres annoncent que le coût de ce type de déplacement deviendra tellement exorbitant que l'on ne pourra s'offrir un tel voyage qu'une seule fois dans sa vie, ou bien prévoient que nous sommes à l'aube d'une désaffection massive des touristes pour l'aérien. Les ingénieurs aéronautiques, de leur côté, travaillent sans relâche au complexe développement de l'aviation commerciale à l'hydrogène, promise à l'horizon 2040.

L'avenir est plutôt à la multiplicité des solutions volantes, permettant une étroite adéquation entre l'inextinguible désir des humains de voler, l'exigence d'une rapide réduction des nuisances pour la planète et un coût de vol restant raisonnable, c'est-à-dire accessible à une famille. Car n'en déplaise aux Cassandra précitées, la demande pour l'expérience d'un aérien « propre » est encore et toujours confirmée par toutes les études de marché. Ainsi en 2020, 79 % des touristes interrogés se déclaraient désireux d'une balade aérienne familiale sur le principe d'un dirigeable à énergie solaire, et 62 % étaient prêts à déboursier au moins 70€ par passager⁵ pour y accéder.

Un appareil comme le DS-1500 a l'ambition de répondre à ce marché d'un tourisme aérien facile et économique à travers une offre de vols décarbonés permettant de découvrir (ou redécouvrir) les plus beaux sites touristiques de la planète. Sans nuisance sonore ni pollution, sans infrastructure défigurant les paysages, un DS-1500 transporte plus de 20 000 passagers par an pour un ticket à 70€ la demi-heure de vol (c'est-à-dire trois fois moins élevé qu'un vol de tourisme en hélicoptère ou en montgolfière). Et décollage et atterrissage s'effectuent depuis le même terrain,

⁵Études de marché ESSEC, 2013, 2016 et 2020.

contrairement à un vol en montgolfière, offrant ainsi le confort d'improviser un vol de tourisme à la dernière minute.

Ainsi, le DS-1500 propose-t-il à tous la magie du tourisme aérien... mais libéré de tout sentiment de *flygskam* !

Déclaration d'intérêts

Christophe Béesau a travaillé pour la Solar Impulse Foundation (association à but non lucratif) de 2003 à 2016, en tant que Chief mathematician. Il est aujourd'hui conseiller scientifique pour la start-up Dirisolar.