



BALLONS ET DIRIGEABLES

Tour d'horizon : inconvénients techniques, avantages fantasmatiques.



— *lβ & mβ* —

LAURENT BOUTIN & MATTHIEU BARREAU

(D'après une conférence de Laurent BOUTIN lors du Forum « dans l'air » qui eut lieu à l'IUT de Bordeaux les 19 & 20 octobre 2001 pour commémorer le centenaire du vol de Santos-Dumont)



BALLONS ET DIRIGEABLES

Tour d'horizon : inconvénients techniques, avantages fantasmatiques.

1. INTRODUCTION

Les ballons et dirigeables ont été les premiers aéronefs de l'humanité.

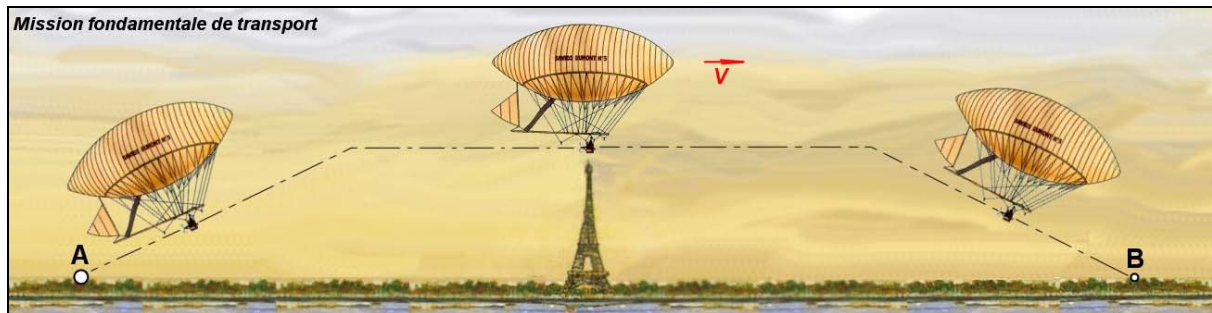
Ils ont réalisé avant tous les autres types d'aéronefs tous les exploits de l'aéronautique civile et militaire :

- vol,
- vol motorisé,
- vol motorisé avec retour au point de départ,
- traversée maritime, traversée océanique,
- tour du monde,
- bombardement, dépose de soldats dans un pays ennemi,
- photographie et observation aériennes,
- altitude, durée de vol, etc.

Ces exploits ont été possibles parce qu'il n'y a pas de puissance minimale à embarquer pour leur vol. Les qualités requises pour l'éventuel moteur d'aérostat sont donc moins critiques, comparées avec celles des aérodynes (voir définitions ci-dessous). Comme leurs aspects fantasmatiques continuent d'alimenter des discussions, voyons à tête reposée (si cela est possible) ce qu'il en est des ballons et dirigeables, et ce qu'il en sera dans l'avenir.

2. RAPPEL : MISSION FONDAMENTALE DE TRANSPORT

Si l'on exclut les véhicules qui ont pour but de situer la position sociale apparente de son utilisateur (et qui sont de plus en plus nombreux, signe des temps), la mission d'un véhicule est de transporter une certaine masse marchande d'un point A à un point B, à une certaine vitesse V :



Les contraintes imposées sont celles du milieu ambiant de transport (eau, air, etc.).

Les dépenses (au sens large : énergétique, financière, etc.) incluent :

- les frais d'établissement, d'amortissement ;
- les frais fixes (hanger ou garage, assurance, licence, entretien calendaire) ;
- les frais de consommables et d'entretien horaire.

Les critères de qualité sont toujours les mêmes (cf. cours d'Inter Action) :

- cohérence du cahier des charges ;
- critères techniques : masse, aérodynamique, propulsion ;
- autres critères : sécurité, coûts, nuisances, etc.

Exemples :

Un vélo est très intéressant par ses coûts d'amortissement et d'utilisations réduits, mais ne saura transporter plus d'une ou de deux personnes à vitesse et parcours limités ;

Un avion, un navire, une péniche permettent de limiter le coût des infrastructures aux points de départ et d'arrivée. Un avion peut survoler, de plus, des zones terrestres arides, montagneuses. En termes d'exploitation, une ligne aérienne ou maritime peut être décidée du jour au lendemain sans aucun frais, ce qui est très avantageux ;

Un véhicule terrestre nécessite une route tout le long du parcours. Historiquement, le réseau routier est apparu en premier, en particulier grâce au système d'exploitation des esclaves ("travail de Romain"). L'héritage correspondant nous sert encore aujourd'hui. Signalons au passage que, contrairement à une idée fort répandue, aucune réalisation humaine ne peut se passer « d'esclaves » ou "d'épsilon moins moins" au sens d'Aldous Huxley, même (et surtout) de nos jours. Il est donc (hélas !) nécessaire de faire la promotion de l'esclavage, si l'on tient à continuer à consommer du pétrole entre autres.

3. DEFINITIONS, CLASSIFICATION

Tous les objets volants de création humaine s'appellent des AÉRONEFS.
En attendant les soucoupes volantes à anti-gravité, il en existe deux catégories : les AÉRODYNES et les AÉROSTATS.

• 3.1 Les AÉRODYNES,

Ou "plus lourds que l'air" utilisent pour voler les lois de la mécanique de Newton ("action/réaction", "La somme des forces appliquées à un solide est égale au produit de sa masse par l'accélération de son centre de gravité", etc.) directement (fusées) ou indirectement par action aérodynamique sur des surfaces portantes (avions, planeurs, hélicoptères, autogires) ; ils incluent :

Les Hélicoptères : la portance vient de la mise en rotation par un moteur d'un ensemble de pales horizontales qu'on appelle rotor. L'inclinaison du plan de rotation du rotor permet de diriger l'appareil. Pour les hélicoptères mono rotor à entraînement mécanique direct, un petit rotor arrière anti-couple compense le couple inverse que subit le moteur d'entraînement du rotor principal. Il permet aussi le pilotage en lacet de l'appareil. L'appareil peut voler de manière rigoureusement stationnaire.



Hélicoptère

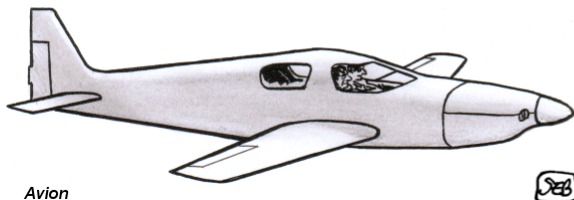


Autogire

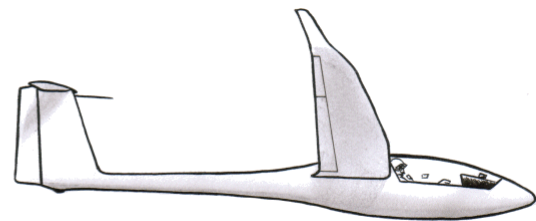
Les Autogires : même principe général que pour les hélicoptères. Le rotor est cependant libre, mis en rotation par vent relatif, créé par l'avancement qu'impose le moteur de propulsion. Par principe, l'appareil ne peut voler en vol rigoureusement stationnaire. L'artifice du prélançeur réduit sensiblement la distance de décollage.

Ces deux catégories (hélicoptères et autogires) ont en commun une forte valeur de la traînée induite par la portance (l'allongement du disque de portance est faible), une relative insensibilité aux rafales (charge alaire des pales très élevée) et, surtout pour l'hélicoptère, un coût élevé en relation avec une complication mécanique importante. Il est à noter que les autogires font l'objet d'un nombre élevé d'accidents (cf. Sites bureaux d'enquête accidents, BEA, NTSB)

Les Avions et les Planeurs utilisent la réaction aérodynamique sur des plans (ailes, gouvernes). Ils ont tous une vitesse minimale de vol. L'avion emporte un ou plusieurs moteurs pour créer cette vitesse de vol. L'avion en panne de propulsion et le planeur utilisent comme moteur la composante de leur poids projetée sur leur trajectoire toujours descendante (par rapport à l'air).



Avion



Planeur

La Fusée est un cas limite d'avion montant verticalement par la seule action de son moteur. On peut alors économiser les ailes. La condition d'existence d'une fusée est, bien entendu, que la force de propulsion de ce moteur dépasse le poids total de la fusée, pendant toute la durée du vol ascensionnel. La fusée n'est pas un aéronef très répandu en raison des exigences particulièrement sévères sur le moteur (la masse d'un moteur-fusée bien conçu est de l'ordre de quelques grammes par kW fourni).



Fusée au décollage



Youri !

Tous les aérodynes ont besoin d'une puissance motrice minimum pour voler. Les exigences (essentiellement de masse) pour cette puissance motrice sont assez sévères, ceci explique leur apparition tardive dans l'histoire de l'humanité.

• 3.2 Les AÉROSTATS,

Ou "plus légers que l'air" ou "ballons" (sans autre précision), sont des aéronefs qui utilisent la force d'Archimède pour voler.

L'étymologie en indique une propriété : capables de vol immobile. Il n'y a pas de puissance minimale pour le vol. Ceci explique pourquoi les aérostats sont apparus avant les aéroplanes.

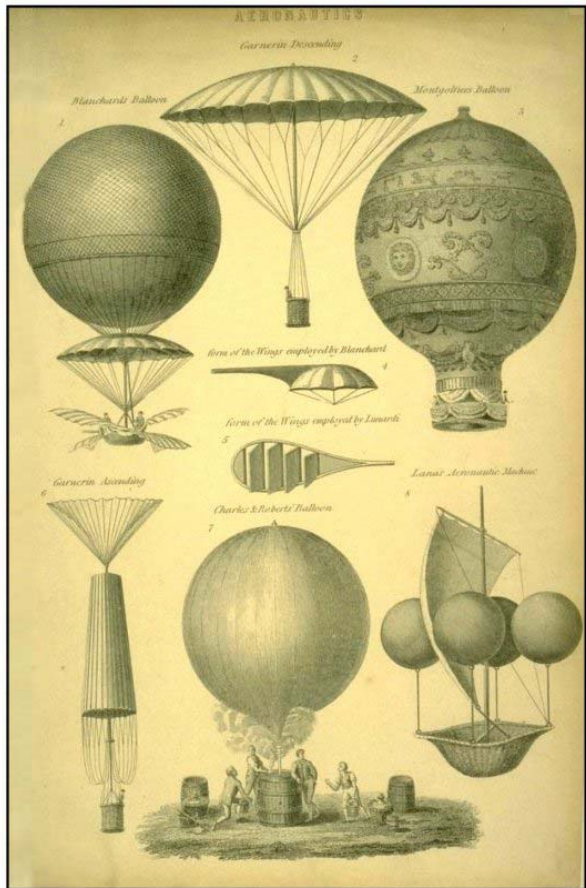
Les aérostats se distinguent suivant qu'ils emportent ou non une source de puissance motrice :

Les Aérostats non motorisés s'appellent également "ballons libres", ou "ballons".

Ils ne peuvent se déplacer qu'au gré du vent, une fois en l'air. Les ballons captifs sont une sous-catégorie des ballons libres. Ce sont des aérostats non motorisés, attachés au sol par un câble sur treuil. Ils font la joie des citadins en mal d'altitude.

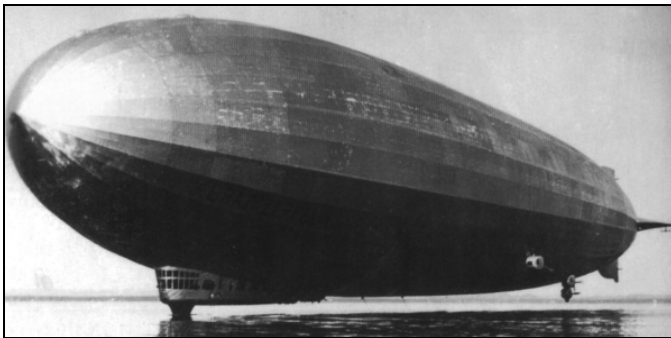


Ballon captif à gaz : « *E pericoloso sporgersi* ». (photographie Mme S. Barreau)



Les Aérostats motorisés s'appellent des "ballons dirigeables" ou simplement "dirigeables".

L'emport d'une puissance motrice leur permet (en principe) de suivre une route préalablement déterminée. Puisque (rappel) il n'y a pas de puissance minimale pour le vol d'un aérostat, l'installation, à bord des dirigeables, d'un moteur même assez lourd permet le déplacement aussi lent que l'on veut (ou plutôt que l'on peut...). Au milieu du XIX^{ème} siècle, la faisabilité du vol avec des moteurs de plus de 10 kg/kW ne pouvait en effet qu'être le fait de ballons.



Exemple d'équilibre statique à deux fluides : Zeppelin LZ 127 "Graf" posé sur le lac de Constance, TRH



Exemples de routes suivies dans les années 1920 par le "Los Angeles" et le "Graf", TRH

Un peu de **VOCABULAIRE** :

- **Lest, ballast** : masse morte (eau, sable, procureur à la retraite ayant vendu sa maison en voyage au Mexicain) embarquée à bord des ballons, pour être larguée en vol (pour le procureur, l'accident bête ... Une affaire !) afin de ralentir la chute ou d'accélérer la montée ;
- **Gaz de sustentation** : gaz de masse volumique inférieure à celle de l'air, contenu dans une enveloppe, permettant à la force d'Archimède de s'exercer ; en larguant du gaz (on dit "soupape"), on peut accélérer la chute ou ralentir la montée ;
- **Ballonnet** : les dirigeables, en raison de leur forme et par redondance, sont souvent divisés en plusieurs ballonnets, qui sont donc des sous-ensembles de sustentation. Chacun possède sa soupape.
- **Nacelle** : dans les ballons libres, sorte de grand panier en osier contenant la charge marchande, le ballast et, pour les ballons à air chaud, le carburant ; dans les dirigeables, pièce contenant le commandant de bord, les timoniers, les commandes, la charge marchande, etc. ; pour les gros dirigeables, on distingue la gondole de commandement des nacelles motrices et de celle contenant les passagers ou les bombes ;
- **Timonier, barreur** : personne en poste à la barre, chargée d'exécuter les ordres du commandant de bord ;

- Barre : dans les dirigeables, volant de commande des gouvernes ; il y a en principe deux barres : celle de profondeur pour cabrer ou pour piquer, et celle de direction.

Ce vocabulaire est plus issu de la marine que de l'aviation. C'est curieux, chez les marins, ce besoin de faire des phrases !

4. PRINCIPE PHYSIQUE

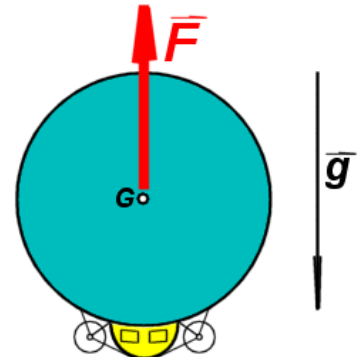
4.1 Tous les ballons utilisent le THÉORÈME D'ARCHIMÈDE appliqué dans l'air :

"Tout corps immergé dans un fluide subit une force opposée au poids du fluide déplacé."
On nomme cette force "portance aérostatique" :

$$F = \rho \cdot g \cdot V$$

Avec :

F :	Valeur de la portance (dirigée vers le haut) [N]. point d'application : centre de gravité G de l'air déplacé
ρ :	masse volumique de l'air déplacé par le ballon [kg/m ³]
V :	volume d'air déplacé par le ballon (en vert) [m ³]
g :	accélération due à la gravité (dirigée vers le bas) [m/s ²]



Pour les puristes :

$$\vec{F} = -\rho \cdot \vec{g} \cdot V$$

4.2 Application numérique de l'équation qui précède

$F = 1,2$ daN par m³ de ballon, avec $\rho = 1,225$ kg/m³ (niveau de la mer)

À 3 km d'altitude : 75 % de la valeur au niveau de la mer. $F = 0,9$ daN par m³ de ballon

À 6,5 km d'altitude : 50 % de la valeur au niveau de la mer. $F = 0,6$ daN par m³ de ballon

À 10 km d'altitude : 33 % de la valeur au niveau de la mer. $F = 0,39$ daN par m³ de ballon

Note importante :

La portance a une valeur numérique très faible.

De plus, on n'en exploite qu'un certain pourcentage, puisqu'il faut soulever le ballon lui-même, ses équipements, la motorisation éventuelle, le carburant, le lest, (etc.) avant de soulever la moindre charge marchande. Cette faiblesse a une incidence directe sur la traînée et le coût de l'appareil (énormité des surfaces mouillées).

La grande taille est donc la caractéristique essentielle d'un ballon.

Notes supplémentaires :

La portance croît comme le volume.

Et non comme la surface (cas des aérodynes), ce qui favorise encore plus cette grande taille et interdit pratiquement l'existence des petits ballons.

La portance diminue avec l'altitude.

La portance diminue comme la masse volumique (ρ). Il est donc illusoire de vouloir réaliser des ballons pour un usage de haute altitude ayant une capacité d'emport importante.

La seule possibilité est le ballon-sonde météorologique, où tout est sacrifié : pas de nacelle, pas de moteur, pas de carburant, pas de lest, pas de soupape à gaz, pas d'ancre, enveloppe de gaz jetable, très fine, très fragile et très élastique qu'on laisse se distendre pour augmenter le volume et récupérer une partie de la perte de poussée d'Archimède en altitude. Ce genre de ballon parvient à monter à quelques dizaines de kilomètres. L'instabilité d'altitude qui résulte de l'élasticité de l'enveloppe n'est pas gênante pour cette application, le ballon étant à usage unique et son éclatement en fin de mission prévu (cf. paragraphe sur la stabilité).

La portance ne peut se piloter directement.

Elle ne peut se piloter directement ni en direction, ni en sens, ni en intensité.

Ce n'est pas le cas de l'avion, où l'équation de portance $F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_a \cdot C_z$ (voir définitions des termes dans n'importe quel cours d'Inter Action) fait apparaître les termes de pilotage primaire (C_z = manche ; V = manette(s) des gaz) et secondaire (S_a = volets).

