



Association Aéronautique
Astronautique de France

LA SOCIÉTÉ SAVANTE DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE

A decorative graphic on the left side of the page consists of several concentric, semi-circular arcs in shades of gray, emanating from a stylized human figure. The figure is composed of simple geometric shapes: a circle for the head, a vertical line for the neck, and a series of lines forming the torso and legs.

3^{ème} FORUM ÉTUDIANTS

Réinventons le futur du transport aérien
le 28 janvier 2021 à l'ENAC

Commission Technique 3AF - Aviation Commerciale



Directeur de la publication : Président 3AF : Louis Le Portz

Président de la Commission Technique Aviation Commerciale : Francis Guiméra

Rédaction : les membres de la CT 3AF Aviation Commerciale

Mise en page : Caroline Saux

Publication : Juin 2021

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	6
2 - DÉROULEMENT	6
3 - FRUIT DU FORUM	6
4 - RÉSUMÉ DES PRESTATIONS	7
4 – 1 Premier sujet (ENAC) : un dirigeable, durable, transport de fret	7
4 – 2 Deuxième sujet (ENAC) : un aéroport durable	8
4 – 3 Troisième sujet (Masters ISAE-SUPAERO) : Le transport aérien, électricité ou hydrogène sont-ils les solutions pour réduire les émissions de CO2 ?	10
5 - CONCLUSIONS DU FORUM	11
ANNEXES	12

1. INTRODUCTION

Le 28 Janvier 2021, la Commission Technique Aviation Commerciale de 3AF a organisé avec l'ENAC et l'ISAE-SUPAÉRO, un forum « étudiants » intitulé « Réinventons le futur du transport aérien » ; Elle a demandé à des groupes d'élèves de penser au rôle du transport aérien dans la société et à la façon dont il contribue à son développement en redéfinissant son périmètre, peut-être par une diversification de ses activités et en se basant sur la situation actuelle : qui fait quoi et comment ?

Cette initiative, à la différence des colloques habituels (Professionnels invités à imaginer le transport dans le futur) s'était fixé pour objectif de faire s'interroger les étudiants de ces grandes écoles sur le "POURQUOI ?" bien plus que sur le "COMMENT ?" sur la base de leur propre perspective et de leur ressenti.

Chacune des Ecoles a été sollicitée pour engager une ou plusieurs équipes (de 2-3 étudiants) afin :

- De réfléchir au rôle sociétal du transport aérien : comment doit-il être conçu pour servir au mieux les intérêts de la société ? quelles seraient ses priorités, ses apports ? quels sont les écueils à éviter et comment: par exemple en concurrence avec les autres modes de transport, impact environnemental, utilisation de l'énergie...?
- D'en tirer des conclusions et de faire des propositions ;
- De les confronter, lors du Forum, aux autres équipes venant d'une autre Ecole.

Le forum a été organisé selon le schéma suivant :

- Chaque équipe a produit une étude et des propositions structurées autour d'un document publiable et d'une présentation type Power point ;
- Chaque équipe a présenté son étude(en français ou en anglais) devant les autres équipes ainsi que devant les membres de la Commission Technique aviation commerciale 3AF et des participants du groupe 3AF de Midi-Pyrénées ;
- Un membre de cette Commission s'est tenu à la disposition de chaque équipe comme référent pendant la phase de préparation.

2 - DÉROULEMENT

Compte tenu de la pandémie, seuls l'ENAC et les masters ISAE-SUPAÉRO ont pu répondre présents. La CT Aviation commerciale publie ci-après sous forme de dossier, avec les noms des auteurs en référence, leur étude et des propositions structurées. Ces projets dont la CT a eu le plaisir d'entendre la présentation ce 28 janvier 2021, doivent être considérés comme relevant d'une analyse stratégique, un projet innovant et une ouverture potentielle vers l'avenir.

Pour réinventer le transport aérien, il est important de partager aussi les idées des plus jeunes!

3 - FRUIT DU FORUM

Ce forum a permis notamment :

- Que le travail de chaque équipe soit inclus dans le parcours pédagogique des écoles. En particulier les deux sujets développés par l'ENAC ont été construits à partir de deux PICs (Project Innovation Challenges) établis par deux professeurs Catherine Letondal et Thierry Druot dont les termes principaux sont les suivants :
« *La situation de danger climatique dans laquelle nous nous trouvons représente un risque terrible pour nos sociétés, mais c'est aussi une formidable opportunité pour repenser et faire évoluer nos modes de vie, nos organisations et notre rapport à la planète. Pour autant, penser la durabilité n'est pas chose facile. Nous devons adapter et élargir nos concepts afin d'être capables d'embrasser la complexité du problème* ».
- Une confrontation des idées de plusieurs équipes provenant d'écoles différentes dans un contexte multinational impliquant des étudiants français et étrangers...
- Un essai de synthèse des propositions esquissant un transport aérien efficace et efficient, au service de la société du XXIème siècle ;
- La publication par 3AF des présentations et débats dans les Actes du Forum.

4 - RÉSUMÉ DES PRESTATIONS

4 – 1 Premier sujet (ENAC) : un dirigeable, durable, transport de fret



Par :

Antoine MONTAGNON

Cédric SIGAUT

Jiaqi XIE

Cette étude de faisabilité n'a pas bien sûr la prétention d'examiner le design complet d'un dirigeable, mais de présenter un ensemble des éléments à prendre en compte et de proposer des choix techniques.

L'étude présentée par les élèves s'est focalisée sur le potentiel d'un grand dirigeable de transport de gros volumes de fret dans le contexte de la transition énergétique. Cette étude s'est attachée à établir une image préliminaire du marché du transport de fret dans le monde, permettant plus particulièrement de considérer le transport de fret par dirigeable en lui-même, en essayant de comprendre pourquoi à l'heure actuelle il ne rencontre pas de franc succès sur ce marché.

Les pistes suivantes ont été explorées en s'appuyant sur des recherches bibliographiques.

Considérations sur le marché :

- Comment assurer la complémentarité avec l'avion, la route et avec le train : choix des masses et volumes objectifs de la charge utile, des lieux et fréquences d'exploitation, etc...
- Considérations sur l'énergie motrice :
 - Panneaux solaires et hydrogène comme source d'énergie et moyen de stockage pour le dirigeable ?
 - Autres ?
- Considérations sur les opérations et l'exploitation :
 - Quelles infrastructures au sol (fabrication, stationnement, livraisons, maintenance, déconstruction) ;
 - Quelles conditions d'exploitation (sensibilité à la météo, temps d'utilisation, etc...), gestion du vol statique lors d'opérations de déchargement en zone vierge.
- Durabilité, bilan système :
 - L'exploitation de grands dirigeables pourrait-elle être à « énergie positive » (globalement productrice d'énergie) ?
 - L'exploitation de grands dirigeables pourrait-elle s'accorder avec la dépollution active de l'atmosphère (capture de CO₂) ?
 - L'impact sociétal de la construction (fabrication, déconstruction) et de l'exploitation ?

