

Rapport : Projet de Dirigeables Durables pour le transport aérien



Figure 1 - Flying Whales Project (Flying Whales)

Projet Innovation Challenge - ENAC

MONTAGNON Antoine

SIGAUT Cédric

XIE Jiaqi

INTRODUCTION

Notre planète est en plein réchauffement climatique. Selon l'ONU, qui s'appuie notamment sur les conclusions du GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), il va être très difficile de limiter à moins de 2°C la hausse des températures sur la planète d'ici 2050. Cela va entraîner des changements climatiques et par effet boule de neige, des problèmes sociétaux et une redéfinition de notre économie.

Le dirigeable est un moyen de transport qui a eu un succès majeur dans les années 30. Déchu suite à l'accident du Zeppelin LZ129 Hindenburg en mai 1937, causant 36 décès, mais aussi à cause de sa lenteur, sa sensibilité aux conditions météorologiques, son encombrement et ses difficultés opérationnelles. Il semble faire son retour pour des activités autres que purement militaires ou publicitaires. On voit aussi la multiplication de nouveaux projets industriels de construction de dirigeables LCA (Large Capacity Airships) tels que Flying Whales en France dont le premier vol est prévu pour 2024. Le transport de fret aérien (commercial, humanitaire ...) sera toujours d'actualité dans le futur, et les prévisions sont même à la hausse à hauteur d'environ 5% par an en termes de volume de biens transportés [1]. Pour intégrer, à l'horizon 2030 par exemple, le dirigeable dans la société du futur, il est indispensable d'envisager son design dans une logique durable.

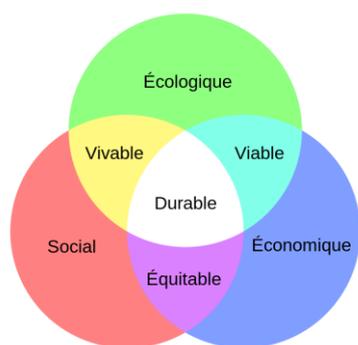


Figure 2 - Développement durable - Wiki

La définition du développement durable a été donnée en 1987 par le rapport Brundtland de l'ONU ; il s'agit d'un développement qui "répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs". Il doit obligatoirement regrouper 3 aspects pour être dit "durable" : économique, sociétal, et environnemental.

La problématique qui sera la nôtre va donc être de savoir quelles sont les conditions de design d'un dirigeable de cargo pour qu'il s'insère dans cette problématique de développement durable avec succès.

Pour résumer, voici les principaux critères à prendre en compte selon nous sur chacune des trois thématiques du développement durable, ainsi que quelques moyens pour y arriver.

Aspect du développement durable	Critères
Environnemental	<ul style="list-style-type: none"> - Disposer d'outils pour étudier l'empreinte d'un dirigeable (code par ex.) - Pollution opérationnelle - Pollution due à la fabrication et à la fin de vie - Empreinte des infrastructures
Social	<ul style="list-style-type: none"> - Emplois décents créés - Répondre à des besoins de transport de marchandises - Répondre à des besoins humanitaires
Economique	<ul style="list-style-type: none"> - Répondre à un vrai besoin - Réduire les coûts par rapport aux autres moyens de transport - Avoir un projet réalisable : respecter tous les critères de certification et d'opérabilité, à un coût soutenable

Tableau 1 - Critères de développement durable pour le dirigeable

Cette étude n'a pas du tout la prétention de renvoyer un design complet d'un dirigeable, mais de renvoyer une image des éléments à prendre en compte et des propositions de choix techniques. Elle s'appuiera notamment sur des recherches bibliographiques, l'élaboration d'un code pour concevoir le dirigeable et renvoyer ses principales caractéristiques techniques, et la prise en compte de nombreux paramètres opérationnels.

La question que nous nous posons donc dans le cadre de cette étude est :

Quelle place pour le dirigeable durable dans l'avenir du transport aérien de fret ?

SOMMAIRE

I.	Définition du cadre et méthodologie retenue	5
A.	Aspect économique	5
B.	Méthode d'innovation.....	11
C.	Logique de conception du dirigeable	12
II.	Etude de l'existant	14
A.	Fonctionnement du dirigeable	14
B.	Comparatif des dirigeables	17
C.	Cadre opérationnel.....	20
D.	Sensibilité météorologique	23
E.	Réglementation et certification	25
III.	Choix technologiques	28
A.	Premiers choix	28
B.	Répartition en classe et programmation	33
C.	Premiers résultats et évolution	35
IV.	Evolution pour les prochaines phases	35
A.	Un succès dépendant de divers scénarios.....	35
B.	Critères critiques à surveiller	36
V.	Conclusion	39
VI.	Remerciements	41
VII.	Bibliographie	41
VIII.	Annexes	42

I. Définition du cadre et méthodologie retenue

A. Aspect économique

Le développement durable du dirigeable doit obligatoirement passer par un aspect économique, en plus d'aspects sociétaux et environnementaux. Notre étude porte sur le marché du cargo. Nous allons essayer d'établir une image du marché du transport de fret dans le monde, puis nous nous intéresserons plus particulièrement au transport de fret par le dirigeable en lui-même, en essayant de comprendre pourquoi actuellement il ne rencontre pas de franc succès sur ce marché.

a) Marché du transport de fret dans le monde :

L'unité utilisée pour décrire ce marché est la tonne kilométrique (1 tkm représente une tonne de marchandise transportée sur un kilomètre).

Les chiffres avancés dans ce paragraphe sont issus de l'International Transport Forum (ITF) de 2019 [1]. Sur un total de 108 trillions tkm transportés en 2015, voici la répartition.

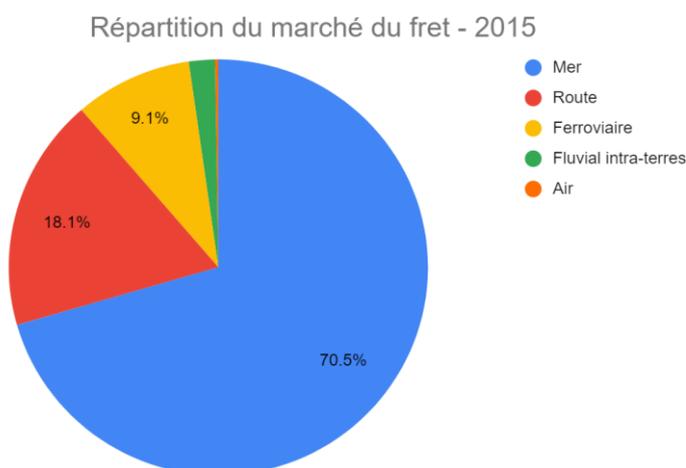


Figure 3 - Répartition du marché du fret en 2015

Le marché du fret par air représente moins de 0.25% du total en tkm (en orange) , tandis que le transport par la voie des mers représente 70.5% du marché.

Cela peut s'expliquer en faisant un bref comparatif des différents moyens de transport de fret. Le tableau ci-dessous ne donne que des avantages et inconvénients en termes économiques et ne prend pas forcément en compte les aspects sociétaux et environnementaux (bien que souvent liés) :

Moyen de transport	Vitesse [km/h]	Capacité [t]	Avantages	Inconvénients
Avion/Hélicoptères	450-1000	Quelques dizaines, jusqu'à, jusqu'à 250 (Antonov 225)	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup plus rapide - Certains endroits beaucoup plus accessibles par l'air que par l'eau - Possibilité d'assurer une plus grande intégrité des produits transportés 	<ul style="list-style-type: none"> - Cher, nécessite beaucoup d'infrastructures pour des régions reculées
Ferroviaire	~60	Plusieurs milliers voire plusieurs dizaines de milliers	<ul style="list-style-type: none"> - Peut s'appuyer sur de vieux réseaux déjà bien développés - Coûts d'exploitation moindre 	<ul style="list-style-type: none"> - Cher à entretenir et surtout à développer
Maritime	~40	Plusieurs milliers voire plusieurs dizaines de milliers	<ul style="list-style-type: none"> - Le plus répandu - Moins cher - Beaucoup de tonnage 	<ul style="list-style-type: none"> - Intégrité des produits transportés moins contrôlée - Délais de transport
Routier	<90	50	<ul style="list-style-type: none"> - Pratique pour des courtes/moyennes distances 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de capacité, peu adapté aux gros volumes
Dirigeable	100-200	Entre 10 pour les plus petits et jusqu'à environ 100 dans les projets envisageables	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'exploitation beaucoup moins élevé que avion/hélico mais avec toutes leurs avantages sauf vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Offre non disponible - Vitesse faible par rapport à l'avion

Tableau 2 – Comparatif des divers moyens de transport

Le fret aérien :

Nous détaillons ici le marché du fret aérien. Cette description est avant tout vraie pour les avions voire hélicoptères et nous analyserons plus loin les nouveautés apportées dans le cas du dirigeable.

Ce qui fait qu'une compagnie va préférer envoyer un bien par la voie des airs est avant tout le délai de livraison. La plupart des biens n'ont pas besoin d'être très rapidement réapprovisionnés ce qui fait que l'on préférera d'autres moyens de transports (notamment les navires de fret pour les longues distances) aux coûts d'exploitation beaucoup plus faibles.

Dès qu'un bien nécessite un transport rapide (fleurs, fruits, derniers téléphones des grandes marques, ...), ce dernier fait appel aux avions. Il peut aussi avoir recours à ce moyen de transport pour

un transport rapide dans des conditions de stockage (température, pression) optimales et contrôlées efficacement (vaccins par exemple).

La valeur des biens transportés par fret aérien est en moyenne beaucoup plus élevée, cela étant dû notamment aux coûts d'exploitation.

Ainsi, selon l'IATA [2], le cargo aérien représente 1% du marché total en volume mais 35% en termes de valeur des biens transportés !

Le meilleur exemple que l'on peut apporter est celui de la pandémie de COVID-19 qui a laissé part à une véritable explosion du secteur du fret aérien. Selon l'IATA, le chiffre d'affaires du marché du fret aérien a augmenté de +14.9% à 117.7 milliards de dollars en 2020. L'avènement des vaccins contre le COVID-19 ne va qu'augmenter ce chiffre.

La croissance du secteur du fret aérien est relativement continue comme l'atteste le graphique suivant produit par l'IATA :

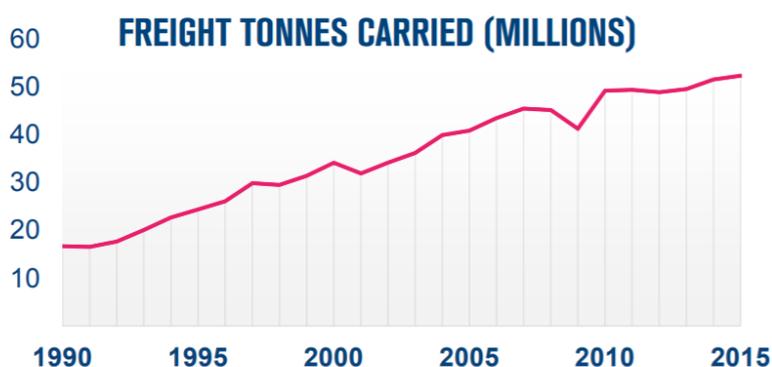


Figure 3 - Tonnages de fret aérien par année - IATA [2]

Selon l'IFT [1], le secteur aérien du fret est celui qui connaîtra la plus forte croissance annuelle avec pour horizon 2030 (+5.5 %). La quantité de biens à transporter va fortement augmenter quel que soit le moyen de transport.

La diversification du secteur aérien :

Le "secteur aérien" du fret désigne ici le transport par avion et hélicoptères en majorité.

Il faut cependant avoir à l'esprit que cette réalité va progressivement changer, avec l'émergence de nombreux projets phares de dirigeables (Flying Whales par exemple d'une capacité de 60 tonnes).

Par les airs, le drone fait aussi son apparition. La start-up américaine Zipline grossit de jour en jour avec son transport de marchandises par drones à voile fixe. Dernièrement, en Septembre 2020, ils ont signé un accord avec les supermarchés américains WalMart [3] pour commencer la livraison de produits de santé/bien-être aux Etats-Unis. Il y a possibilité d'étendre ces services à l'ensemble des marchandises commercialisées par la chaîne de grande distribution.

Pour conclure sur le fret aérien, il devient de plus en plus complexe et chacun de ses composants va répondre à des besoins différents. Et le dirigeable a un rôle à jouer. Nous le détaillerons par la suite.

b) Transport de fret par un dirigeable : cas d'étude du transport des pièces d'A320 :

Pour étudier le rôle que le dirigeable pourrait jouer dans le secteur du fret, nous avons souhaité tout d'abord étudier un cas concret où le dirigeable pourrait remplacer la voie maritime, et quels bénéfices ils pourraient apporter.

Airbus doit envoyer des pièces de fuselage de l'A320, fabriquées à Hambourg en Allemagne, à son usine américaine à Mobile, Alabama.



Figure 4 - Transport du fuselage arrière de l'A320 - Source : Airbus,2015

Le bateau utilisé transporte empennage, section arrière de fuselage etc. : il s'agit du **BBC Fuji Cargo Ship** selon le site d'Airbus. On peut retrouver ses caractéristiques techniques en ligne sur marinetraffic.com [4].

Les composants transportés et leurs dimensions sont :

Composant	Origine	Dimensions [m] et/ou Surface [m ²]
Ailes	Royaume-Uni	S = 122.6 m ² ; envergure = 34m
Cône Arrière / fuselage avant et cockpit	Espagne/France	Longueur Fuselage = 37.6m / diamètre = 3.95 m
Gouverne de profondeur	Espagne	12.43 *3 environ

Tableau 3 – Composants de l'A320 transportés de Hambourg à Mobile

Estimation du volume en ordre de grandeur (celui du fuselage) : 460 m³

Estimation de la masse à transporter :

Selon les données usuelles, les atterrisseurs représentent environ 12% de la masse structurale de l'A320 : on transporte donc environ 88% de la masse de structure de l'appareil. Selon Airbus l'OEW (Operating Empty Weight) = Manufacturer Empty Weight + Crew + Crew Luggage de l'appareil doté de moteurs CFM 56 est d'environ 42,22 t.

Chaque moteur équivaut à près de 2t, si l'équipage est de 5 personnes à raison de 100 kg/Personne, cela revient à 0.5 t.

On peut donc estimer l'ordre de grandeur de la masse structurale (sans moteurs) à 37.7 tonnes et la **charge transportée à 33.18 tonnes** (coefficient de 0.88).

Dimensions minimales de la soute du dirigeable (on fait une suite d'hypothèse simplistes) :

- Supposons 1 m de distance nécessaire entre le fuselage, les deux ailes, les empennages et la structure de la soute. Cela suppose une largeur minimum de : largeur(fuselage) + 1*4 = 3.95 + 4 = **8 m environ**.

