

Les dirigeables

Une alternative à l'aviation civile ?



Dr Christophe Lovis
Astrophysicien dipl Université de Genève



Etude réalisée pour Noé 21 - Genève - Octobre 2010 - www.noé21.org

Introduction

But de l'étude

Cette étude sur les dirigeables s'inscrit dans le cadre d'une période de service civil de courte durée auprès de l'ONG Noé21. Conformément aux objectifs de Noé21, il s'agit d'une étude prospective destinée à mieux comprendre le potentiel des dirigeables comme moyens de transport non-polluants pour les passagers et le fret, dans le contexte d'une réduction impérative et rapide des émissions de CO₂.

Les moyens de transport de passagers et fret traditionnels sont tous basés sur une utilisation massive des énergies fossiles, que ce soit sur terre, mer ou dans l'air: camions, bateaux et avions ont ainsi totalement dominé les transports au XXe siècle. Curieusement, l'avion ne s'est pas tout de suite imposé parmi les engins volants, puisque le début du XXe siècle a vu un développement remarquable des engins plus légers que l'air – les dirigeables – alors que les avions plus lourds que l'air n'ont pris leur véritable essor que plus tard. Aujourd'hui, les dirigeables ont largement disparu de la mémoire collective, et les multiples utilisations qu'on en faisait dans les années 1910-1940 se sont un peu perdues dans l'oubli. A une malheureuse exception près: l'image du *Hindenburg* en flammes et les 36 personnes qui ont péri dans l'accident de 1937 (sur 97 passagers) poursuivent encore aujourd'hui les dirigeables comme une malédiction. Pourtant, quel moyen de transport n'a pas, à ses débuts, causé de graves accidents? Certainement pas l'aviation en tout cas...

L'abandon des dirigeables à partir de 1937 doit se comprendre dans un contexte plus large lié à la situation politique de l'époque, avec l'Allemagne nazie sur le point de déclencher la Deuxième guerre mondiale et le développement rapide de l'aviation comme moyen militaire. Par la suite, tant que les questions environnementales ne jouaient aucun rôle, il n'y avait aucune raison de remettre en question l'utilisation massive de moyens de transport efficaces et rapides comme les avions.

La situation a aujourd'hui changé. Il est clair que le secteur des transports en général est l'un des plus gros contributeurs d'émissions de CO₂ et que la nécessité d'éviter un changement climatique catastrophique nous impose de réduire drastiquement ces émissions dans un avenir très proche. Malgré la prise de conscience du problème qui s'améliore à tous les niveaux, envisager des moyens de transport alternatifs pour le fret et les passagers reste une tâche titanesque et presque farfelue, tant notre société actuelle s'est construite sur le moteur à explosion et le réacteur.

Le but de cette étude est donc de déterminer dans quelle mesure les dirigeables pourraient renaître de leurs cendres et proposer une alternative viable à une époque où le développement durable devient une préoccupation majeure. Nous tenterons d'étudier à la fois les aspects écologiques et économiques, le but étant d'envisager des solutions intéressantes pour l'industrie immédiatement, et non pas seulement dans un futur lointain.

Physique de base des dirigeables

Nous présentons tout d'abord quelques notions physiques de base concernant les dirigeables, afin de mettre en évidence les facteurs qui déterminent leurs performances et limitations. Le concept de dirigeable est basé sur l'utilisation d'une enveloppe contenant un gaz plus léger que l'air, créant de ce fait une force d'Archimède (dirigée vers le haut) qui compense le poids du dirigeable et lui permet de flotter dans l'air. La force d'Archimède provient de la différence de pression entre le haut et le bas d'un volume immergé dans un fluide et est donnée par:

$$F_A = \rho_{air} \cdot g \cdot V,$$

où ρ_{air} est la densité de l'air, g est l'accélération de la gravité (9.8 m/s^2 à la surface de la Terre), et V est le volume immergé. A l'équilibre, la force d'Archimède est égale au poids total de l'objet:

$$F_A = \rho_{air} \cdot g \cdot V = m_{tot} \cdot g = (m_{gaz} + m_{obj}) \cdot g = (\rho_{gaz} V + m_{obj}) \cdot g,$$

où m_{gaz} est la masse du gaz porteur, m_{obj} la masse de l'objet (dirigeable) sans le gaz et ρ_{gaz} la densité du gaz porteur. En divisant par g et en réarrangeant l'équation, on obtient la masse du dirigeable en fonction du volume de gaz et des densités:

$$m_{obj} = (\rho_{air} - \rho_{gaz}) \cdot V$$

Cette équation permet tout de suite de se faire une idée de la charge utile qu'un dirigeable peut transporter. Pour maximiser cette charge, il faut maximiser la différence (absolue) des densités interne (gaz) et externe (air), et maximiser le volume de gaz.

Considérons d'abord les densités. La densité de l'air au niveau du sol est d'environ 1.25 kg/m^3 . Dans le cas extrême, on peut imaginer avoir une densité interne nulle (le vide). En pratique cela s'avère toutefois impossible car il faudrait une structure rigide et très robuste (en métal) pour supporter la différence de pression ($10 \text{ tonnes par m}^2$!) sans imploder. Les deux gaz ayant la plus faible densité sont l'hydrogène (H_2 , 0.09 kg/m^3) et l'hélium (He , 0.18 kg/m^3). En utilisant l'un ou l'autre gaz, on voit qu'on peut obtenir une différence de densité dans l'équation ci-dessus de 1.16 ou 1.07 kg/m^3 , soit une différence de 8% entre l'hydrogène et l'hélium.