À l'issue de cette étude, les élèves ont formulé la conclusion suivante :

D'un point de vue général, cette étude aura permis de mentionner tous les paramètres à prendre en compte dans le cadre de la conception du dirigeable du futur. Les élèves n'ont bien sûr pas pu apporter une réponse sur tous les points concernés, mais ils se sont efforcés de citer tout ce qui à leurs yeux aura une grande importance. 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 degré d'innovation et de leur capacité à maîtriser les principaux défauts du dirigeable qui restent sa vitesse, son opérabilité limitée par les conditions météorologiques, les reliefs, etc... L'architecture avec pile à combustible est une proposition qui semble satisfaire de nombreuses contraintes

de développement durable. Il va aussi très probablement permettre de s'affranchir de l'hélium à l'horizon 2040 comme gaz porteur, dont on sait la pénurie prochaine. Les technologies de sécurisation de l'hydrogène vont devoir convaincre aussi les clients potentiels. Mais quoi qu'il arrive, les projets de dirigeables futurs doivent prendre en compte les trois piliers du développement durable : Social, Économique, Environnemental pour prétendre à être des succès.

4 – 2 Deuxième sujet (ENAC) : un aéroport durable



Par :

Viktor BABCAN
Yannis BONFILS
Guillaume VENSİ

De la même manière le sujet avait été posé selon les termes d'un PIC ainsi libellé :

« Le transport aérien se révèle être une activité quasiment emblématique, frappée de plein fouet par les bouleversements qui s'annoncent, car c'est une grosse consommatrice d'énergie fossile. Bien qu'elle ne représente actuellement que moins de 3% des émissions mondiales de CO₂, elle dépend des énergies fossiles, le kérosène ayant des propriétés d'énergie massique et de conditions d'utilisation qui le rendent difficilement remplaçable pour les systèmes embarqués à long rayon d'action. De nombreux acteurs participent à l'activité globale du transport aérien et tous auront un rôle à jouer dans les nécessaires transformations à venir. Parmi tous les acteurs, l'un d'eux jouera sans nul doute un rôle central car il réalise la connexion entre le vecteur aérien et la Cité : il s'agit de l'aéroport. Vue du ciel, l'aéroport n'est qu'un grand bâtiment séparant deux parkings (voitures d'un côté, avions de l'autre) accolés à un grand espace lisse, sillonné de pistes. Le potentiel de développement de l'aéroport dans un contexte de transition énergétique est immense ».

Cette étude a consisté à identifier le potentiel de développement de l'aéroport en utilisant une modélisation de l'utilisation/production énergétique des différents composants d'un aéroport et dans un contexte de transition énergétique en travaillant sur l'exemple concret de l'aéroport de Toulouse-Blagnac.

Les pistes suivantes ont été explorées :

- Le fonctionnement énergétique de l'aéroport :
 - Organisation énergétique de type « smart-grid » pour l'aéroport ;
 - L'aéroport comme unité de production énergétique pour l'aviation et pour la cité ;
 - L'aéroport comme unité de dépollution active de l'atmosphère (capture de CO₂).
- L'aéroport dans son territoire :
 - Rôle de l'aéroport dans le développement des vols Intercités,
 - Relations avec les « petits aéroports » ;
 - Intermodalité et complémentarité avec d'autres modes de transport, courts, moyen et long-courriers ;
 - Accès à l'aéroport ;
 - Impact de la robotisation au sol.
- L'aéroport acteur du trafic aérien :
 - Optimisation énergétique des vols domestiques et internationaux à nombre de créneaux fixe.

La conclusion de cette étude a été formulée ainsi par ce groupe d'élèves :

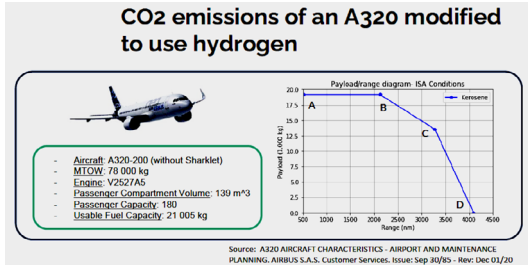
Le potentiel de développement de l'aéroport est important, mais les défis à relever le sont d'autant plus. Dans cette étude, des hypothèses fortes ont été faites de façon à développer une intuition de ce que pourrait être l'aéroport de demain et faire apparaître de nombreux axes d'améliorations. Il apparaît par exemple que les parkings et les systèmes de traitement de bagages robotisés ont un impact non négligeable sur le

besoin en énergie. La réponse à apporter est cependant à nuancer, car la suppression d'un système robotisé crée des emplois et réduit la consommation d'un côté, mais augmente les coûts pour l'exploitant de l'autre. Ce surcoût pourrait en revanche être compensé par des coûts de mise en place et d'entretien plus raisonnables des énergies renouvelables.

La mise en place d'une multitude de sources d'énergies semble aussi nécessaire, l'énergie devant être disponible tout le temps aux heures d'ouvertures et quelles que soient les conditions météo. L'éolienne sans pale fragile, utilisée en complément d'une centrale photovoltaïque, a semblé intéressante lors de notre étude et pourrait être développée. De très nombreuses autres possibilités, présentées en première partie, existent aussi et devraient être étudiées au cas par cas par un exploitant qui devra considérer chaque option en fonction du flux de passagers attendu et de sa position géographique par exemple.

4 - 3 Troisième sujet (Masters ISAE-SUPAERO) : Le transport aérien, électricité ou hydrogène sont-ils les solutions pour réduire les émissions de CO2 ?