- La longueur va être contrainte par le fuselage de l'A320 (37 m)

- La hauteur va être contrainte par celle de la dérive (5m environ)

Cela ne prend pas en compte l'espacement nécessaire aux machines de chargement/déchargement, etc.

A la suite de toutes ces hypothèses on obtient un Cahier des Charges du transport des pièces d'A320 entre Hambourg et Mobile.

Masse à transporter [t]	33.18
Volume à transporter (ordre de grandeur) [m³]	460
Dimensions minimales soute	Longueur : 37 m Largeur de la soute : 8 m Hauteur : 5 m
Distance à parcourir [km]	7800

Tableau 4 – Cahier des charges du transport des pièces de A320

Nous pouvons comparer différents modes de transport pour répondre à ce Cahier des Charges. Pour les données du dirigeable, nous nous basons sur un dirigeable type « Flying Whales ».

	Bateau – BBC Fuji	Dirigeable
Vitesse moyenne [km/h]	26.5 (<i>marinetraffic.com</i>)	100
Longueur [m]	125.78	?
Largeur [m]	22.02	?
Distance approx [km]	7800	7800
Temps de la traversée [jours]	12.3	3.25
Puissance [kW]	70 000	5 000
Energie [kWh]	1 680 000	390 000
Equivalent essence (1 l = 9 kWh)	186 667	43 333

Tableau 5 – Principales caractéristiques du transport des pièces d'A320 par bateau ou dirigeable

Le dirigeable est donc 4x plus rapide, et près de 4.4 fois moins polluant que le bateau, et donc à priori plus économique en termes d'exploitation. Qu'est-ce qui explique donc que Airbus ait recours au bateau ?

Verrou	Explication
La charge utile	Les prochains projets de dirigeables en service qui arrivent permettront de transporter cette charge. Actuellement il faudrait 4 trajets pour que le dirigeable puisse tout transporter et cela représente donc une perte de temps, et une

	consommation en essence du même ordre de grandeur.
Le volume de la soute	Elle doit pouvoir accueillir toutes les pièces (volume exact mentionné dans le tableau) ; à l'heure actuelle, seuls les plus gros projets (Aeros de Aircraft etc.) mentionnent des soutes aussi grandes. On peut aussi envisager le transport de charges avec des câbles mais cela serait probablement plus compliqué (traversée transatlantique à basse altitude, et vitesse plus faible).
Le rayon d'action	Comment évolue-t-il avec la charge du dirigeable ? La plupart des données dont nous disposons indiquent que la distance de 7800 km est énorme avec une charge de plus de 30 t pour un dirigeable.
Le manque d'offre	Il n'y a concrètement aucune offre sur le marché crédible à laquelle Airbus pourrait aujourd'hui adhérer.

Tableau 6 – Désavantage du dirigeable sur le marché actuel

Pour conclure sur nos recherches concernant l'aspect bibliographique, le dirigeable semble avoir un marché à portée dans le futur du secteur aérien. Cela explique bien sûr l'émergence de nombreux projets de dirigeables de fret que nous comparerons dans un tableau comparatif.

Le dirigeable s'adresse plus à un transport de charge à haute valeur ajoutée dans le secteur industriel, vers des zones un peu plus isolées et moins facilement accessibles. Pour devenir compétitif, il se doit de relever de multiples défis (infrastructures au sol minimales, vitesse augmentée, charge emportée, ...) que nous détaillerons par la suite.

B. Méthode d'innovation

Pour pouvoir apporter une première réponse brève au problème posé, la méthode d'innovation appelé 9 écrans a été mise en place dans un premiers temps. Cette méthode permet de rendre compte de l'évolution temporelle du système étudié ainsi que de ses sous-systèmes et ses super-systèmes.

Elle permet ainsi de mettre en valeur le nombre important d'aspect à considérer dans le cadre de l'étude. Les aspects concernant la réglementation, les infrastructures ou encore le faible impact environnemental du dirigeable peuvent par exemple être cités.

	PASSE	PRESENT	FUTUR
SOUS-SYSTEMES	Structure, équipage, Gaz Porteur etc.	Structure, équipage, Gaz Porteur, avionique	Structure, équipage, Gaz Porteur, avionique, moyens de chargement/déchargement
SYSTEME	Dirigeables lent , sensible aux conditions météorologiques, peu performant face au développement des avions	Dirigeable souple à usage commercial et touristique + Projets de réhabilitation du dirigeable pour le transport de fret (hybride ou non)	Aérostat durable répondant à de nouveaux besoins (transport de charges lourdes et encombrantes, humanitaire...), propulsé à l'énergie propre
SUPER-SYSTEMES	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures • Opérabilité : Météo problématique / ATC inexistant / VTOL/STOL/ Ground Handling • Réglementation • Compétition • Besoins et marché 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures • Opérabilité • Réglementation • Besoin et marché 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures • Opérabilité • Réglementation • Besoin et marché • Changement climatique

Figure 5 – Tableau 9 écrans

Le tableau permet de diviser notre dirigeable en de nombreux sous-systèmes à prendre en considération (Structure, Equipage à bord ou au sol, Gaz Porteur, Approvisionnement etc.). De nouveaux éléments très importants font leur apparition à l'heure actuelle : avionique et systèmes embarqués, innovations technologiques en termes d'approvisionnement énergétique ... Dans le futur, un ensemble complet d'éléments devront être pris en compte : comment charger/décharger le dirigeable ? Comment le porter ? Quelle(s) innovation(s) ?

Dans la case super-systèmes, les éléments non inhérents au dirigeable mais qu'il faut nécessairement envisager sont cités (la liste n'est pas exhaustive). Ainsi on peut parler des infrastructures, de la certification du dirigeable et de la réglementation lors de ses opérations. Pour qu'il soit un succès, le dirigeable devra répondre aux besoins du marché. De même il devra prendre en compte le changement climatique, avec par exemple l'augmentation des turbulences, ou le réchauffement des températures qui changera les conditions opérationnelles.

A travers cette étude nous essayerons d'apporter des éléments de réponse à beaucoup de ces aspects (sans toujours prendre une décision), sans pouvoir tous les aborder.

C. Logique de conception du dirigeable

Cahier des Charges :

Nous établissons pour définir le cadre de cette étude un Cahier des Charges dont voici les principales caractéristiques :

Cahier des Charges	Précisions
---------------------------	-------------------

Payload [t]	Charge utile ≥ 20 t pour nos applications en général
Range [km]	Le rayon d'action voulu par le client (à pleine charge)
Vitesse [km/h]	Vitesse maximum (l'ordre de grandeur pour un dirigeable actuellement étant de 100-150 km/h)
DISA [°C]	Écart avec l'atmosphère standard : dans quelles conditions météorologiques, à quelle altitude, température veut-on que notre dirigeable puisse opérer ?

Tableau 7 - Input du code - CDC -

Il faut noter que de nombreux autres paramètres pourront être modifiés (conditions de stockage hydrogène, rendements des composants installés etc.). Ceux résumés ici correspondent aux Top Level Airship Requirements.

Nous devons aussi considérer des contraintes de design. Voici celles que nous avons choisi :

Contrainte	Précision
Puissance Moteur	Puissance Moteur \geq Puissance Moteur nécessaire pour atteindre 150 km/h * 1.1
Equilibre en croisière	Force d'Archimède \geq masse du dirigeable * g
Masse de Fuel	Masse nécessaire pour réaliser le range demandé * 1.15

Tableau 8 - Contraintes de Design

La conception s'appuie sur plusieurs paramètres de départ. Par simplification, nous allons considérer toutes les autres grandeurs de design dépendantes de ces paramètres dans un premier temps.

Des relations simples peuvent être proposées avec l'aide de nos recherches bibliographiques (nous détaillerons plus loin les hypothèses).

Paramètres de Design
Longueur du Dirigeable
Puissance des moteurs
Masse de fuel

Tableau 9 - Paramètres de Design

L'idée générale est alors de "diviser" notre dirigeable en différentes parties. Chaque partie concentrera des fonctions de calcul différentes. L'architecture retenue est en trois gros blocs ; la **structure** (gondole + enveloppe + réservoirs de lest etc.), l'**approvisionnement énergétique** (pile à combustible, hydrogène etc.), et enfin la **propulsion** (moteur, hélices etc.).

L'organisation est la suivante :

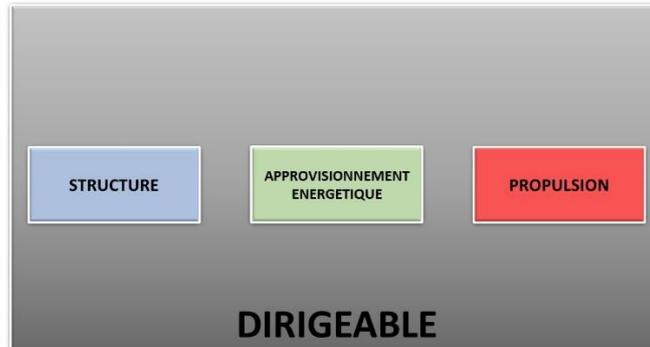


Figure 6 - Classes de notre programme regroupées en 3 modules

II. Etude de l'existant

A. Fonctionnement du dirigeable

Le dirigeable est catégorisé comme un « plus léger que l'air » lorsqu'il opère. Il est donc considéré en tant qu'aéronef comme un aérostat. A la différence du ballon, le dirigeable est lui motorisé et est en plus muni de gouvernes et d'empennages permettant d'assurer le contrôle du dirigeable.

La sustentation du dirigeable est principalement assurée par la poussée d'Archimède ce qui permet par ailleurs de minimiser le besoin énergétique pour le maintien en vol du dirigeable. En pratique l'enveloppe du dirigeable contient un gaz porteur plus léger que l'air, historiquement de l'hydrogène puis de l'hélium. Le dirigeable composé de son enveloppe remplie de gaz possède ainsi un poids inférieur au poids du volume d'air déplacé par l'enveloppe permettant ainsi sa sustentation.

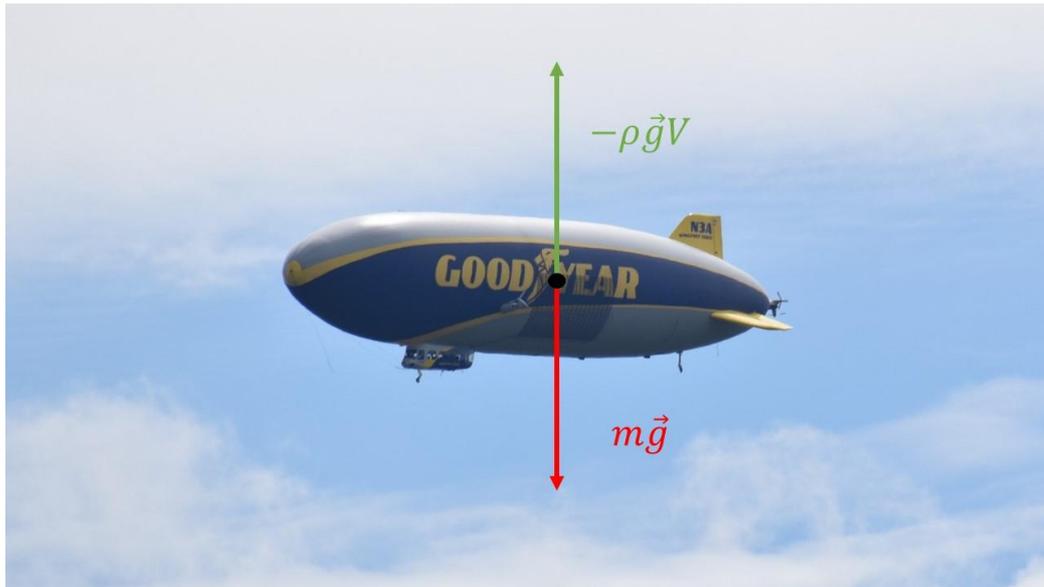


Figure 7 - Dirigeable en vol - Image d'origine : pixabay.com (libre de droits)

Quand la température décroît ou que le dirigeable perd de l'altitude, le gaz porteur se contracte et diminue son volume. Quand la température monte ou que le dirigeable prend de l'altitude, le gaz porteur se détend et augmente son volume à cause de la diminution de la pression extérieure. Pour maintenir la pression à l'intérieur de l'enveloppe en toute situation, un système de ballonnets se gonflant d'air à l'intérieur de l'enveloppe est implémenté.

Par exemple, avec la prise d'altitude, la pression exercée sur les parois de l'enveloppe augmente et les ballonnets se dégonflent pour maintenir la pression à l'intérieur de l'enveloppe et éviter un éclatement. À l'inverse, avec la perte d'altitude, les ballonnets se gonflent en prélevant l'air sur les hélices pour éviter un affaissement du dirigeable et maintenir la surpression interne.

Le contrôle vertical du dirigeable est effectué en gonflant plus ou moins les ballonnets avant ou arrière à l'aide d'une valve d'air. Il est aussi notable que le gonflement des ballonnets est plus difficile que leur dégonflement. Il est également important de noter qu'il existe trois types de dirigeables distincts : **les dirigeables souples, les dirigeables semi-rigides et les dirigeables rigides**. Le fonctionnement des ballonnets dépend de la rigidité de la structure du dirigeable.

<p>Dirigeable Souple</p>	<p>WDL 1B (WDL Luftschiffgesellschaft mbH)</p>  <p><i>jetphotos.net / Andres van der Berg</i></p>
--------------------------	--

<p>Dirigeable Semi-rigide</p>	<p style="text-align: center;">NT (Zeppelin)</p>  <p style="text-align: center;"><i>jetphotos.net / Andres van der Berg</i></p>
<p>Dirigeable Rigide</p>	<p style="text-align: center;">LZ129 Hindenburg (Zeppelin)</p>  <p style="text-align: center;"><i>https://fr.wikipedia.org/wiki/LZ_129_Hindenburg</i></p>

Tableau 10 - Différents types de structures de dirigeables

Les dirigeables souples parfois appelés « blimp » possèdent une enveloppe souple contenant directement le gaz porteur ainsi que d’unique ballonnets placés au sein de l’enveloppe à l’avant et à l’arrière. Ces dirigeables sont plutôt destinés à un usage commercial et touristique.

Les dirigeables semi-rigides possèdent également une enveloppe souple et ils se distinguent grâce à une structure interne partielle rigide qui soutient la partie inférieure du ballon. Le fonctionnement des ballonnets est identique à celui des dirigeables souples.

