

Article « Les verrous des dirigeables en passe de sauter »

Auteur : Philippe Tixier

Date version finale : 17 novembre 2021

### 1) Situation actuelle

Le marché commercial des dirigeables civils est quasiment bloqué, et ce depuis 1910. Actuellement, dans le monde entier, on dénombre seulement une cinquantaine de dirigeables à air chaud en service commercial ou en exploitation dans des clubs. Et l'on dénombre moins de dix dirigeables à gaz en service commercial. En revanche, environ 10 000 montgolfières sont en service dans le monde entier. Il est donc justifié de parler de « blocage du marché des dirigeables ».

### 2) Le Groupe de Travail « aérostation »

A l'initiative de la 3AF, un groupe de travail a rassemblé en 2020 la majorité des acteurs français de l'aérostation. Son rapport, intitulé « panorama de l'aérostation étape 1 », publié début 2021, est accessible par le QR code ci-joint et par le lien hypertexte suivant : [panorama aérostation étape 1](#). Ce rapport a identifié les principaux « verrous » qui bloquent en particulier le marché des dirigeables.



### 3) Le verrou principal (ou verrou n° 1) est constitué par la combinaison de deux faits :

- Le dirigeable a besoin d'une importante équipe au sol pour se poser, voir la video accessible par le QR code ci-joint  
et par le lien ci joint : [atterrissages de dirigeables classiques](#)
- Le dirigeable ne peut décoller et surtout atterrir que si le vent ne dépasse pas 15 km/h pour les dirigeables classiques et 25 km/h pour le dirigeable Zeppelin NT. Cette limite réduit la disponibilité à 30 % pour les dirigeables classiques, et à 50 % pour le Zeppelin NT. En d'autres termes, un vol programmé d'avance pour un dirigeable classique est annulé ou reporté dans 70 % des cas pour les dirigeables classiques, et dans 50 % des cas pour le Zeppelin NT.
- **Cinq pistes d'innovation** sont en conception avancée ou en expérimentation pour tenter de lever ce verrou :
  - . La « **vectorisation** ». Ce terme, spécifique au domaine des dirigeables, consiste à doter le dirigeable de moteurs et d'hélices plus puissants pour contrer les forces aérodynamiques très importantes qui s'appliquent sur la grande surface extérieure du dirigeable quand le vent forçit. Ces hélices actionnent le dirigeable sur trois axes, en propulsion selon l'axe longitudinal, en propulsion selon l'axe vertical, et en rotation selon l'axe de lacet. Comme la puissance nécessaire pour un effet donné sur le dirigeable est proportionnelle au cube de la vitesse relative de l'air, et qu'en première approche, le poids d'un système de propulsion est proportionnel à sa puissance, on comprend que cette piste atteint rapidement ses limites.
  - . « **L'hybridation** ». Le dirigeable est maintenu volontairement en déséquilibre entre sa portance statique, c'est-à-dire la poussée d'Archimède résultant du gaz porteur emprisonné dans le dirigeable et son poids. Ce « déséquilibre » ou poids résiduel apparent, peut varier entre 20% et 50 %, ce qui permet (théoriquement) de faire varier le poids embarqué, et ainsi de faire du transport de charges sans avoir besoin d'ajuster la poussée d'Archimède quand le poids total varie. Plusieurs prototypes ont volé en appliquant ce principe, mais aucun n'a débouché sur une commercialisation du produit. La conclusion de cette piste, qui ambitionnait au départ de combiner les avantages des avions et ceux des dirigeables, se révèle finalement combiner les inconvénients des avions et ceux des dirigeables.
  - . La « **compression du gaz porteur** ». Le gaz porteur à bord est aspiré par un compresseur embarqué qui confine ce gaz porteur sous pression dans un réservoir embarqué. Plusieurs prototypes ont volé en appliquant ce principe, mais aucun n'a



débouché sur une commercialisation. Le poids du réservoir sous pression est trop important.