La charge pouvant être transportée dépend donc surtout du volume de gaz. Numériquement, on constate que la masse du dirigeable en kg est environ égale au volume de gaz en m^3 . Par exemple, soulever une masse de 10t ($10'000 \text{ kg}$) requiert un volume de gaz d'environ $10'000 \text{ m}^3$. Pour 100t , ce sera $100'000 \text{ m}^3$, c'est-à-dire par exemple un cylindre de 30 m de diamètre et 150 m de longueur. On notera encore que le maintien de l'équilibre entre force d'Archimède et poids n'est pas trivial si l'on fait varier l'altitude du dirigeable, et ce à cause de la densité et de la pression de l'air qui varient. La différence absolue de densité diminue avec l'altitude, ce qui nécessite un volume de gaz plus grand en altitude qu'au niveau du sol pour transporter une charge donnée. Il faut donc intégrer au dirigeable un système permettant au gaz de s'étendre au fur et à mesure que le dirigeable prend de l'altitude.

Performances et limitations

Gaz porteurs

Il y a essentiellement deux possibilités concernant le gaz utilisé si l'on veut obtenir une portance intéressante: l'hydrogène et l'hélium. Le gaz presque exclusivement envisagé aujourd'hui est l'hélium en raison de son inertie chimique totale et donc de son caractère non-inflammable. On sent ici clairement les répercussions de la catastrophe du *Hindenburg*, qui utilisait de l'hydrogène et qui s'était enflammé. On notera toutefois que les causes réelles de la catastrophe ne sont pas clairement établies et que l'hydrogène n'est probablement pas seul en cause.

L'hélium

La non-réactivité de l'hélium est une qualité de taille, mais ce gaz a malheureusement aussi plusieurs désavantages. Tout d'abord, on a vu que sa portance est de 8% inférieure à celle de l'hydrogène. Surtout, l'hélium est difficile à obtenir. Il n'est présent dans l'atmosphère qu'en infimes quantités. L'essentiel de la production mondiale d'hélium provient en fait des gisements de gaz naturel, où on le trouve mélangé au méthane. La production actuelle est d'environ 32'000 t par année, utilisés surtout pour la cryogénie ainsi que la pressurisation et la purge de systèmes. Pour fixer les idées, cette quantité permettrait de remplir environ 1700 dirigeables de 100'000 m³ chacun. La production et la demande sont en constante augmentation (2-4% par année). Les réserves mondiales estimées se montent à environ 7 millions de tonnes. Au rythme actuel, les réserves seraient donc épuisées d'ici 200 ans, mais ce chiffre est ramené à seulement 70 ans si l'on prend en compte une croissance de la demande de 3% par an. On voit donc que l'hélium est une ressource limitée et non-renouvelable déjà aujourd'hui, alors qu'on ne l'utilise pas (encore) pour remplir des dirigeables à grande échelle. Pour que les dirigeables jouent un rôle significatif dans le domaine des transports, on peut imaginer qu'il faudrait en construire à terme au moins 10'000 ayant un volume d'hélium de 100'000 m³ chacun. Cela représenterait 180'000 tonnes d'hélium, soit 2.6% des réserves totales ou 6 années de production. On reste dans le domaine du possible, mais la marge de manoeuvre est étroite et la concurrence avec les autres applications de l'hélium sera forte.

Tout cela nous amène à quelques considérations sur le prix de l'hélium. Celui-ci était en 2007 d'environ \$3.50 par m³, en forte hausse par rapport aux années précédentes en raison de coûts de production et d'entretien des installations à la hausse. A ce prix-là, le remplissage d'un dirigeable de 100'000 m³ coûte pas moins de 350'000 dollars, un chiffre qui risque d'augmenter fortement à l'avenir avec la demande croissante et la raréfaction de l'hélium.

L'hydrogène

L'hydrogène a des propriétés diamétralement opposées à celles de l'hélium: il est inflammable et donc potentiellement dangereux à utiliser dans un dirigeable, mais en contrepartie il est facilement disponible, et ce en quantités quasi infinies et à bas prix. En effet, l'hydrogène s'obtient facilement avec différentes méthodes, par exemple par électrolyse de l'eau. La production mondiale d'hydrogène est actuellement en pleine

croissance en raison du remplacement possible des énergies fossiles par cette nouvelle source d'énergie dans plusieurs domaines. Dans le cas des dirigeables, il ne s'agit évidemment pas d'utiliser l'hydrogène comme combustible mais seulement comme gaz porteur, et donc seul un remplissage initial est nécessaire (plus la compensation périodique d'éventuelles fuites). Le prix actuel de l'hydrogène gazeux est d'environ \$1.50 par kg, ce qui représente \$0.13 par m³. Remplir un dirigeable de 100'000 m³ coûterait donc environ 13'000 dollars, ce qui est d'ores et déjà 26 fois moins cher que l'hélium. Comme il est probable qu'à l'avenir le prix de l'hélium augmente et celui de l'hydrogène diminue (développement de capacités de production industrielles), cette différence va encore s'accroître fortement.

En résumé, on peut penser que le développement à grande échelle des dirigeables sera difficile si ceux-ci se basent uniquement sur l'hélium. Il faut impérativement chercher des solutions pour rendre l'utilisation de l'hydrogène acceptable du point de vue de la sécurité. Cet aspect a probablement été laissé de côté depuis les années 1930 et donc tout reste à faire ou presque. Néanmoins, on peut raisonnablement espérer que les progrès techniques réalisés en 70 ans permettent d'envisager l'hydrogène comme une alternative viable (utilisation de matériaux résistants au feu, poches de gaz concentriques avec gaz inerte comme l'azote à l'extérieur, etc). Si les dirigeables prennent vraiment leur envol, l'hélium pourra être utilisé au début pour développer des prototypes et produire une première génération d'engins. Une fois la démonstration de leur utilité faite, l'industrie pourrait alors se tourner vers l'hydrogène.