Seuls les dirigeables rigides possèdent un système de ballonnets légèrement différent puisque les ballonnets contiennent dans ce cas directement le gaz porteur. Ils sont de plus placés dans une armature rigide dans laquelle les nacelles, les gouvernes et les empennages sont liés rigidement.

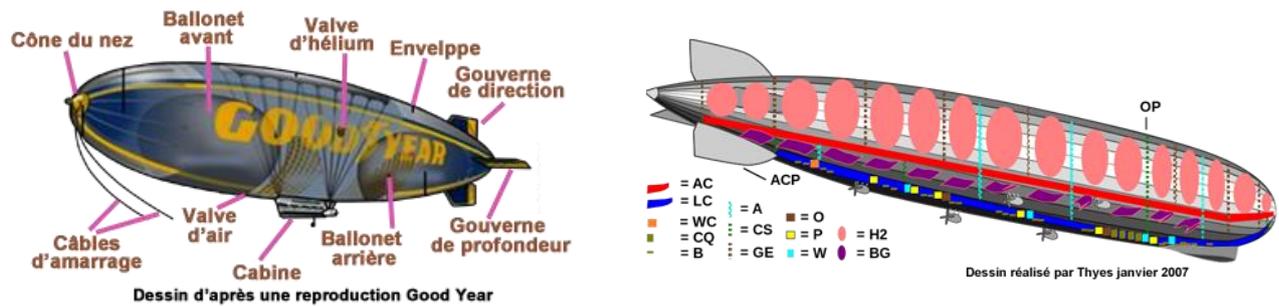


Figure 8 - Dessins de structure des dirigeables - lavionnaire.fr

Pour pouvoir gérer l’atterrissage et plus particulièrement le décollage du lest est également embarqué, traditionnellement de l’eau. Le largage de lest permet d’augmenter la flottabilité du dirigeable au décollage. En vol du lest indésirable peut parfois être récupéré, par exemple du gel dû à de mauvaises conditions météorologiques. Certains dirigeables utilisaient de plus des gouttières pour récupérer de l’eau en vol mais cette technique est également dépendante des conditions météorologiques.

B. Comparatif des dirigeables

Nous commençons les analyses sur les dirigeables par compiler leurs informations principales dans un tableau dit “comparatif” (cf. fig.6). Ce dernier figure en Annexe 1 du rapport. Il est assez grand pour être correctement incorporé au rapport et sera aussi envoyé en pièce-jointe avec ce rapport.

On liste les types (structure rigide, semi-rigide, souple, ...), missions (cargo, passagers, surveillance, ...), tailles (dimensions et volumes), et leur performance (vitesse croisière, vitesse maximum, plafond...) entre autres. Certaines valeurs sont introuvables sur la documentation en ligne et donnent lieu à des cases blanches. Des grands noms comme le Zeppelin LZ129, Zeppelin NT développé au début des années 2000, ou le futur Flying Whales figurent dans cette liste. Une fiche résumée de chaque dirigeable présenté est disponible en Annexe 2 du rapport.

À partir de ce tableau, on peut comparer les critères des dirigeables et on peut effectuer d’autres calculs et études sur ces informations. Par exemple, on peut facilement calculer la surface de l’enveloppe pour les dirigeables approchés par une forme ellipsoïde à partir des informations de dimensions. On utilise chaque vitesse et la traînée calculée avec quelques hypothèses (surface de l’enveloppe, coefficient de frottement, ...) pour calculer la puissance minimale requise.

Nom du dirigeable	WDL 1B	LZ 129	NT	LCA60T
				
	<small>jpgphoto.net / Andres van der Berg</small>	<small>AP Photo</small>	<small>Wikipedia</small>	<small>Flying Whales</small>
Fabricant	WDL Luftschiffgesellschaft mbH	Zeppelin	Zeppelin	Flying Whales
Souple/rigide/semi-rigide	Souple	Rigide	Semi-rigide	Rigide
Civil ou militaire	Civil	Civil		Civil
PAX ou cargo ou mix	Pub	PAX		Cargo
Stockage energie		Diesel		Hybride élec
Longueur [m]	60	245	75	150
Diamètre [m]	19.3	46.8	19.5	60
Hauteur [m]	16.4	44.7	17.4	42
Volume soute [m³m]				
Volume enveloppe [m³]	7200	190000	8425	186000
Plafond [m]	1800	300	2600	3000
Vitesse croisière [km/h]	65	100		100
Vitesse max [km/h]	105	135	125	100
Durée typique mission	22 h	48 h		
Puissance	300 Cv	890 Kw / moteur		1 600kW jusqu'à 5 000kW (2 175Cv to 6798Cv)
N° de moteurs	2	4	3	7
Rayon d'action [Km]		10000	900	1000
Charge utile [t]	1.3	11	1.9	60
Ratio charge utile/longueur	0.022	0.045	0.025	0.4
Matériaux	tissu enduit / Résistance de 4000 daN/m / durée de vie : 20 ans		Alu et fibre de carbon pour structure, câbles en aramide	
Commentaire structure (trilobée etc.)		Structure conçue pour hélium		
Gaz utilisé	Hélium	Hydrogène	Hélium	Hélium
Stockage dirigeable	Amarré à camion par ex	Hangars		Hangars/ capable de vol stationnaire
Infrastructure au sol nécessaire				
Personnel au sol nécessaire	18			
PAX	7	72		0
Pilote/Equipage	1	52		2 pilotes + 1 operateur

Figure 9 - Un aperçu sur le tableau comparatif des dirigeables

Comme on a les dimensions des dirigeables, on compare les tailles sur un graphe (cf figure 7). Et pour le plafond de chaque dirigeable, nous avons essayé de comparer les différents dirigeables (cf figure 8). On indique également la charge utile de chaque dirigeable en dessous d'eux. Dans l'infographie ci-dessous, l'axe y gauche montre l'altitude et l'axe y droit montre la masse volumique de l'air et la pression.

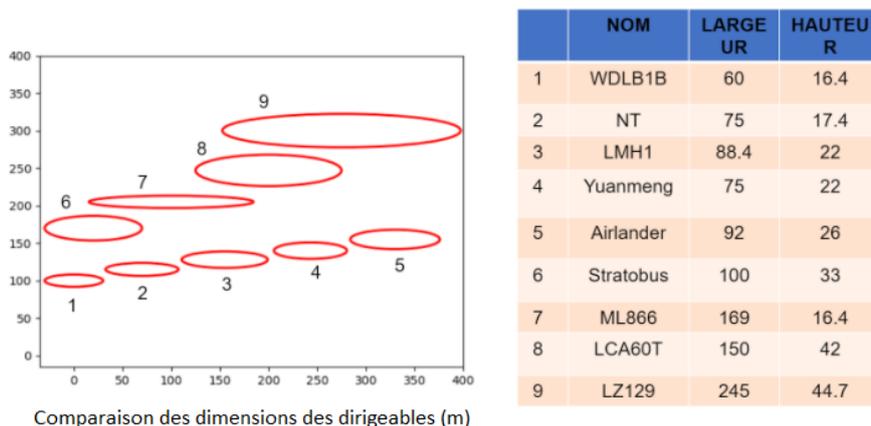


Figure 10 - Comparaison des tailles

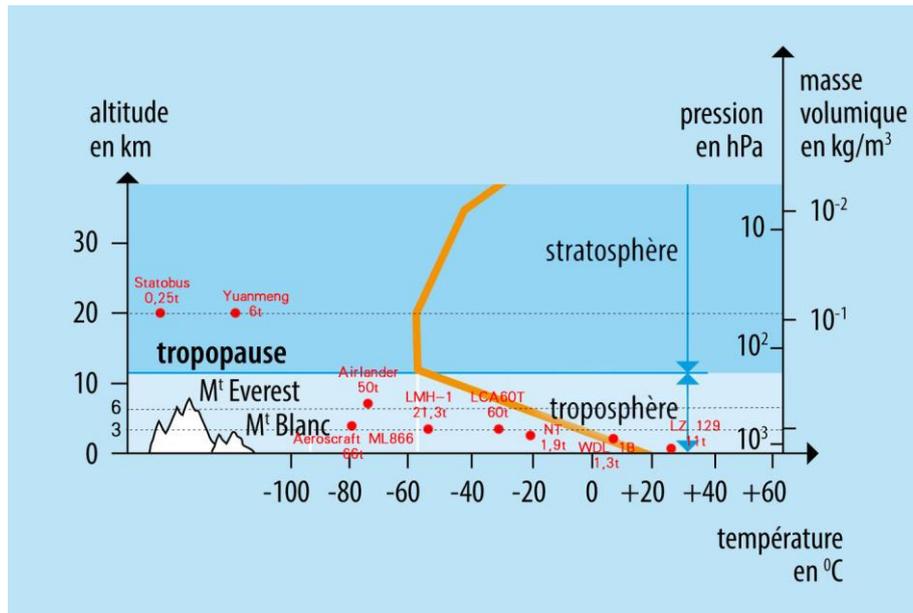


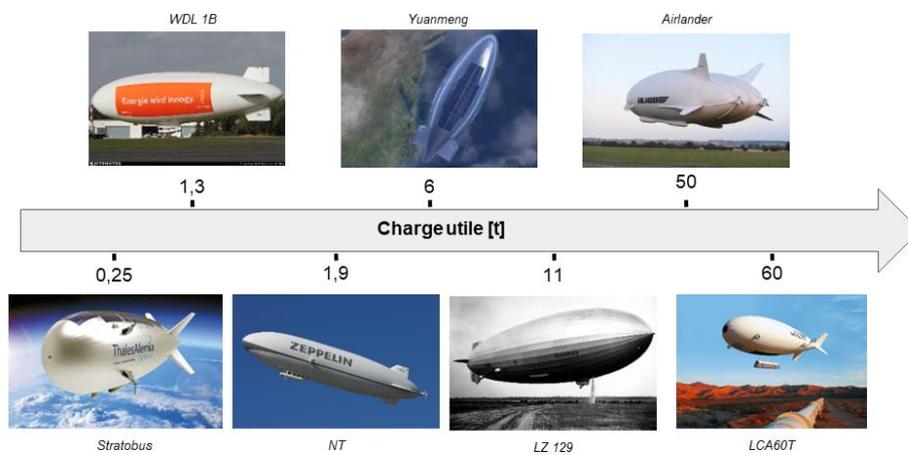
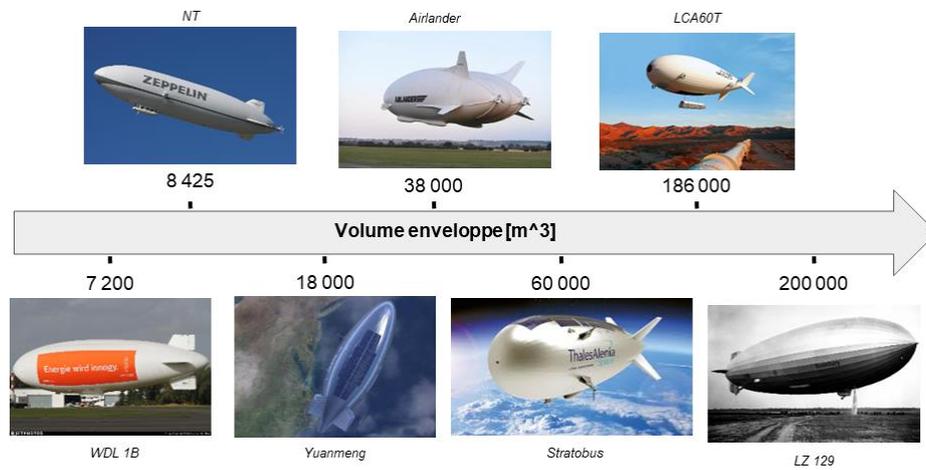
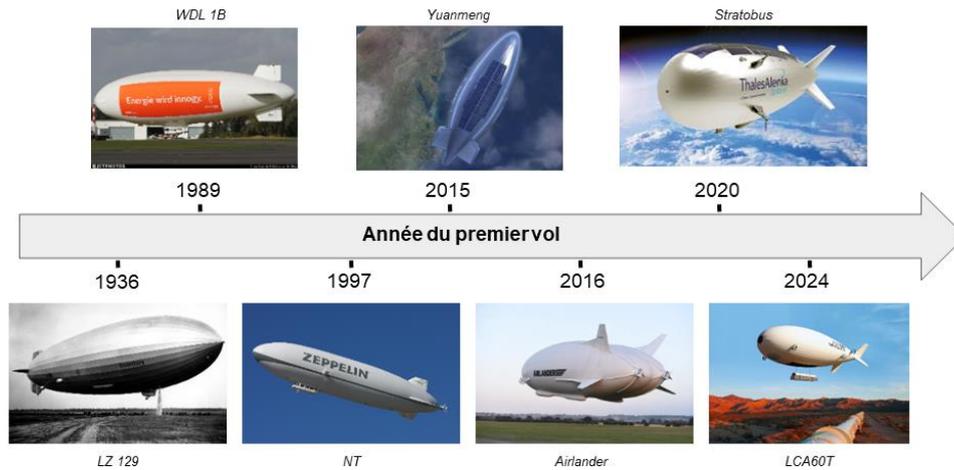
Figure 11 - Infographie des dirigeables en croisière - Image de fond - Pinterest [7]

Un autre travail a été réalisé avec des chronologies et fiches résumés. Pour chaque dirigeable, on donne les caractéristiques les plus importantes dans les fiches. Il y a son utilisation pour le fret ou le transport de passagers, l'année du premier vol, le type de structure, son volume, les dimensions et le plafond. La totalité de ces fiches est en Annexe 2.



LZ 129	
Zeppelin	
Transport du PAX et cargo	
Premier vol	1936
Structure	Rigide
Volume Enveloppe [m ³]	200 000
L * H * D [m]	245 * 44.7 * 46.8
Charge utile [t]	11
Plafond [m]	300 ?

Figure 12 - Une fiche résumée de LZ129



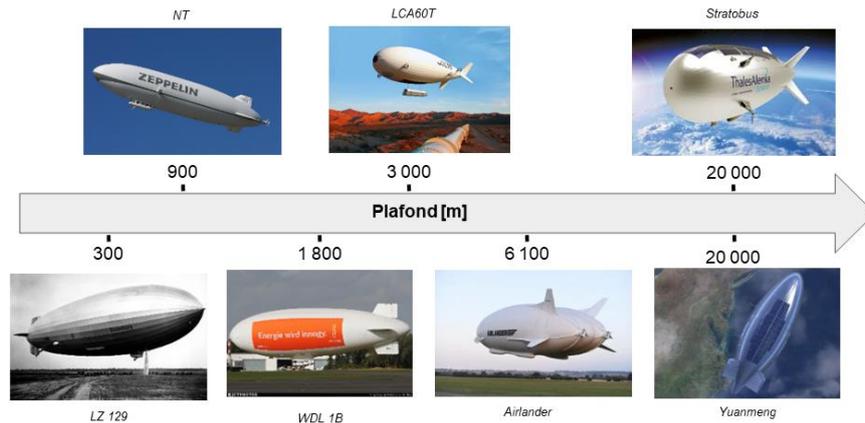


Figure 13 - Infographies résumant les principales informations sur les dirigeables

C. Ground Handling et infrastructures

Cette partie aborde les aspects infrastructures au sol, ground handling (chargement ou déchargement notamment) des dirigeables en fonction de leur type.