. **« Le drone en guise de singe »**. C'est le brevet de la société Flying Whales. Sur les dirigeables classiques, un des opérateurs au sol saisit l'élingue (ou le câble) d'amarrage et monte au mat d'ancrage pour passer l'élingue dans le treuil qui va ensuite tracter le dirigeable jusqu'au mât. Dans le jargon des aéroliers, cet opérateur est appelé le « singe » parce qu'il grimpe en haut du mât. Le brevet de Flying Whales consiste à embarquer à bord du dirigeable un drone qui amène le câble d'arrimage depuis le dirigeable jusqu'au treuil situé en haut du mât d'ancrage. Ce concept n'a pas encore fait l'objet d'un prototype physique ni d'une expérimentation.

. **Le « fond plat »**. C'est le brevet de la société Dirisolar. La forme traditionnelle du dirigeable est modifiée et son fond inférieur est proche d'un plan. Cette forme génère à l'atterrissage un couple piqueur au lieu d'un couple cabreur sur les dirigeables classiques. De ce fait le besoin d'une équipe au sol disparaît, le dirigeable est plaqué au sol par l'effet venturi qui apparaît sous le dirigeable. Le dirigeable peut s'ancrer dans un dispositif qui ne dépasse pas du sol, à l'inverse de tous les mâts d'ancrage nécessaires pour les dirigeables classiques. Cette configuration supprime également le risque de choc entre le dirigeable et le mât d'ancrage.

Ce concept a fait l'objet d'un démonstrateur physique à échelle réduite (2 m de long) qui a emporté le prix d'innovation au salon du Bourget en 2011. Les très nombreuses simulations numériques effectuées depuis ont confirmé sans aucune exception l'efficacité de cette forme qui lève totalement ce verrou.

L'expérimentation sur deux maquettes de petite taille met également en évidence cette propriété avantageuse et décisive du fond plat.

Ci-joint le QR code :



et le lien vers cette expérimentation :

<https://deux formes de dirigeables en soufflerie>

#### 4) Les autres verrous

En supposant ce verrou « principal » enfin levé, après plus de cent ans de blocage du marché pour cette raison (depuis 1910), plusieurs verrous « secondaires » existent, et sont susceptibles de grever la capacité du dirigeable à assurer de façon efficace et rentable sa mission. Ces verrous « secondaires » sont au nombre de six :

##### **.Verrou n° 2 : l'instabilité en vol à cause des turbulences et de variations de vitesse du vent, surtout près du sol.**

La très grande prise au vent du dirigeable le rend extrêmement sensible aux légères variations de vent. Il s'ensuit des mouvements indésirables du dirigeable, notamment si la mission exige une position stationnaire précise. C'est le cas pour le chargement ou le déchargement sans atterrir, par exemple pour le LC60T de Flying Whales. C'est également le cas si le dirigeable doit approcher des cibles de près sans prendre le risque de les percuter. C'est l'exemple du diridrone de CNIM Air Space, qui ambitionne de surveiller les lignes à haute tension de RTE/EDF.