Charge utile

Comme on l'a vu plus haut, la charge utile que peut transporter un dirigeable dépend surtout de deux choses: le type de gaz porteur et son volume. Le choix de gaz porteurs est très limité: hydrogène ou hélium. L'hydrogène fournit une portance 8% plus grande que l'hélium en raison de sa densité inférieure. Mis à part cette petite différence, c'est essentiellement le volume de gaz qui va déterminer la charge utile transportable. Pour soulever 100 t, un volume de 100'000 m³ est nécessaire, soit par exemple un cylindre de 30 m de diamètre et 150 m de longueur.

On voit donc qu'une utilisation des dirigeables pour transporter du fret ou des passagers nécessite de relativement grands engins, à l'image du *Hindenburg* dans les années 1930. Ces dimensions ne semblent pas poser en elles-mêmes un problème au niveau de la construction puisque de tels engins ont pu être fabriqués il y a 80 ans déjà. Mais peu de développements ont eu lieu depuis. De nouvelles études doivent être faites au niveau de l'aérodynamisme, de la manoeuvrabilité et du comportement en cas de mauvais temps avant que des dirigeables de plus de 200 m de longueur puissent voler. Ce travail de développement ne doit pas être sous-estimé pour qu'un projet puisse devenir vraiment crédible.

Altitude et vitesse

Contrairement aux avions, les dirigeables volent en général à basse altitude et à faible vitesse. Les avions ont besoin de la vitesse pour obtenir la portance aérodynamique

nécessaire, et ils recherchent la haute altitude car la densité de l'air y est plus faible et la résistance au mouvement également. Les dirigeables, au contraire, ont des difficultés à changer d'altitude en raison de la portance qui diminue quand celle-ci augmente. En bref, les paramètres physiques importants pour le dirigeable varient avec l'altitude (pression, densité, volume de gaz) alors que la charge à transporter reste constante, ce qui n'est pas facile à gérer. Il est donc probable que les dirigeables du futur restent à basse altitude.

Quant à la vitesse, celle-ci semble pouvoir atteindre 150-200 km/h sans que cela pose trop de problèmes (à confirmer pour de très gros dirigeables). Cependant, dans un contexte d'économies d'énergie, on ne pourra et ne devra sans doute pas dépasser ces valeurs car la résistance de l'air augmente rapidement avec la vitesse, et la consommation de carburant également.

Manoeuvrabilité, chargement et déchargement

Peu de choses se sont passées depuis les années 30 et un effort significatif doit sans doute être fourni dans ces domaines pour que les projets de dirigeables du futur deviennent crédibles. Cela nécessite des investissements non-négligeables en recherche et développement. Tout le problème est de développer un système qui permette à un gros dirigeable de charger et décharger sa marchandise ou ses passagers de manière simple, rapide et fiable. L'un des gros désavantages des premiers dirigeables était qu'ils nécessitaient beaucoup de personnel au sol pour les manoeuvres de départ et d'arrivée. En effet, contrôler précisément la position d'un énorme dirigeable est loin d'être simple, surtout quand les conditions météorologiques ne sont pas idéales. De plus, on ne peut pas simplement charger et décharger sans autre un dirigeable: le volume de gaz est adapté à la charge transportée et ne peut pas être changé si facilement. Une solution possible est de remplacer la charge utile par de l'eau ou du sable afin de maintenir en permanence l'équilibre entre charge et portance. En résumé, les infrastructures au sol permettant de stabiliser ces engins et de les charger/décharger doivent être imaginées, conçues, et développées pratiquement à partir de zéro.

Cependant, il est permis de penser que les dirigeables ne sont pas si mal placés dans ces domaines, en particulier lorsqu'on compare avec l'aviation. Quelles que soient les infrastructures au sol nécessaires, elles seront probablement beaucoup moins encombrantes que les aéroports, et généreront beaucoup moins de nuisances, en particulier sonores. Parmi les grands atouts des dirigeables on trouve en effet leur silence en vol ainsi que leur capacité à décoller et atterrir verticalement. Pas besoin donc de longue piste d'atterrissage. On peut en fait imaginer reconverter une partie des surfaces d'aéroports en installations pour dirigeables, ce qui ne demanderait pas d'espace supplémentaire. Mais on peut aussi aller plus loin: l'empreinte au sol des infrastructures restant probablement faible, on pourrait envisager d'utiliser des surfaces urbaines telles que les toits de grands bâtiments comme ports pour dirigeables. Ceux-ci seraient alors intégrés à l'environnement urbain et permettraient d'amener passagers et fret directement au centre des agglomérations. Et ce, en ligne droite, sans bruit et sans embouteillages.

Conditions météorologiques

C'est peut-être le domaine où les dirigeables auront le plus de mal à convaincre les professionnels de l'aéronautique: leur manoeuvrabilité en cas de mauvaises conditions météorologiques. Le paramètre le plus critique semble être la vitesse du vent. Les quelques dirigeables actuellement en exploitation (pour touristes) semblent être très limités à ce niveau-là. Le Zeppelin NT à Friedrichshafen, par exemple, ne prend pas de passagers si le vent dépasse 30 km/h. Il est difficile de savoir à quel point cela représentera un obstacle à l'avenir. A nouveau, le manque de développement de ces 80 dernières années se fait sentir. De nouveaux concepts sont actuellement en train de voir le jour, comme des dirigeables hybrides où l'hélium n'assure qu'une partie de la portance et l'aérodynamisme assure le reste (le tout à faible vitesse). Ceux-ci pourraient être moins sensibles aux aléas de la météo. Le potentiel d'amélioration dans ce domaine semble en tout cas assez grand.