Décollage, atterrissage :

Cela va dépendre du dirigeable en lui-même. A-t-il besoin de s'élancer pour décoller, ou peut-il faire un décollage vertical ? Peut-il être stocké au sol même, fixe ou doit-il être amarré ?

Traditionnellement, un Zeppelin des années 30 nécessitait une vingtaine de personnes au sol au moins pour décoller ou atterrir.

Pour le décollage vertical ou horizontal, cela dépend de si le dirigeable est hybride ou non. Un dirigeable hybride accorde une partie importante de sa portance à l'aérodynamique (typiquement 20%), et le reste au gaz plus léger que l'air (80%). Il nécessitera de s'élancer comme un avion pour décoller. Il a besoin d'une piste, même si elle est courte (STOL : Short Take Off and Landings). Pour le projet LMH-1 de Lockheed-Martin, capable d'emporter environ 20 tonnes de charge utile, il lui faut une piste (non forcément pavée) de 700 m, sur terre ferme ou sur eau). Opérationnellement il présente l'avantage d'être fixe au sol par un système de ACLS : Air Cushion Landing System (les 4 ventouses que l'on peut apercevoir sous ce prototype de dirigeable, équipées elle-mêmes de moteurs qui inversent leur poussée une fois le stationnement rejoint pour plaquer le dirigeable au sol et ainsi s'affranchir de mât ou câbles de fixation).

Pour l'espace de stationnement il faudra quand même prévoir un cercle au-cas-où le dirigeable bouge s'il est soumis à du vent. Ces dirigeables sont généralement dits semi-rigides dans la mesure où l'enveloppe est gonflée par le gaz porteur et sa forme ne provient pas d'une structure.



Figure 14 - Prototype du LMH1 - ChipTV

Un dirigeable non hybride (le Zeppelin NT des années 2000 par exemple) pourra lui effectuer des atterrissages et décollages verticaux (VTOL). Il ne nécessite donc pas de piste. Toutefois, il doit être amarré avec précision à un mât, et est loin d'être fixe une fois amarré. Ses roues touchent le sol mais il est porté au gré du vent et nécessite donc un cercle de rayon égal à sa longueur autour du mât comme espace de stationnement.

Ci-dessous un Zeppelin NT amarré (photo Zeppelin). La cabine touche généralement le sol pour embarquer et débarquer les passagers. Le zeppelin est en pivot avec le mat une fois amarré.



Figure 15 - Zeppelin NT - photo de Zeppelin

Une autre technologie existe depuis 2015 après un brevet développé par la société américaine Aeros. Il s'agit d'un projet de dirigeable (Aeroscraft, détaillé dans nos recherches bibliographiques) qui est lui aussi équipé de ACLS (Air Cushion Landing System) comme le LMH-1 de Lockheed Martin. Toutefois, il n'a pas besoin de créer de la portance aérodynamique et de s'élancer sur une piste, ni de lestage par eau. La compagnie a développé un système appelé COSH (Control of Static Heaviness) qui consiste en la présence de tanks de pressurisation d'hélium dans l'enveloppe. Lors de l'atterrissage, l'hélium est comprimé et stocké dans ces tanks, créant une dépression dans l'enveloppe et le remplissage de ballons d'air. La portance du dirigeable est ainsi réduite, et il n'y a pas besoin de lâcher du lest. Ce dirigeable est rigide, et donc plus complexe à construire.



Figure 16 - Prototype de Aeroscraft par Aeros (photo : Aeros)

	Hybride	Non Hybride	Mix (Aeroscraft)
Piste	Oui (700-800 m), non pavée	Non	Non
Comment reste-t-il fixe par rapport au sol	ACLS : Air Cushion Landing System qui inverse la poussée moteur et fixe le dirigeable au sol	Mât d’amarrage, câbles reliés au sol : ne reste pas forcément fixe et bouge au gré du vent	ACLS : Air Cushion Landing System
Chargement/Déchargement Lestage	Oui (on charge le dirigeable d’eau en le déchargeant)	Oui (même méthode). Pour des dirigeables à passagers comme le NT Zeppelin, seuls quelques sacs d’eau par passager débarqué ou embarqué.	Non de par la technologie COSH (Control of Static Heaviness) : pas d’emport de lest, ground handling réduit (pas de nécessité de remplir d’eau)

Tableau 11 - Comparaison du ground handling et manœuvres au sol des dirigeables

Les infrastructures de stockage et fabrication n'ont pas été détaillées ici. Il s'agit de hangars, qu'on peut construire ou dans un premier temps ré-utiliser ceux du siècle précédent (il y en a beaucoup en Allemagne par exemple). Il faut avoir à l'esprit que la construction ou l'utilisation de tels bâtiments aura un impact sur notre projet, d'autant plus qu'ils sont volumineux.

D.Sensibilité météorologique

<i>Facteurs Principaux</i>	Répartition des accidents (%)	Répartition des pertes humaines (%)
<i>Conditions météorologiques dégradés</i>	31	50
<i>Défaillance technique</i>	20	17
<i>Incendie</i>	18	22
<i>Erreur humaine</i>	15	3

Tableau d'accidentologie des dirigeables, Crédit : Thibault Proux

Figure 17 - Tableau d'accidentologie des dirigeables

Fig. 21 -

Un des désavantages des dirigeables est leur sensibilité à la météo. Le facteur météorologique peut être considéré comme le plus critique lors de l'opération de ces appareils. Les dirigeables sont beaucoup plus soumis aux conditions météorologiques que ne l'est un plus lourd que l'air. Les principales limitations vont porter sur le vent et sur le type de précipitations. Cela s'explique par la grande prise au vent engendrée par les enveloppes volumineuses des dirigeables, et par leur faible vitesse et manœuvrabilité. Les dirigeables souples sont beaucoup plus sensibles aux conditions météorologiques que les autres types des dirigeables.

Sensibilité au vent et aux précipitations :

Le vent rentrera principalement en jeu pour les phases proches du sol : décollage, atterrissage et manœuvres au sol. Les précipitations plutôt sur la flottabilité qui est critique en vol, un ajout d'eau, ou de glace sur la machine peut alourdir notablement le dirigeable qui a une portance aérostatique. Les dirigeables ne peuvent pas décoller ou atterrir dans des vents forts. Comme tout aéronef, l'atterrissage constitue l'une des phases de vol les plus critiques. La sensibilité des dirigeables aux aléas météorologiques accentue davantage la complexité de cette phase. Pour le stockage et la maintenance, les hangars fournissent une protection contre les aléas météorologiques. L'entretien extérieur de ces dirigeables pose de nombreuses contraintes et une exposition prolongée aux conditions météorologiques érode la durée de vie des dirigeables.

En vol, il est limité par son plafond (5000 à 9000 pieds / 1500 à 2700 m par ex) et donc soumis aux vents de la troposphère. Il vole lentement dans la basse atmosphère alors les tempêtes sont moins

violentes. Mais une forte prise au vent le rend très vulnérable aux rafales. Au-delà de 20 nœuds de vent (environ 37 km/h), le dirigeable n'est pas manœuvrable.

Sa vitesse de croisière limitée le soumet plus que les jets aux vents forts ce qui va influencer la durée de vol, le planning des vols et la navigation. D'un autre côté, elle donne plus de marge aux pilotes pour éviter le mauvais temps. Sa structure doit résister à de nombreuses contraintes induites par les cisaillements de vents, les rafales, les précipitations, etc.

Neige et glace :

La neige et la glace peuvent causer une masse additionnelle et la modification de l'aérodynamique. Pour le dirigeable souple, il a tendance à laisser tomber la neige ou la glace pendant le vol.

Il faut développer des systèmes d'anti-icing propres au dirigeable si on vole dans des conditions givrantes. Pour les moteurs, les processus appliqués aux moteurs des avions actuels devraient suffire.

Orage :

Le facteur incendie à cause de l'orage, à regrouper avec le facteur explosion, est majoritairement lié à l'utilisation de l'hydrogène comme gaz porteur, les navires comme le Hindenburg étaient remplis d'hydrogène qui brûlait.

Les petits dirigeables sont protégés (un conducteur qui fait la longueur du haut de l'enveloppe) mais cela se complique avec les grands dirigeables. La technologie de protection contre l'orage n'est pas encore à point.

E. Réglementation et certification

Il n'existe pas encore à l'heure actuelle de réglementation et de certification publiée exclusivement dédiée aux dirigeables et en particulier aux LCA (Large Capacity Airship). Cependant deux réglementations ont été étudiées par la JAA (Joint Aviation Authority) mais n'ont jamais été publiées et sont restées au stade de projets lorsque la JAA est devenue l'EASA en 2002. Il s'agit spécifiquement des **CS-30T** (Transport Airship) et **CS-30N** (Commuter Airship).

Le projet de CS-30T est à l'origine initié par la société CargoLifter en 1996 prévoyant la construction d'un dirigeable de transport lourd. Les premiers échanges concernant la création d'un texte officiel pour la certification des dirigeables permettent d'aboutir à la TAR (Transport Airship Requirement) en 2000. Cependant la société CargoLifter abandonna le projet pour des raisons financières et la TAR resta au projet de CS-30T par manque d'intérêt d'autres constructeurs.

Concernant le projet de CS-30N, il est issu du LFLS (Lufttüchtigkeitsforderungen für Luftschiffe) qui est un code de certification convenu seulement avec la LBA (Luftfahrt Bundesamt, équivalent allemand de la DGAC). Les dirigeables certifiés par ce code, notamment les Zeppelin NT, ont été développés avant la création de l'EASA ce qui explique pourquoi la CS-30N n'a pas été publiée.

Pourtant aujourd’hui de nombreux projets de réactualisation de LCA voient le jour. On peut particulièrement citer le projet **LCA60T** de la société Flying Whales. De ce fait, pour établir la certification de ce projet, Flying Whales ainsi que d’autres constructeurs tels Zeppelin ou encore HAV travaillent avec l’EASA pour implémenter une réglementation pour les LCA. Initialement basée sur la CS-30T, l’idée fut abandonnée car peu applicable à ce type de projet. Une réglementation qui doit être publiée dans les prochains mois sous la forme de SC (Special Condition) et qui se base sur des objectifs de sécurité et de performance plutôt que sur des contraintes de design permettant de faciliter la certification des nouveaux projets à venir est en élaboration.

On peut de plus associer le trafic du dirigeable à un trafic d’aviation général. En effet il s’agit de machines de type VFR ou VFR de nuit volant en dessous du FL100 à une vitesse semblable à celle d’un ULM soit environ 100 km/h. Certains projets de dirigeables prévoient un niveau de vol supérieur au FL600 mais il s’agit de dirigeables ayant pour mission la surveillance ou étant liés aux télécommunications. Le dirigeable n’a donc pas les contraintes de route d’une machine IFR et vole bien en dessous du niveau de vol en croisière d’un avion de ligne. Bien sûr, même sans ces contraintes, les règles de l’air doivent continuer à s’appliquer rendant ainsi le dirigeable prioritaire face aux aérodynes plus lourd que l’air.

Certains dirigeables particuliers ont cependant réussi à avoir un plan de certification validé par une autorité. C’est le cas par exemple du LMH-1 de la société Lockheed Martin qui en 2013 a proposé un plan de certification validé par la FAA. Cette documentation se décompose en plusieurs sections et un exemple de critères pour les sections Flight, Structure, Design and construction est présenté ci-dessous.

FLIGHT	
GENERAL	<input type="checkbox"/> Removable ballast can be used but the use of it must considered inertia criteria, mass and center of gravity effects,
PERFORMANCE	<input type="checkbox"/> Takeoff for airships equipped with ACLS required to clear a 50 ft obstacle for each combination of total mass, most unfavorable center of gravity position (same for landing) <input type="checkbox"/> In case of engine failure the airship must be capable to maintain the level flight and zero rate of descent following failure of the most critical engine: ballast or helium may be dropped <input type="checkbox"/> For airships intended to load and unload cargo or ballast in flight, hovering or on the ground, operating limit must be established with the most critical configuration
CONTROLLABILITY AND MANEUVERABILITY	<input type="checkbox"/> Airships must be safely controllable and maneuverable during takeoff, climb, level flight, descent, landing, level flight with most critical configuration and in flight cargo exchange <input type="checkbox"/> Longitudinal control : nose-down pitch change out of a stabilized climb (or descent) with 30° nose-up (or nose-down) deck angle at the most critical airspeed <input type="checkbox"/> Directional control : there must be enough rudder control to enter and recover any turns appropriate to the conditions of certification and must be

	<p>demonstrated that directional control can be maintained with and against asymmetric engine thrust</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> It shall be possible to land without assistance from ground personnel <input type="checkbox"/> Emergency landing technique must figure in the airship flight manual
TRIM	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> It shall be possible to trim the airship in all conditions of loading, configuration, speed and power
STABILITY	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> The airship must be sufficiently stable in pitch and yaw axes, must be controllable with normal use of PFD
MISCELLANEOUS FLIGHT REQUIREMENTS	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Each part of the airship must be free from excessive vibration <input type="checkbox"/> A mean must be provided for the pilot to determine and control the envelope pressure <input type="checkbox"/> Satisfactory ground handling procedures must be developed assuming the specified minimum flight and ground crew <input type="checkbox"/> Procedures and performance information of the airship at various levels of turbulence must be established for combinations of mass and static heaviness <input type="checkbox"/> Lifting gas pressure must remain within its limits during flight in rough air

STRUCTURE	
GENERAL	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> The structure must be able to support limit loads without detrimental permanent deformation <input type="checkbox"/> The structure must be able to support ultimate loads without failure for at least 3 seconds <input type="checkbox"/> The mass of the airship is its mass with the envelope deflated plus the mass of the gas used to inflate the envelope
FLIGHT LOADS	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Limit engine torque specified in the document <input type="checkbox"/> Engine mounts and supporting structure must be designed to withstand the limit engine torque load imposed by engine malfunction, effects of sudden engine stoppage
CONTROL SURFACE AND SYSTEM LOADS	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> System must be designed for the maximum effort of the pilot or autopilot. Each flight control system and its supporting structure must be designed for limit loads. Must provide a rugged system for service use. <input type="checkbox"/> Secondary controls, such as manually operated air or lifting gas valves as well as freight loading system controls, must be designed for the maximum forces that a pilot or crew member is likely to apply to those controls.
EMERGENCY LANDING CONDITIONS	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> The structure must be designed to give each occupant every reasonable chance of escaping serious injury in a minor crash landing when proper use is made of seat belts <input type="checkbox"/> The airship, including its propulsion system, although it may be damaged in emergency landing conditions, must be designed to protect each occupant