On parvient cependant à commander l'altitude d'un ballon (tenant compte de l'inertie) en jouant avec :

- le lest (eau, sable...), plus lourd que l'air ;
- le gaz de sustentation, plus léger que l'air (quantité, température...).

Il faut bien entendu tenir compte des charges perdues en vol : carburant, bombes, procureur ou belle-mère, etc.

Réaliser et piloter un ballon sont finalement de véritables gageures.

Pour bien se rendre compte de la difficulté de réalisation, il s'agit *in fine* de fabriquer, avec des matériaux solides (de masse volumique de 2800 kg/m³ par exemple), un objet ayant la masse volumique apparente de l'air (soit seulement 1,225 kg/m³ au niveau de la mer, encore moins dès que l'on souhaite prendre de l'altitude).

- **4.3 Pour réaliser l'ÉQUILIBRE du ballon, on égalise son poids et la portance d'Archimède. Ça y est, le ballon vole !**

L'équation d'équilibre s'écrit :

$$F = M.g$$

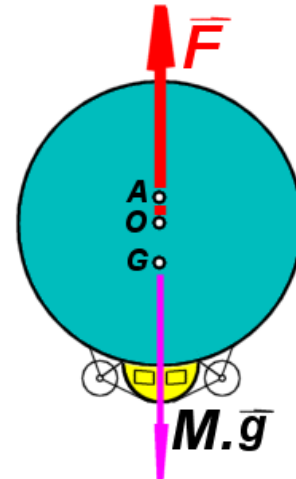
Avec :

F :	portance du paragraphe précédent [N] O est le point d'application de la portance F
M :	masse du ballon [N] G est le centre de gravité, point d'application du poids M.g
A :	A est le métacentre de flottabilité
g :	accélération due à la gravité (dirigée vers le bas) [m/s ²]

Si la portance dépasse le poids, le ballon monte pour atteindre l'altitude d'équilibre, et inversement. L'altitude d'équilibre est celle pour laquelle la masse volumique de l'air réalise l'équation d'équilibre. La masse volumique de l'air (donc la portance) décroît en effet avec l'altitude.

Exercice 1: pour voir si vous avez bien assimilé cette notion élémentaire : On place une balle de ping-pong dans un récipient plein d'eau (aquarium par exemple), le tout dans un satellite en apesanteur. Vers quelle paroi de l'aquarium se dirige la balle ?

Exercice 2: pour voir si vous avez réellement bien compris cette notion élémentaire : le satellite "freine" sur sa trajectoire. Même question.



Pour les puristes :

$$\vec{F} + M.\vec{g} = \vec{0}$$

- **4.4 STABILITÉS**

On rappelle que la stabilité est l'étude des (faibles) variations autour de l'équilibre. Avant d'étudier la stabilité, il n'est pas inutile de vérifier la réalité de l'équilibre, sous peine de bonnet d'âne (cf. feu le ballon "Avéa", projet dont on mettait en avant les qualités de stabilité en altitude, alors que l'équilibre n'était pas réalisé entre les diverses forces : Poids, Archimède, traction moteurs). Cette règle est générale ; en électronique, on étudie d'abord le point de repos, avant l'étude des petits signaux ; en mathématique, on étudie le domaine de définition de la fonction avant la dérivée. Il est inutile d'étudier les variations si la fonction n'a pas d'existence.



Stabilité de l'équilibre "poids-portance", ou stabilité d'altitude

L'équilibre réalisé entre la portance et le poids du ballon est toujours stable, dès que le ballon se déforme suffisamment peu (en comparaison avec la compressibilité de l'air), pour présenter un volume pratiquement constant. On rappelle que la masse volumique de l'air ρ décroît avec l'altitude ; si le ballon a tendance à monter, ρ donc la poussée d'Archimède diminuent, et le ballon revient à son altitude d'équilibre.

Ceci est toujours vrai (tissus ou structure métallique rigides), sauf pour certains ballons-sondes météorologiques (cf. plus haut). Mais ce n'est pas vrai avec les sous-marins dont la déformabilité de la coque n'est pas négligeable devant celle d'un liquide peu compressible comme l'eau, ce qui entraîne une instabilité en profondeur.

Stabilité d'attitude

Elle s'étudie comme pour les bateaux. On la réalise en plaçant G en toutes circonstances de vol et de chargement sous le(s) métacentre(s)¹ de flottabilité A, ici presque confondu(s) avec O en raison du faible gradient de la masse volumique de l'air sur la hauteur totale du ballon (cf. dessin ci-dessus).

Il existe, comme pour les bateaux, un métacentre en tangage et un métacentre en roulis. Il faut donc étudier les deux cas. Le chargement de la quille des ballons résout pratiquement la question de la stabilité d'attitude, question nettement plus facile à résoudre que dans le cas des bateaux.

Stabilité aérodynamique

Cette stabilité n'intéresse que les dirigeables (les ballons libres ne se déplacent pas par rapport à l'air).

Elle s'étudie comme pour celle d'un avion : stabilité en tangage, en lacet, en roulis.

Elle s'obtient, comme pour un avion, en plaçant judicieusement le centre de gravité par rapport au(x) foyer(s) aérodynamique(s). On s'aide, comme pour un avion, de surfaces aérodynamiques appelées profondeur et dérive, pour la stabilité de tangage et celle de lacet.

L'étude de la stabilité de roulis, pour un dirigeable, revient à l'étude de la stabilité d'attitude en roulis.

¹ Le métacentre est à la flottabilité ce que le foyer est à l'aérodynamique : c'est le point d'application des variations de poussée d'Archimède. Pour plus d'infos se reporter à un cours général ou à un bon livre de vulgarisation sur les bateaux (exemple : "les bateaux" 1969 R. Laffont).

5. BALLONS LIBRES : DESCRIPTION

Les BALLONS LIBRES, non motorisés, sont apparus les premiers (1783), en raison de leur simplicité (absence de moteur).

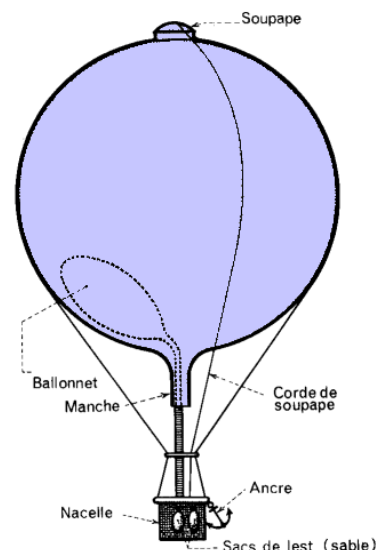
L'art du pilotage consiste à jouer avec ballast et soupape à gaz pour choisir l'altitude (ballons à air chaud : conduite du brûleur) ; la difficulté consiste à éviter le gaspillage...

Dans la mesure des capacités en lest, en carburant ou en gaz de sustentation, le pilote peut choisir l'altitude pour choisir le vent, s'il dispose de prévisions météorologiques correctes. La navigation reste néanmoins aléatoire.

Les difficultés techniques de réalisation imposent la forme sphérique, qui garantit une surface de paroi minimale pour un volume donné.

Cette forme permet :

- la fuite de gaz minimale (pour les ballons à gaz) ;
- la fuite thermique minimale (pour les ballons à air chaud ou à vapeur d'eau) ;
- le coût de matière minimal ;
- la masse de paroi minimale.



Ballon libre, in Cessac & Tréherne, Physique 2^eC, 1966

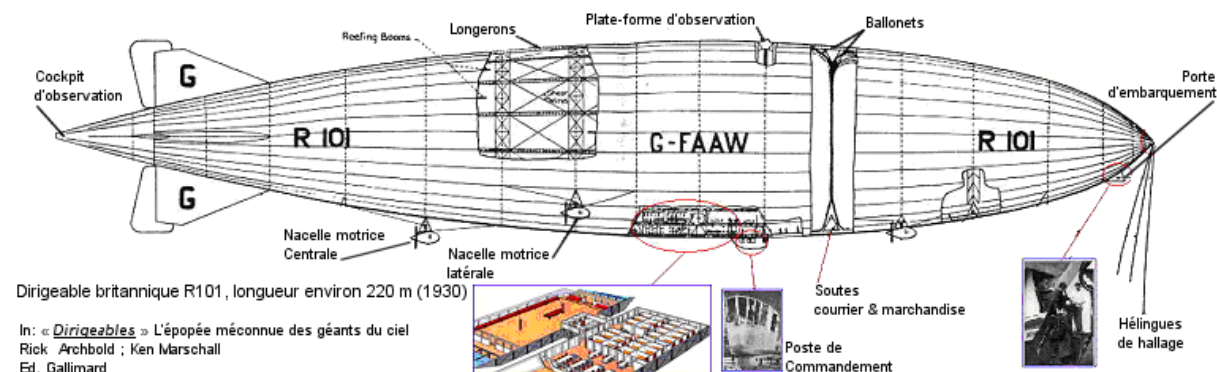
6. BALLONS DIRIGEABLES : DESCRIPTION

6.1 Les BALLONS DIRIGEABLES

Ils sont apparus en raison du caractère aléatoire de la navigation des ballons libres :

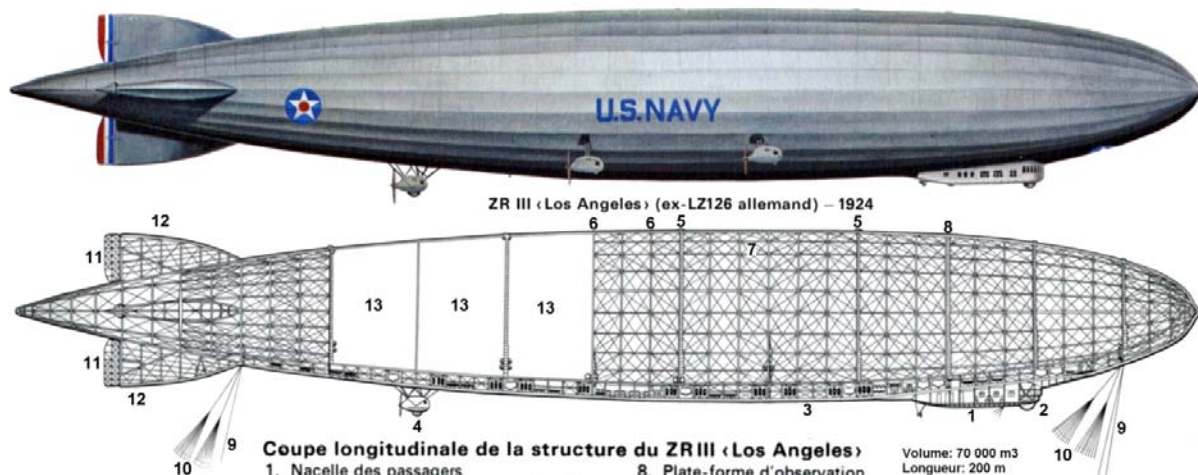
"Ces [ballons libres] ne seront d'aucun secours tant que l'on ne saura les manœuvrer". S. Johnson, 1784

Les dirigeables possèdent tous les éléments du ballon libre ; des moteurs permettent, en plus, de suivre une route préalablement choisie.



Dirigeable britannique R101, longueur environ 220 m (1930)

In: « *Dirigeables* » L'épopée méconnue des géants du ciel
Rick Archbold ; Ken Marshall
Ed. Gallimard



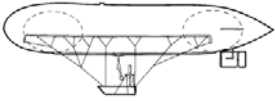
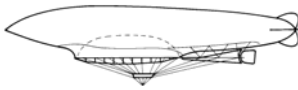
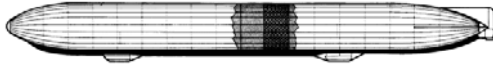
Coupe longitudinale de la structure du ZR III « Los Angeles »

1. Nacelle des passagers
2. Nacelle de commandement et de pilotage
3. Course de la quille
4. Nacelle du moteur arrière
5. Anneaux transversaux principaux
6. Anneaux transversaux secondaires
7. Haubanage de renforcement
8. Plate-forme d'observation
9. Câbles de retenue au sol
10. Câbles d'arrêt au sol
11. Gouvernail de direction
12. Plan de dérive
13. Ballonnets

Volume: 70 000 m³
Longueur: 200 m
Diamètre: 27,6 m
Motorisation: 5 moteurs Maybach de 440 cv

In: « *Dirigeables* » Histoire illustrée des navires aériens.
Henry BEAUBOIS

• 6.2 TYPES DE DIRIGEABLES

type souple : - valable pour les petits dirigeables (difficulté de reprendre les efforts, dimensionnement des parois, etc.) - facilité relative de construction	 dessins de F. Bigio
type semi-rigide : - solution intermédiaire pour dirigeables de taille moyenne	
type rigide : - les plus légers capables de transporter des charges importantes, les plus performants, les plus compliqués à fabriquer	

7. QUELQUES DÉTAILS TECHNIQUES

• 7.1 GAZ DE REMPLISSAGE

Vide

- En principe le plus léger des corps (0 kg/m^3) ;
- masse prohibitive de l'enveloppe capable de le contenir (tenue de la pression atmosphérique extérieure). Une difficulté supplémentaire est le sens de l'application de cette pression (de l'extérieur vers l'intérieur), qui rend délicate la tenue au flambage de la paroi ; cette solution techniquement irréaliste a été envisagée par les anciens de la Renaissance (exercice : par qui ?).

Hélium

- Gaz rare (He) en quantité très faible sur Terre ;
- donc très cher ;
- léger ($0,18 \text{ kg/m}^3$ en conditions normales) ;
- ininflammable, neutre à tous points de vue ;
- c'est le gaz actuellement le plus employé pour les ballons dirigeables ;
- comme la molécule d'hélium est monoatomique et de très petite taille, le gaz diffuse facilement à travers les parois (à l'échelle moléculaire, une paroi, c'est un grillage), ce qui est fort dispendieux ; les personnes qui envisagent de boucher le grillage avec un enduit spécial révolutionnaire peuvent "monter" un dossier de subvention publique : ils ont toutes leurs chances.



De l'avantage de l'hydrogène pour le remplissage des ballons, en 1917 (vu du côté Rosbif voulant descendre du teuton)

Hydrogène

- élément très répandu sur Terre (2 millions de fois plus fréquent que l'hélium) ;
 - bon marché ;
 - molécule (H_2) la plus légère ($0,09 \text{ kg/m}^3$) ;
 - le mélange avec l'air est inflammable dans de fortes proportions (la déflagration se propage à 10 m/s) ; engendrant un éparpillement par petits bouts, façon Puzzle.
- C'était le gaz classique de remplissage des ballons dirigeables de l'âge d'or.

Gaz de ville

- mélange essentiellement de méthane (CH_4) et d'hydrogène ;
- assez lourd (environ $0,5 \text{ kg/m}^3$) ;
- inflammable dans l'air ;
- bon marché ;
- gaz utilisé par les aéronautes du début, en raison de sa facilité d'approvisionnement ("gaz à tous les étages") ;

Vapeur d'eau

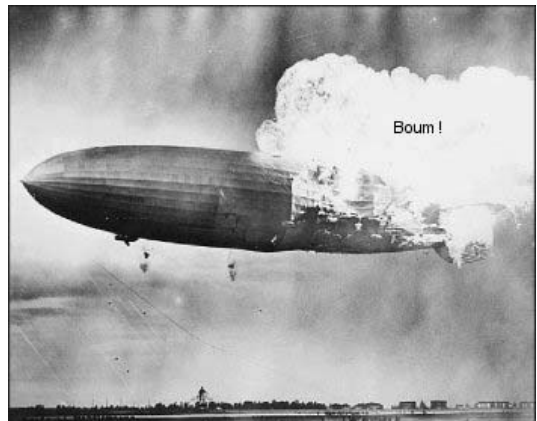
- molécule (H_2O) très répandue sur Terre ;
- assez lourde (environ $0,56 \text{ kg/m}^3$ à 100°C et pression normale) ;
- bon marché ;
- nécessite une dépense élevée d'énergie (énorme chaleur latente de vaporisation : plus de 2 MJ/kg) ;
- nécessite une réserve de bord (masse élevée) ;
- contraintes structurales et de sécurité importantes : la paroi du ballon est à 100°C .

Air chaud

- mélange d'oxygène (O_2 , 20%) et d'azote (N_2 , 80%) et de quelques autres gaz rares en quantité négligeable ;
- lourd (aux températures utilisées, environ $0,9 \text{ kg/m}^3$) ;
- nécessite une dépense d'énergie pour l'entretien de la température ;
- très bon marché ;
- ne nécessite pas de réserve, disponibilité permanente ;
- la paroi subit moins de contraintes que pour la vapeur d'eau : il y a une couche limite thermique ;

Ammoniac

- molécule (NH_3) répandue, assez lourde (environ $0,7 \text{ kg/m}^3$), d'odeur désagréable, bon marché, mais dont la toxicité en a fait abandonner l'usage.



On rappelle qu'il est strictement VERBOTEN de fumer en dehors du fumoir !

• 7.2 PAROIS et STRUCTURES

Suivant que le ballon est rigide ou ne l'est pas, la paroi qui contient le gaz n'aura pas ou aura le rôle de transmission mécanique des efforts pour soulever la charge utile, les moteurs, le carburant, etc.



Pour les ballons souples et semi-rigides (qu'on devrait en fait appeler semi-souples), la paroi fait l'étanchéité et transmet les efforts. Elle sert de structure. La forme du ballon est déterminée par la pression qui règne à l'intérieur. Plus le ballon est gros, plus il faut élever la pression pour tenir la forme, et comme le dimensionnement d'une paroi gonflée est directement fonction du rayon de courbure, un gros ballon souple devient rapidement trop lourd. C'est ce qui a justifié la création des ballons rigides, à partir d'une certaine taille.