Applications possibles des dirigeables

Comparaison avec les autres modes de transport

Avant d'examiner plus en détails les domaines d'application possibles des dirigeables, il est utile de faire une comparaison générale des avantages et désavantages des différents moyens de transport, en particulier la route, le rail, le bateau et l'avion. Les deux paramètres probablement les plus importants en termes économiques sont le coût de transport par tonne et par kilomètre, ainsi que la vitesse du transport.

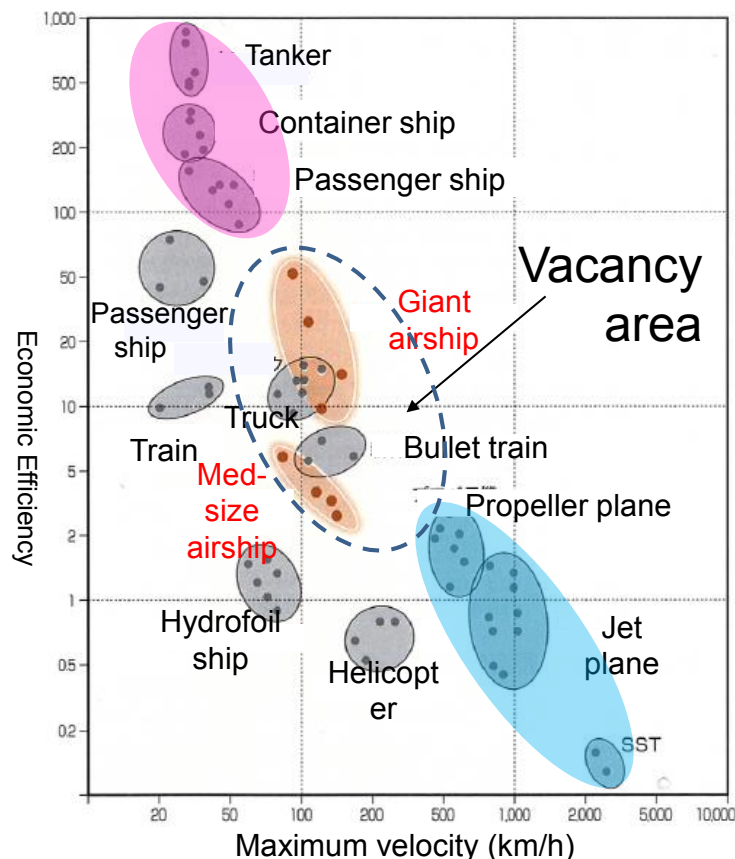


Schéma illustrant le coût et la vitesse des différents moyens de transport (source: Hiroyuki Watanabe, Nippon Airship Corporation)

Si l'on place les moyens de transport dans un diagramme comprenant ces deux paramètres, on constate que ceux-ci se répartissent plus ou moins suivant une diagonale, qui montre que coût et rapidité sont anti-corrélés. D'un extrême à l'autre, on trouve tout d'abord le bateau, qui offre les coûts de transport les plus bas grâce à l'énorme capacité de fret des navires marchands et à leur faible consommation d'énergie. En contrepartie, il s'agit du moyen de transport le plus lent, avec des vitesses ne dépassant pas les 30-50 km/h. A l'autre bout de l'échelle se trouve l'avion qui cumule la plus grande vitesse (900 km/h) et le coût de transport le plus élevé à cause de sa grande consommation de carburant et de sa charge utile relativement faible. Entre les deux se situent la route et le rail, ainsi que les dirigeables.

L'absence de chiffres réels concernant les dirigeables rend l'exercice de comparaison difficile. On voit cependant que ceux-ci occupent une niche intermédiaire en termes de coûts et de rapidité, et que les premiers débouchés économiques pour les dirigeables doivent être recherchés dans des domaines correspondant à ces capacités.

Il faut encore rajouter au moins un aspect capital dans la comparaison entre modes de transport: les infrastructures nécessaires ainsi que, bien entendu, les conditions géographiques du transport (sur terre ou mer, en ligne droite ou pas, etc). La mise en commun de ces différents critères permet d'imaginer un certain nombre d'applications intéressantes pour les dirigeables, brièvement décrites ci-dessous.

A noter que pour l'instant nous considérons uniquement les aspects économiques, à l'exclusion de l'impact environnemental des différents moyens de transport. Cependant, on peut d'ores et déjà mentionner que, dans un contexte de réduction massive des émissions de CO₂, les dirigeables offrent des perspectives extrêmement intéressantes. Cet aspect à lui tout seul pourrait rendre les dirigeables incontournables dans un avenir proche si les coûts des énergies fossiles continuent d'augmenter rapidement.

Transport de passagers

Longue distance

L'utilisation de dirigeables pour remplacer les avions de ligne dans le transport de passagers longue distance n'est pas a priori considérée comme viable étant donné la lenteur des dirigeables comparé aux avions (ceux-ci sont environ 6 fois plus rapides). Pour les voyages d'affaires et professionnels en général, la vitesse est primordiale et les avions resteront probablement incontournables.

On pourrait cependant imaginer que les dirigeables aient un rôle à jouer dans les voyages à but touristique. A la condition impérative que les dirigeables puissent offrir un niveau de confort vraiment supérieur aux avions, il est possible que les voyageurs acceptent un voyage plus long jusqu'à leur destination de vacances étant donné le spectacle visuel offert par un voyage en dirigeable. Si l'on prend l'exemple des voyages en Europe, un vol d'une journée et une nuit en dirigeable (18h) permettrait de parcourir environ 2700 km, c'est-à-dire d'atteindre la plupart des destinations en Europe, en Afrique du Nord et au Proche-Orient. Moyennant un niveau de confort adéquat (cabine privée), les dirigeables permettraient de sillonner l'Europe ou d'aller plonger en Mer Rouge de manière agréable, économique et écologique.