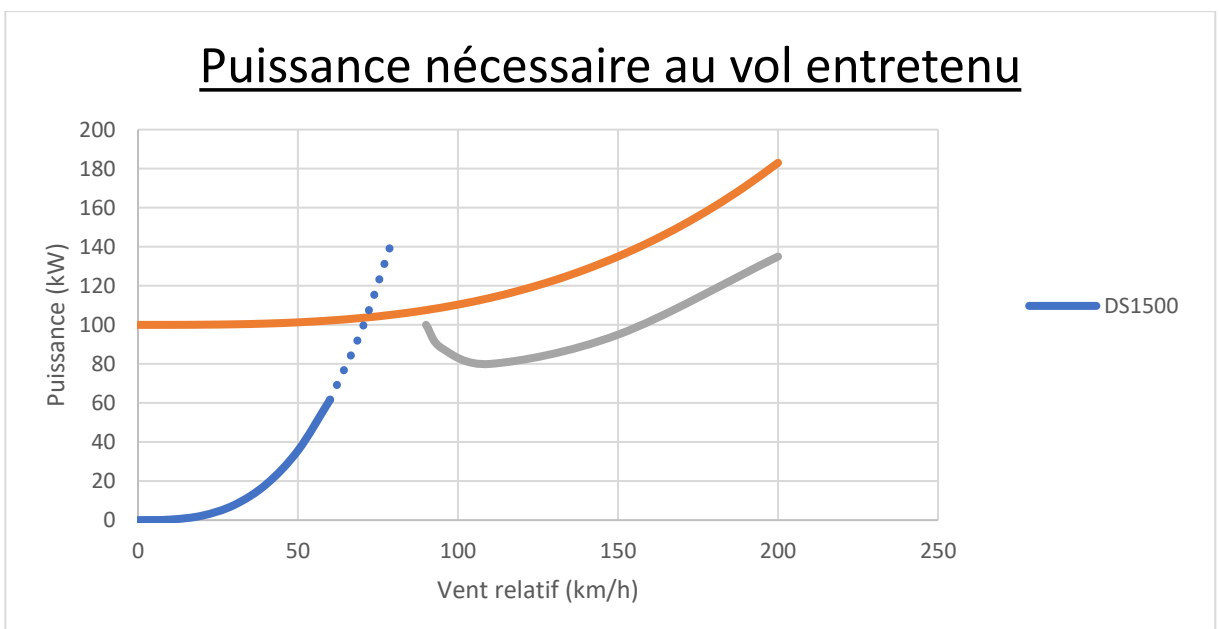
La solution qui tente les porteurs de projets français de dirigeables est d'embarquer des appareils appelés « lidar ». Ces appareils mesurent les variations de vitesse du vent à distance. Plusieurs lidars seraient ainsi capables de neutraliser les effets d'une variation de vent sur le dirigeable en commandant par anticipation les hélices du dirigeable.

De telles commandes existent sur les bateaux de croisière modernes, elles anticipent et atténuent dans une certaine mesure les effets de roulis, sources d'inconfort pour les passagers.

### . Verrou n°3 : l'émission de CO2 et la consommation d'énergie non renouvelable

Les dirigeables traditionnels utilisent des combustibles fossiles, les plus utilisés actuellement étant le gazole et l'essence. Le recours à l'énergie solaire pour les avions et les hélicoptères se heurte à la nécessité d'une grande surface de capteurs, qui est peu compatible avec l'architecture des avions ou des hélicoptères. L'exploit de l'avion Solar Impulse reste une démonstration technologique sans application commerciale probable.

Dans le cas du dirigeable, le recours à l'énergie solaire se présente de façon beaucoup plus favorable. En effet, la puissance nécessaire au vol d'un dirigeable n'a aucun rapport avec la puissance nécessaire au vol d'un avion ou d'un hélicoptère. La comparaison chiffrée de ces puissances nécessaires pour trois appareils de capacité d'emport comparable est illustrée sur le tableau ci-dessous. Les trois appareils comparés sont le Cessna 172, avion quadriplace pour le tourisme aérien (courbe grise), l'hélicoptère Ecureuil (courbe orange), de cinq ou six places, largement utilisé pour le tourisme aérien (hors Europe, où la réglementation bride énormément l'usage des hélicoptères pour le tourisme) et enfin de DS 1500 de Dirisolar, (courbe bleue) cinq personnes, pour le tourisme aérien.



La très faible puissance nécessaire au DS 1500 dans les basses vitesses en fait un appareil idéal pour les survols touristiques, et du même coup un appareil volant avec zéro émission de CO2, et zéro consommation d'énergie non renouvelable.

### . Verrou n°4 : le risque panne sèche avant d'atteindre le but ou avant de pouvoir regagner la base

Ce risque est depuis toujours inhérent à tous les appareils volants dans l'atmosphère. La conséquence de la panne sèche est le crash plus ou moins violent au sol ou en mer.