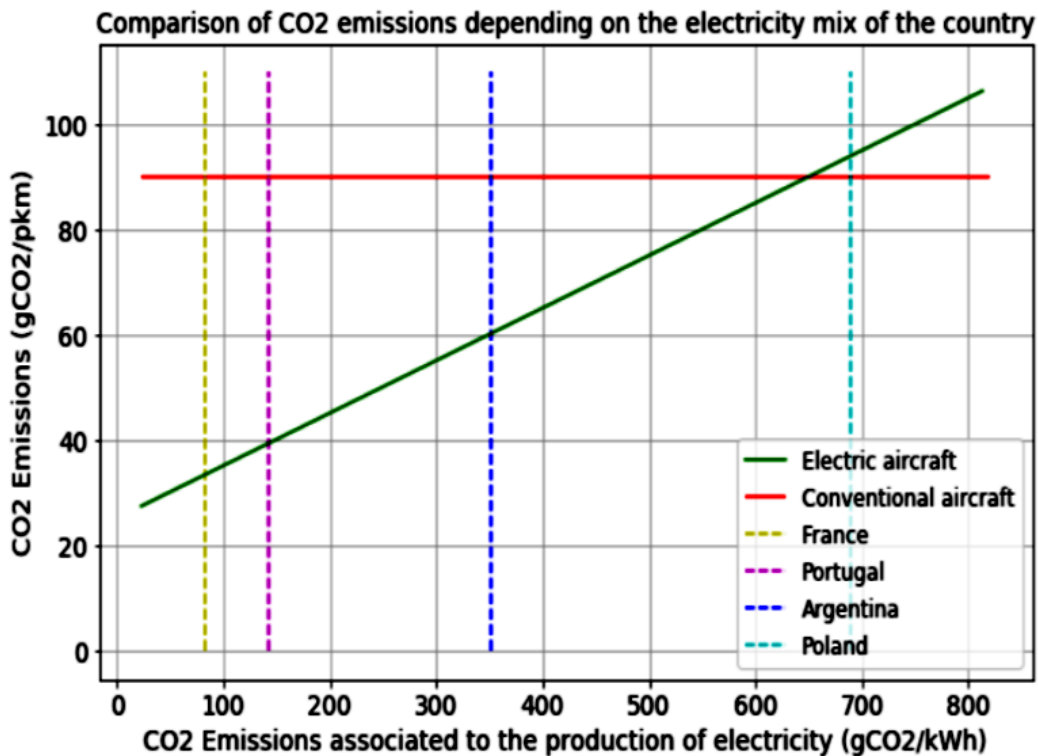
Il s'agit d'un sujet traité par des élèves de Masters, suivis par Valérie Boudiner professeure à l'ISAE-SUPAÉRO).



Par :

Patricia OLIVEIRA PALMELAO
Pilar TAGLIERO

A partir de l'étude des émissions de deux voyages : Espagne / Portugal et Argentine (vol et route intérieure) ce groupe a constaté que si le temps de parcours le plus court est sans conteste obtenu par l'aérien, la plus faible émission l'est certainement par le transport terrestre mais avec un temps considérablement plus long. Cependant le kérosène utilisé par l'avion produit un taux de CO2 considéré comme inacceptable. D'où la question d'une meilleure alternative énergétique pour l'avion de demain.



Une alternative vient donc à l'esprit aujourd'hui :

- L'électricité,
- L'hydrogène.

L'étude effectuée montre que l'électricité peut réduire significativement le taux d'émission de CO₂, mais celui-ci dépend du mode de production de chaque pays. De plus, sur le plan technique les avions électriques sont pour l'instant limités en temps de vol, et cette solution ne s'applique aujourd'hui qu'à des avions de petite capacité.

En ce qui concerne l'hydrogène, le constat permet de penser que c'est une solution conduisant à des émissions beaucoup plus faibles que le kérosène : 80% de moins d'émission d'azote avec en prime le fait qu'un kilogramme d'hydrogène liquide contient 2,8 fois plus d'énergie qu'un kilogramme de kérosène et surtout que l'hydrogène est abondant sur terre.

En contrepartie, l'hydrogène produit à partir d'énergie fossile, n'est pas une solution pérenne, de gros volumes de stockage étant requis (la densité de l'hydrogène est 10 fois plus faible que celle du kérosène). En outre, l'hydrogène liquide doit être stocké à très basse température dans des réservoirs d'autant plus lourds.

La conclusion de cette étude révèle que l'une ou l'autre de ces deux solutions n'est pas aujourd'hui une solution d'avenir aisée :

- L'efficacité économique de l'avion électrique dépend du lieu où est produite l'électricité. De plus, sur le plan technique, la technologie actuelle ne permet pas de concevoir des avions de grande capacité.
- L'efficacité environnementale de l'hydrogène dépend de la façon dont il sera produit et en outre d'une technologie permettant de concevoir des réservoirs plus légers. Enfin, l'utilisation de l'hydrogène, du fait du volume occupé comparativement au kérosène, impose un changement radical dans la forme des avions commerciaux, ce qui n'apparaît pas réalisable à court terme.

Ce groupe a conclu qu'il n'y a pas aujourd'hui de solutions simples et que la technologie doit produire des solutions adéquates en faveur de l'une ou l'autre des solutions énergétiques. En outre, il faudra imaginer un nouvel appareil aux formes adaptées et non pas essayer de transformer un avion existant.

5 - CONCLUSIONS DU FORUM

Ce 3^{ème} forum 3AF étudiants a été organisé par la Commission Technique Aviation commerciale dans des conditions difficiles imposées par les restrictions sanitaires et le respect des gestes barrières. Nous devons encore une fois remercier les directions de l'ENAC et de l'ISAE-SUPAÉRO ainsi que les professeurs impliqués pour avoir su organiser avec nous cette session.

Les occasions d'échanges (grands témoins, table ronde, cocktails...) qui sont d'habitude associés à cette manifestation et appréciées des étudiants n'ont toutefois pas pu être maintenues dans les circonstances sanitaires du moment, merci à l'ENAC, et en particulier à Mme Ledontal et M. Druot, de nous avoir permis de maintenir le présentiel et d'assurer une ouverture en associant cette journée à la téléconférence prévue par l'ENAC avec le Pr Bontems sur la mécanique

En ce qui concerne les travaux des étudiants, le niveau de réflexion, d'étude, de travail et de ressenti fait que nous considérons le résultat de cette session comme plus que satisfaisant. Les membres de la CT ont été frappés par l'excellence des études présentées, la justesse des analyses et la volonté de bien faire de tous les élèves : qu'ils en soient ici encore remerciés.

L'implication d'étudiants venant de plusieurs grandes écoles, chacune spécialisée dans son domaine, a permis de voir des approches à la fois très variées mais aussi (partiellement) complémentaires, à différents horizons temporels .

Le timing (1h15 par groupe) était suffisamment large pour approfondir les thématiques lors des discussions et les mettre en perspective par rapport à une vision plus globale du transport aérien et des enjeux sociétaux. La qualité de ces échanges a compensé le petit nombre de présentations et de projets innovants. L'implication des étudiants dans la présentation des projets était importante et très appréciable, d'autant plus qu'il s'agissait d'un travail supplémentaire dans leurs études, pour certains d'entre eux.