On peut pousser le raisonnement plus loin et imaginer de véritables croisières aériennes sur le modèle de ce qui existe avec les paquebots. Nul doute qu'il y ait un grand potentiel économique pour ce type de vacances, qui offrirait des paysages inoubliables, un grand confort de vol, et de multiples escales le long du chemin.

Local/régional

Il existe peu de projets d'utilisation des dirigeables à un niveau plus local. Il vaut pourtant la peine de se demander s'ils pourraient jouer un rôle comme moyens de

transport public, par exemple dans des zones urbaines étendues et mal équipées en moyens de transport traditionnels comme le train ou le métro. S'il est possible de créer facilement des ports pour dirigeables en milieu urbain, il serait possible de tirer profit de leur flexibilité et de leurs déplacements en ligne droite, au-dessus des rues engorgées par le trafic routier. L'utilisation de dirigeables pour transporter les pendulaires entre périphérie et centre-ville pourrait s'avérer intéressante et bon marché dans des villes qui n'ont pas de transports publics suffisants, évitant ainsi de lourds investissements dans les infrastructures au sol.

Les dirigeables pourraient également jouer un rôle important dans toute région difficile d'accès pour des raisons géographiques ou pour cause de manque d'infrastructures routières. La vitesse des dirigeables les rend compétitifs avec le rail et la route, avec en plus la faculté de se déplacer en ligne droite.

Transport de fret

Le fret est sans aucun doute le domaine d'application le plus souvent cité pour les dirigeables. En particulier, le transport de charges très lourdes et indivisibles d'un point A à un point B pourrait être la première "niche économique" exploitée par des dirigeables. Plusieurs projets de ce genre ont vu le jour ces dernières années, mais malheureusement aucun ne s'est pour l'instant concrétisé (voir chapitre suivant).

Si l'on regarde de plus près les différents avantages et inconvénients de chaque mode de transport, on constate que les dirigeables se distinguent par d'autres points forts, dont voici quelques exemples:

- Combinaison coût-vitesse unique en ce qui concerne le transport sur mer
- Rapport vitesse/coût comparable aux avions sur les distances intermédiaires
- Capacités de transport de fret uniques dans les régions isolées ou difficiles d'accès

Sur les longues distances, les dirigeables ne sont pas compétitifs si le facteur temps n'est pas important car le transport maritime est imbattable dans ce domaine. Si le facteur temps est critique, l'avion est aussi imbattable sur les longues distances. Par contre, il existe des besoins intermédiaires où la vitesse est importante mais pas critique, pour lesquels les dirigeables peuvent offrir une solution viable. On peut citer par exemple le transport de denrées périssables pouvant résister quelques jours (fruits et légumes). Les dirigeables seraient en mesure de les acheminer sur des distances inaccessibles au transport par camion, et ce à un coût bien inférieur au transport par avion.

Sur des distances intermédiaires, les dirigeables pourraient s'avérer aussi rapides que les avions si l'on prend en compte les aspects logistiques. En effet, les avions sont obligés de passer par les aéroports, suivant des horaires relativement contraignants. Une chaîne logistique (p. ex. transport par camions) est ensuite nécessaire pour amener la marchandise à sa destination finale. Le temps nécessaire pour acheminer la marchandise depuis et vers les aéroports est loin d'être négligeable et devient parfois le facteur dominant dans les transports par voie aérienne sur des distances intermédiaires. L'avantage potentiel des dirigeables est leur grande souplesse en ce qui concerne les points de chargement et de déchargement, qui ne nécessitent pas de grandes

infrastructures au sol et permettent une collecte et une distribution plus directes de la marchandise. Même lorsque le facteur temps est critique, les dirigeables pourraient donc concurrencer les avions sur des distances de 2000-4000 km.

Quant au transport de fret par voie terrestre sur de courtes distances, il est la chasse gardée des camions et du rail. Dans les régions bien développées économiquement disposant de bonnes infrastructures routières, il sera probablement difficile pour les dirigeables de concurrencer les camions. On pourrait tout de même imaginer quelques niches, comme l'acheminement rapide de marchandises dans les centres urbains, permettant de désengorger ceux-ci du trafic des camions. Les perspectives sont plus prometteuses dans les régions reculées ou mal équipées en infrastructures de transport, que ce soit dans les pays riches ou en voie de développement. Plusieurs projets de dirigeables sont par exemple en cours de développement dans le grand nord canadien pour désenclaver les communautés qui y vivent. Dans un tout autre contexte, on peut facilement imaginer à quel point les dirigeables auraient été utiles pour apporter de l'aide aux populations frappées par le tsunami de 2004 en Indonésie ou le tremblement de terre à Haïti en 2010. Dans les deux cas, les gouvernements et les organisations humanitaires ont été confrontés à des problèmes logistiques majeurs. Les capacités des dirigeables en matière de charge utile, vitesse de transport et flexibilité pour charger et décharger auraient sans nul doute apporté une aide précieuse.

Projets et réalisations pratiques: état des lieux

Zeppelins du début du XXe siècle

Des centaines de zeppelins ont été construits entre 1900 et 1937 en Allemagne, sous l'impulsion du comte Ferdinand von Zeppelin. Utilisés à des fins militaires durant la Première guerre mondiale, ils deviennent à usage civil par la suite. L'âge d'or des zeppelins se situe entre 1925 et 1937, lorsque plusieurs modèles construits par l'entreprise *Luftschiffbau Zeppelin* de Friedrichshafen sillonnent le monde pour des vols de démonstration et des vols de ligne entre l'Europe, les Etats-Unis et l'Amérique du Sud. Les deux plus connus sont sans doute le LZ 127 "*Graf Zeppelin*" et le LZ 129 "*Hindenburg*". Le *Graf Zeppelin* réalise le tour du monde en août 1929, puis assure un service transatlantique régulier entre 1930 et 1936. Quant au *Hindenburg*, il est le plus grand engin volant jamais construit, avec une longueur de 245 m et un volume de gaz de 200'000 m³. Il effectue 17 voyages aller-retour à travers l'Atlantique durant la saison d'été 1936, transportant jusqu'à 72 passagers par voyage. En juillet, il réalise deux traversées en l'espace de moins de 6 jours, un record pour l'époque. L'aventure se termine malheureusement tragiquement le 6 mai 1937 avec l'incendie du dirigeable en phase d'atterrissage à Lakehurst aux Etats-Unis. 36 personnes meurent dans l'accident, alors que 62 en réchappent. L'hydrogène est mis en cause mais un certain flou règne encore aujourd'hui sur les causes exactes du drame.