Dans le type "ballon rigide", on dissocie en effet la fonction mécanique de la fonction "étanchéité au gaz". Cela permet de réaliser une structure mécanique avec les matériaux adaptés les plus légers (aluminium pour les Zeppelins, bois) avec une épaisseur convenable (moment d'inertie élevé pour obtenir la légèreté).

La fonction "paroi d'étanchéité au gaz" ne servant plus à "tenir" le

ballon, elle peut se réaliser avec un matériau très léger qui se contente de transmettre l'effort statique du gaz de remplissage, localement, à la paroi rigide.

On a utilisé pour cela dans les zeppelins du coton couché de boudruche. La boudruche est la paroi de l'intestin de vache, dont la structure lipidique la rend assez étanche aux gaz de petite taille moléculaire. Des masses de paroi de 90 g/m² ont ainsi été atteintes.

Remarque : un LZ129 utilisait 16 ballonnets de 50 000 boudruches chacun. Cela fait dans les 800 000 vaches à trouver, par appareil, et à renouveler tous les 18 mois, en moyenne !

Il a existé aussi des ballons à paroi d'aluminium (masse d'une tôle d'1 mm d'épaisseur : 2,7 kg/m² !).

Les ballons, objets aériens pour lesquels la masse est un critère majeur, ont utilisé tous les matériaux classiques de la construction aéronautique : bois, bambou, osier, duralumin, etc.

Note : le remplissage des ballons modernes à l'hydrogène, outre qu'il s'agit du corps le plus léger, offre l'indéniable avantage de créer toutes les conditions requises pour le spectacle télévisuel.



Vérification de l'étanchéité des parois. BBC Hulton picture library, London

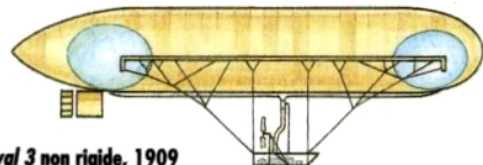
ÉVOLUTION DU DIRIGEABLE

Lorsque les frères Montgolfier lancèrent leur ballon en 1783, des inventeurs se mirent aussitôt à concevoir toutes sortes de ballons « dirigeables ». Le premier de ceux-ci fut une évolution vers le ballon ovale. La forme était maintenue par pression interne. Ces aérostats non rigides utilisaient des ballonnets souples gonflés à l'hydrogène (couleur bleue) qui se dilataient ou se contractaient en fonction de l'altitude. La même technique, aujourd'hui, est utilisée sur les Blimps de Goodyear. Ces aérostats souples se déformaient sous les efforts. Pour assurer la rigidité, les constructeurs installèrent des quilles (en rouge). Ces semi-rigides furent une réussite dans le domaine de la reconnaissance militaire. Cependant, seul le dirigeable rigide atteignit les dimensions permettant de transporter des charges utiles importantes, même en cas de défaillance d'un ou de plusieurs ballonnets.

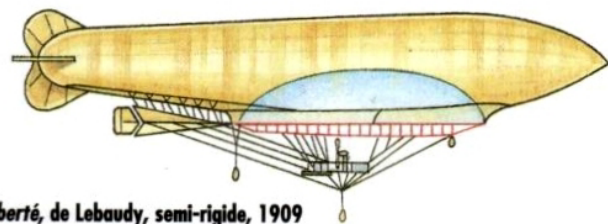
Ballon à air chaud
Montgolfière,
1783



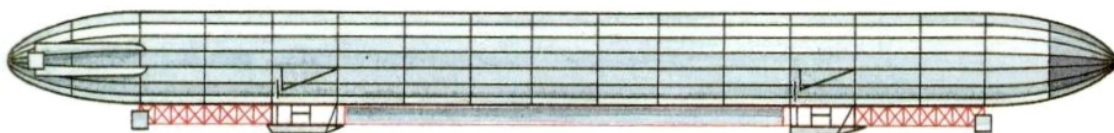
Parseval 3 non rigide, 1909



Liberté, de Lebaudy, semi-rigide, 1909



LZ 2 rigide, 1906



d'après "Dirigeables" Ed. Gallimard

8. HISTORIQUE SOMMAIRE DES BALLONS

8.1 IL Y A LONGTEMPS

L'arche de Noé illustre l'utilisation empirique de la statique des fluides et des équilibres à deux fluides, par simple observation de la flottabilité de certains corps à la surface de l'eau.



Dessin J-P PETIT

8.2 3ème SIÈCLE AVANT JÉSUS-CHRIST

(Pour les autres religions, se reporter au calendrier *ad hoc*)

Archimède et son théorème fondamental de la statique des fluides, ayant profité de sa baignoire pour démêler une affaire de contrefaçon (si Archimède avait vécu fin 19^{ème}, il aurait sans doute *euréka* autour d'un célèbre capitaine D. et d'un fameux bordereau de je ne sais quelle nation à la fois étrangère et hostile, et nous n'en serions pas là). La formulation de son théorème est tellement simple qu'il est enseigné en classe de seconde, dans le premier cours de Physique, avec les unités de mesures. C'est aussi pour cela qu'il est le plus oublié par des intellectuels bardés de diplômes se prétendant "scientifiques".



IL ÉTAIT UNE FOIS ARCHIMÈDE



"Imagine un disque plongé dans l'atmosphère. La colonne d'air qui est au-dessus, pèse sur sa face supérieure. Plus cette colonne d'air est haute, plus cette force est importante. Mais, si le disque est infiniment mince, une force de pression, égale et opposée, s'exerce sur sa face inférieure et la somme des forces est nulle."



RAPPEL :

"Tout corps immergé dans un fluide subit une force verticale ascendante et de norme égale au poids du volume de fluide déplacé."

On nomme cette force « portance hydro ou aérostatique ».

$$F = \rho \cdot g \cdot V$$

Avec :

F :	Valeur de la portance (dirigée vers le haut) [N]. point d'application : centre de gravité G de l'air déplacé
ρ :	masse volumique de l'air déplacé par le ballon [kg/m^3]
V :	volume d'air déplacé par le ballon (en vert) [m^3]
g :	accélération due à la gravité (dirigée vers le bas) [m/s^2]

8.3 17ème SIÈCLE

Pascal livre la première réflexion correcte sur la pression, unité de mesure de celle-ci.

Barométrie (Florin Périer).

Même remarque générale que ci-dessus.

En 1673, **C. Huygens** propose un moteur à poudre. On s'était en effet rendu compte que les armes à feu étaient nettement plus efficaces que les javalots et autres arbalètes.

On commence à avoir l'intuition que les moteurs "à feu" permettent d'embarquer une source d'énergie remarquable par sa densité (J/kg), paramètre essentiel pour réaliser des véhicules autonomes.



• 8.4 1783-1785

Années charnières pour le vol humain. Presque simultanément, les deux techniques principales (air chaud et gaz) sont expérimentées, ainsi que l'essentiel des points de détail.



Montgolfier & Charles

Invention des éléments suivants : soupape, nacelle, lest, enduit d'imperméabilisation, usage du baromètre pour la mesure de l'altitude.

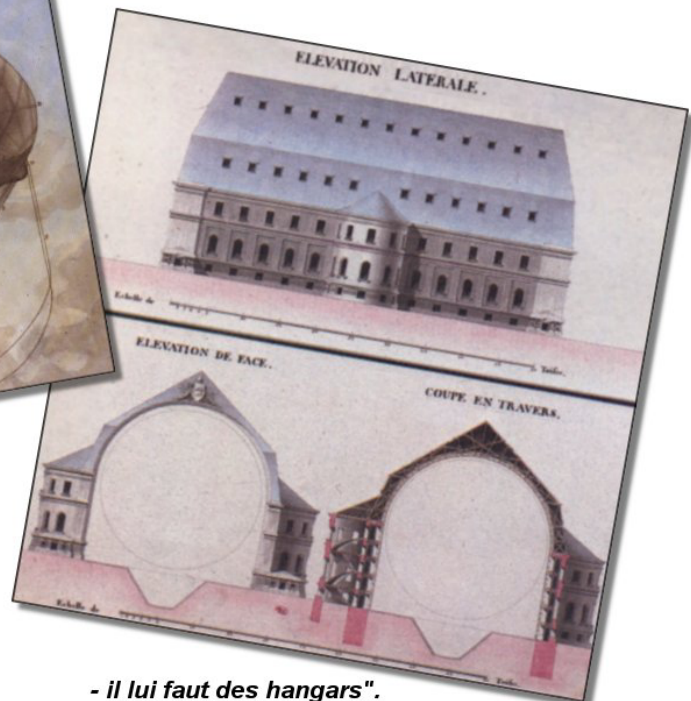
Note : l'usage mixte du gaz hydrogène (!) et de l'air chaud a sans doute été la cause du premier accident d'aéronef (on attend toujours le rapport d'un bureau d'enquêtes).

Meusnier pose deux problèmes fondamentaux des ballons :

"Un dirigeable, oui, mais :



- il faut le caréner ;



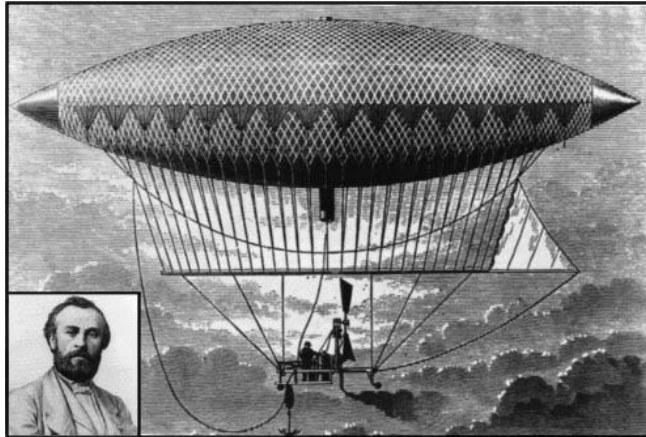
- il lui faut des hangars".

• 8.5 19ème SIECLE

À partir des bases posées précédemment, les idées foisonnent concernant les structures, les motorisations, dans le domaine théorique comme dans le domaine pratique. Les premières et les records s'accumulent.

1824, Carnot

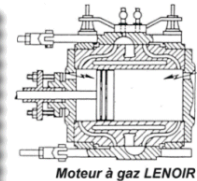
"Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à la développer".
Base théorique incontournable des moteurs thermiques.



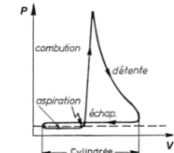
Sadi CARNOT

1852, Giffard

1^{er} vol propulsé (27 km), dirigeable à hydrogène de 2500 m³, moteur à vapeur de 3 CV, vitesse de croisière 9 km/h.



Moteur à gaz LENOIR



En 1860 apparaît le moteur **Lenoir**, moteur à combustion interne (hélas sans compression préalable, qui aurait permis un meilleur rendement).



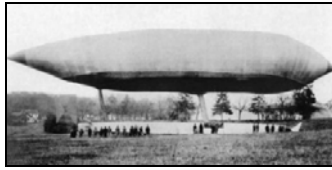
En 1863 paraît « 5 semaines en ballon » et plus tard, « Robur le conquérant » de **Jules Verne**. Cet auteur a parfaitement compris l'intérêt dominant des ballons (pour ne pas dire l'unique intérêt), i.e. son aspect fantasmatique. Jules Verne fait partie intégrante de l'histoire moderne des sciences et des techniques, ballons inclus.

En 1870, l'épisode des Prussiens à Paris et la fuite de **Gambetta** en ballon ont rajouté une couche d'exploits liés aux ballons. Pendant ce temps, les Parisiens mangeaient des rats et des chats (non, ce n'est pas une contrepétérie).



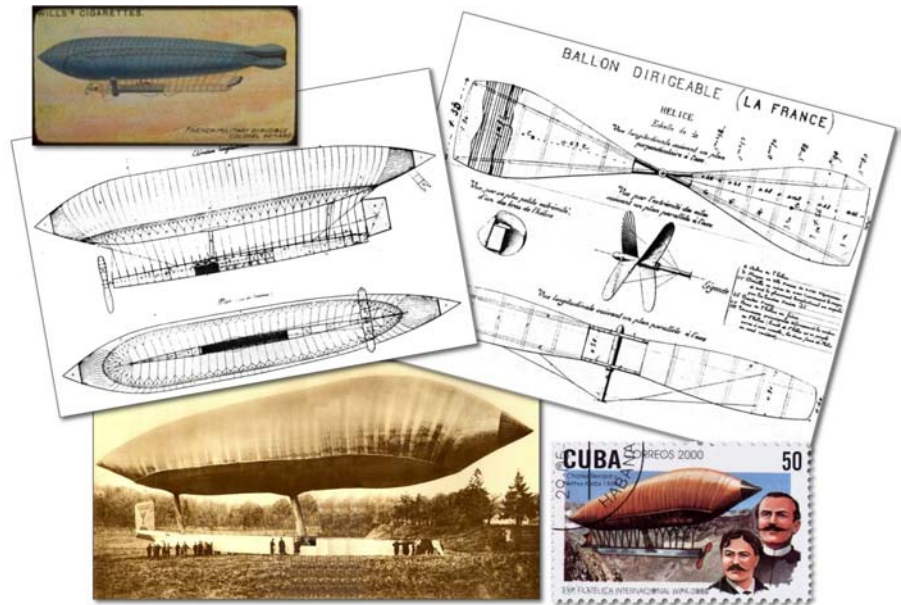
En 1883, **Tissandier** fait voler un dirigeable à moteur électrique.

En 1884, Renard & Krebs réalisent le premier vol en circuit fermé avec le dirigeable "la France" à moteur électrique.

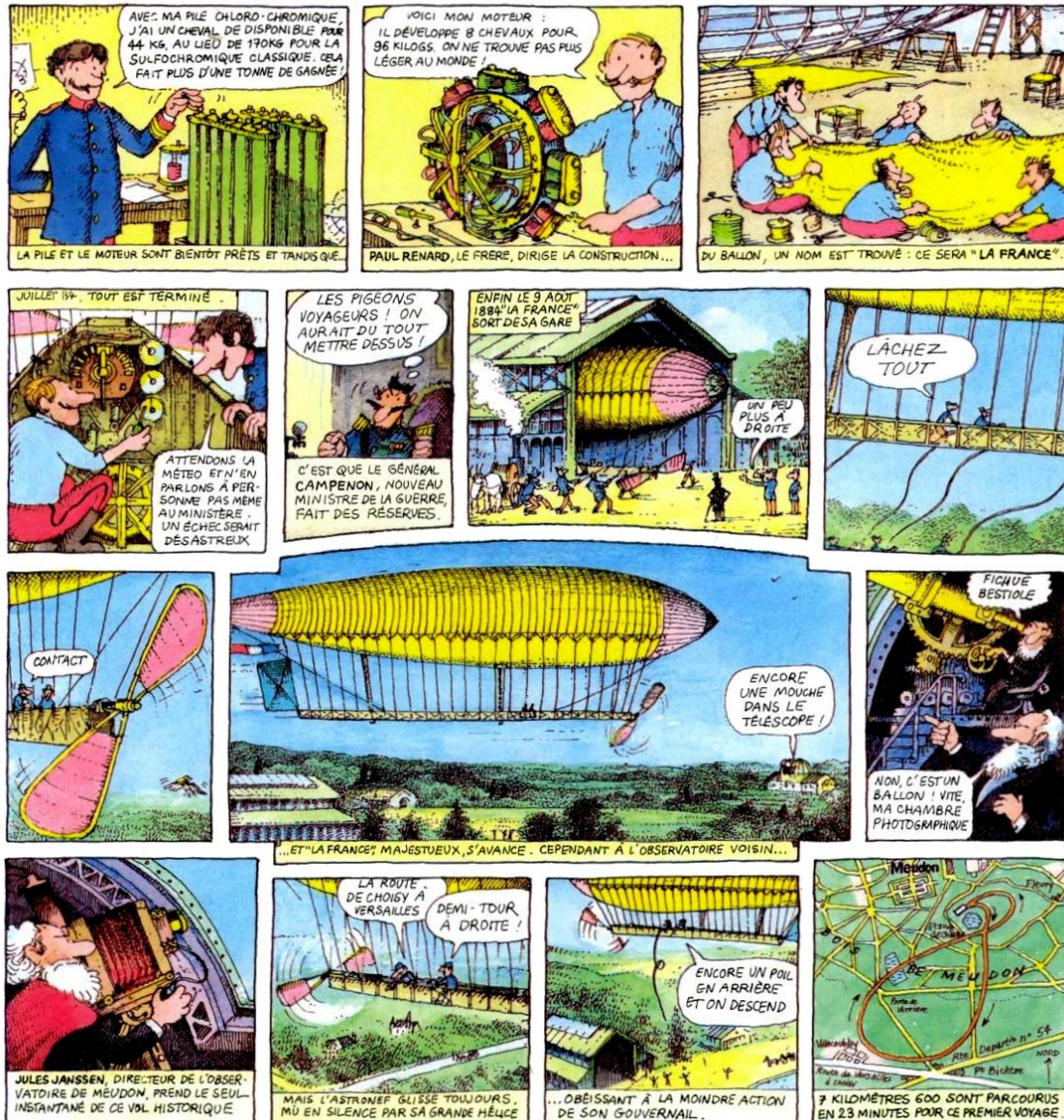


Il a fallu un siècle avant de pouvoir remonter le vent.

On devine que l'énormité de la traînée des ballons doit y être pour quelque chose !



LE PREMIER VOL AÉRIEN PILOTÉ, DIX-NEUF ANS AVANT LES FRÈRES WRIGHT. DEUX FOUS VOLANTS SUR LEUR DROLE DE MACHINE ÉLECTRIQUE. CHARLES RENARD ET ARTHUR KREBS, FONT FAIRE À LA "FRANCE" UN TOUR AU DESSUS DE LA FORÊT DE MEUDON.