La périodicité bisannuelle permettant de créer une vraie dynamique autour du thème « réinvention du TA », l'engagement des professeurs étant dynamique et fructueux, et de nombreuses évolutions et innovations étant prévisibles, la CT Aviation Commerciale pense qu'il faudra proposer un forum étudiants sur l'avenir du TA en décembre 2022 ou en début 2023, en espérant bien sûr pouvoir alors y adjoindre les composantes d'ouverture qui n'ont pu être incorporées à l'édition « Covid » du Forum !

ANNEXES

Actes des présentations faites par les élèves

Annexe 1 : un dirigeable durable

Annexe 2 : un aérodrome durable

Annexe 3 : Electricité ou Hydrogène ?

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.

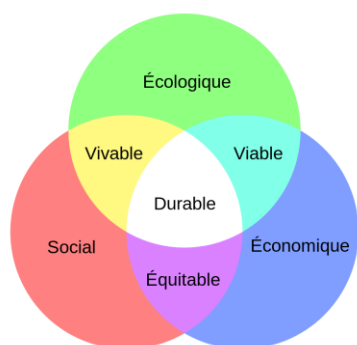


Figure 2 - Développement durable - Wiki

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.

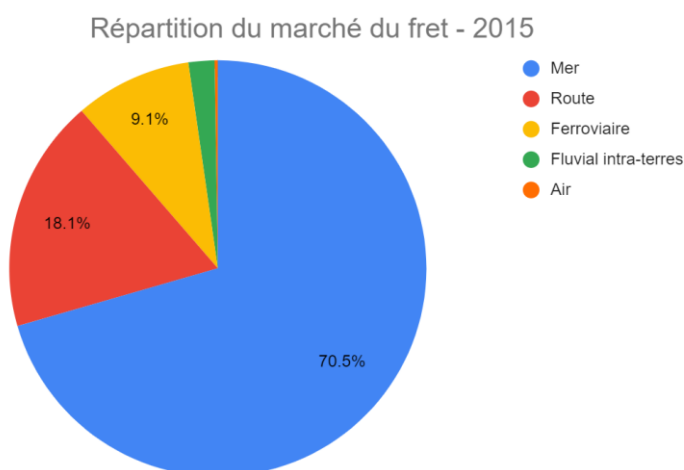


Figure 3 - Répartition du marché du fret en 2015

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 :

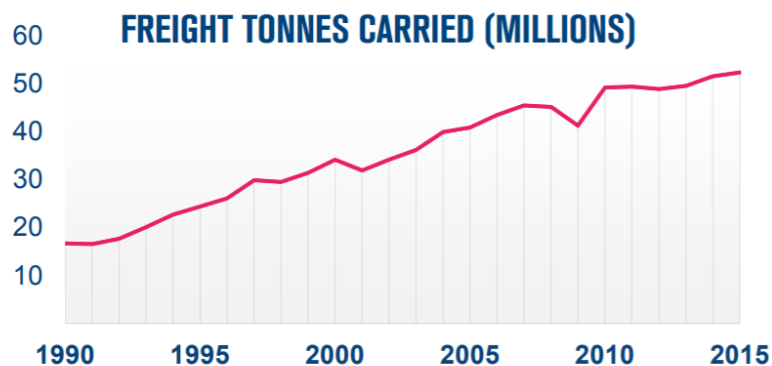


Figure 3 - Tonnages de fret aérien par année - IATA [2]

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 voilure 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 appelée 9 écrans a été mise en place dans un premier 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 :

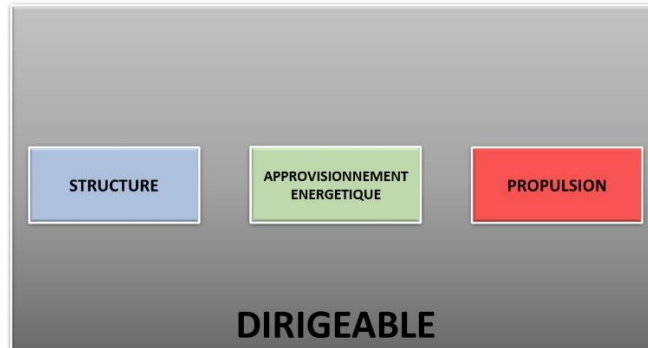


Figure 6 - Classes de notre programme regroupées en 3 modules

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.

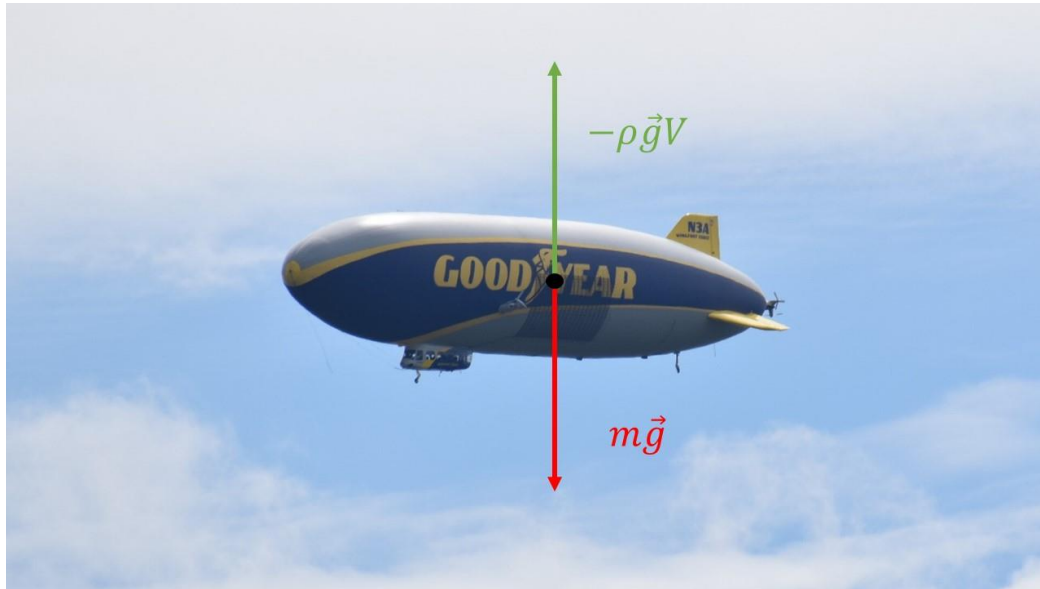


Figure 7 - Dirigeable en vol - Image d'origine : pixabay.com (libre de droits)

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.