L'USS Los Angeles (ex LZ-126) survolant Manhattan en 1930.

Le régime nazi n'ayant aucun intérêt pour les zeppelins, ceux-ci disparaissent alors rapidement. La Deuxième guerre mondiale les fera tomber dans l'oubli, alors que l'aviation est en plein essor.

Zeppelin NT

Dans les années 1990, l'idée de construire à nouveau des zeppelins refait surface à Friedrichshafen. La société *Zeppelin Luftschifftechnik* reprend le flambeau et crée le Zeppelin NT, un dirigeable de 75 m de longueur (www.zeppelinflug.de). D'un volume de 8425 m³, celui-ci peut emporter 14 personnes dont 2 pilotes sur une distance d'environ 900 km. A but essentiellement touristique, quelques exemplaires ont été construits depuis 1997. Ce modèle se prête aussi particulièrement bien à des missions spéciales telles que cartographie, gestion du territoire, surveillance, recherche environnementale, études thermographiques, etc.



Le Zeppelin NT.

CargoLifter

CargoLifter a sans doute été le projet industriel récent le plus ambitieux et le mieux financé (www.cargolifter.de). Il s'agit d'un projet de dirigeable "cargo" capable de

transporter 160 t de fret, en particulier de grosses charges indivisibles comme des turbines ou des pièces d'avion. Ses dimensions sont imposantes: 260 m de longueur et un volume d'environ 550'000 m³ d'hélium. La société *CargoLifter AG*, entrée en bourse en 2000, a réussi à lever plus de 380 millions d'euros pour son projet. Elle commence par construire un énorme hangar proche de Berlin pour abriter le futur dirigeable. Les études sont lancées et le projet franchit le cap de la *preliminary design review* en février 2002. Malheureusement, l'aventure se termine en juin de la même année par une retentissante faillite, qui plombe probablement encore aujourd'hui les investissements dans le domaine des dirigeables. Les causes de la faillite sont difficiles à établir, mais les différents sites web discutant du sujet laissent penser que la direction a péché par excès d'optimisme en sous-estimant de beaucoup le temps nécessaire pour développer un tel projet et en brûlant les étapes. Il serait intéressant d'interroger des ingénieurs du projet quant aux difficultés rencontrées. A noter qu'une nouvelle société a repris le flambeau en 2005, avec le but plus modeste de promouvoir la technologie "plus léger que l'air" pour le transport de fret.



Vue d'artiste du projet CargoLifter.

SkyCat

SkyCat est un projet anglais comprenant plusieurs modèles de dirigeables dits hybrides. Ceux-ci se distinguent des dirigeables classiques par le fait que leur portance provient en partie seulement du gaz porteur, le reste provenant de l'aérodynamisme de l'engin.

Le projet SkyCat existe depuis les années 1990 et a été porté par différentes sociétés ayant connu des fortunes diverses. Au début des années 2000, le projet était mené par *Airship Technologies Group* qui proposait des modèles pouvant satisfaire toutes sortes de besoins: surveillance, tourisme, publicité, aide humanitaire, logistique, cargo, etc. Au moins trois versions étaient proposées, avec des charges utiles allant de 20 à 200 t. Malheureusement, aucun prototype grandeur nature n'a été construit jusqu'à présent. Aujourd'hui, le savoir-faire lié à SkyCat a été repris par la société *Hybrid Air Vehicles* (HAV), toujours basée en Angleterre (www.hybridairvehicles.net). C'est peut-être l'entreprise qui a actuellement le plus d'expérience au monde dans la construction d'engins plus légers que l'air (voir aussi ci-dessous).

Applications dans les domaines sécuritaire et militaire

L'armée américaine s'intéresse aux dirigeables depuis très longtemps, et en a utilisé à différentes époques pour des missions d'observation et de surveillance.

Mais le dernier événement en date est certainement le plus retentissant: en juin 2010, l'armée américaine a octroyé à *Northrop Grumman* et *Hybrid Air Vehicles* (HAV) un contrat de 517 millions de dollars pour développer un nouvel appareil de surveillance militaire, le Long-Endurance Multi-intelligence Vehicle (LEMV). Celui-ci sera un dirigeable hybride sans pilote capable de rester en vol 3-4 semaines et d'assurer une surveillance continue d'une vaste zone. L'armée prévoit de le déployer dès 2012 en Afghanistan.

Le LEMV sera la première vraie réalisation du concept de dirigeable hybride. Sa portance sera assurée à 60% par l'hélium et à 40% par l'aérodynamisme de l'engin. Des moteurs orientables l'aideront à décoller et atterrir presque verticalement. Moyennant des modifications mineures, le LEMV pourra contenir une cabine de pilotage et transporter 20 t de fret, ce qui en fera un prototype très intéressant pour tous ceux qui s'intéressent aux dirigeables. Cela donnera-t-il à ces engins le coup de pouce décisif pour déclencher un développement industriel? Il n'est pas interdit de le penser.