In « Petites histoires des inventions qui ont changées le Monde » Jean Louis Besson, Ed : Gallimard

• 8.6 THÉORIE SUR LES MOTEURS

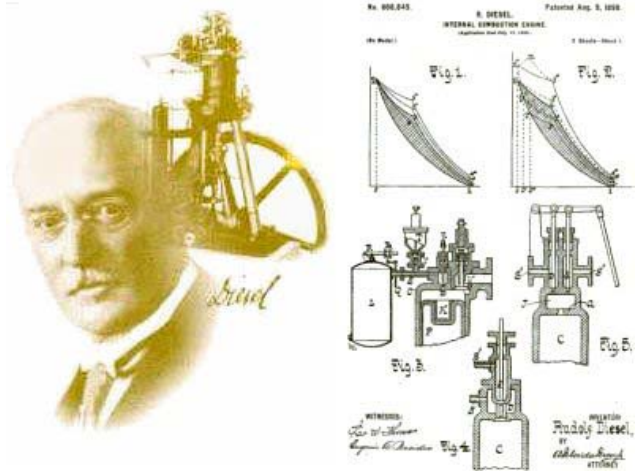
En 1860 et 1880, **Beau de Rochas** (F) et **Otto** (T) établissent les bonnes bases des moteurs à combustion interne avec compression préalable. Ci-contre, copie du mémoire de Beau de Rochas.

1^{re} aspiration produit une course entière du piston ;
 2^{de} compression produit la course suivante ;
 3^{de} inflammation au point mort et détente produit la troisième course ;
 4^{de} expulsion des gaz brûlés hors du cylindre au quatrième point mort.

En 1897, **Rudolf Diesel** (F/T) rédige son ouvrage : « *Théorie et projet d'un moteur thermique rationnel* »

Ce titre est révélateur d'une méthode de travail rare (même de nos jours), l'étude d'un objet avant sa réalisation.

Le Comte Zeppelin

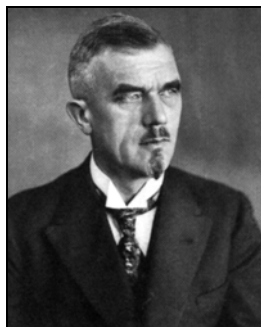


• 8.7 1900 : 1er VOL DU 1er ZEPPELIN

Premier vol d'un dirigeable rigide : **Zeppelin LZ1**
 Avec l'apparition des dirigeables rigides zeppelins, plusieurs problèmes sont correctement posés puis résolus :

- la tenue mécanique de l'enveloppe, dissociée de la tenue du gaz (voir plus haut);
- l'adaptation d'une propulsion convenable pour des engins aériens : on ne bricole plus avec ce qu'on a sur l'étagère, mais on conçoit des propulseurs pour la mission.

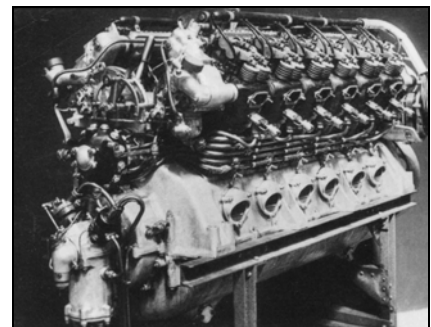
On rappelle que Zeppelin avait pour prénom Ferdinand et non Led, de même que le prénom d'Einstein était Albert et non Frank, et celui de Zola était Emile et non Gorgon.



Ludwig Dürck : l'ingénieur



Karl Maybach : le motoriste
 Petite annonce : l'auteur cherche une monture de lunettes du même modèle.



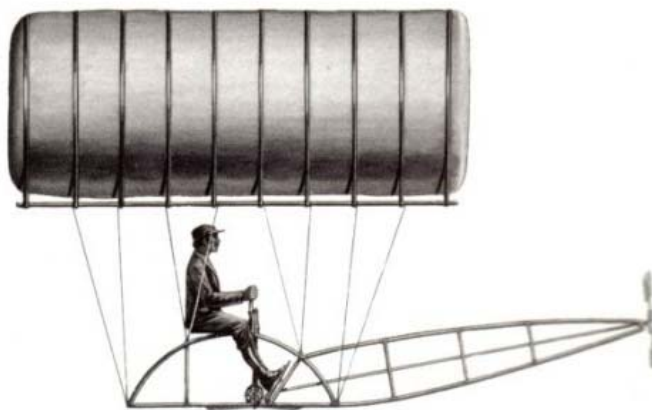
Des moteurs conçus pour une mission :
 Moteur Maybach VL-1 (LZ126, 1919)

• 8.8 1900-1914 : BOUILLONNEMENT DES IDÉES

La bicyclette volante de Ritchell – 1878

Petit dirigeable à pédales réalisé par le professeur C. E. Ritchell de Hartford (Connecticut). L'hélice quadripale était actionnée par le jeu de deux pédales à la manière de celles d'une bicyclette. Le 12 juin 1878, il s'éleva à 60 m, tenant l'air plus d'une heure. Les résultats de translation n'ont pas été précisés; ils furent probablement peu sensibles. La taille de l'enveloppe est à l'évidence sous estimée par le dessinateur.

In: « *Dirigeables* » Histoire illustrée des navires aériens.
Henry BEAUBOIS Ed. Edita Lausanne



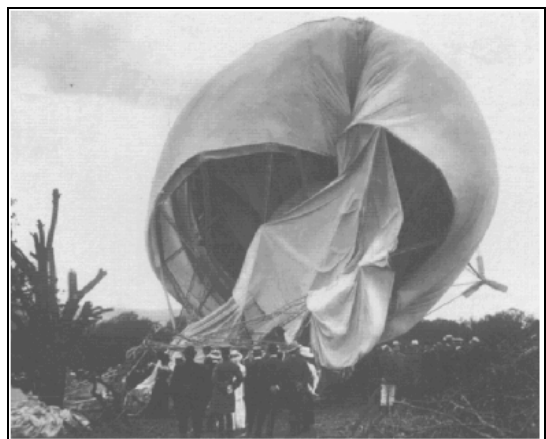
De nombreux expérimentateurs cassent du bois... Heureusement, la photographie existait aussi !



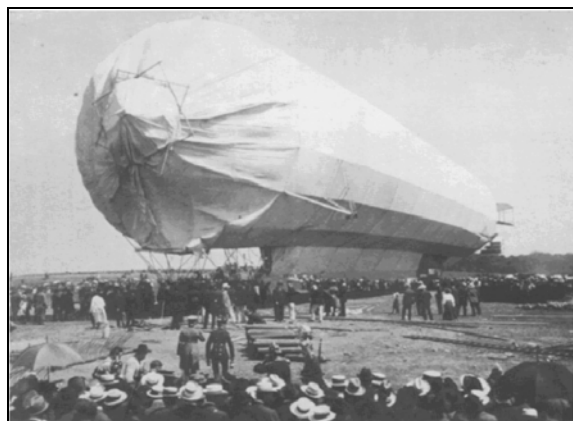
"Santos-Dumont n°2", Hornes



"Roma"



LZ5 contre un pommier, 1909



Le LZ5 a résisté au pommier

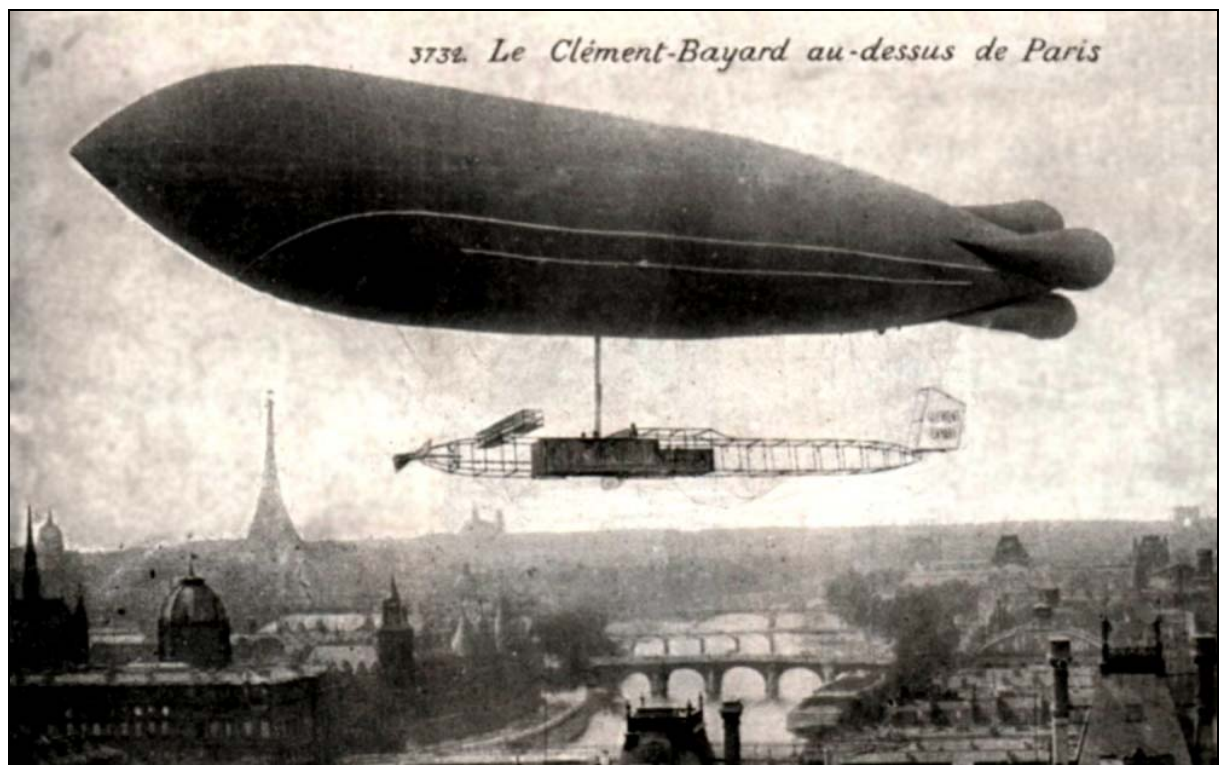
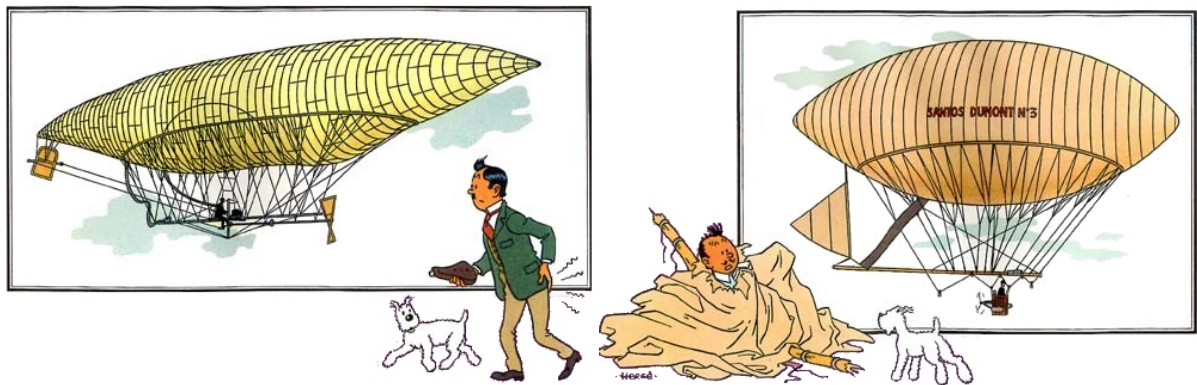
Note : le pommier en question est sans aucun doute le plus rentable de l'Histoire, il a donné lieu à la fabrication de souvenirs en quantité dépassant largement le volume de bois initial. Un vrai miracle. L'aéronef, pour sa part, a décollé après une réparation en apparence sommaire. Mais qui lui a délivré le certificat de navigabilité ?

1901 Santos DUMONT.

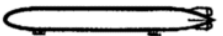
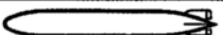
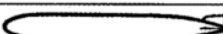
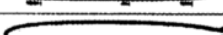
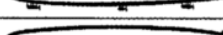
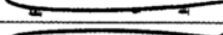
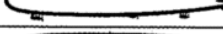
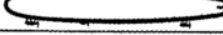
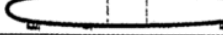
Le 19 octobre 1901, un léger vent d'ouest (10 nœuds) souffle sur Paris. A 14h30, Alberto Santos-Dumont à bord de son dirigeable N°6 ordonne le "Lâchez tout". Le dirigeable s'élève en direction de la Tour Eiffel, neuf minutes après son départ il passe et contourne la Tour, mais le moteur a des ratés et ralentit, Alberto sans harnais de sécurité quitte sa nacelle, progresse sur la quille et atteint le moteur. Le moteur redémarre, plus une minute à perdre, cap sur Saint-Cloud, 29 minutes et 30 secondes plus tard il passe la ligne d'arrivée, une minute plus tard il se pose et remporte la coupe Deutsch de la Meurthe.

Santos Dumont fut prolifique et ne se laissa pas décourager par ses échecs.



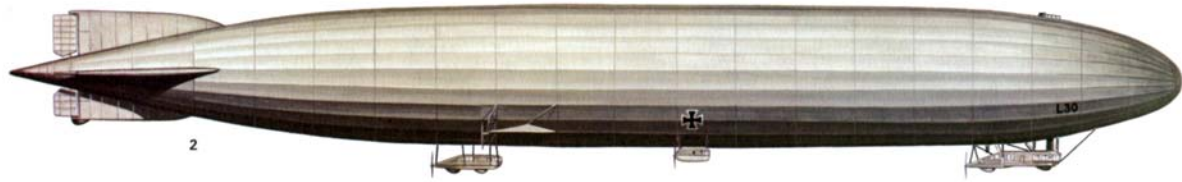


8.9 1914-1918, évolution darwinienne des zeppelins

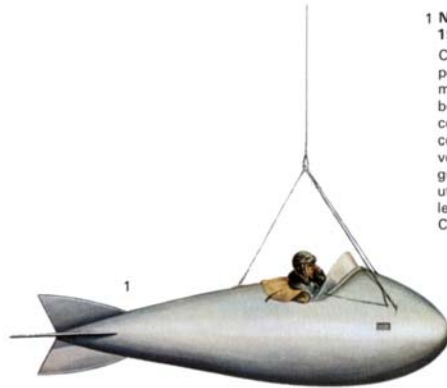
Marine-Luftschiffe		Longueur (m)	Volume (m ³)	Charge utile (kg)	Vitesse (m/s)	Plafond (m)	Année
L 3 — 8		158	22470	9200	23,4	2500	1914/15
L 9		161,4	24900	11000	23,6	3000	1915
L 10 — 19		163,5	31900	16200	26,7	3200	1915
L 20 — 24		178,5	35800	17900	26,5	3500	1915/16
L 30 — 41, 45, 47, 50		198	55200	35500	28,7	4000	1916
L 42 — 43		196,5	55500	36400	27,7	5500	1917
L 44 u. 46		196,5	55800	37800	28,9	5500	1917
L 48, 49, 51, 52, 54		196,5	55800	39000	29,9	5500	1917
L 53, 55, 56, 58, 60 — 65		196,5	56000	40000	30,2	6500	1917/18
L 57 u. 59		226,5	68500	52100	28,6	8200	1917
L 70 — 71		211,5	62200	44500	36,4	7000	1918

Evolution des zeppelins au cours de la première guerre mondiale.

Pendant la première Guerre Mondiale, l'amélioration des zeppelins porte simultanément sur la motorisation, l'aérodynamisme et la masse. Le meilleur dirigeable ayant existé, en terme d'opérabilité, est le LZ114 (rebaptisé "Dixmude"), dont on remarque l'exceptionnelle capacité d'emport, de plafond, de vitesse.



2



1 Nacelle d'observation de Zeppelin – 1915-1918

Conçue par le capitaine Ernst Lehmann, cette petite nacelle monoplace aux formes aérodynamiques était affalée par un treuil à moteur au bout d'un câble de 800 m de long. Par temps couvert, le dirigeable voguant au-dessus de la couche nuageuse, dissimulé aux yeux de l'adversaire, l'observateur pouvait, par téléphone, guider le largage des bombes. Ce dispositif fut utilisé expérimentalement pour la première fois le 17 mars 1915, lors d'un bombardement de Calais. Il ne fut généralisé que l'année suivante.

Le poste d'observateur en nacelle était très apprécié des équipages car c'était le seul endroit où l'on pouvait fumer une cigarette.

2 Zeppelin L37 – 1916-1920

Soixante-deuxième dirigeable construit à Friedrichshafen, ayant effectué sa première sortie le 9 novembre 1916, ce «super-Zeppelin» mesurait 196,5 m de long pour un diamètre de 23,9 m et il jaugeait 55 200 m³ répartis en 19 ballonnets. Il était propulsé par six moteurs Maybach HSLU de 240 ch chacun, actionnant autant d'hélices. Ces propulseurs étaient ainsi disposés : un à l'arrière de la nacelle avant, une paire aux petites nacelles motrices latérales ; une autre paire sur pylônes au-dessus de la nacelle arrière multimotrice équipée en outre d'une hélice axiale. La nacelle de commandement à l'avant portait une cheminée d'accès à l'intérieur de la carène. La vitesse propre avoisinait 115 km/h.

Affecté à la Marine (comme tous les dirigeables désignés par la simple lettre L alors que ceux de l'Armée portaient la désignation LZ à partir de 1915), le L37, basé à Seddin en Poméranie, fut notamment utilisé comme éclaireur pour des patrouilles au-dessus de la Baltique puis réformé en novembre 1917. En 1920, certains de ses éléments furent livrés au Japon en application des clauses du traité de paix.

L.-72 ; LZ114 "DIXMUDE"

Dimensions : longueur, 226,50 m ; largeur, 24 m ; hauteur, 28 m.

Propulsion : 6 moteurs Maybach de 260 ch chacun.

Ballonnets : 16, formant un volume total de 68 500 m³ d'hydrogène.

Enveloppe : en toile de coton vernie, tendue sur une carcasse en poutrelles de duralumin.