Dans le cas du dirigeable solaire, ce risque disparaît. En effet, ce dirigeable n'a pas besoin d'énergie pour rester en l'air, car il est en équilibre poids portance grâce au gaz porteur. Cet équilibre n'est cependant assuré qu'à 2 ou 3% près. En effet la poussée d'Archimède étant égale au poids d'air déplacé, et ce poids varie légèrement avec la température locale. La température moyenne du gaz porteur ne s'égalise pas instantanément avec la température de l'air extérieur, qui elle peut varier assez

rapidement, par exemple en passant d'une zone à l'ombre vers une zone ensoleillée. Mais le besoin en énergie pour compenser par vectorisation les écarts poids/portance est largement couvert par l'apport énergie solaire sur le long terme. L'appareil peut dériver si le vent dépasse la valeur avec laquelle la puissance captée ne peut plus contrer le vent, mais le dirigeable solaire ne « tombe jamais ». Bien évidemment, les passagers à bord ne supporteront pas une dérive très longue, et cette capacité à « ne jamais tomber » ne prend son intérêt que dans le cas d'un dirigeable solaire dronisé, c'est-à-dire pour des applications autres que le tourisme.

Ainsi peut-il être envisagé un drone dirigeable dont la durée de vol est illimitée, à condition toutefois d'admettre que ce drone puisse dériver indéfiniment, et « router » pour rejoindre n'importe quel but assigné au bout d'un temps long, temps incalculable à l'avance, mais certainement fini.

Quand on examine les régimes de vent à basse altitude, avec une vue suffisamment large, on constate que les zones de vent fort sont toujours des grands tourbillons, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels l'air fait à peu près un tour complet. Une magnifique représentation de tous les vents actuels et leur prévision à court terme est fournie par le site de la NASA, avec le lien suivant : <https://earth.nullschool.net/fr/> Ce site permet de comprendre comment un dirigeable drone solaire peut naviguer indéfiniment en choisissant à chaque instant intelligemment son cap pour rejoindre in fine n'importe quelle destination. Pour le drone dirigeable solaire, lutter contre un vent trop fort pour garder une position fixe est vain, se laisser emmener par le tourbillon est la solution intelligente.

#### **.Verrou n°5 : la fuite du gaz porteur.**

Le gaz porteur d'un dirigeable à gaz peut être l'hydrogène, inflammable, ou l'hélium, ininflammable. Ces deux gaz ont une molécule très petite, qui passe à travers tous les réseaux atomiques faits d'autres molécules, dont les tissus ou films des enveloppes. Les progrès importants réalisés sur les enveloppes de dirigeables ne pourront cependant probablement jamais rendre ces enveloppes exactement étanches au passage d'hydrogène ou d'hélium. Au bout d'une durée plus ou moins longue, il faut « recharger » en gaz porteur.

L'innovation consiste à recharger en hydrogène tout en volant. En effet, à basse altitude, l'atmosphère contient toujours de la vapeur d'eau. Sèche quand on ne la voit pas (ciel sans nuages), saturée quand elle se manifeste sous forme de nuage. Mais le teneur en vapeur d'eau n'est jamais nulle à basse altitude, même au-dessus des déserts. Capter cette vapeur d'eau avec une paroi froide est un procédé connu depuis très longtemps. Aujourd'hui une paroi très froide est obtenue avec l'effet Peltier, qui nécessite une faible puissance électrique. L'eau ainsi récupérée est électrolysée à bord, et donne donc de l'hydrogène qui peut alors être réinjectée dans l'enveloppe et compenser les fuites de gaz porteur. Le dimensionnement de ce dispositif a été calculé par Air Liquide dans le cas du DS 1500. Le poids total du système est inférieur à 30 kg. Ce poids est totalement acceptable pour le devis de poids d'un DS 1500 solaire, qui est de 2000 kg.

#### **.Verrou n°6 : le bruit**

Tous les appareils « plus lourds que l'air » sont régulièrement critiqués pour le bruit généré par leurs propulseurs et leurs hélices. Le malheur veut qu'une hélice soit d'autant plus bruyante que son rendement est élevé. Pour les plus lourds que l'air, la performance, et notamment la distance franchissable, est directement liée au bon rendement des hélices. Des niveaux de bruit de 70 à 95 db sont les plus courants sur les « plus lourds que l'air ».