Autres

Internet fourmille de sites concernant les dirigeables et de projets sympathiques visant à les développer pour toutes sortes d'applications. Parmi ceux-ci on peut citer le projet Sol'R (www.projetsolr.com), porté par des étudiants de différentes écoles réparties à travers la France. Le but est de construire un dirigeable à une place fonctionnant uniquement à l'énergie solaire. Le dirigeable est tapissé de cellules solaires qui fournisse l'énergie à deux petits moteurs électriques permettant de piloter l'engin, qui émet ainsi 0 g de CO₂ pour se déplacer. Une sorte d'équivalent "dirigeable" de Solar Impulse, l'avion solaire de Bertrand Piccard? En tout cas le projet semble bien engagé et des essais sont en cours afin de préparer une traversée de la Manche ces prochains mois. Peut-être un projet que Noé 21 pourrait soutenir d'une manière ou d'une autre?



Le prototype solaire “Nephelios” du projet français Sol’R.

Bilan énergétique et environnemental

Emissions de CO₂

Les émissions de CO₂ d'un dirigeable sont en général bien plus faibles que celles d'un avion ou d'un hélicoptère. La raison en est que ces derniers ont besoin d'énergie pour se maintenir en l'air et se propulser, alors qu'un dirigeable n'a besoin d'énergie que pour se propulser, et ce à des vitesses relativement faibles.

Il est difficile de faire des comparaisons précises puisqu'il n'existe pas encore de dirigeable commercial ayant des capacités semblables à un avion, un bateau ou un camion. On peut cependant estimer qu'un dirigeable peut facilement consommer 70-80% de carburant en moins par tonne et par kilomètre qu'un avion. La société *Hybrid Air Vehicles* parle d'une consommation de moins d'un tiers de celle d'un avion pour son modèle hybride SkyCat. Quels que soient les chiffres exacts, il apparaît que les dirigeables sont les seuls engins volants capables de réduire massivement les émissions de CO₂ du trafic aérien. Tous les efforts de réduction concernant les avions paraissent assez symboliques en comparaison, et nécessiteront des durées d'adaptation très longues en raison du renouvellement très lent de la flotte. La seule autre alternative pour contenir les émissions de gaz à effets de serre est de stopper la progression, puis de réduire le volume du trafic aérien, chose qui paraît difficile à envisager tant les mentalités doivent évoluer.

A ce stade, il est presque impossible de comparer les dirigeables aux autres moyens de transport tels que camions, rail et bateaux en ce qui concerne les émissions de CO₂, tant les incertitudes sont grandes. On peut tout de même supposer que tous les efforts fournis pour diminuer les émissions des transports en général seront aussi utiles pour les dirigeables puisque ceux-ci utiliseront probablement des moteurs et des carburants semblables aux transports terrestres et maritimes. Un point clé à retenir est que les dirigeables sont en quelque sorte les "bateaux du ciel". Ils fonctionnent en effet sur le même principe de base que les bateaux (force d'Archimède), qui sont, rappelons-le, de loin les plus efficaces en termes d'énergie consommée par tonne et par kilomètre. Les dirigeables sont aussi potentiellement très peu gourmands en énergie, particulièrement à faible vitesse. C'est assurément un atout indispensable dans le contexte des transports du futur.

Utilisation de cellules solaires sur les dirigeables

Pourquoi ne pas tirer profit des énormes surfaces offertes par les dirigeables en les couvrant de cellules photovoltaïques? L'énergie ainsi collectée peut faire fonctionner les moteurs du dirigeable, ce qui créerait un moyen de transport à 100% propre. Cela nécessite des cellules solaires légères et bon marché, ainsi que des batteries elles aussi légères. De nombreux développements sont en cours dans ces domaines, par exemple l'avion solaire Solar Impulse de Bertrand Piccard. Il serait d'ailleurs très intéressant d'interroger l'équipe de Solar Impulse sur cette possibilité, et de leur demander pourquoi ils ont choisi de développer un avion plutôt qu'un dirigeable.

Impact environnemental d'un développement à grande échelle

Si les dirigeables devaient un jour remplacer les avions, camions ou bateaux, leur prolifération dans le ciel serait-elle gérable et supportable? On est ici un peu dans le domaine de la science-fiction... Il est clair que des géants de 200 m de longueur volant à basse altitude ne passeront pas inaperçus. Il s'agira tout d'abord de structurer le trafic en définissant toutes sortes de règles de circulation et de routes autorisées. On peut imaginer des couloirs aériens évitant si possible les zones habitées. Le fonctionnement relativement silencieux des dirigeables devrait toutefois leur permettre de survoler des zones habitées sans causer trop de nuisances, contrairement aux avions.

Etude économique: un projet pour Noé 21 ?

Concept

Les études économiques pratiques et concrètes impliquant des dirigeables sont pour l'instant difficiles à cause du flou qui règne sur les performances et capacités de ceux-ci, ainsi que sur leurs coûts de fabrication et d'exploitation. Il y aurait cependant plusieurs études intéressantes à mener. Noé 21 pourrait s'impliquer dans ce domaine en encourageant des écoles et des étudiants à se pencher sur ces questions. Pourquoi ne pas imaginer un concours au niveau genevois, romand ou national, mis sur pied par Noé 21 en collaboration avec des hautes écoles spécialisées? Le concours récompenserait les meilleurs travaux d'étudiants dans des domaines techniques ou économiques liés aux dirigeables. On pourrait aussi imaginer non pas une compétition entre étudiants, mais plutôt une grande collaboration au sein d'un même projet où chacun apporte ses compétences propres: techniques, économiques, etc.