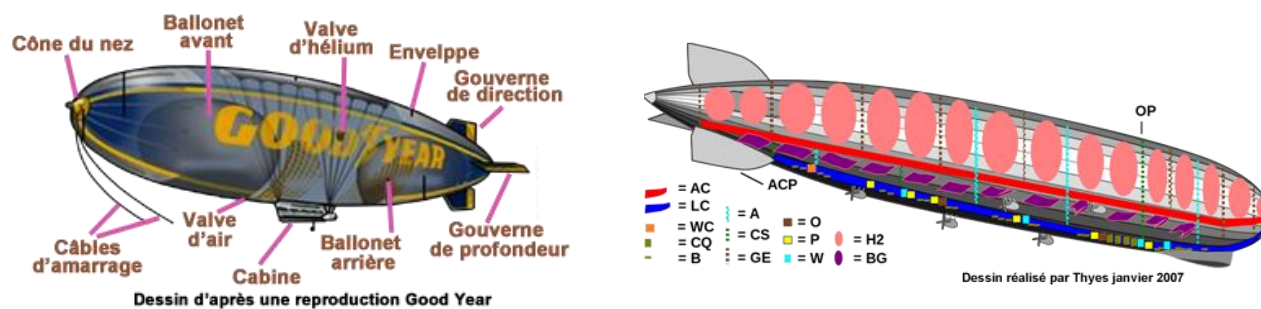


Figure 8 - Dessins de structure des dirigeables - lavionnaire.fr

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>jpgphotos.net / Andreas 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	189000
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.