DESIGN AND CONSTRUCTION

<p>GENERAL</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> The suitability and durability of materials used for parts, the failure of which could adversely affect safety, must be established on the basis of experience or test <input type="checkbox"/> Each part of the Airship structure must be suitably protected against deterioration or loss of strength in service due to any cause, including weathering, corrosion and abrasion <input type="checkbox"/> If VH is greater than 100 kts, the Airship must be designed to assure capability of continued safe flight and landing after impact with a 10 pound (4.5 kg) bird
<p>ACLS</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> The main ACLS must be designed so that if it fails due to overloads during takeoff and landing the failure mode is not likely to cause the spillage of enough fuel from any part of the fuel system to constitute a fire hazard
<p>FIRE PROTECTION EVALUATION</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Hand fire extinguishers depending on passenger capacity <input type="checkbox"/> Thermal/acoustic insulation material installed in the gondola must meet the flame propagation test requirements <input type="checkbox"/> In each area where flammable fluids or vapors might escape by leakage of a fluid system, there must be means to minimize the probability of ignition of the fluids and vapors <input type="checkbox"/> Electrical cables, terminals, and equipment in designated fire zones that are used during emergency procedures, must be at least fire resistant. <input type="checkbox"/> Main power cables (including generator cables) must be designed with flexibility in the routing to minimize the amount of deformation and stretching to prevent failure and must be isolated from flammable fluid lines
<p>AIRSHIP SPECIFICS</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Non-rigid airships envelope must be designed to be pressurized and maintain sufficient superpressure to remain in tension while supporting the limit design loads for all flight conditions and ground conditions <input type="checkbox"/> The ballonnet system must be designed so that the static trim capabilities of the system about the center of buoyancy of the Airship are equally divided between the fore and aft ballonets, if provided <input type="checkbox"/> A means must be provided to permit emergency deflation of the envelope on the ground during emergency evacuation of the occupants <input type="checkbox"/> The nose of the envelope must be designed to prevent wrinkling due to high speed flight <input type="checkbox"/> Lifting gas Valves: at least two valves must be provided, must be designed for both manual and automatic operation, be operable at specified pressure settings at all attainable air speeds, and be designed to open and close positively and be prevented from sticking and/or freezing <input type="checkbox"/> Air Valve(s): at least one air valve must be provided to discharge air from each ballonnet <input type="checkbox"/> The lifting gas must be non-flammable, non-toxic and non-irritant <input type="checkbox"/> The hoisting/sling load system is designed for static limit loads derived from the maximum suspended masses and the load is applied in the vertical direction and in any direction making an angle of 30° relative to the vertical <input type="checkbox"/> During the cargo transfer, the kinetic energy of the suspended mass due to oscillations in combination with the dynamics of the hovering Airship and the lowering speed of the cargo hoist does not endanger the Airship's controllability

	<input type="checkbox"/> Ropes, cables and/or other devices attached to the lowered suspended mass for longitudinal and lateral adjustment of the precise settling and positioning of the mass must be designed to absorb all inertial forces due to the dynamics addressed in
--	--

Tableau 12 - Résumé de la certification appliquée au LMH-1 par la FAA sur proposition de Lockheed Martin

Même si l'avancement de ce projet n'a pas dépassé le stade du prototypage, l'étude de ces critères de certification permet de mettre en valeur certains points explicités plus tard sur lesquels il est nécessaire de se focaliser lors de la construction d'un futur dirigeable.

III. Choix technologiques

A. Premiers choix

Gaz Porteur :

Le benchmark des technologies actuelles ou passées offre deux choix de gaz porteur : l'hydrogène et l'hélium. Dans l'imaginaire collectif, l'hydrogène est lié à l'accident du Zeppelin LZ129, aussi appelé 'Hindenburg', le 6 mai 1937 à New York. C'est un gaz très inflammable qui de ce fait peut porter atteinte à la sécurité.

En termes de propriétés, l'hydrogène reste deux fois plus léger que l'hélium. Toutefois, il y a l'aspect sécuritaire (l'hydrogène est très inflammable, contrairement à l'hélium), mais aussi d'approvisionnement à considérer.

L'approvisionnement en Hélium et en Hydrogène est un processus stratégique. Déjà à l'époque, si le LZ129 volait à l'hydrogène, c'est en partie parce que les Etats-Unis avaient fait un embargo sur l'hélium exporté au régime nazi [5].

L'hélium est rare sur Terre. Au fur et à mesure que sa disponibilité s'amointrit, il devient de plus en plus une ressource stratégique. Selon Ariel Fenster, publié par l'agence SciencePresse le 31/01/2011 [6], il est possible que d'ici 30 ans, sans augmentation du prix de l'hélium, ce gaz ait disparu sous forme naturelle pour extraction. A l'heure actuelle la demande en hélium (électronique, refroidissement, levages de ballons) surpasse l'offre.

La synthèse de l'hélium est possible, mais beaucoup trop complexe et peu viable.

Le tableau suivant résume les principaux arguments en faveur de chaque gaz porteur :

	<i>He</i>	<i>H₂</i>
Approvisionnement et aspect environnemental	Deviens peu à peu une ressource stratégique / les	Présent à l'état naturel mais exploitation non économique/

	réserves naturelles ont tendance à s'épuiser	Mode de productions polluants (reformage de gaz naturels, gazéification de charbon) mais électrolyse d'eau envisageable si électricité d'origine renouvelable : l'H2 ainsi produit est 4x plus cher cependant
Economie	Cher	Plus abordable
Sécurité	Ininflammable	Inflammable : mais les technologies pour le rendre "sûr" sont à portée
Capacité de portance	1,02 kg / m3	1,1 kg / m3

Tableau 13 - Comparaison Hélium et Hydrogène

A l'horizon 2030-2035, il semble viable de voler à l'Hélium. Toutefois, c'est une ressource qui se raréfie à grande vitesse et dont le prix risque d'augmenter. D'un autre côté, la production actuelle d'hydrogène, dont l'extraction à l'état naturel est non viable économiquement, est très polluante et à base d'énergie fossile. La technologie qui permettra de rendre sûr l'hydrogène est abordable et sera probablement bientôt développée.

Il nous semble plus prudent à l'heure actuelle de tabler sur un développement à l'hélium, en gardant en tête tout ce qui a été dit précédemment.

Le plus prudent serait de développer une gamme de dirigeables qui peut facilement adapter sa fabrication à l'un ou l'autre des gaz.

Stockage d'énergie :

Nous avons choisi de fonctionner avec des moteurs électriques, et d'explorer la piste de l'hydrogène comme stockage d'énergie. Il nous paraissait important de s'éloigner du fuel qui pollue beaucoup opérationnellement. D'un point de vue environnemental, l'hydrogène est très intéressant à condition de s'assurer de sa production propre. Ce n'est pas encore le cas aujourd'hui, l'hydrogène étant produit à partir de reformage de gaz naturel dans 96% des cas [8]. La forme "propre" serait une filière d'électrolyse alimentée par de l'énergie renouvelable. Aujourd'hui cette technique est peu pratiquée car chère. Avec l'amenuisement des ressources naturelles et l'explosion de l'utilisation de l'hydrogène, cela pourrait changer.

Ce-dernier pourrait être stocké sous forme gazeuse ou liquide, chaque forme ayant ses propres avantages et inconvénients (une étude bibliographique plus poussée sur les réservoirs de stockage de l'hydrogène a été réalisée en Annexe 3). La forme gazeuse est à privilégier probablement, en raison de la faible consommation du dirigeable (plus légère mais moins compacte). Les détails du stockage sont à retrouver en Annexe 3.

Pourquoi passer par l'hydrogène et des moteurs électriques ?

Cela nous permet d'utiliser une pile à combustible. Celle-ci consomme l'hydrogène et délivre une tension en sortie qui alimente les moteurs électriques.

Elle a aussi l'intérêt de donner beaucoup d'eau en sortie (1g d'H₂ donnera 9g d'eau). On peut imaginer réutiliser cette eau pour recharger le dirigeable au fur et à mesure du vol en lest, et permettre de compenser la perte de poids liée à la consommation d'essence par exemple.

Cela présente plusieurs intérêts : manœuvrabilité accrue en vol, rayon d'action, mais aussi environnemental puisque l'on fait un cycle ; le produit de l'utilisation de l'énergie est ré-utilisé.

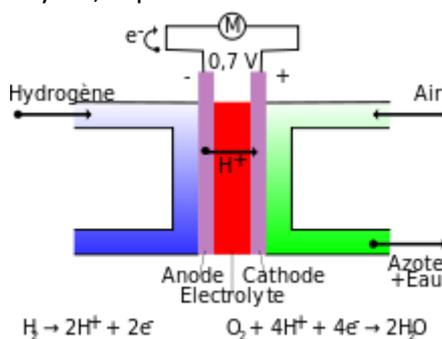


Figure 18 - Schéma d'une pile électrique

L'utilisation d'une pile à combustible impose l'utilisation d'un dissipateur de chaleur aussi dans le dirigeable. On peut envisager l'utilisation de piles à combustibles telles que AEROSTAK 1000-500. Supposons qu'on utilise la pile à combustible AEROSTAK qui sort un voltage d'environ 50 V à son point de fonctionnement. Il faut donc mettre 11 cellules en série pour fournir 550 V un moteur électrique Magni500 qui fonctionne à une tension nominale de 540V.

AEROSTAK 1000-50



Figure 19 - Aerostak 1000-50 - HES Energy Systems

Possibilité d'autres technologies :

Il y a une multitude d'architectures à évaluer. Parmi elles, nous avons voulu faire une petite étude pour savoir si la technologie de panneaux solaires pouvait permettre d'apporter d'une énergie intéressante à notre dirigeable. Les panneaux utilisés sont en fait des "films" souples, de l'épaisseur d'une feuille de papier (avec un rendement un peu plus faible que les panneaux solaires). Ils sont déjà développés par des entreprises comme Asca Technologies.

A la surface de la Terre on peut récupérer au maximum 1000 W/m² en ensoleillement pour une surface perpendiculaire aux rayons.

Par approximation, on suppose que le rayonnement à 3000 m est le même.

Il faut donc estimer la surface projetée du dirigeable sur le sol, la masse et le rendement des panneaux solaires.

Si on veut obtenir l'énergie produite par un panneau en Wh, on utilise la formule suivante :

$$E = P * D_{vol} * S * r * C_p$$

Où :

E : énergie produite en kWh/vol

P : puissance surfacique d'ensoleillement en kW/m²

D_{vol} :Durée du vol en h

S : surface de production photovoltaïque en m²

r : rendement (on peut prendre 14% pour un panneau solaire classique, 10% pour un film solaire)

H : ensoleillement en kWh/m²/an

C_p : coefficient de perte (en moyenne : 0.8) : dû à toute la connectique, aux fluctuations de températures etc.

Surface projetée de l'ellipsoïde :

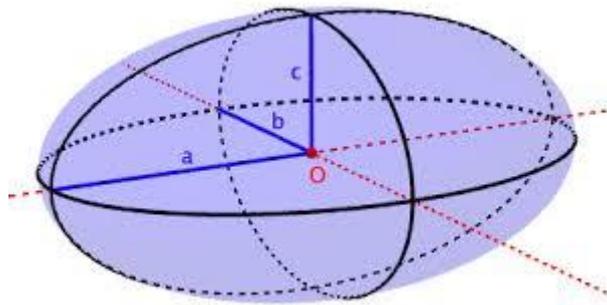


Figure 20 – Ellipsoïde

On approche la surface projetée de l'ellipsoïde par celle du plan (O, a, b) d'aire $S = \pi ab$.
Où a est la demi-longueur et b la demi-largeur de notre dirigeable.

On peut dès lors estimer l'énergie récupérable par panneaux solaires pour un vol nominal, et le % de cette énergie par rapport à celle requise pour effectuer le vol.

Estimation de la masse :

- Celle de la masse des films solaires (400 g/m² environ), sur l'enveloppe
- Celle des autres composants nécessaires (batteries, régulateur, onduleur, ...)

Ensoleillement (kW/m ²)	1
Demi-longueur [m]	50
Demi-largeur [m]	15

Surface [m ²]	2356.19449
Durée vol [h]	9
Coefficient Pertes (onduleur, températures, ...)	0.8
Rendement film solaire	0.1
Energie Produite [kWh]	1696.460033
Energie Produite [MJ]	6107.256119
Masse Panneaux Solaires [kg]	942.4777961
Vol Nominal	
Puissance [kW]	5000
Durée de vol [h]	9
Energie correspondante [MJ]	162000
% Energie Produite par Panneaux	3.769911184

Tableau 14 - Estimations simplifiées du ratio masse/énergie produite des panneaux

En première approche, et en considérant uniquement la masse des films solaires en tant que tel, pour un dirigeable de 5000 kW, et une durée de vol de 9 heures, les films solaires produisent 3.7% de l'énergie requise au vol dans des conditions d'ensoleillement maximal (ce qui ne sera pas le cas en vol), au prix d'une tonne ajoutée sur l'enveloppe au minimum, sans prendre en compte toute la connectique et autres composants nécessaires. Le solaire ne nous a pas paru une solution très envisageable pour notre projet.

B. Répartition en classe et programmation

Nous réutilisons l'organisation évoquée précédemment en subdivisant le dirigeable en 3 parties. Cela permet d'un point de vue programmation d'obtenir trois classes distinctes basées sur la structure (gondole + enveloppe + réservoirs de lest etc.), l'approvisionnement énergétique (pile à combustible, hydrogène etc.), et enfin la propulsion (moteur, hélices etc.).

L'objectif est alors d'obtenir des premiers résultats via un programme informatique en prenant en compte le cahier des charges évoqué. Le code est un outil qu'il nous a semblé utile de développer : en rentrant des paramètres (Cahier des Charges déjà évoqué, architecture choisie (pile à combustible, moteurs thermiques, solaire etc.) pouvoir obtenir des informations sur un dirigeable et comparer plusieurs systèmes.