Nacelles : A l'avant, nacelle de pilotage avec un moteur accouplé à une hélice à sa partie arrière. Le long de la carène sont disposés dans des nacelles latérales deux moteurs à bâbord et deux à tribord. A l'arrière et dans l'axe, une nacelle portant le sixième moteur.

Communications : radiotélégraphie de portée de 500 milles.

Navigation : sextant gyroscopique Fleuriais ; navigraphe Le Prieur ; compas liquide.

Equipage : état-major, 5 ; arrimeurs, 10 ; mécaniciens et radios, 24 ; soit 39 au total.

Passagers : 6 places disponibles.

Performances : Masse à vide : 30 t ; masse maximale : 80 t ; masse normale de 56 t permettant d'emporter 10 t d'eau et 16 t d'essence ; rayon d'action avec 24 t d'essence et les 6 moteurs à 1 000 tr/min : 10 000 km à 77 km/h ; autonomie de 144 h à vitesse de croisière sur 4 moteurs et 36 t d'essence ; altitude maximale : 6 000 m ; taux de montée moyen : 7 m/s.

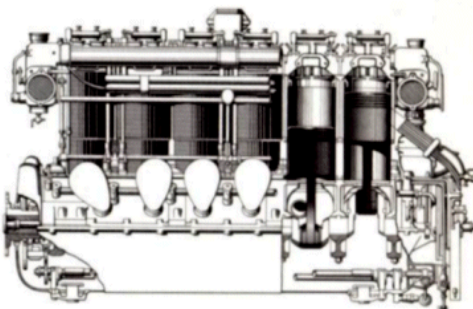
Mise en œuvre au sol : 250 hommes (moins dans des circonstances météo favorables).

Ravitaillement : en 48 h au hangar.

En vol, les occupants se trouvent dans les nacelles ou dans les postes de repos aménagés à l'intérieur du ballon de part et d'autre de la coursive centrale, elle-même reposant sur la quille axiale qui court de l'avant à l'arrière. L'accès aux nacelles se fait par une échelle, en plein air, ce qui n'est pas sans danger.



Moteur Maybach de 260 ch actionnant les Zeppelins en 1917-1918. Équipant régulièrement les dirigeables allemands durant toute la guerre, les Maybach virent leur puissance motrice passer de 210 ch en 1914 (type CX) à 240 ch en 1915 (type HSL) et à 260 ch à partir de 1917 (type IVa). C'étaient des six cylindres avec arbre à cames en tête. L'image représente à droite deux de ces cylindres en éclaté. La firme Maybach était devenue une filiale de la société Zeppelin.



Dans cette évolution, la qualité massique du moteur joue un rôle prépondérant, mais cela, tout le monde le sait, en principe (surtout si l'on a assisté au stage d'Inter Action).

• 8.10 Importance de la motorisation (parenthèse)

Bien qu'un ballon n'ait pas besoin d'une puissance minimale pour le vol (elle est nulle), plusieurs éléments militent pour l'amélioration des moteurs :

- un moteur léger et consommant peu, c'est autant de charge marchande en plus ;
- un dirigeable à but fixé doit pouvoir remonter le vent. Il faut donc diminuer les traînées pour une puissance donnée, donc limiter la masse du groupe motopropulseur et de son carburant ; ou inversement, il faut pouvoir augmenter la puissance pour augmenter la vitesse, sans augmenter la masse qui se retrouverait hélas immédiatement en volume de ballon, donc en surface mouillée, donc en traînée ;

Une particularité des ballons est la faible vitesse de croisière obtenue, au regard de la puissance installée (toujours liée à l'énormité des surfaces mouillées). L'obtention d'un rendement de propulsion acceptable est donc difficile à obtenir :

Évolution darwinienne des moteurs de zeppelins

Année	Type	Puissance en CV	Masse en kg	M/CV	Consommation g/CV/h
1899	Daimler (Mercedes)	15	385	25,70	400 g
1905	"	90	360	4,00	265
1910	"	120	450	3,75	225
1910	Adler	70	150	2,15	250
1912	"	110	200	1,81	250
1913	Maybach CX	180	462	2,56	225
1914	Maybach CX	210	414	1,97	225
1915	Maybach HSL	240	365	1,52	200
1917	Maybach IVa	260	400	1,54	200
1918	Maybach IVa	260	390	1,50	200
1927	Maybach VL 2	570	1 140	2,00	202
(II) 1935	Maybach LOP 6	800/900	?	?	170

(II) Premier Diesel adapté sur un zeppelin.

Rendement de propulsion

$$\eta_p = \frac{1}{1 + \frac{V_e}{2V}}$$

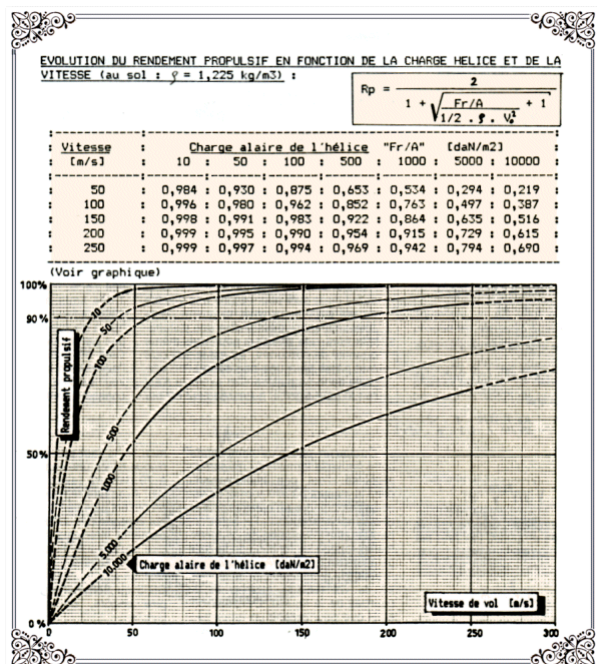
Avec :

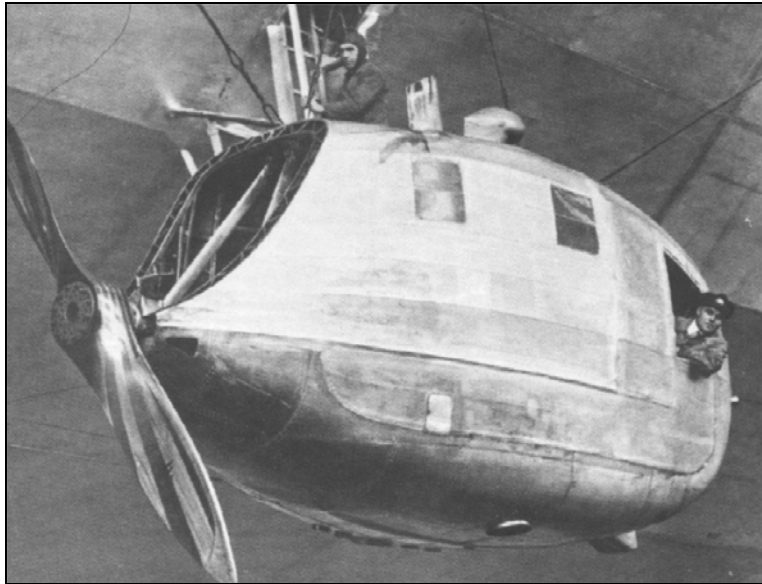
η_p :	rendement maximum théorique de propulsion
V_e :	Vitesse d'éjection des gaz derrière l'hélice [m/s]
V :	Vitesse du véhicule [m/s]



Noter l'exceptionnel diamètre de l'hélice (de l'ordre de 6 m), par comparaison avec la taille du personnage qui est certainement debout de part et d'autre de l'arbre moteur (LZ 6).

Exercice : Evaluer le régime de rotation de cette hélice en supputant la vitesse d'obturation que l'on suppose être de l'ordre du trentième de seconde (1/30^{ème}).





En voituuuure ! (LZ 127 "Graf")

Même remarque que précédemment sur le diamètre de l'hélice.

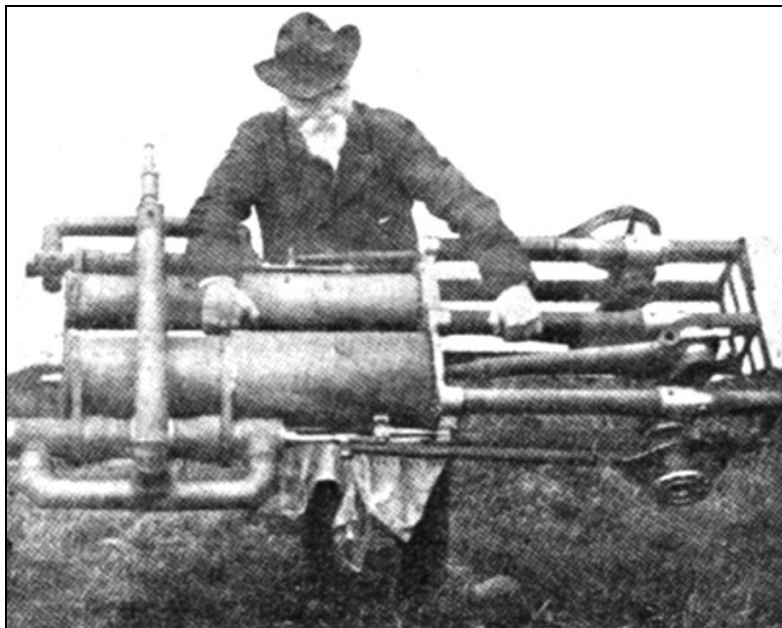
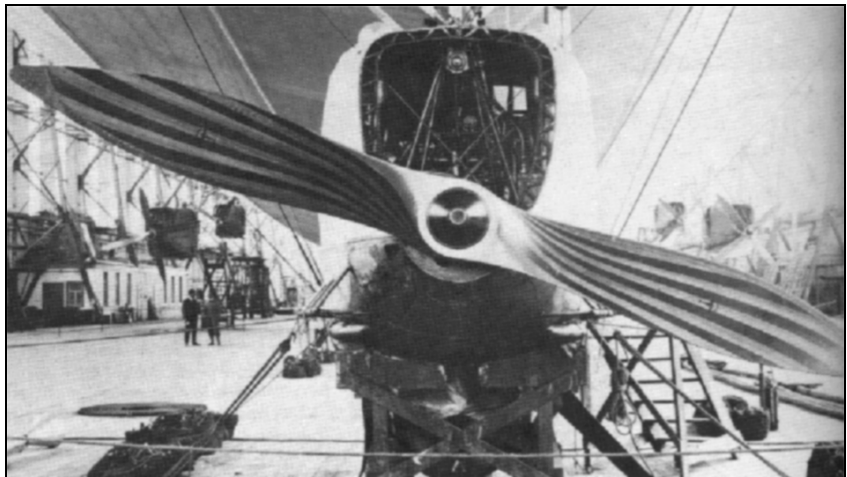
Noter également l'écope d'admission d'air du moteur sur la partie supérieure de la nacelle bien dégagée de la couche limite de cette nacelle et qui profite de la pression dynamique.

On aperçoit aussi un mécano sur l'échelle permettant d'accéder en vol à la nacelle motrice. Pas de rambardes = sélection naturelle des bons mécanos acrobates !

Du rendement, bordel !
(LZ 127 "Graf")

Noter la présence d'hélices quadripales partout sauf pour le moteur AR (exercice : pourquoi ?)

Noter à quel point les nacelles motrices sont éloignées du ballon afin de ne pas travailler dans l'épaisse couche limite de celui-ci et donc de profiter de la plus grande pression dynamique possible. Cet éloignement permet aussi de bien séparer une source de feu de la paroi du ballon et de l'hydrogène.



De la légèreté, bordel !

M. Hiram Maxim soulevant un moteur à vapeur de 180 cv (Hornes, 1903).

• 8.11 Age d'or (1918-1940) et période moderne

Comparaison de quelques véhicules.

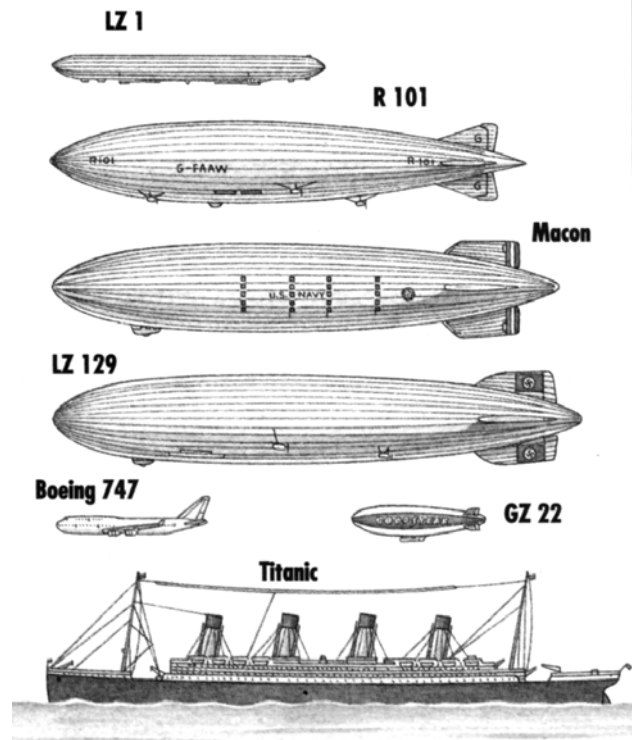
Pour un trajet donné (l'Atlantique nord, par exemple) :

- Un Boeing 747 est capable de transporter 600 passagers bien tassés à 1000 km/h en dépensant 90 t de pétrole.
- Le LZ 129 était capable de transporter une cinquantaine de passagers dans le luxe (et 70 hommes d'équipage dans un luxe moindre) à 100 km/h en dépensant 70 t de pétrole. Sa productivité spécifique n'était donc que d'un pour cent de celle du Boeing 747.

On comprend pourquoi ces ballons ont disparu et que les oiseaux sont tous de type "aérodyné" !

Noter la taille du GZ22, aussi gros que le Boeing, mais ne transportant qu'une douzaine de personnes à une vitesse de vélomoteur (sans vent), pour un coût que seule la publicité peut payer.

Echelle : longueur du Titanic 270 m
in *Les dirigeables*, Gallimard.

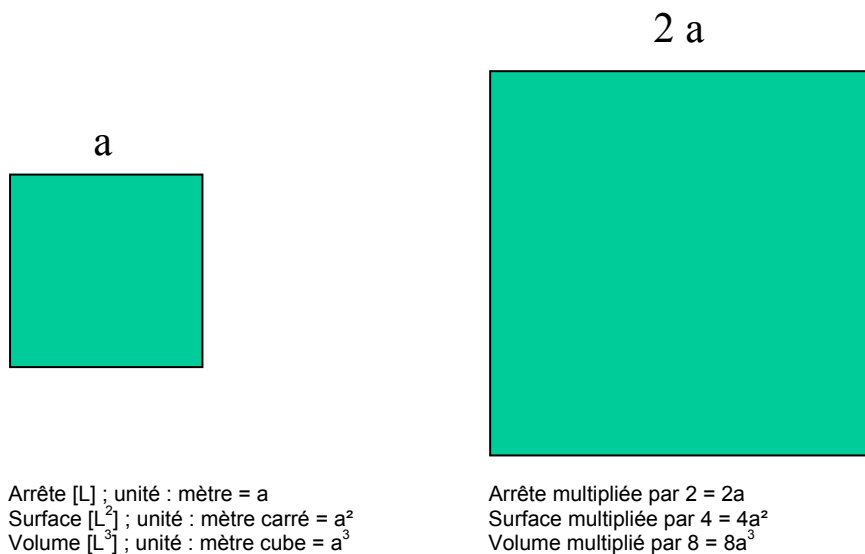


9. INCONVENIENTS TECHNIQUES

Ce titre et le suivant (10. Coûts) laisse sournisement entendre que les seuls avantages des ballons sont fantasmagiques, et que les inconvénients techniques sont rédhitoires. Si ce n'était pas le cas, il y aurait davantage de ballons en vol, car le fantasme, ça finit par coûter cher dans un monde réel confronté à des problèmes "bêtes" (ne pas mourir de faim ou de froid, etc.).

Tous les inconvénients techniques des ballons proviennent de la limitation absolue de portance, en raison de la masse volumique de l'air, qui est très faible (voir application numérique plus haut).

Avant d'examiner les ballons quant aux critères techniques, on rappelle la loi de similitude sur un cube (cf. certificat d'études primaires) :



L'inconvénient technique absolu de la faible portance de l'air a pour corollaires :

- Les inconvénients économiques : énormités des surfaces, des volumes, des traînées, des coûts ;
- Les inconvénients de sécurité : cette énormité des surfaces rend tous les ballons très sensibles à l'atmosphère.

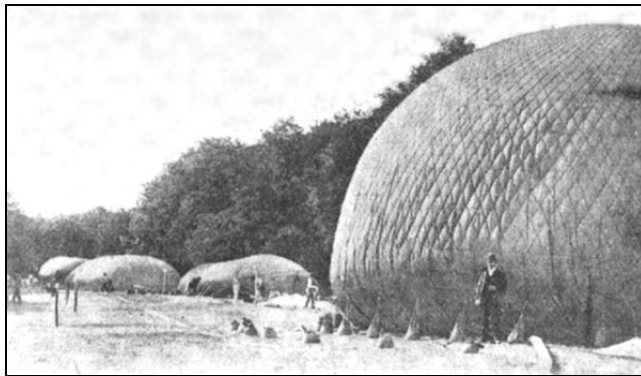
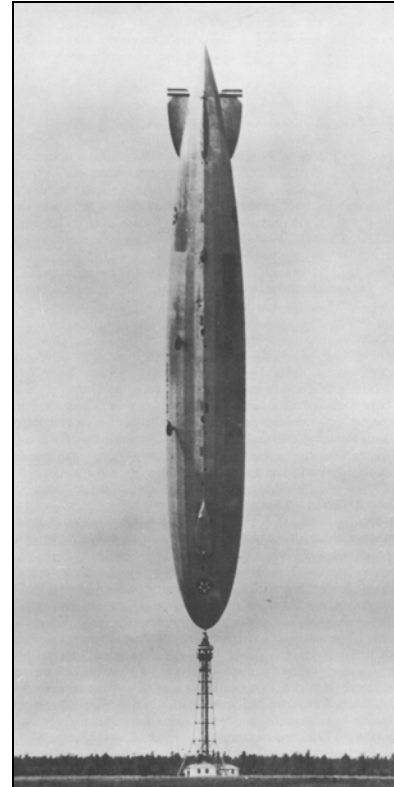
On rappelle à ce sujet que l'atmosphère réelle est composée d'oxygène et d'azote mais aussi de :

- vents, rafales, tourbillons ;
- nuages, pluie, neige, glace, grêle ;
- poussières, cendres volcaniques, cailloux, météorites ;
- radiations solaires et cosmiques ;
- oiseaux, autres aéronefs, procureur à la retraite....