Un tel projet au niveau romand ou national aurait de grandes vertus pédagogiques et permettrait de sensibiliser les jeunes aux problèmes environnementaux de manière concrète. Ceux-ci montreraient certainement une bonne dose d'enthousiasme à travailler pour un projet potentiellement utile pour l'avenir de tous. De plus, ce projet aurait sûrement un certain retentissement médiatique qui ferait connaître l'action de Noé 21 et ferait avancer la cause des dirigeables. Les axes principaux qui pourraient être étudiés sont brièvement décrits ci-dessous.

Définition de quelques modèles "standards" de dirigeables

Le but serait ici d'identifier au niveau technique quelques concepts de dirigeables couvrant les différents paramètres de base tels que taille, charge utile, manoeuvrabilité, aérodynamisme, etc. Pour chaque concept, une étude devrait déterminer de la manière la plus réaliste possible les performances et limitations de l'engin ainsi que son coût de fabrication et d'exploitation (équiperage etc) et sa consommation de carburant (émissions de CO₂).

Comparaisons de coûts et développement de business plans

En se basant sur les modèles standards de dirigeables définis plus haut, une autre équipe d'étudiants pourrait se pencher sur des comparaisons de coûts entre dirigeables et autres moyens de transport: avions, bateaux, camions, etc. Les transports de fret et de passagers seraient examinés sous l'angle du prix par tonne/passager par km ainsi que d'autres facteurs comme le temps de parcours d'un point à un autre. Dans tous les cas, l'aspect environnemental devra être pris en compte en comparant les émissions de CO₂ générées et en simulant l'évolution des prix du pétrole et l'introduction d'une taxe sur le CO₂.

Enfin, d'autres étudiants pourraient se pencher sur la création de business plans concrets en s'appuyant sur les études ci-dessus. Il s'agirait d'imaginer des applications

pratiques des dirigeables pouvant être rentables à court terme, que ce soit dans le transport de fret ou de passagers, sur de courtes ou longues distances. Si possible, quelques exemples d'applications au niveau suisse ou local permettraient de rendre les choses plus concrètes pour le grand public et éveilleraient plus facilement l'intérêt des médias.

Conclusion

Cette étude succincte a permis de décrire dans les grandes lignes les propriétés des dirigeables et leurs possibles applications dans le transport de fret et de passagers à l'ère des énergies propres. Comme on l'a vu, tout reste à faire dans ce domaine, à qui il a manqué jusqu'à présent l'étincelle qui mettrait en marche la machine. Mais il est rassurant de constater que des solutions originales et écologiques comme les dirigeables existent. En l'absence de solution miracle, aucune piste ne doit et ne peut être négligée. A ce stade, les dirigeables ne sont certainement pas la moins intéressante des solutions proposées pour surmonter les problèmes de transport que l'humanité devra affronter au XXI^e siècle.

Le nombre de sites web existant sur le sujet est impressionnant. Trois semaines n'auront d'ailleurs pas suffi à en faire le tour. On trouve de tout, des projets farfelus et irréalistes aux rapports très sérieux d'universitaires et d'experts reconnus. C'est assurément un signe réjouissant d'une certaine ébullition actuellement en cours autour des dirigeables. Etant donné le nombre d'études et de projets discutés sur Internet, il serait vraiment étonnant que rien ne se passe dans les 10 prochaines années. Nous sommes peut-être tout proches d'une mini-révolution aéronautique...

Bibliographie

Cette étude a pu être réalisée grâce à la très nombreuse documentation trouvée sur Internet. Je n'ai pas mentionné les références explicitement dans le texte, mais j'ai rassemblé mes principales sources d'information ci-dessous:

- Bows A., Anderson K. & Upham P., *Contraction & Convergence: UK carbon emissions and the implications for UK air traffic*, Technical Report 40, Tyndall Centre for Climate Change Research, 2006.
- Carey C., Inderwildi O. & King D., *Just Hot Air? The development of lighter-than-air craft and their possible impact*, Aviation and the Environment, 10, 32-37, 2010.
- Dodson S., *Could Zeppelin's airships soon be gracing our skies again?*, The Guardian, June 5, 2008.
- Harrod H., *Airships: a second age*, The Telegraph, August 4, 2010.
- Jowit J., *Blimps could replace aircraft in freight transport, say scientists*, The Guardian, June 30, 2010.
- King D., Inderwildi O., et al. *Future of Mobility Roadmap*, Smith School of Enterprise and the Environment, University of Oxford, 2010.
- Monbiot G., *Travelling light*, The Guardian, May 6, 2008.
- Prentice B.E., Beilock R.P. & Phillips A.J., *Economics of airships for perishable food trade*, 5th International Airship Convention and Exhibition, Oxford, UK, 2004.
- U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2008.
- Warwick G., *Northrop Grumman to fly surveillance airship*, Aviation Week, July 22, 2010.
- Watanabe H., *Future possibility of world airship transportation as new business*, Airships to the Arctic V, Calgary, 2009.
- Windischbauer F. & Richardson J., *Retrostrategy: is there another chance for lighter-than-air vehicles?*, Foresight, vol. 7, no 2, pp. 54-65, 2005.

Voici encore quelques sites web concernant les dirigeables et les entreprises actives dans ce domaine qui m'ont été très utiles:

www.airship-association.org
www.hybridairvehicles.net
www.airships.net
www.zeppelinflug.de
www.21stcenturyairships.com
www.projectsolr.info

www.cargolifter.de
www.lta-forum.de
www.smithschool.ox.ac.uk
www.worldskycat.com
en.wikipedia.org/wiki/Airship

.....
Noé21 est l'acronyme de Nouvelle orientation économique pour le 21e siècle
ONG indépendante spécialisée dans les solutions au changement climatique
Membre du Bureau européen de l'environnement et du Réseau action climat Europe CAN-E
Accrédité à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
Noé21 - 19 Quai Ch. Page - 1205 Genève – Switzerland - Tel. + 41 22 329 51 36 info@noe21.org