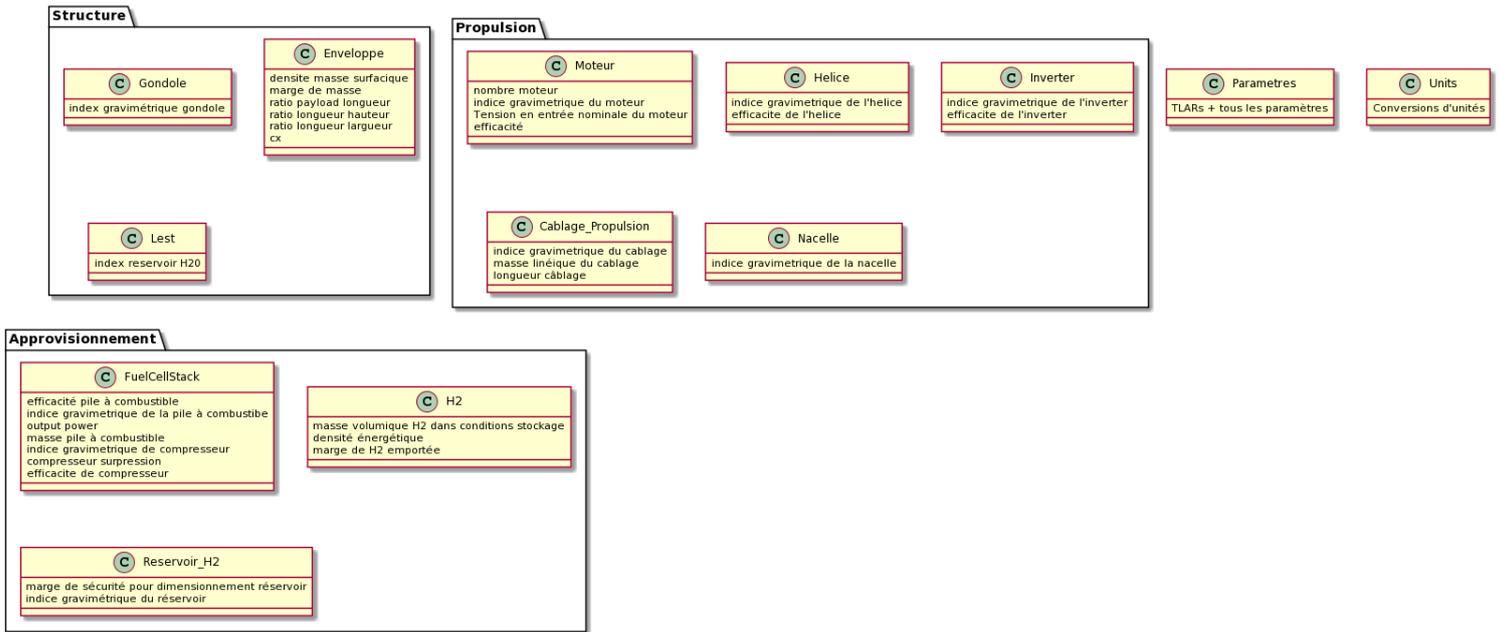


Fig 21 - Classes de notre programme regroupées en 3 modules

En sortie, nous souhaitons obtenir les paramètres de base d'un dirigeable conçu selon notre input. Les voici :

Sortie	Précision
Principales dimensions du dirigeable	Longueur, Volume Enveloppe, Hauteur, ...
Plan simplifié du dirigeable	Vue 2D simplifié, mise en perspective avec le LZ 129 par exemple
Masses	Masse totale du dirigeable, et des différents composants
Impact environnemental lors des opérations	Consommation d'Hydrogène pour la mission nominale

Tableau 15 - Sorties de notre code

Attention, cette liste est loin d'être exhaustive. De nombreuses autres données utiles pour rendre compte de l'impact durable du dirigeable sont à prendre en compte. On pourrait par exemple retourner les Operating Costs, l'impact environnemental de fabrication, recyclage, etc.

Le code est réalisé en langage Python. L'approche est celle de la POO (Programmation Orientée Objet). Chaque grand bloc fait l'objet d'un module (ou fichier) python qui regroupe des classes (une classe est

un type d'objet : par exemple Hélice, Réservoir etc.). Chaque classe a ses propres méthodes (fonctions de calcul).

Nous créons aussi un quatrième module qui sera l'interface avec l'utilisateur : il regroupe tous les paramètres que l'on peut changer (bien sûr le Cahier des Charges avec les TLARs : Top Level Airship Requirements) mais aussi les paramètres plus précis dans leur totalité qui incombent à chaque partie.

Il regroupe aussi l'ensemble des appels aux fonctions de chaque module pour créer la sortie du programme.



```

32
33 #Propulsion#
34 self.nombre_moteurs = 6
35 self.grav_helice = 15 # indice gravimétrique de l'helice kW/kg
36 self.grav_moteur = 5 # indice gravimétrique du moteur kW/kg
37 self.grav_inverter = 15 # indice gravimétrique de l'inverter kW/kg
38 self.grav_cablage = 15 # indice gravimétrique du cablage kW/kg
39 self.grav_nacelle = 10 # indice gravimétrique de la nacelle à déterminer
40 self.eff_helice = 0.87 # efficacité de l'helice de 87%
41 self.eff_moteur = 0.93 # efficacité du moteur de 93%
42 self.eff_inverter = 0.99 # efficacité de l'inverter de 99%
43 self.masse_lin = 4 #masse linéique du cablage en kg/m
44 self.longueur_cablage = 15 #Longueur cablage en m (hypothèse)
45 self.nominal_volt_moteur = 548 # Tension en entrée nominale du moteur
46
47 #Approvisionnement Energetique # Pile à combustible #
48
49 self.eff_fuel_cell = 0.5 #efficacité pile à combustible
50 self.grav_fuel_cell = 5 #indice grav de la pile à combustibe kW/kg
51 self.eff_motor = 0.99
52 self.design_disa = 25.
53 self.design_alt = 0.
54

```

Fig 22 - Définition des paramètres dans le fichier main.py

```

enveloppe = str.Enveloppe(p)
enveloppe.calcul_longueur(p)
enveloppe.calcul_trainee(p)
enveloppe.calcul_masse(p)
enveloppe.affiche_plan_dirigeable() #affiche un premier plan du dirigeable pour rendre compte des dimensions

print (gondole)
print (enveloppe)

```

Fig 23 - Appel dans le fichier main de méthodes des classes Enveloppe, Gondole (module Structure)

Pour rappel, le code est un des livrables de notre projet. Chaque fonction est détaillée le plus possible avec des commentaires comme ci-dessus pour permettre une meilleure compréhension.

Le code est paramétré pour pouvoir facilement être repris en main. Toutes les hypothèses de nos calculs sont explicitées, avec les références. De nombreux aspects n'y sont pas pris en compte et devront nécessairement l'être comme :

- La mécanique du vol
- Le lien entre tous les sous-systèmes

- Possibilité d'étudier d'autres architectures que celle choisie (Pile à combustible)
- Implémenter les contraintes de Design
- Faire une optimisation selon un critère choisi (Range, Vitesse, Plafond etc.)
- Prendre en compte d'autres aspects (environnemental, opérabilité, coûts estimés à travers un DOC : Direct Operating Cost etc.).

Nous n'avons pas eu le temps de finir ce code mais en avons posé les bases pour qu'il puisse être repris par la suite.

IV. Evolution pour les prochaines phases

A. Un succès dépendant de divers scénarios

Il est impossible de ne pas citer l'actuelle crise qui touche le secteur de l'aéronautique à cause de l'épidémie de la COVID-19. En effet, le trafic aérien a subi une baisse conséquente alors qu'il était encore en pleine expansion. On parlerait même d'un retour au trafic d'il y a 15 ans. Cependant cette crise touche majoritairement le transport de passagers puisque la hausse de la consommation a causé une augmentation notable du transport de fret. Le dirigeable pourrait donc s'acquitter de cette fonction durablement puisque contrairement à l'avion il posséderait l'avantage de respecter beaucoup plus l'environnement notamment par l'usage de technologie ne rejetant aucun polluant comme les piles à combustibles. La maîtrise de l'hydrogène est un élément clé à la survie du trafic aérien puisqu'elle permettrait aussi de développer des technologies de propulsion sans émission de gaz à effet de serre en sachant que le transport représente aujourd'hui 23% des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Bien entendu l'usage d'une propulsion utilisant un carburant classique est à bannir si l'on désire s'insérer dans un cadre d'exploitation durable [10].

Concernant le choix du gaz porteur, de nombreux constructeurs semblent aujourd'hui privilégier l'hélium. Or l'hélium est un gaz volatile rare sur Terre et il deviendra très vite une ressource stratégique importante si une alternative n'est pas développée en parallèle. Il est de plus particulièrement utilisé dans le cadre d'activités médicales et industrielles ce qui en fait une ressource très demandée malgré sa rareté [6]. Il est intéressant de noter que pourtant l'hélium est l'élément le plus abondant dans l'univers après l'hydrogène.

Si on ne parvient pas à exploiter l'hélium en dehors de notre atmosphère, le choix de l'hydrogène comme gaz porteur alternatif semble être le plus probable. Il s'agirait donc de rendre cette technologie beaucoup plus mature ou au moins d'étendre son utilisation puisqu'elle est déjà utilisée depuis de nombreuses années en particulier dans l'industrie aérospatiale. Son efficacité n'est plus à démontrer et il faut axer les recherches sur la sûreté de son utilisation en s'assurant de bien prendre en compte son caractère inflammable

L'évolution des conditions météorologiques est aussi à prendre en compte dans le cadre de développement de dirigeables car comme évoqué au sein de cette étude le dirigeable est en effet sensible aux aléas climatiques, l'empêchant même d'opérer dans certains cas. Plusieurs scénarios

peuvent être évoqués, à commencer par le dérèglement climatique mondial que l'on subit actuellement suite au réchauffement climatique. Celui-ci peut avoir de fortes conséquences puisque à nouveau le dirigeable est sensible aux variations de température. Une hausse des conditions givrantes peut également être envisagée. Cette hausse aurait pour conséquence directe d'alourdir le dirigeable en vol qui ne peut donc pas opérer dans des conditions optimales. Un accroissement de la fréquence des tempêtes et autres catastrophes rendrait par ailleurs l'exploitation du dirigeable complètement obsolète en diminuant encore plus sa fenêtre d'opérabilité.

B. Critères critiques à surveiller

Cette étude n'est qu'une première approche du dirigeable durable. Elle se concentre principalement sur la faisabilité du projet. Cette étape est cependant nécessaire et permet de penser à des solutions dont il restera à prouver la faisabilité dans les années qui suivent.

En ce qui concerne les choix technologiques effectués, de nombreuses technologies doivent encore poursuivre leur développement. Par exemple, le choix de piles à combustibles a été retenu en tant que solution durable ; elles sont encore peu utilisées dans le domaine de l'aéronautique civile ou de fret, il s'agit d'une technologie en développement.



Fig 24 - Camions alimentés par des piles à combustibles - HorizonFuelCell

Les moteurs électriques sont en bonne voie d'évolution avec l'amélioration des puissances massiques également. De nombreux projets tels que Flying Whales comptent intégrer la technologie des moteurs électriques.



Fig 25 - Cessna 208 Caravan équipé de moteur électrique- MAGNIX

Au-delà des technologies sur lesquelles il faut porter une attention particulière, il y a également d'autres aspects à traiter pour poursuivre ce projet notamment l'aspect qualité de vol. En effet le dirigeable doit pouvoir être contrôlable en toute circonstances avec les conditions les plus critiques possibles (perte de moteur par exemple) durant toutes les phases de son vol (décollage, montée, vol en croisière, descente, atterrissage).

La sécurité est aussi importante à cause de la nouvelle utilisation de l'hydrogène tout comme le choix des matériaux qui aura une responsabilité prépondérante concernant les normes incendie liées à l'enveloppe par exemple. L'approche et le survol de zone sensible doivent également être étudiés puisque le dirigeable pourrait potentiellement transporter une charge extérieure à son enveloppe et il faut aussi bien assurer la sécurité du produit que la sécurité de ce qui se trouve en contrebas. Cela permet par ailleurs d'évoquer aussi le problème de transfert de charge à étudier également.

Il faut aussi en plus du dirigeable lui-même s'intéresser à ce qui lui permet d'opérer. Cela inclut par exemple des hangars de stockage qui doivent être étudiés spécifiquement pour les grandes dimensions de ceux-ci si on ne réutilise pas les hangars des dirigeables du siècle précédent. Une plateforme permettant le décollage, l'atterrissage, le chargement/déchargement du dirigeable doit aussi être développée puisque la cohabitation avec les avions en zone aéroportuaire semble limitée. On pourrait éventuellement considérer une expansion des aéroports pour conserver la centralisation du fret aérien en un lieu ce qui permettrait aux dirigeables de vraiment s'insérer dans ce marché et non pas de le perturber, assurant ainsi une transition viable.

Voici un tableau qui énumère les points à prendre en compte (cette liste n'est pas exhaustive mais concentre des points importants à nos yeux):

Paramètre	Précision
Pile à combustible	Développement à surveiller
Avionique	Nous n'avons pas eu le temps de développer la partie relative à l'avionique. Notre dirigeable vole dans les conditions VFR comme la plupart des projets. Un dirigeable volant en conditions IFR n'est pas inenvisageable. Cela aura un impact aussi sur la masse de notre avion
Bâtiments et Infrastructures	Quels bâtiments pour la fabrication et le stockage ? A quel prix économique et environnemental ?
Opérabilité	Insertion dans le trafic Aérien
Matériaux de construction	Choix technologiques, et environnementaux. La dimension sociétale doit aussi être envisagée (comment obtient-on le matériau ?)
Hydrogène	Modes de fabrication de l'hydrogène ? Le produire avec des énergies fossiles serait aller à l'encontre de l'idée même du projet
Durée de vie, fin de vie	Combien de temps va pouvoir voler le dirigeable ? Quel recyclage (ou non) en fin de vie ?
Sécurité/ Réglementation	Respecter les scénarios probables de réglementation mentionnées dans ce rapport (FAA, EASA) et assurer la sécurité (évacuation de l'hydrogène stocké, atterrissages d'urgence etc.).

Tableau 16 - Points à prendre en compte pour les phases suivantes du développement du dirigeable

V. Conclusion

D'un point de vue général, cette étude aura permis d'aborder les paramètres à prendre en compte dans le cadre de la conception du dirigeable du futur. Nous n'avons pas pu apporter une réponse sur tous les points nécessaires mais nous sommes efforcés de citer tout ce qui à nos yeux aura une grande importance (respect de la réglementation, choix du gaz porteur, innovation par intégration de pile à combustible, considération du type de dirigeable que l'on veut pour prévoir les infrastructures au sol etc.).

Le dirigeable du futur doit être innovant s'il veut rencontrer du succès. Il est indéniable que de nombreux dirigeables vont être prototypés dans les années à venir (LCA60T de Flying Whales, Aeroscraft, VariaLift etc.). Leur succès dépendra de leur innovation et habilité à outrepasser les principaux défauts du dirigeable qui restent sa vitesse, son opérabilité limitée par les conditions météorologiques, les reliefs etc.