Une parfaite connaissance de l'atmosphère est le préalable à tout vol en ballon.

Oublier des aspects aussi élémentaires que la tenue aux rafales ou à l'eau relève de la même débilité (au sens latin du terme) que le carburateur ne résistant pas à l'essence ou la toiture ne résistant pas au soleil.

"Los Angeles" après le passage d'une rafale
(hauteur totale env. 250 m)
Luftschiffbau Zeppelin GmbH, Friedrichshafen

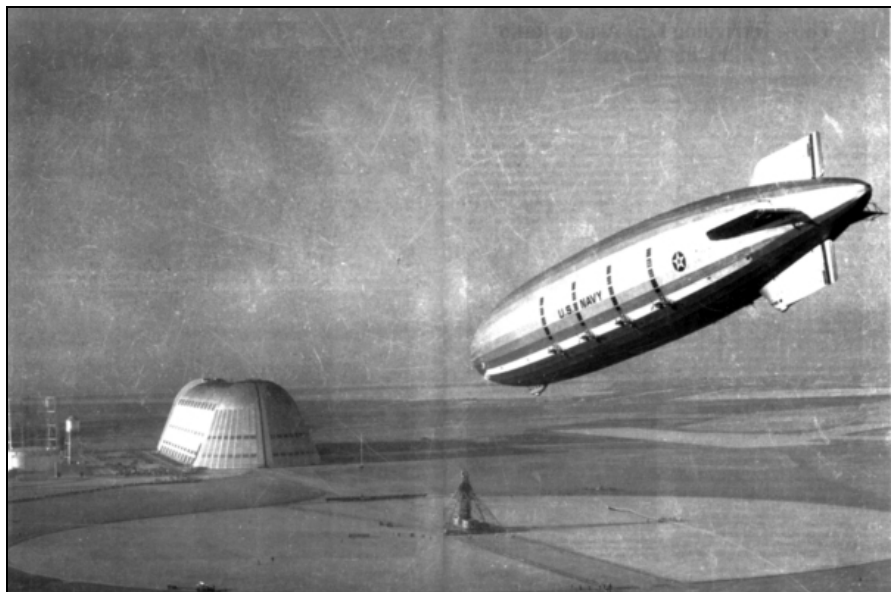


...Usure mécanique, gaz perdu
au dégonflage (Hornes,
1903)...

Noter le filet entourant
l'enveloppe. Il permet de
diminuer les contraintes par
diminution locale du rayon de
courbure de l'enveloppe. Il sert
également à transmettre la
portance à la nacelle.

...Taille léviathanesque des
hangars (pour les modèles
ne se dégonflant pas)...

Akron ou Macon dans l'Ohio.
Hangar Goodyear.
Moffet-Field



On ne doit pas omettre, les contraintes liées à la motorisation et au stockage d'énergie (masse et coût des moteurs, du carburant, etc.), qui sont critiques pour tout engin aérien.

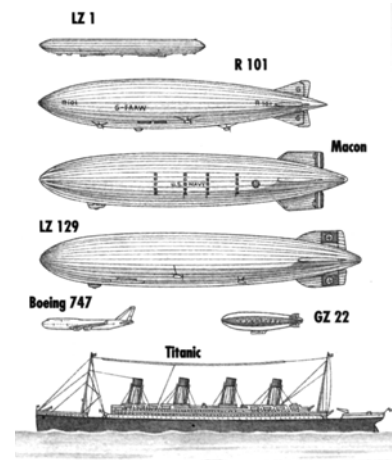
10. Coûts

• 10.1 Coûts de fabrication et d'amortissement élevés

L'énormité de la taille entraîne énormité des usines, des hangars, du nombre de personnes pour assembler les ballonnets. Il faut peut-être aussi prévoir une machine à coudre ou à souder de 250 m de long, etc.



Fabrication des ballonnets, BBC Hulton Picture Library



Piqûre de rappel : Le Titanic (270 m) donne l'échelle.
in Les dirigeables, Gallimard

Prévoir de nombreux billets de banque comme celui-ci. (collection de l'auteur)

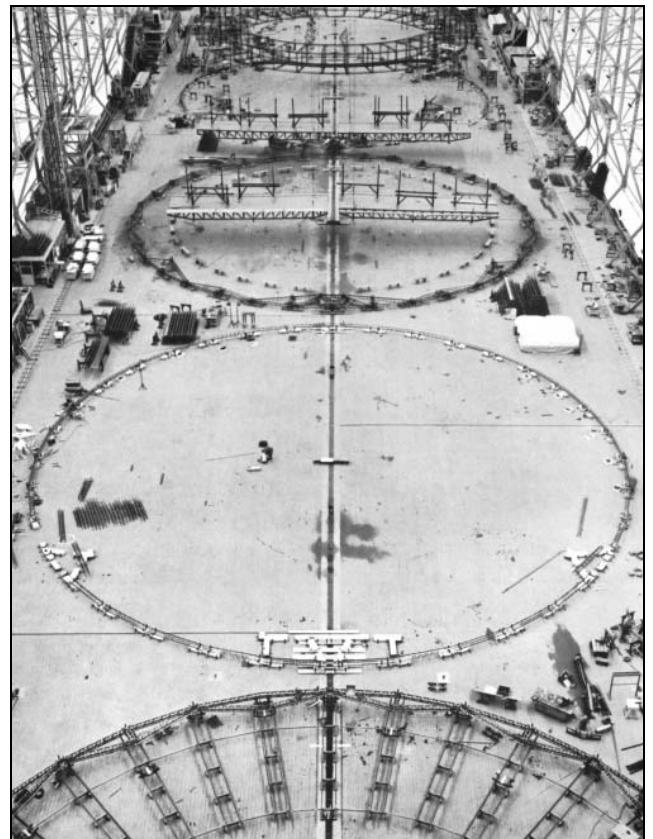


• 10.2 Coûts d'exploitation élevés

Ils sont dus aux éléments suivants :

- vitesse faible, parfois négative compte tenu du vent (-30 ... +150 km/h) ; d'où difficulté de respecter des horaires ; pour les ballons libres, le personnel au sol peut avoir des difficultés à suivre le ballon libre.
- faible durée de vie des immenses parois (mois ... dizaines de mois) du fait des agressions mécaniques, agents atmosphériques, ultraviolets ;
- consommation d'énergie énorme pour les dirigeables : (traînée aérodynamique par siège 100 à 10000 fois supérieure à celle d'un avion), assez élevée pour les ballons à air chaud ;
- fuite de gaz inévitable pour les ballons à gaz (molécules parfois coûteuses, très petites, diffusant facilement) ;
- nécessité de beaucoup de personnel et de matériel au sol, à chaque étape (cf. photo ci-dessous).

Manœuvre d'amarrage du Zeppelin LZ129 "Hindenburg" à Lakehurst (Ullstein Bilderdienst)



Assemblage du LZ129 - cadres de 40 m de diamètre
idée d'échelle : le Boeing 737 ne fait que 28 m d'envergure

11. INCONVENIENTS TECHNIQUES OU AVANTAGES FANTASMATIQUES

Les inconvénients techniques des ballons pleuvent comme vache qui pisse. Ils sont tels que l'on peut se demander pourquoi ces engins ont existé, et pourquoi autant d'argent a été dépensé pour les construire et pour les utiliser.

La raison principale de ce fait est liée à la taille des ballons. Comme disait Napoléon, qui s'y connaissait en taille, "ce qui est grand est beau".

Le nombre élevé d'accidents, l'aspect spectaculaire, film du LZ129 brûlant à Lakehurst, tout cela remplit les librairies et les cerveaux, et les fantasmes s'entretiennent automatiquement (chaque génération d'ingénieurs a droit à son projet fantasmagique de dirigeable... jusqu'au moment où l'on se rend compte de son inutilité).



12. AVANTAGES FANTASMATIQUES

Dans le soleil couchant, à l'arrivée du premier vol transpacifique, le Graf Zeppelin survole la baie de San Francisco.



Extraordinaire non ?

Le Hindenburg arrive à Lakehurst

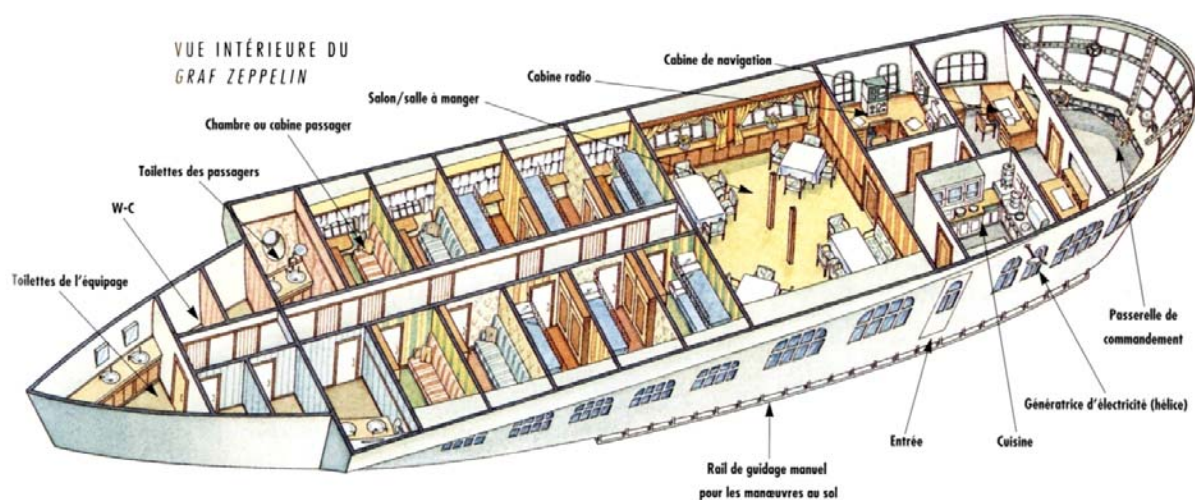


La seule manière de financer un programme de dirigeable étant le fantasme, voyons quels ont été les fantasmes des différentes nations.

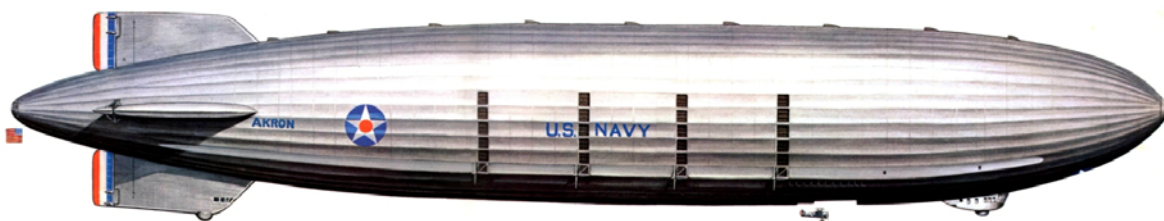
Le Fantasme allemand (réalisé), traverser l'atlantique en deux jours ! (LZ 129 Hindenburg)



Fantasme allemand (bis) : aller en Amérique du sud le plus vite possible (avant guerre) dans un confort digne de l'orient express. Ce n'est pas du transport mais véritablement du voyage.



Le fantasma de la marine américaine (réalisé), le dirigeable porte avion !
USS "AKRON" - 1931



Appareillage de suspension des avions

L'avion, un Curtiss F-9C2, était un chasseur biplace d'une envergure de 8,8 m et de 5,8 m de long. Il était actionné par un moteur de 400 ch à refroidissement par air, lui donnant une vitesse de 290 km/h.

L'appareil est ici représenté suspendu par son crochet en forme de crosse au trapèze escamotable de bord fait d'une poutre en treillis dont les deux éléments sont repliables. Un petit pavillon rectangulaire lesté d'un poids servait de signal pour les manœuvres à effectuer.

Groupe motopropulseur

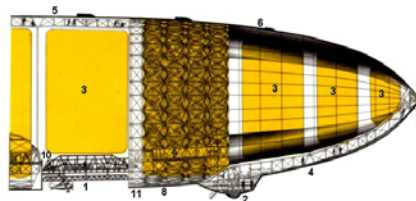
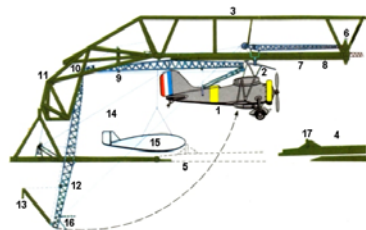
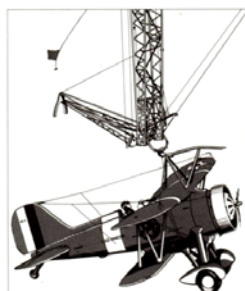
Complètement enclos à l'intérieur de l'enveloppe, le moteur Maybach à 12 cylindres en V commandait par démultiplicateur et renvoi d'angle une hélice bipale en bois assujettie par des mâts au flanc de la carène et orientable dans les quatre sens : avant, arrière, vers le haut ou vers le bas. Les réservoirs d'essence, d'huile et d'eau sont montés sur des traverses à l'intérieur de la carcasse. Le gros conduit coudé achemine les gaz d'échappement vers les condensateurs extérieurs de la vapeur d'eau précédemment décrits. La silhouette du personnage donne l'échelle de l'équipement.



Nacelle avant

Accolée au ventre de la carène, cette nacelle contenait les postes de commandement, de pilotage, de navigation et de radiotélégraphie, en liaison par fil avec les nacelles motrices et la petite nacelle de secours. De larges baies étaient ménagées sur toute sa longueur jusqu'à la pointe arrière. Un escalier incorporé escamotable avec rampe en permettait l'accès à terre. Des projecteurs orientables étaient fixés à l'aplomb d'une des baies. On remarque également les mains courantes pour les manœuvres au sol, ainsi que le volumineux amortisseur pneumatique d'atterrissage.

1. Appareil F-9C2
2. Fourche à trolley de l'avion
3. Pont supportant l'ensemble du dispositif
4. Trappe (ouverte)
5. Trappe (fermée)
6. Treuil
7. Appareil de tension
8. Monorail
9. Trapèze en position rétractée
10. Axe du trapèze
11. Trapèze de support
12. Trapèze en position basse
13. Contrepoids
14. Câble de commande
15. Nacelle d'observation
16. Fourche de centrage
17. Extincteur



Coupe schématique de la section antérieure du dirigeable «Akron»

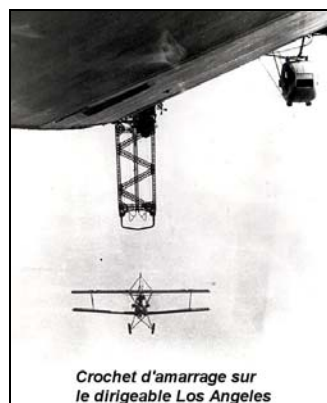
1. Logement des avions et des membres d'équipage
2. Nacelle de commandement
3. Cellules d'hélium
4. Course inférieure
5. Course supérieure
6. Plate-forme de tir
7. Plate-forme d'observation
8. Anneaux intermédiaires
9. Cellule à gaz et haubans de croisillonnage
10. Plate-forme de treuil
11. Anneau principal



Avion Sparrowhawk en retour de mission sous le dirigeable "Akron"



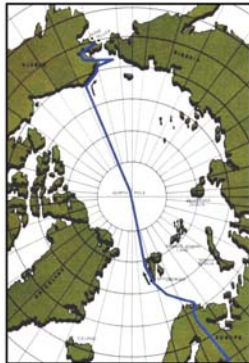
Avion Sparrowhawk en manœuvre de départ sous le dirigeable "Akron"



Crochet d'amarrage sur le dirigeable Los Angeles

La longueur du crochet d'amarrage est nécessaire pour dégager l'avion de la couche limite du ballon.
 L'avion en effet arrive en vol !

Le fantasma italo-norvégien (réalisé), le dirigeable au pôle nord !



Nobile N1 «Norge» – 1926

Du type créé par le colonel italien Umberto Nobile, ce dirigeable semi-rigide à quille longitudinale triangulaire épousant le contour inférieur de l'enveloppe avait été commandé avec le concours du mécène américain James W. Ellsworth par l'explorateur norvégien Roald Amundsen en vue du survol du pôle et de la calotte arctique.

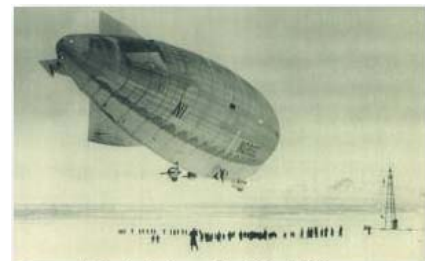
D'une longueur de 80 m, jaugeant 19 200 m³, il était actionné par trois moteurs Maybach de 260 ch chacun. Quatre nacelles l'équipaient: une longue nacelle de commandement et pilotage, suivie de trois nacelles motrices, deux latérales au milieu de la carène et une axiale arrière. En outre, une petite nacelle d'observation pouvait être abaissée par un treuil sous le dirigeable. L'équipage, qui avait accès à la quille sur toute sa longueur, était de 16 hommes, le colonel Nobile commandant le dirigeable, dont les commandes de direction et de profondeur étaient confiées à des Norvégiens.