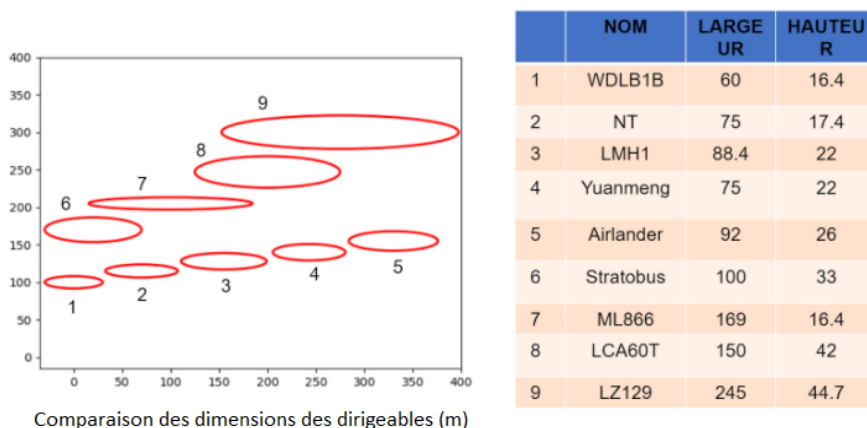


Figure 10 - Comparaison des tailles

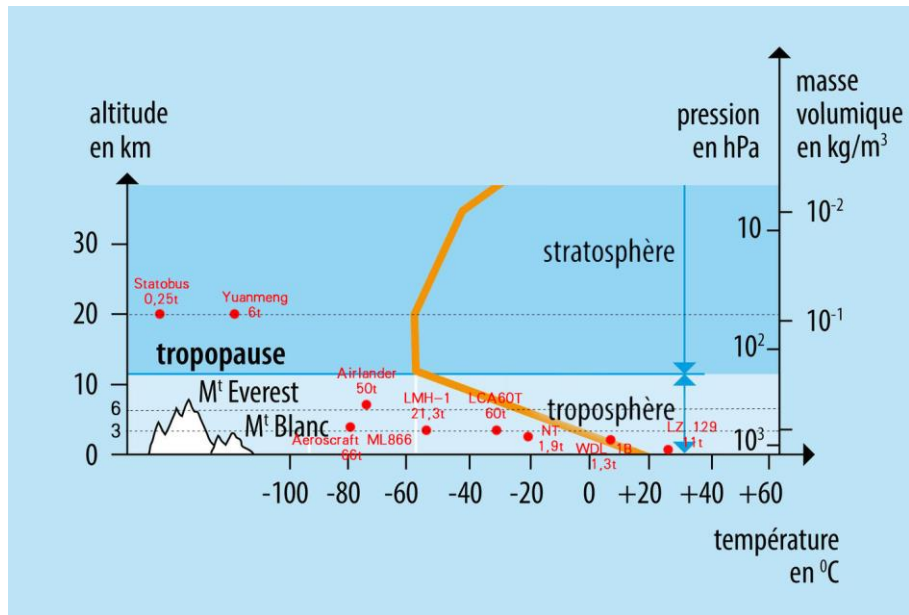


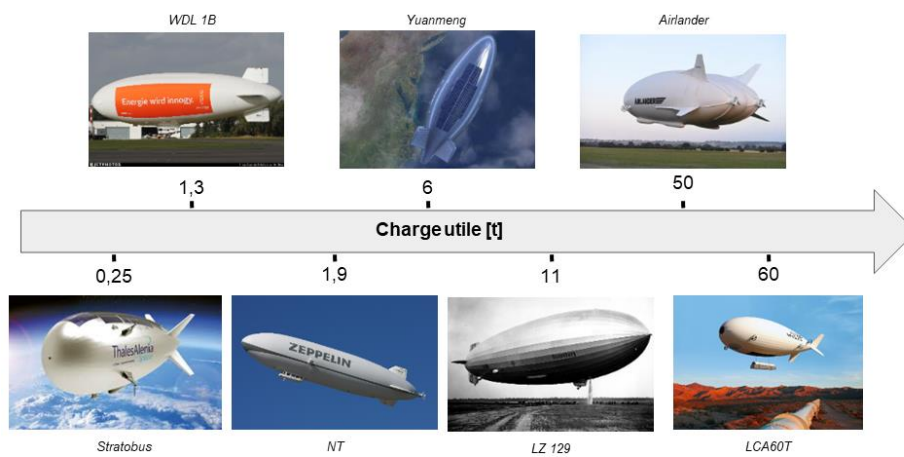
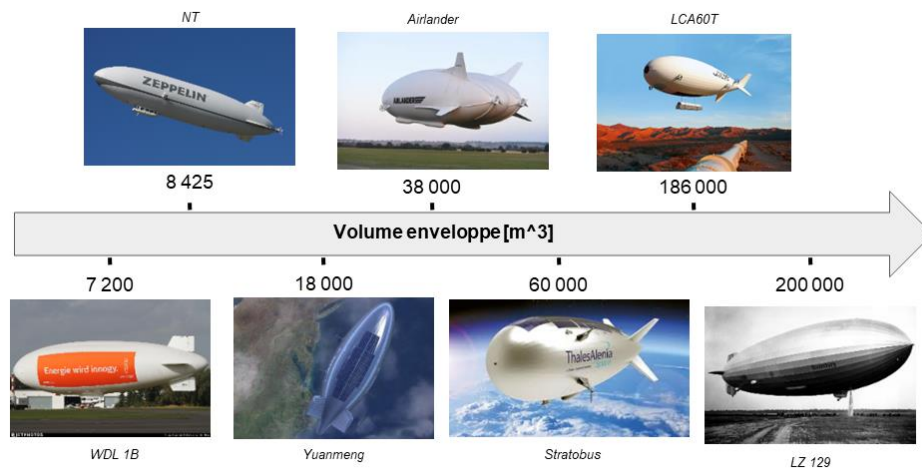
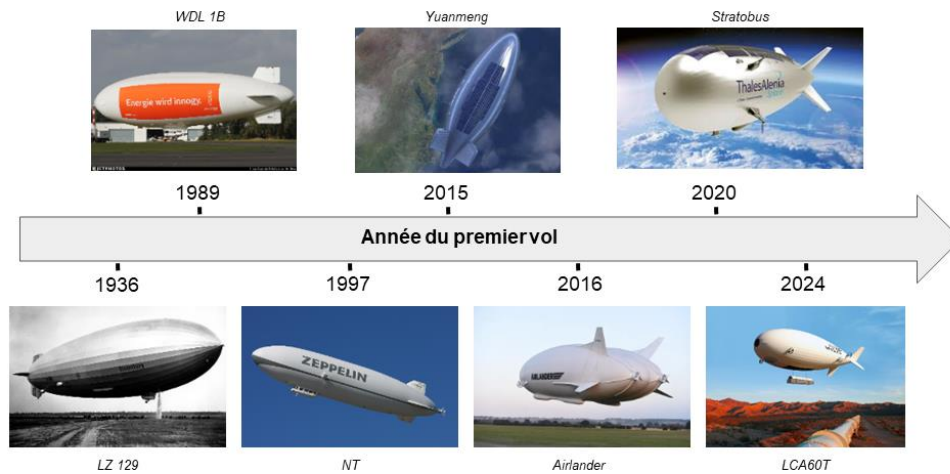
Figure 11 - Infographie des dirigeables en croisière - Image de fond - Pinterest [7]

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



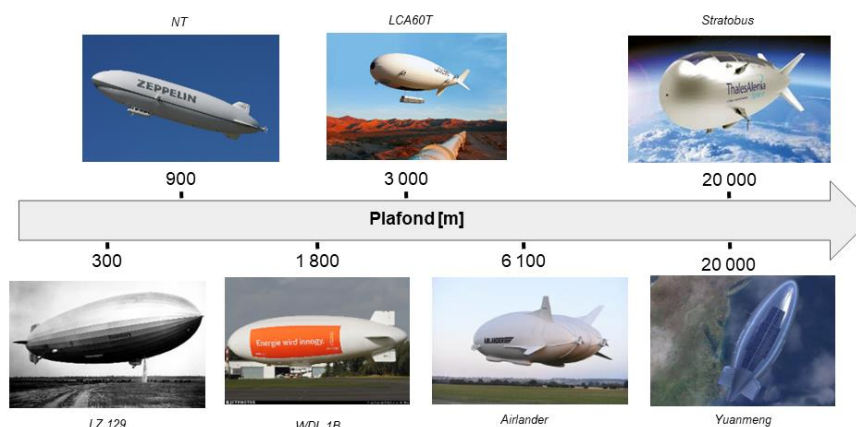


Figure 13 - Infographies résumant les principales informations sur les dirigeables

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.

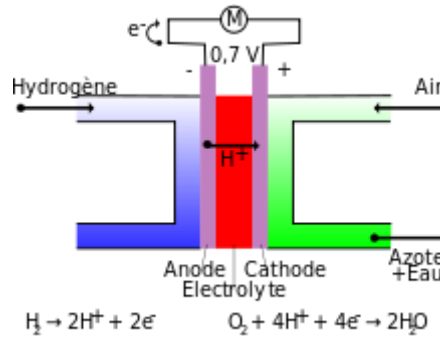


Figure 18 - Schéma d'une pile électrique

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 :

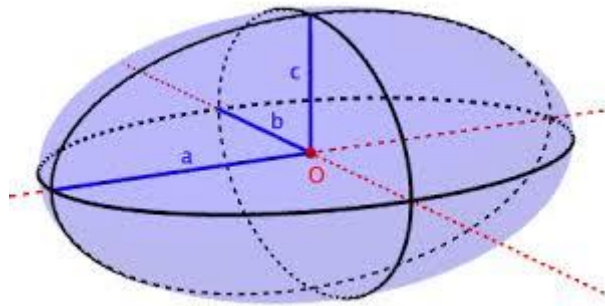


Figure 20 – Ellipsoïde

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.