L'architecture proposée avec la pile à combustible est une proposition qui nous semble satisfaire de nombreuses contraintes de développement durable. Il va aussi très probablement apprendre à s'affranchir de l'Hélium à l'horizon 2040 comme gaz porteur, selon la plupart des projections de pénurie. Les technologies de sécurisation de l'hydrogène vont devoir convaincre les potentiels clients. Quoiqu'il arrive, les projets de dirigeables futurs doivent prendre en compte les 3 piliers du développement durable : Social, Économique, Environnemental pour être des succès.

Notre contribution à travers ce projet aura été d'approcher le travail de conception et de spécifier les conditions de succès d'un dirigeable durable de transport de cargo dans le futur. Notre première contribution a été une recherche bibliographique qui a permis de spécifier les possibles évolutions du marché économique, comparer les divers projets de dirigeables existants et de donner les bases pour des choix technologiques.

Le code développé permet de donner une première vision du dirigeable, avant optimisation de Design. Il permet déjà d'avoir accès à des ordres de grandeur de dimension, masse, consommation en fonction du Cahier des Charges choisi par le client et d'avoir des premiers résultats. Il peut servir de base à une optimisation de design. Nous avons fait en sorte qu'il soit facilement compris et modifiable si nécessaire pour explorer diverses architectures.

Enfin nous avons listé tous les éléments qui à notre avis devront être pris en compte pour des phases ultérieures de développement du dirigeable.

Ce projet aura été l'occasion pour nous de travailler sur un sujet que nous avons choisi par intérêt dès le début : le dirigeable durable. Nous sommes tous les trois intéressés par ces machines que nous n'avons pas eu l'occasion de voir dans notre enfance mais que nous aimerions beaucoup voir voler. D'autre part, la thématique du développement durable nous tient aussi à cœur. Il est essentiel, devant les éléments scientifiques dont la société dispose aujourd'hui, de repenser nos technologies, et notre rôle d'ingénieur sera d'apporter une contribution à ce changement.

Du point de vue de la gestion de projet, nous avons aussi fait face à une situation inédite. Le cadre distancié imposé par la situation sanitaire a été un vrai challenge. Nous avons toutefois réussi à nous organiser par visioconférences et documents partagés en ligne.

La gestion de projet a été de type agile. Nous avons régulièrement contacté nos tuteurs de l'ENAC, M. Druot et Mme. Letondal, pour faire des points avec eux par visioconférence, qui donnent chacun lieu à des compte-rendus pour nous permettre d'avoir des objectifs à long et court terme. Nous avons beaucoup apprécié les rencontres avec les membres de l'association 3AF au cours du projet, qui nous ont donné une autre perspective sur le projet et sa présentation.

VI. Remerciements

Nous souhaitons remercier nos tuteurs M.Druot et Mme. Letondal pour avoir été présents et nous avoir aidé dès que nécessaire lors de ce projet malgré les conditions dégradées du distanciel.

D'autre part, nous remercions les membres de l'association 3AF pour leur soutien, leur présence lors de rencontres et divers aiguillages qui nous ont beaucoup aidé. Avoir un point de vue extérieur de la part d'experts a été très enrichissant et nous en sommes reconnaissants.

Nous adressons enfin nos remerciements aux personnes qui ont su nous apporter des réponses à des questions : Jean-François Petit, enseignant en Certification à l'ENAC, et enfin Guillaume Fleurisson, Mohamed Abbassi, Jacques Calveyrac, et Eva Guerric nos alumni de l'ENAC qui travaillent à Flying Whales et qui ont su nous apporter des réponses sur la réglementation et la certification des dirigeables.

VII. Bibliographie

[1] The Maritime Executive, "Global Freight Demand to Triple by 2015", 27/05/2019

[2] IATA - The Value of Air Cargo - 2020

[3] Walmart and Zipline Team Up to bring First-of-its-Kind Drone Delivery Service to the US, Walmart, 14/09/2020 , <https://corporate.walmart.com/newsroom/2020/09/14/walmart-and-zipline-team-up-to-bring-first-of-its-kind-drone-delivery-service-to-the-united-states>

[4] Données techniques du BBC Fuji, consulté en Octobre 2020,
https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:152612/mmsi:218509000/imo:9508419/vessel:BBC_FUJI

[5] L'incendie du Zeppelin Hindenburg, herodote.net, 30/04/2019

[6] La pénurie d'Hélium n'affecte pas seulement les ballons, SciencePresse, A. Fenster, 31/01/2011

[7] Infographie atmosphère, universalis.fr publiée sur pinterest,
<https://www.pinterest.fr/pin/705094885389279428/>

[8] Production de l'Hydrogène, connaissancesdesenergies.org, dernière modification en mai 2019,
<https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene>

[9] Hybrid Airships Operational Concepts : US Department of Defense, consulté en 10/2020

[10] Cap sur l'Hydrogène, AirLiquide, 2018

[11] Cargo Airships - Airport facilities - International Airport Review consulté en 10/2020, https://www.internationalairportreview.com/article/37170/cargo-airships/?fbclid=IwAR00yP3Is-TjdDSI_WK_ncu3xbGQ1bFhBT5ZCObyRcwqyfQ-i2e6rxq1dJQ

[12] BALLONS ET DIRIGEABLES Tour d'horizon : inconvénients techniques, avantages fantasmagiques, L. Boutin, M.Barreau, InterAction, 2001, <http://inter.action.free.fr/publications/zep.pdf>

VIII. Annexes

ANNEXE 1 - Tableau comparatif des dirigeables

Ce tableau est très complexe et contient beaucoup d'informations. Il est difficile de le restituer dans ce rapport. Il sera joint en tant que livrable du projet aux diverses communications.

Nom du dirigeable	WDL 1B	LZ 129	NT	LCA60T
				
	<small>jetphotos.net / Andries van der Berg</small>	<small>AP Photo</small>	<small>Wikipedia</small>	<small>Flying Whales</small>
Fabricant	WDL Luftschiffgesellschaft mbH	Zeppelin	Zeppelin	Flying Whales
Souple/rigide/semi-rigide	Souple	Rigide	Semi-rigide	Rigide
Civil ou militaire	Civil	Civil		Civil
PAX ou cargo ou mix	Pub	PAX		Cargo
Stockage energie		Diesel		Hybride élec
Longueur [m]	60	245	75	150
Diamètre [m]	19.3	46.8	19.5	60
Hauteur [m]	16.4	44.7	17.4	42
Volume soute [m³m³]				
Volume enveloppe [m³]	7200	190000	8425	186000
Plafond [m]	1800	300	2600	3000
Vitesse croisière [km/h]	65	100		100
Vitesse max [km/h]	105	135	125	100
Durée typique mission	22 h	48 h		
Puissance	300 Cv	890 Kw / moteur		1 600kW jusqu'à 5 000kW (2 175Cv to 6798Cv)
N° de moteurs	2	4	3	7
Rayon d'action [Km]		10000	900	1000
Charge utile [t]	1.3	11	1.9	60
Ratio charge utile/longueur	0.022	0.045	0.025	0.4
Matériaux	tissu enduit / Résistance de 4000 daN/m / durée de vie : 20 ans		Alu et fibre de carbon pour structure, câbles en aramide	
Commentaire structure (trilobée etc.)		Structure conçue pour hélium		
Gaz utilisé	Hélium	Hydrogène	Hélium	Hélium
Stockage dirigeable	Amarré à camion par ex	Hangars		Hangars/ capable de vol stationnaire
Infrastructure au sol nécessaire				
Personnel au sol nécessaire	18			
PAX	7	72		0
Pilote/Equipage	1	52		2 pilotes + 1 operateur
Masse à vide [t]	4.8	118		
Masse structure [t]			1	
Masse Maxi décollage [t]				
Capacité carburant [t]		14		10
Année du premier vol	1989	1936	1997	2024

Nom du dirigeable	Airlander	Aeroscraft ML866	Stratobus
			
	Joe Odden / PA	Aeros	Thales
Fabricant	Hybrid Air Vehicles (UK)	Aeros	Thales
Souple/rigide/semi-rigide	Souple	Rigide	Souple
Civil ou militaire	Civil	Civil	Militaire/Civil
PAX ou cargo ou mix	Cargo	Cargo	Surveillance/télécommunications
Stockage energie	Diesel		Electrique (cellules photovoltaïques)
Longueur [m]	92	169	100
Diamètre [m]	43.5	29	33
Hauteur [m]	26		
Volume soute [m³]	30 x 4.6 x 4	67 * 12 * 9	
Volume enveloppe [m³]	38000		60000
Plafond [m]	6100	3600	20000
Vitesse croisière [km/h]	148	220	75
Vitesse max [km/h]	148		
Durée typique mission			Plusieurs mois jusqu'à 5 ans
Puissance	325 Cv		5 kW
N° de moteurs	4		2 moteurs à hélice électrique
Rayon d'action [Km]	3500	7700	200
Charge utile [t]	50	66	0.25
Ratio charge utile/longeur	0.54	0.39	0.0025
Matériaux			Tissu en fil de carbone
Commentaire structure (trilobée etc.)			
Gaz utilisé	Hélium	Hélium	Hélium mais aussi compatible hydrogène
Stockage dirigeable			Pliable et rentre dans un container
Infrastructure au sol nécessaire			
Personnel au sol nécessaire			
PAX			0
Pilote/Equipage			0
Masse à vide [t]			8.3
Masse structure [t]			
Masse Maxi décollage [t]			
Capacité carburant [t]			
Année du premier vol	2016	?	2020

ANNEXE 2 - Fiches résumés et Infographies sur les dirigeables



LZ 129	
Zeppelin	
Transport du PAX et cargo	
Premier vol	1936
Structure	Rigide
Volume Enveloppe [m³]	200 000
L * H * D [m]	245 * 44.7 * 46.8
Charge utile [t]	11
Plafond [m]	300 ?



WDL 1B	
WDL Luftschiffgesellschaft mbH	
Publicité	
Premier vol	1989
Structure	Souple
Volume Enveloppe [m ³]	7 200
L * H * D [m]	60 * 16,4 * 19,3
Charge utile [t]	1.3
Plafond [m]	1800



NT	
Zeppelin	
Transport du PAX, surveillance	
Premier vol	1997
Structure	Semi-rigide
Volume Enveloppe [m ³]	8 425
L * H * D [m]	75 * 17,4 * 19,5
Charge utile [t]	1.9
Plafond [m]	900



Yuanmeng	
Beijing Nanjiang Sky Science and Technology & Beihang University	
Surveillance	
Premier vol	2015
Structure	Rigide
Volume Enveloppe [m ³]	18 000
L * H * D [m]	75 * 22 * X
Charge utile [t]	6
Plafond [m]	20 000



Airlander	
Hybrid Air Vehicles (UK)	
Transport du cargo	
Premier vol	2016
Structure	Souple
Volume Enveloppe [m ³]	38 000
L * H * D [m]	92 * 26 * 43,5
Charge utile [t]	50
Plafond [m]	6 100



Stratobus	
Thales	
Surveillance	
Premier vol	2020
Structure	Souple
Volume Enveloppe [m ³]	60 000
L * H * D [m]	100 * X * 33
Charge utile [t]	0.25
Plafond [m]	20 000



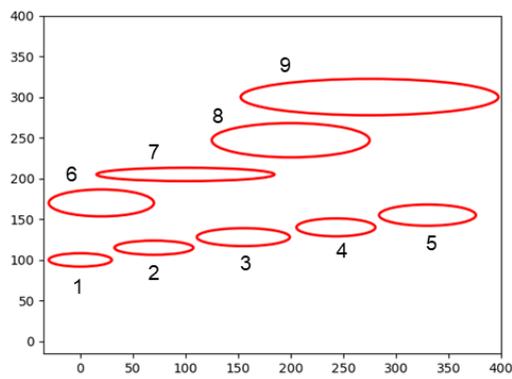
LCA60T	
Flying Whales	
Transport du cargo	
Premier vol	2024
Structure	Rigide
Volume Enveloppe [m ³]	186 000
L * H * D [m]	150 * 42 * 60
Charge utile [t]	60
Plafond [m]	3 000



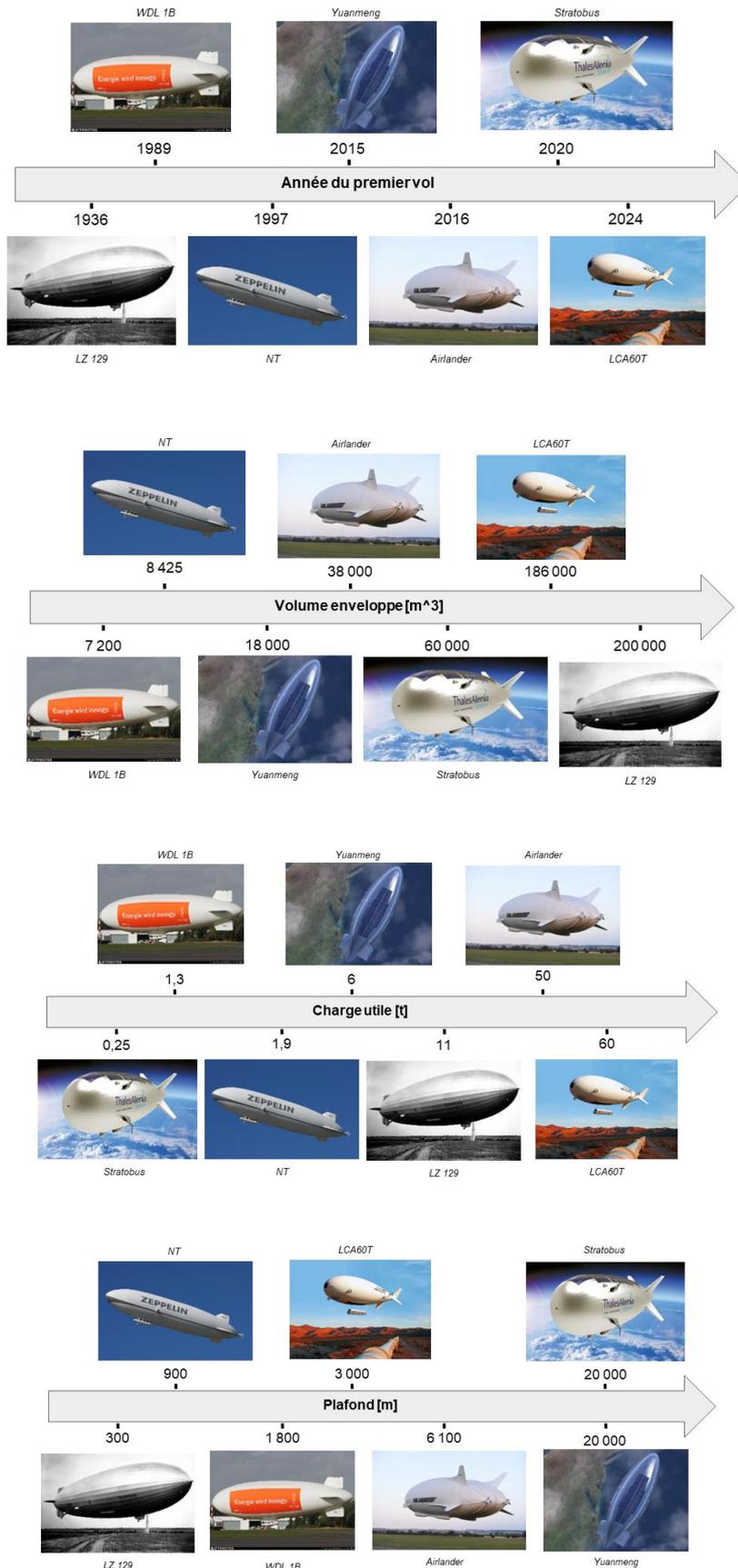
Aeroscraft ML866	
Aeros	
Transport du cargo	
Premier vol	
Structure	Rigide
Volume Enveloppe [m³]	
L * H * D [m]	67 * 12 * 9
Charge utile [t]	66
Plafond [m]	3 600