Avant fait sa première sortie en avril 1924, le «Norge» partit de Rome le 10 avril 1926 et arriva au Spitzberg à sa base de la Baie-du-Roi le 7 mai. Le 11 il mit le cap sur le pôle Nord, qui fut atteint le lendemain. Suivant le programme prévu, le parcours se poursuivit, malgré la brume, la formation de glace et de givre alourdissant le dirigeable, jusqu'en Alaska. L'atterrissage s'opéra à Teller, à quelques kilomètres de la ville de Nome, point fixé au plan de vol. Un parcours de 5500 km en 68 heures 30 minutes avait été remarquablement exécuté.

Carte du parcours transpolaire effectué par le «Norge» de l'expédition Amundsen-Ellsworth-Nobile de la Baie-du-Roi (Spitzberg) à Teller (Alaska) en mai 1926.



Le Norge en route vers le Pôle Nord.



Arrivée du Norge à la baie du Roi.

Le second dirigeable de Nobile «Italia» s'est abîmé sur la route du pôle en 1928, probablement par décrochage dynamique, lié à la surcharge en glace accumulée sur la paroi. Le sauvetage tragique des occupants de ce dirigeable occupe encore les esprits: mort d'Amundsen et de Guilbaud dans le Latham 47/02, liaison radio avec un amateur russe, brise-glaces Krassin etc.

"L'Italia au Pôle Nord" Umberto NOBILE Ed. La Madeleine 1933.



L'Italia arrive au Spitzberg



La tente rouge des naufragés



Le sauvetage par le brise glace russe "Krassin"



Nobile N4 «Italia» – 1928

L'«Italia», quatrième dirigeable de la série conçue par l'ingénieur Umberto Nobile, avait les mêmes caractéristiques dimensionnelles, de volume, de puissance motrice que le N1 «Norge». Son enveloppe avait reçu quelques renforcements pour la protéger contre les projections de glaçons par les hélices, à la suite des enseignements recueillis lors du parcours transpolaire de son prédécesseur le «Norge».

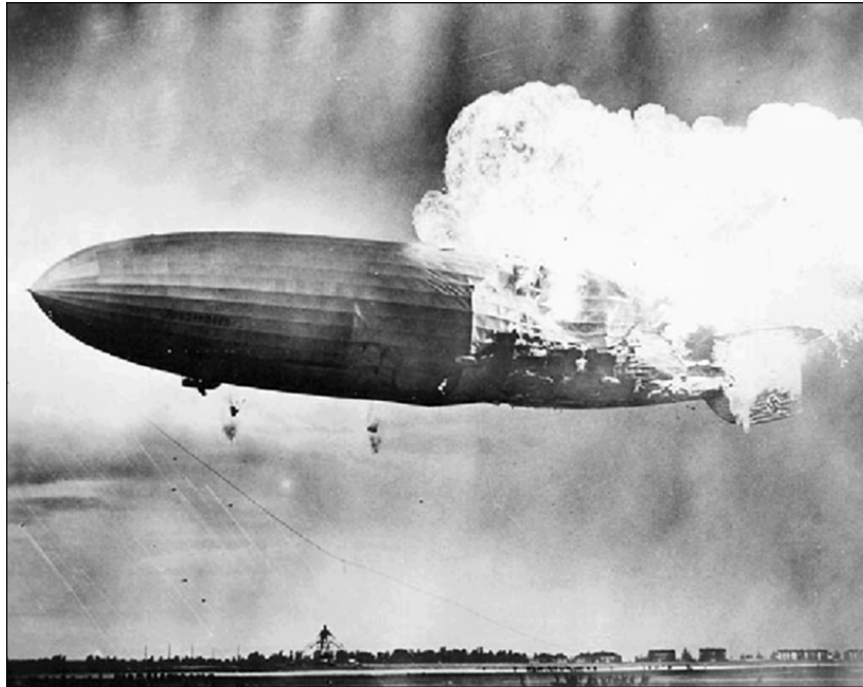
Les philatélistes ne s'y trompent pas :



Si vous avez ceci qui vous encombre, je puis à la rigueur vous débarrasser.



Si Madame en a marre de voir traîner ces vieux papiers, faites-moi signe.



LZ 129 "Hindenburg" en train de brûler en 1937 à Lakehurst. Echelle : longueur de l'appareil 250 m.

Ci-dessous, le même "Hindenburg" en train de brûler en couleurs (ça rajoute au spectaculaire fantasmagorique). film probable : Kodak (cf. référence de l'image). Appareil probable : Leica, parce qu'il n'y avait presque rien d'autre à l'époque utilisant le film cinématographique de 35 mm.

Int'l museum of photography George Eastman house.



C'est surtout l'accident du Hindenburg qui a alimenté tous les fantasmes de grandeur et de chute, en raison de la présence de caméras.



Élément central du fantasme du dirigeable (imaginez la chevauchée des Walkyries avec le film de l'accident).

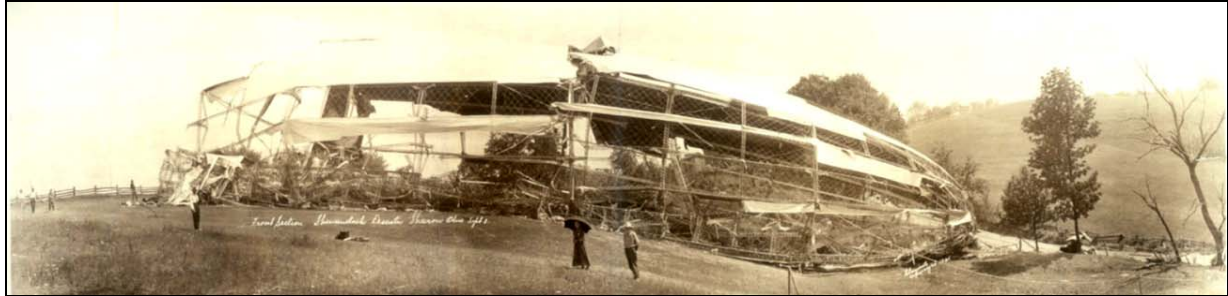
En visionnant le film (Cf. Site Inter-Action au chapitre : publications : <http://inter.action.free.fr>), notez la vitesse de déflagration de l'hydrogène (environ 10 m/s) : ce n'est pas une explosion.

Le fantôme est encore tellement présent que la ville de Lakehurst est probablement plus connue pour son accident de dirigeable que pour tout autre chose :

*Another place to visit: Lakehurst.
Drive carefully (danger : possible crash of
airships)*



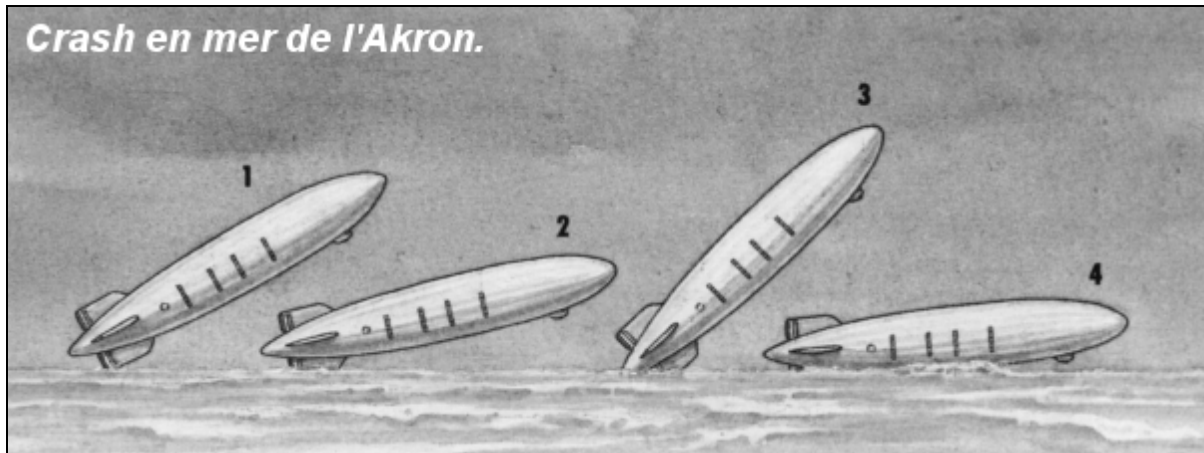
Le "Shenandoah" a lui aussi contribué au fantôme et fait la fortune des tailleurs du coin.
A vendre : imperméables en toile de dirigeable.



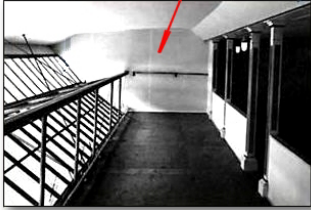
Shenandoah coll. Carl Grieve

Note : le chargement des ballonnets à l'hélium n'a pas empêché les dirigeables américains de tomber eux aussi, par rupture sous rafales, talonnage dans l'eau, etc. Il est remarquable de noter que l'accident de l'un des dirigeables porte-avion ("Akron") a fait plus de deux fois plus de morts que celui du "Hindenburg" pourtant gonflé à l'hydrogène.

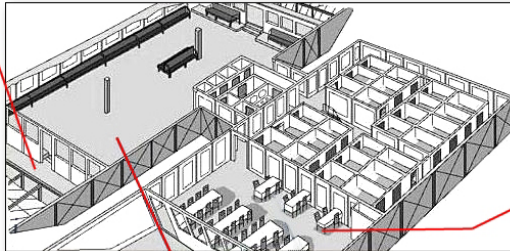
Crash en mer de l'Akron.



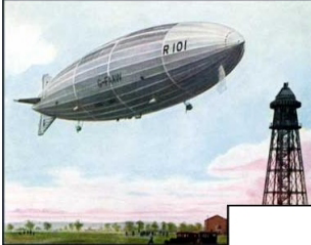
Le fantasme anglais est toujours teinté de "*comfort*", c'est indiscutable : aller aux Indes le plus vite possible...
Cabine du R101 : *cosy, isn't it ?*



l'observatoire



la salle à dîner



le salon

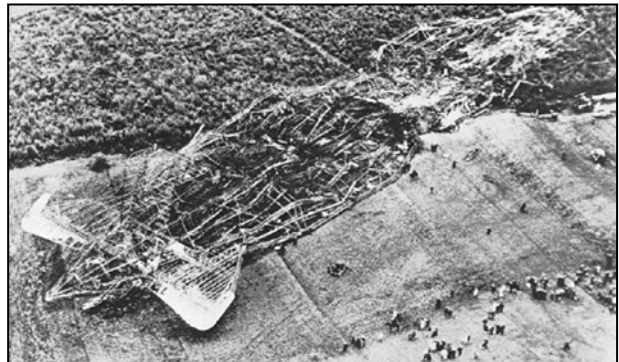


Intérieur de la cabine de commandement du R-100.

Pont promenade, salle de danse, salle de restaurant, cabines individuelles etc...

Hélas, hélas, hélas, le "*comfort*" n'empêche pas le comique ou le ridicule : le R101, qui, sur la route Angleterre-Inde, s'est écrasé sur la première colline sérieuse, à Beauvais (Oise), pendant la traversée inaugurale, en est un exemple de plus, si le Titanic n'a pas suffi. La technique anglaise (de casser l'appareil pendant la traversée inaugurale) a pour corollaire d'éliminer les grosses huiles (qui font la traversée inaugurale), ce qui remet les pendules à l'heure de la réalité "bête".

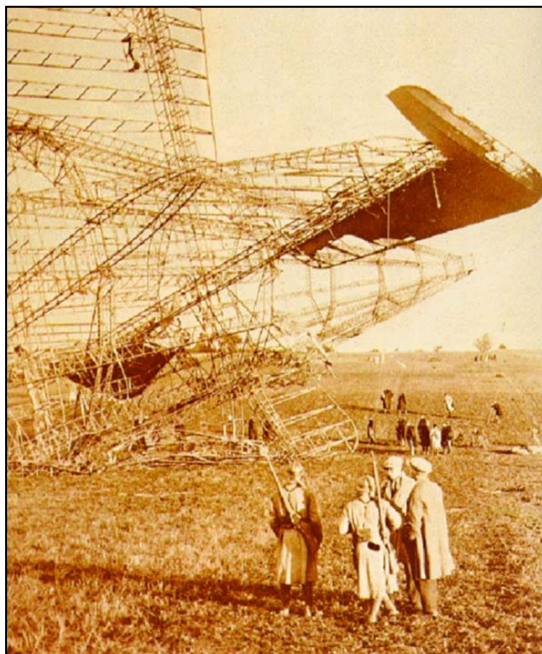
Beauvais (Oise) : son musée du dirigeable (comme quoi rien n'est perdu pour tout le monde).



R101, arrêté à Beauvais sur la route Cardington – Indes

Qui n'a pas son morceau de dirigeable ?

Noter la structure de l'appareil et ce qui reste de l'entoilage (actuellement au musée de Cardington, *another place to visit*)



13. INTERETS DES BALLONS

Mais alors, direz-vous, à quoi ça sert, un ballon ? Simple, docteur Watson, il faut utiliser les inconvénients comme avantages, là où les critères rationnels ne fonctionnent plus !

- **13.1 Propagande**



Le dirigeable est gros, énorme, coûte très cher, est rare, ne peut sortir que par beau temps calme, alimente toutes les discussions : « Doudes les kondizions remblies bour la brobagande, Herr Doctor ! »

Le pouvoir extraordinaire que possède les ballons, pour fasciner les esprits a parfaitement été compris de tous les organismes de propagande :

"Goebbels affirmait que les Zeppelins gardaient encore un rôle très important. Non pas, certes, dans le domaine militaire, il était forcé d'en convenir, mais dans celui de la propagande. Ne voyait-on pas l'effet produit sur l'étranger par les exploits sensationnels de ces appareils? A l'occasion des plébiscites et des référendums faisant le fond de la politique hitlérienne, n'y aurait-il pas moyen d'employer rentablement ces aérostats impressionnants? Et le grand chef du Propaganda Staffel d'évoquer les grandes machines survolant le Reich, lançant jour et nuit des proclamations enflammées (sic) en faveur du régime, faisant pleuvoir les tracts et les émissions mégaphoniques sur les populations extasiées...."

(Extrait de "l'étrange histoire des zeppelins" Maurice Role France Empire 1972).



Zeppelin LZ129 survolant la porte de Brandebourg (Berlin), 1936.
Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz



"Dem deutscher Volk". Reichstag survolé par le "Graf".



Notez les anneaux olympiques sur les flancs du Hindenburg.

La grande taille absolument fascinante des dirigeables les rend visibles de loin. Ces vaisseaux étant lents et volant bas, le message est, de plus, bien visible et longtemps. De nuit, on peut en faire des lanternes chinoises géantes. Dans le langage moderne, propagande se dit plutôt "publicité". Le but reste le même : anesthésie des cerveaux. On note que ça marche aussi dans les universités et autres lieux censés conserver le niveau de savoir d'une nation. L'anesthésie fonctionne à plein.



Petits dirigeables publicitaires (40 m).

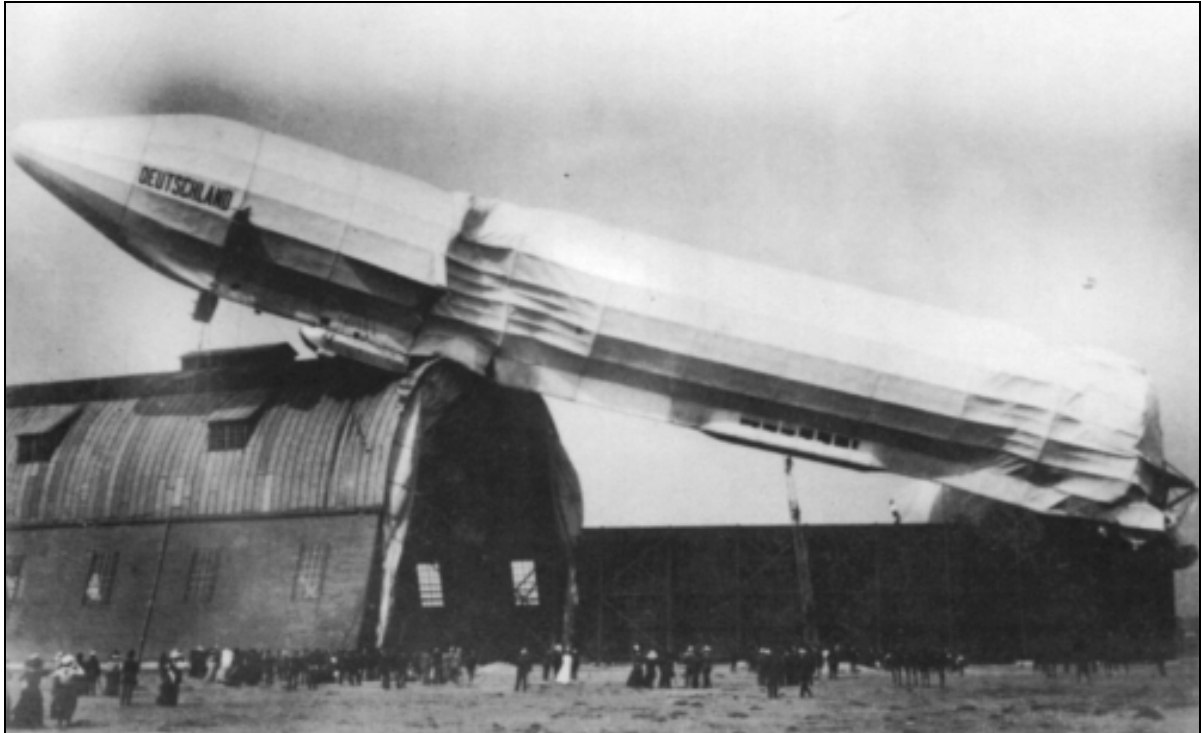
• 13.2 Ballades

Si la propagande publicitaire peut se payer des objets de fascination pour la masse, il existe également une "niche" (comme on dit en mercatique) de personnes capables de payer le prix d'un billet transatlantique pour faire une balade sur un lac. On exploite alors l'effet "Barnum" (« à chaque minute naît un gogo »²).