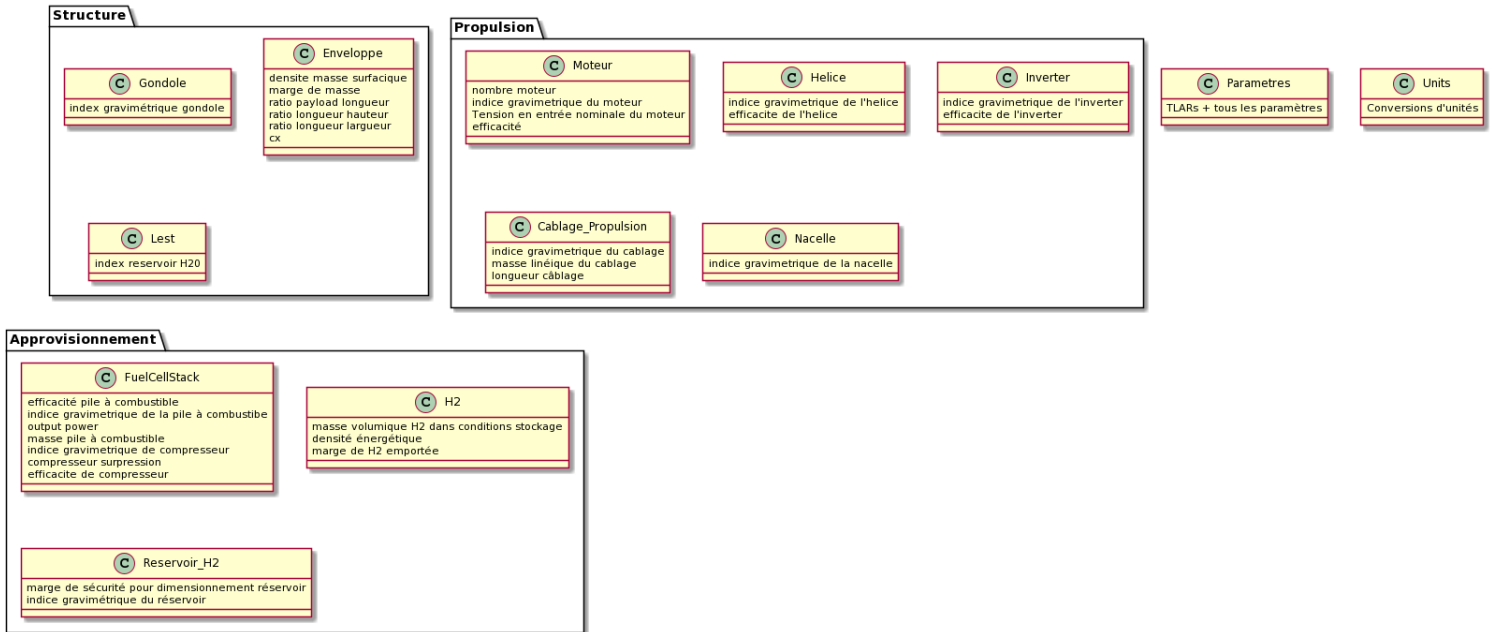


Fig 21 - Classes de notre programme regroupées en 3 modules

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 câblage 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 fantasmatiques, 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 [m³3]	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 Gidden / 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/longueur	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



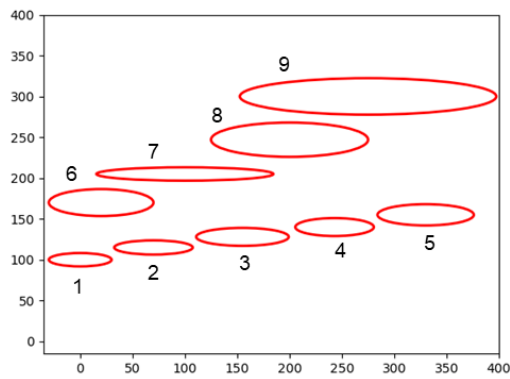
LCA60T	
Flying Whales	
Transport du cargo	
Premier vol	2024
Structure	Rigide
Volume Enveloppe [m ³]	186 000
L * H * D [m]	150 * 42 * 60
Charge utile [t]	60
Plafond [m]	3 000



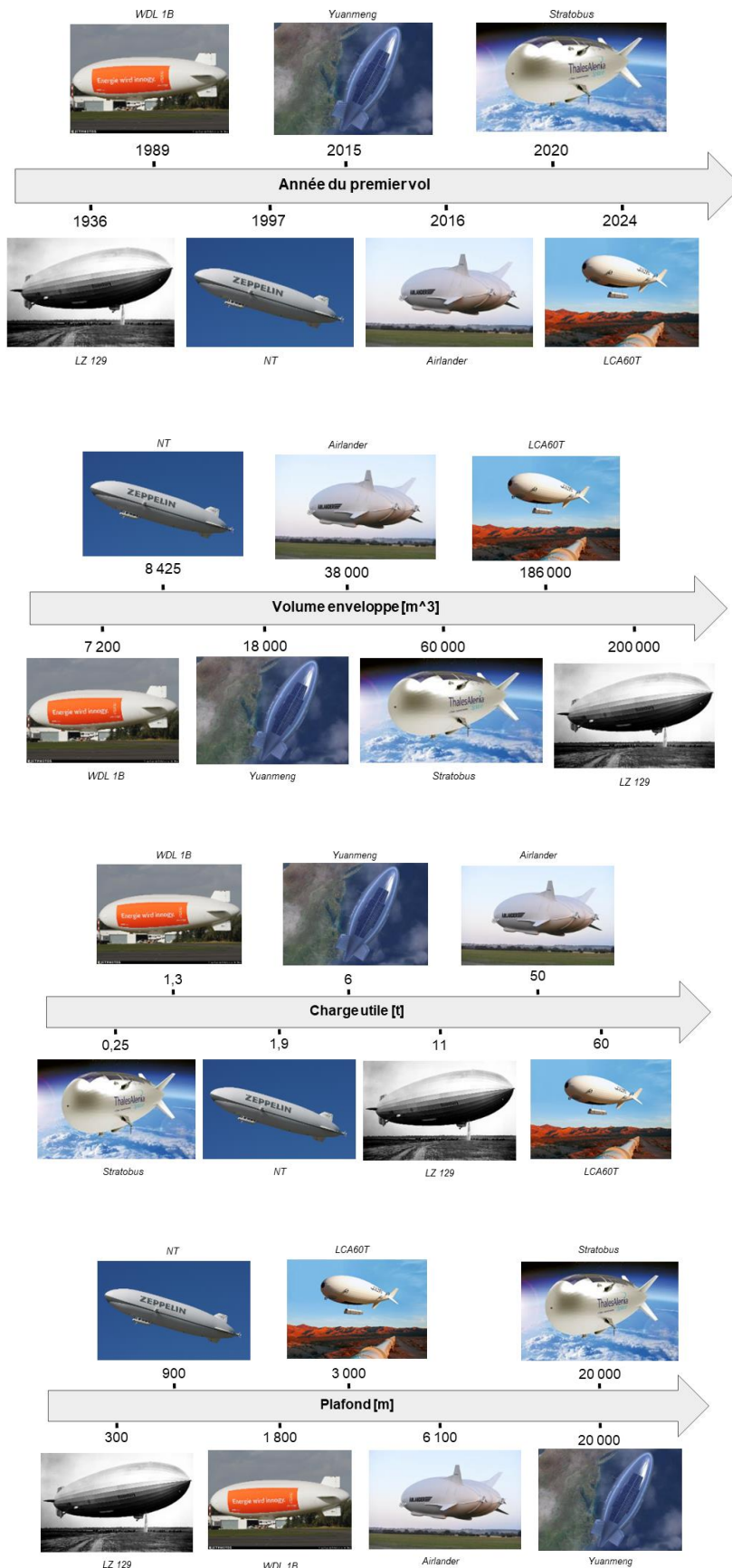
Aeroscraft ML866	
Aeros	
Transport du cargo	
Premier vol	
Structure	Rigide
Volume Enveloppe [m³]	
L * H * D [m]	67 * 12 * 9
Charge utile [t]	66
Plafond [m]	3 600



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	LARGE UR	HAUTEUR
1	WDLB1B	60	16.4
2	NT	75	17.4
3	LMH1	88.4	22
4	Yuanmen g	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.