LMH-1	
Lockheed Martin	
Transport du cargo	
Premier vol	
Structure	Semi-rigide
Volume Enveloppe [m³]	
L * H * D [m]	
Charge utile [t]	21.3
Plafond [m]	3 000



	NOM	LARGEUR	HAUTEUR
1	WDLB1B	60	16.4
2	NT	75	17.4
3	LMH1	88.4	22
4	Yuanmeng	75	22
5	Airlander	92	26
6	Stratobus	100	33
7	ML866	169	16.4
8	LCA60T	150	42
9	LZ129	245	44.7



ANNEXE 3 - Technologies de Stockage de l'Hydrogène

Pour obtenir une estimation de la masse de réservoir nécessaire pour le fuel, il faut étudier la technologie de réservoir utilisée dans le domaine de l'aéronautique notamment. Sur la base des données de deux constructeurs répertoriés dans le tableur associé à ce document.

Hydrogène :

L'hydrogène a une densité énergétique spécifique 3 fois plus élevée que le fuel. Attention souvent des plages de densités sont données et ici les valeurs usuelles sont affichées, ces chiffres peuvent légèrement changer.

Carburant	Densité énergétique [MJ/kg]	Masse Volumique [kg/m^3]
H2	120	71 (à -250 °C, 1 bar)
Diesel	48.1	830 (15 °C)
Essence	48.3	740 (15 °C)
JET A	42.8	775-840 (15°C)

En passant du JET A ou du diesel à l'hydrogène liquide, on peut donc facilement avoir les rapports donnant la masse d'Hydrogène à emporter, et retomber sur le volume correspondant.

Technologies de stockage de l'hydrogène :

Elles sont très complexes et peu utilisées encore dans le domaine de l'aviation, particulièrement parce que les développements les plus récents dans le domaine de l'hydrogène sont à base d'hydrogène gazeux, avec des techniques de stockage différentes.

Autres recherches de cette année :

Etudes:

[1] Hydrogen Storage - Gaps and Priorities

T. Riis et al, 2005

[2] Hydrogen Storage for Mobility : A Review

E. Rivard et al, 2019

3 principales façons de stocker de l'hydrogène : gaz, liquide et solide.

L'efficacité d'un stockage est mesurée souvent par deux paramètres :

- 1) Gravimetric Density GD : % massique d'H₂ stocké sur la masse totale du système (H₂+système de stockage)
- 2) Volumetric Density VD : masse de H₂ stockée par unité de volume du système

Les deux sont à considérer car on doit allier légèreté et compacité.

D'après l'étude [1]

On remarque que le stockage le plus léger (mais très volumineux en contrepartie) est celui de l'hydrogène pressurisé à environ 130/200 bars, avec une densité de masse de près de 20% avec une densité volumétrique d'environ 10 kgH₂/m³.

Table 1 Selected H₂-storage system and media targets for fuel cell vehicles[†].

Property	Units	2010 USA	2007 Japan	2006 IEA [*]
System density (by weight)	wt.% H ₂	6	3	–
System density (by volume)	kg H ₂ /m ³	45	–	–
System cost	US\$/kg H ₂	133	–	–
Refuelling time	minutes	3	–	–
Medium density (by weight)	wt.% H ₂	–	5.5	5.0
H ₂ liberation temperature	C	–	150	80

[†] 500 km range = ca. 5-13 kg stored H₂

^{*} IEA HIA Task 17

Table 2 State of the art technology and estimates for system volumes and weights for vehicular compressed gas, cryogenic liquid, and hydride storage of 3 kg H₂.[†]

Technology	Volume [liters]	Weight [kg]	Density [Wt. % H ₂]
35 MPa (350 bar) compressed H ₂	145	45	6.7
70 MPa (700 bar) compressed H ₂	100	50	6.0
Cryogenic liquid H ₂	90	40	7.5
Low-temperature metal hydride	55	215	1.4

[†]Source: A. Niedzwiecki (QuantumTechnologies), US DOE Hydrogen Vision Meeting, November 2001 [2].

Attention : tous les stockages de H₂, sauf gazeux, ont besoin d'un échangeur thermique. En général, de la chaleur doit être ajoutée au déchargement, et enlevée pendant le chargement.

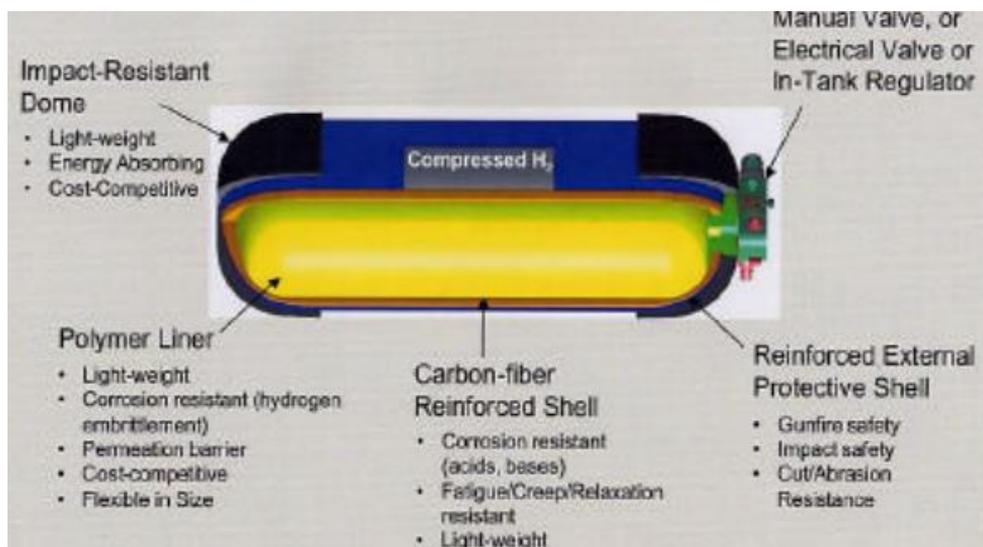
1. Hydrogène Gazeux :

Le plus commun est dans des tanks en acier, mais les tanks en composite légers qui peuvent résister à de grandes pressions sont de plus en plus commun.

Du gaz cryogénique, H₂ refroidi à des températures presque cryogéniques, sont d'autres alternatives qui peuvent être utilisées pour améliorer la densité volumétrique de l'hydrogène. Une autre méthode envisagée en 2001 : des microsphères en verre.

1.1. Tanks en Composite :

Exemple de schéma issu de l'étude :



Avantages	Inconvénients
Légers, sûres (bcp de prototypage déjà en 2001)	Volume large
Pressions sur la fourchette 350-700 bars	Prix élevé : 500-600 USD/kg H2
N'ont pas besoin d'échangeur thermique interne	Énergétiquement très coûteux de comprimer le gaz
	Pb non résolu : perte rapide d'H2 dans un accident
	L'effet à long-terme du H2 sur le matériel (fatigue cyclique, températures froides) pas encore maîtrisé
	Forme cylindrique, pas facilement adaptable

L'étude [2] présentes les valeurs suivantes (étude publiée en 2019) :

Table 3. Pressure vessel materials according to their type.

Type	Materials	Typical Pressure (bar)	Cost (\$/kg)	Gravimetric Density (wt %)
I	All-metal construction	300	83	1.7
II	Mostly metal, composite overwrap in the hoop direction	200	86	2.1
III	Metal liner, full composite overwrap	700	700 [65]	4.2 [66]
IV	All-composite construction	700	633 [65]	5.7 (Toyota Mirai)

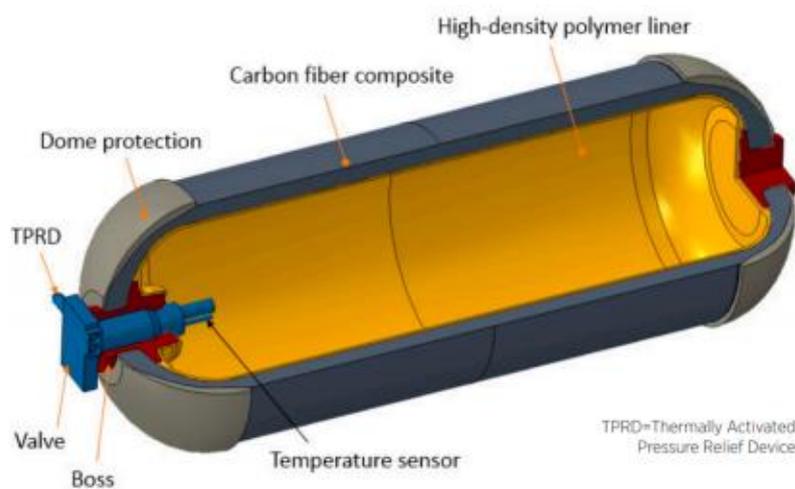


Figure 1. Type-IV composite overwrapped hydrogen pressure vessel (source: Process Modeling Group, Nuclear Engineering Division, Argonne National Lab (ANL)). Reprinted from Ref. [67]; Copyright DOE 2017.

1.2. Microsphères en verre :

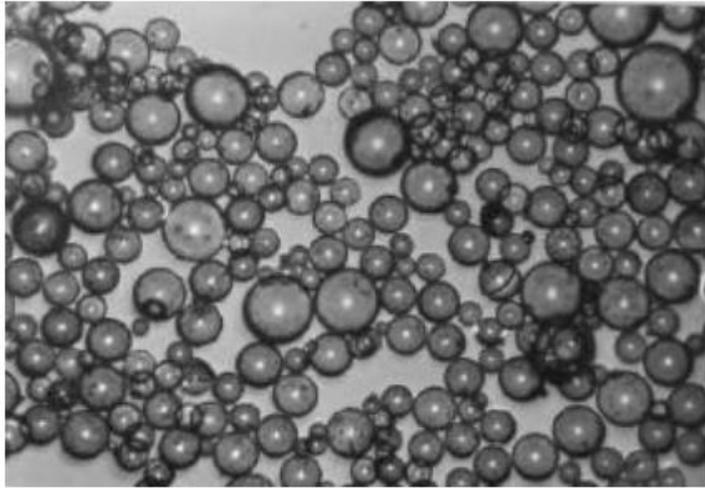


Figure 4 Photo of glass micro spheres for H₂ gas storage (Source: Teitel, BNL 51439, 1981 [3]).

- 1 → balles remplies d’H₂ comprimé (350-700 bars) à des températures élevées (environ 300 °C) par "perméation" (vapeur dans pénètre dans solide)
- 2 → les microsphères sont refroidies à la température ambiante et transférées dans un tank à basse pression
- 3 → les microsphères sont réchauffées à 200-300 °C pour une décharge contrôlée en H₂.

Avantages	Inconvénients
Sécuré : pression de stockage relativement basse : les tanks sont facilement adaptables aux formes requises	Densités volumétriques basses
Coût de stockage moins élevé	Pressions hautes requises pour la charge en H ₂
Densité démontrée de 5.4wt%H ₂	Fuite de H ₂ à température ambiante
	Fragilisation structurelle avec les cycles
	Chaleur nécessaire pendant les opérations

2. Hydrogène Liquide :

Le + commun : refroidi à -253°C. Ou alors stocker le H₂ dans des solutions (par exemple solutions de NaBH₄).

On ne va s’attarder que sur le liquide cryogénique dans ce résumé mais d’autres méthodes sont discutées dans l’étude.

2.1. Cryogenic Liquid Hydrogen (LH2) :

Cryogenic hydrogen : masse volumique de 70.8 kg/m³. En 2001 : on peut **atteindre seulement des valeurs de 20 wt.% H2 dans les systèmes d'alors**, et en densité volumétrique (30 kg/m³).

L'hydrogène liquide a une densité énergétique bien meilleure que le gazeux, mais **30 à 40% de l'énergie est perdue à la production du LH2**.

Autre désavantage : pertes par évaporation : nécessité d'un réservoir cryogénique très protégé.

Avantage	Désavantage
Bcp + compact : énorme gain de masse	Coût du réservoir cryogénique
Basses pressions de stockage	Nécessité de bien isoler le réservoir ou développer système de capture et re-liquéfaction du LH2 évaporé

Valeurs données par l'étude [2] réalisée en 2019 :

Table 4. Storage methods overview.

Method	Gravimetric Energy Density (wt %)	Volumetric Energy Density (MJ/L)	Temperature (K)	Pressure (barg)	Remarks
Compressed	5.7	4.9	293	700	Current industry standard
Liquid	7.5	6.4	20	0	Boil-off constitutes major disadvantage
Cold/cryo compressed	5.4	4.0	40–80	300	Boil-off constitutes major disadvantage
MOF	4.5	7.2	78	20–100	Attractive densities only at very low temperatures.
Carbon nanostructures	2.0	5.0	298	100	Volumetric density based on powder density of 2.1 g/mL and 2.0 wt % storage capacity.
Metal hydrides	7.6	13.2	260–425	20	Requires thermal management system.
Metal borohydrides	14.9–18.5	9.8–17.6	130	105	Low temperature, high pressure thermal management required
Kubas-type	10.5	23.6	293	120	
LOHC	8.5	7	293	0	Highly endo/exothermic requires processing plant and catalyst. Not suitable for mobility
Chemical	15.5	11.5	298	10	Requires SOFC fuel cell.