Le sentiment de faire partie d'une élite rare, de survoler la masse avec puissance, lenteur et majesté vaut bien quelques sacrifices.

Les limitations d'emploi (basse altitude de vol, lenteur, ne volant que par beau temps calme) sont autant d'arguments favorables pour ces belles ballades aériennes.

Zeppelin NT
www.zeppelin-nt.com



Descente des passagers du "Deutschland II" après un incident mineur (quelle aventure !).
Luftschiffbau Zeppelin GmbH, Friedrichshafen

Noter la hauteur de l'échelle permettant une sélection naturelle des passagers (après paiement) comme pour les mécanos plus haut.

Pour les aéronautes ayant compte en banque fourni, soucieux d'aventure et de vol silencieux, une autre forme de ballade réside dans l'art de ne pas trop savoir dans quel lieu atterrir, à l'aide d'un ballon libre (variante moins coûteuse : ballons captifs, sans ballast et sans *impedimenta*).

Si l'on est vraiment riche et que l'on dispose de temps, on peut faire le tour du Monde comme cela. Le tour du Monde, c'est finalement idiot : on revient au point de départ et il n'y a aucune preuve de l'exploit. Il vaut mieux le demi-tour : la preuve est indiscutable.

Concours international de ballons de Stanton Harcourt
Keystone in Cessac & Tréherne, Physique 2èC, 1966



² Pour en savoir plus : <http://pseudo-science.org/barnum.pdf>

• 13.3 Usage météorologique

À condition d'éliminer tout ce qui ne sert pas (pas de moteur, pas de carburant, pas de pilote, pas de nacelle), de gonfler avec un gaz bon marché, de revenir à un ballon rustique à coût minimal, il existe un usage intéressant du ballon, celui du sondage atmosphérique, déjà cité. En utilisant des parois très élastiques qui se distendent avec l'altitude, on a pu atteindre 40 km.



Noter sur la photographie de droite : l'absence d'équipement superflu, le parachute de récupération, la beauté des nuages (le photographe a sans doute utilisé un filtre polarisant pour assombrir le ciel).

Archives photographiques de la Météorologie Nationale in
Cessac & Tréherne, Physique 2èC, 1966



• 13.4 Usage pour anniversaire

L'utilisation d'un ballon minimal pour animer vos soirées surfaites est très efficace.

En fin de soirée, vous pourriez être tentés de vouloir respirer de l'hélium pour vérifier une loi de la physique (fréquence de vibration des cordes vocales en fonction de la masse volumique du gaz les entourant) ou plus vraisemblablement pour faire partie du monde débile de Saturnin le canard. Il faut alors penser à ne pas s'étouffer (eh oui, l'hélium, même s'il n'est pas toxique à respirer, ça ne remplace pas l'oxygène au niveau des globules rouges !).

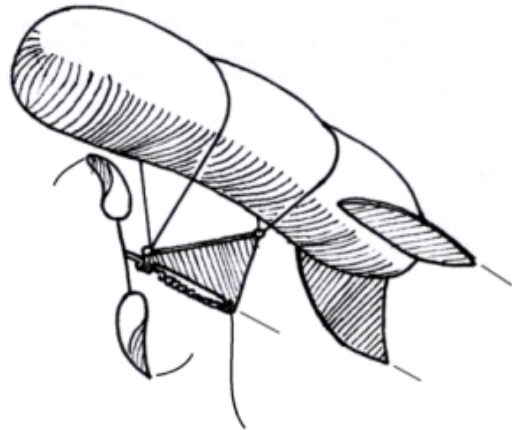
Exemple de ballon d'intérieur :

25 g seulement de masse totale au décollage, incluant :

- enveloppe et gaz ;
- gondole ;
- stockage d'énergie (élastique) ;
- moteur à élastique et hélice ;
- guiderope (câble reposant partiellement au sol et permettant une stabilisation en altitude).

Noter le diamètre de l'hélice.

Ballon aimablement fourni par M. Lassalle
Dessin d'après photographie de l'auteur.



• 13.5 Intérêt artistique



Que voir sur la photographie ci-contre ?

Maquettes de soufflerie ou art contemporain ?

Hornes (1903)

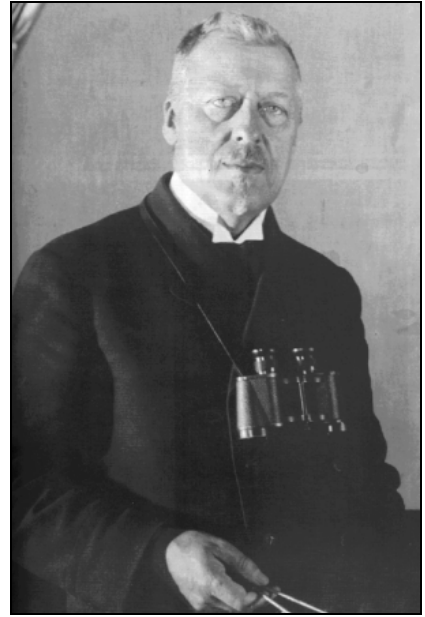
- **13.6 Prestige "Marine"**

Nul doute qu'avec tenue et accessoires comme ceux des personnages ci-contre et ci-dessous, vous gagnez !



WITTEMANN au sextant, dans le "Graf"

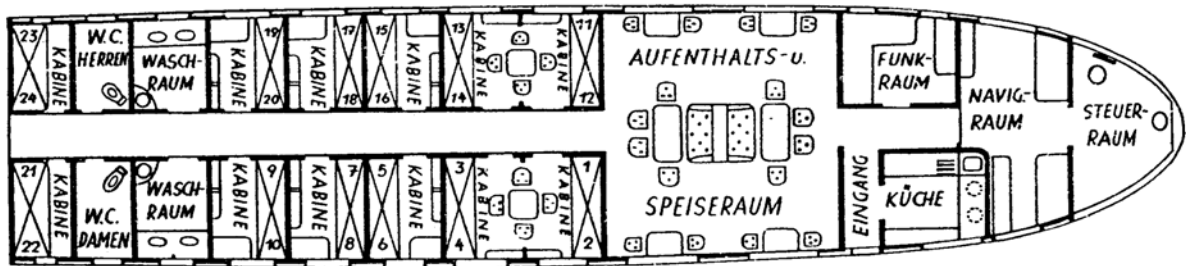
Hugo ECKENER : économiste et journaliste au Frankfurter Zeitung, devenu commandant de Zeppelins TRH



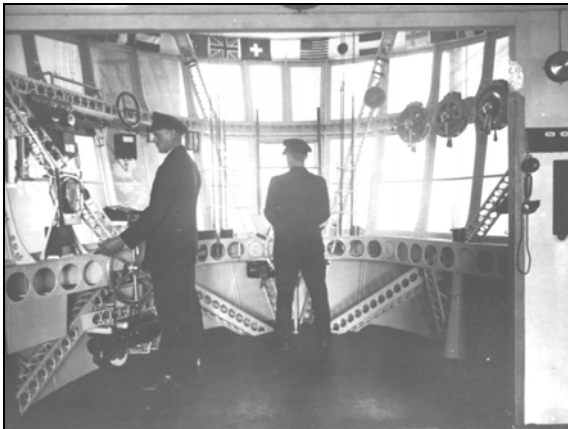
14. RÊVES

- **14.1 Rêves passés**

Les quelques vues ci-dessous donnent une idée bien partielle de l'ambiance à bord du Zeppelin LZ 127 "Graf", seul ballon dirigeable ayant été exploité sans accident.



Coupe horizontale de la gondole du LZ127 "Graf". "L'avion, c'est du transport, le dirigeable, c'est du voyage"



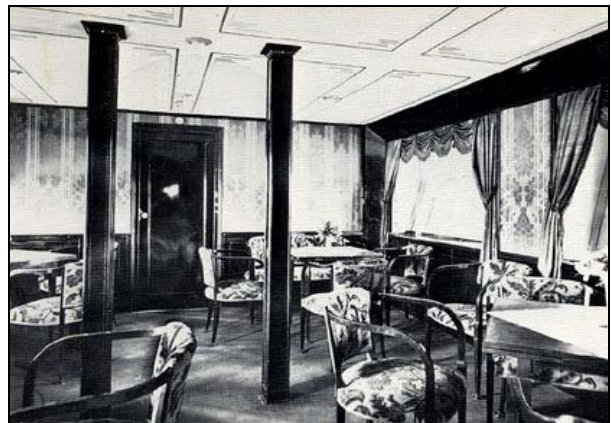
Salle de commandement du "Graf".
Notez la présence de deux barreaux :
profondeur à gauche, direction au centre
Voyez également les commandes des salles des machines,
l'altimètre, le téléphone de liaison.



Salle de navigation du "Graf".
Si tous les aéronefs avaient de telles salles de navigation...



Salle à manger du "Graf"



Salle à manger du "Graf"

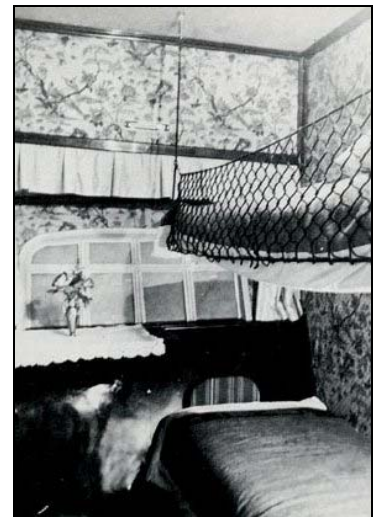


Chambre du "Graf"

Les voyages à bord du Graf Zeppelin devaient plus se rapprocher des romans de Jules Vernes (*Robur le conquérant*, *Vingt mille lieux sous les mers*, *cinq semaine en ballon*) que du transport actuel dans des compagnies charter.

Dans un décors années vingt, on pouvait prendre son thé en contemplant à travers les baies vitrées le coucher de soleil sur l'océan, le tout en écoutant une mélodie de Mozart sur un gramophone 78 tours.

Au matin, collation servie par un maître d'hôtel en livrée dans un service en porcelaine ultra légère siglée Zeppelin puis petite promenade digestive le long des coursives inférieures (près d'un demi kilomètre aller-retour). Pour les plus sportifs, il était possible d'accéder aux plates-formes supérieures situées au sommet de l'enveloppe du dirigeable, et de là, "chevaucher" cet énorme cétacé dans l'infini bleuté de l'azur.....

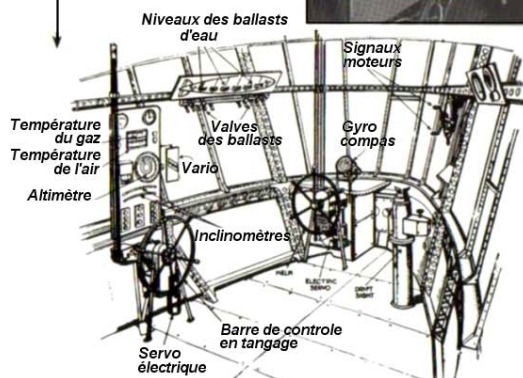
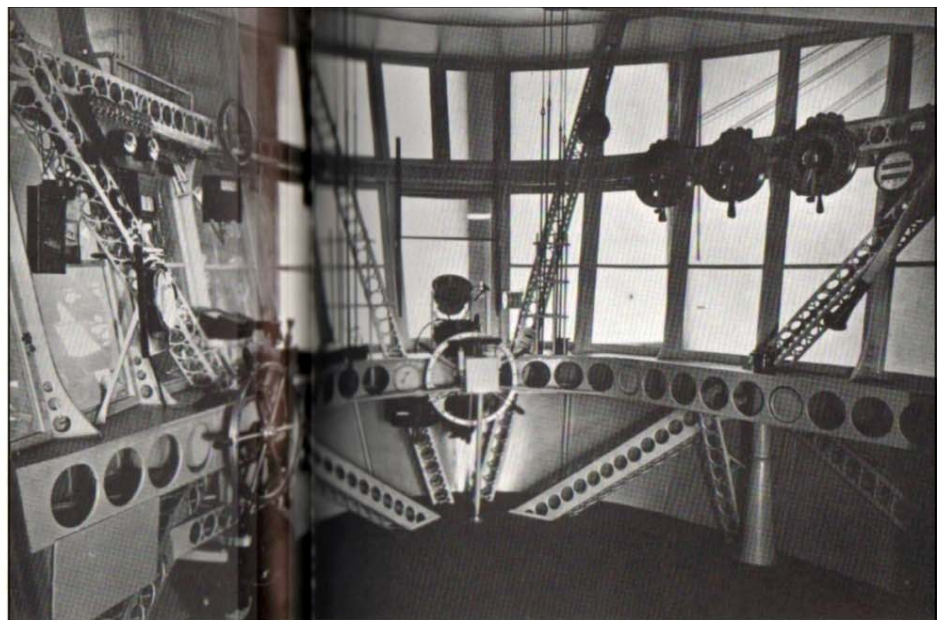


Chambre en position couchette.

LE POSTE DE NAVIGATION

Salle de pilotage du Graf Zeppelin. En dépit d'une apparence simplifiée, le pilotage des zeppelin était un art. Le plus difficile était l'atterrissage, surtout la nuit. Le docteur Eckener n'hésitait pas à attendre l'aube pour poser son Zeppelin. Les poutrelles en aluminium sont percées de trous pour gagner du poids.

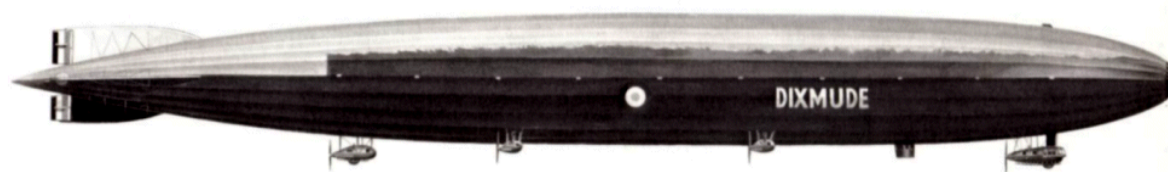
L'intérieur de la nacelle du Hindenburg avec les commandes. Elles sont pratiquement identiques à celles du Graf de 1929



Nacelle de pilotage du Hindenburg (1936)



• 14.2 Rêves futurs



Tout projet de ballon devra bien avoir intégré les inconvénients inhérents au principe physique utilisé, se placer dans les "niches" mercatiques qui peuvent en absorber les coûts élyséens et, du point de vue technique, faire mieux que le LZ114 "DIXMUDE" :

Année : 1918, fabriqué en 6 semaines ;
méthode de fabrication classique, éprouvée, sans surprises ;
matériaux connus (aluminium) ;
masse à vide : **24 700 kg** ;
masse maximale au décollage : **79 760 kg** ;
vitesse maximale : 131 km/h ;
puissance installée : 6 x 179 kW ;
distance franchissable : 12 000 km ;
plafond atteint : 6 200 m.

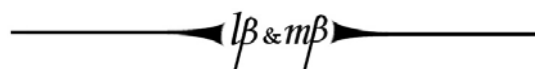
MÉTHODE :
en avoir et l'appliquer (Descartes) ;
modélisation de système ;
utiliser des critères de qualité ;
ne pas confondre innovation et amélioration.

MOTEURS : mieux que Jumo, Nomad, Sultzer :
masse spécifique : < 0,5 kg/kW ;
conso. spécifique : < 0,18 kg/kW.h ;
technique de fabrication classique, éprouvée ;
durée de vie : milliers d'heures ;
coût faible ; entretien non folklorique.

Rêvons mais restons lucides quant au FUTUR !



Dans le fracas de la pluie, on entend légèrement l'écho de la musique de bal ! Le dirigeable Anglais R101 en route vers son funeste destin sur les collines de Beauvais !



Laurent BOUTIN
303 av. Mont de Marsan 33850 Léognan France
+33 6 76 58 95 44
elitec.aero@free.fr

Matthieu BARREAU
IUT de Cachan, 9 avenue de la division LECLERC BP 140, 94234 Cachan Cedex.
+33 1 41 24 11 90
matthieu.barreau@wanadoo.fr

Bibliographie :

« Dirigeables » Histoire illustrée des navires aériens. Henry BEAUBOIS Ed. Edita Lausanne	Rapport NACA 117. http://naca.larc.nasa.gov/reports/1923/naca-report-117/ Rapport remarquable pour la détermination de la traînée d'un dirigeable (par chronométrage de la décélération après coupure brusque des moteurs), qu'on peut appliquer à tout objet roulant, flottant ou volant.
« Dirigeables » L'épopée méconnue des géants du ciel. Rick Archbold; Ken Marschall Ed. Gallimard; ISBN: 2-07-051320-3	Rapport NACA 194. Excellent rapport de conception. http://naca.larc.nasa.gov/reports/1924/naca-tn-194/
« L'étrange histoire des zeppelins » Maurice Role France Empire 1972; dépôt légal n° 972	Rapport NACA 204. Pour la tenue des dirigeables dans les rafales http://naca.larc.nasa.gov/reports/1925/naca-report-204/
« Petites histoire des inventions qui ont changées le Monde » Jean Louis Besson, Ed : Gallimard; ISBN: 2-07-056286-7	
« L'Aspirisouffle » Les aventures d'Anselm Lanturlu Jean pierre Petit www.jp-petit.com	« Le Zeppelin » en 300 histoires et 150 photos. Jacques Borgé & Nicolas Viasnoff Ed. Balland; ISBN: 2-7158-0060-6