Il existe des hélices à bas rendement qui sont peu bruyantes. Par exemple Electravia a conçu des hélices dont le bruit ne dépasse pas 47 db. Sur le dirigeable solaire, un

rendement élevé des hélices n'est pas une nécessité, puisqu'il suffit d'avancer moins vite pour rester toujours en excédent d'énergie embarquée. En outre les moteurs électriques brushless sont peu bruyants. Ainsi équipé, le DS 1500 est inaudible à 200 mètres. Même d'assez près, on le voit, énorme, mais on ne l'entend pas.

### **.Le dernier verrou (n°7) est un verrou économique : le prix de l'heure de vol**

Le prix de billets pour un vol sur les rares dirigeables en service commercial est très élevé. Entre deux cents et quatre cents euros. Ceci résulte surtout du verrou n°1. En effet une équipe au sol nombreuse a un coût élevé, et les aléas de disponibilité génèrent aussi des coûts importants. A cela il faut ajouter le désagrément de l'annulation des vols, et les coûts indirects générés par ces annulations. Les opérateurs annulant les vols reportent ces vols, mais ne les remboursent pas, en règle générale.

Avec la levée du verrou n°1, le coût d'utilisation du DS 1500 chute significativement. De plus, le coût récurrent de l'énergie nécessaire est faible, c'est le coût de l'énergie solaire captée une fois amorti le système de capteurs solaires. Les batteries ont une durée de vie limitée, et donc un coût de remplacement qui doit s'amortir et qui contribue donc au coût de l'heure de vol. Mais l'ensemble de ces coûts est limité. Le calcul complet de l'heure de vol pour une dirigeable solaire type DS 1500 est inférieur à 100 €, alors qu'il est supérieur à 1000 € pour un hélicoptère de capacité comparable.

## **5) Conclusions**

Rarement dans l'histoire des machines volantes, un problème a suscité autant d'efforts que la problématique des dirigeables. Aujourd'hui, les débats sur l'intérêt des dirigeables sont toujours aussi passionnés. Or le plus souvent ces débats ne portent pas sur les verrous, mais sur l'usage possible de ces machines. Et donc ces débats sont et resteront stériles tant que l'identification des verrous ne fait pas d'abord l'objet d'une analyse rationnelle et partagée, et ensuite l'objet d'une recherche très méthodique sur les possibilités de les faire sauter. Tel est le but de cette session.

L'expérience montre que dans l'histoire des techniques, les avancées décisives sont souvent nées d'une discussion entre deux ou plusieurs acteurs passionnés. C'est pourquoi nous sommes réunis ici, et c'est pourquoi nous allons peut-être faire progresser l'état de l'art des dirigeables.

Il est proposé d'ordonner le débat en trois étapes :

- 1) Questions et discussions sur les 7 verrous évoqués ci-dessus. L'intervenant pourra apporter des éclairages supplémentaires sur l'histoire des dirigeables, sur les projets de dirigeables en cours, et sur les perspectives à court terme.
- 2) Autres verrous éventuels identifiés par des participants, solutions imaginées et débat. Il est rappelé que pour les solutions envisagées, un niveau TRL 6, au moins par prototypage virtuel, est souhaitable.
- 3) Plan d'action suggéré par le Groupe de Travail de la 3AF :  
Un programme commun à la majorité des porteurs de projet français pour expérimenter les pistes pour lever les verrous :
  - plateforme DS 1500 à fond plat
  - même plateforme portant un drone « singe »
  - un système énergie basé sur la capture d'énergie solaire
  - des lidars à bord pour anticiper l'effet des turbulences
  - une régénération d'hydrogène en vol pour compenser les fuites de gaz
  - plusieurs logiciels de routage embarqués, pour comparer leur efficacitéLes participants pourront suggérer d'autres sujets d'expérimentation.

Les verrous historiques des dirigeables sont en passe de sauter