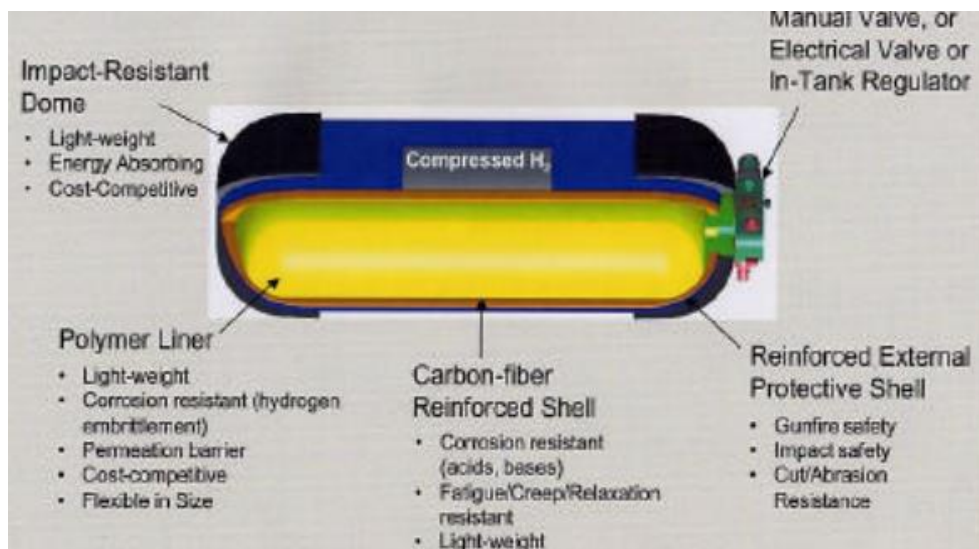
1. Hydrogène Gazeux :

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, sécurés (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)

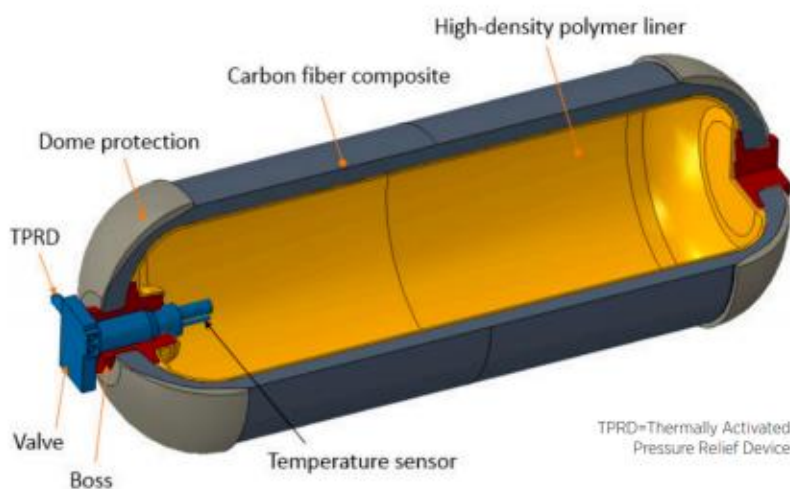


Figure 1. Type-IV composite overwrapped hydrogen pressure vessel (source: Process Modeling Group, Nuclear Engineering Division, Argonne National Lab (ANL)). Reprinted from Ref. [67]; Copyright DOE 2017.

1.2. Microsphères en verre :

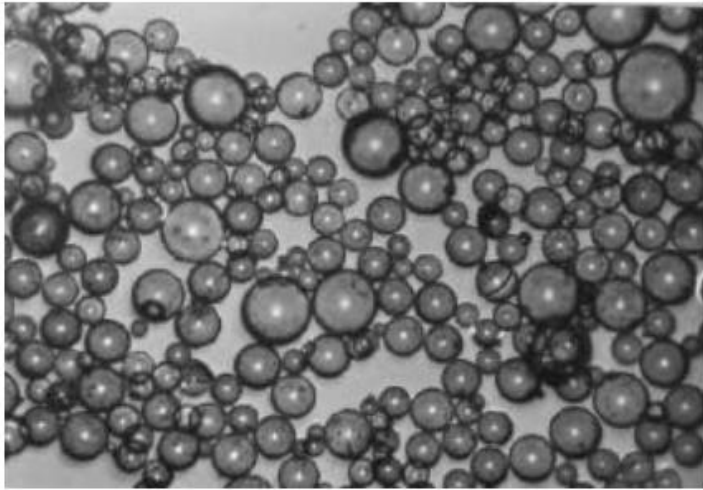


Figure 4 Photo of glass micro spheres for H₂ gas storage (Source: Teitel, BNL 51439, 1981 [3]).

- 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
Sécuritaire : 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.

L'Aéroport Durable

Etude du cas de Toulouse Blagnac

Projet Innovation Challenge

Viktor Babcan
IENAC 18 OPS
ENAC

7 Avenue Edouard Belin, 31400
Toulouse
viktor.babcan@alumni.enac.fr

Yannis Bonfils
IENAC 18 SAT
ENAC

7 Avenue Edouard Belin, 31400
Toulouse
yannis.bonfils@alumni.enac.fr

Guillaume Venesi
IENAC 19 SAT
ENAC

7 Avenue Edouard Belin, 31400
Toulouse
guillaume.venesi@alumni.enac.fr



RESUME

Cet article étudie quelques pistes potentielles d'évolution des plateformes aéroportuaires visant à améliorer leur empreinte environnementale. Le cas de l'aéroport de Toulouse-Blagnac en particulier est utilisé. Après un état de l'art des mesures déjà prises ou en voie de développement, cet article propose une modélisation informatique simplifiée, prenant en compte l'état de l'art et se limitant aux flux de personnes et d'énergies de l'aéroport, en faisant des hypothèses fortes pour évaluer leur impact. Les résultats montrent qu'un peu plus de 80 % de l'énergie nécessaire à l'aéroport provient du terminal (système de traitement des bagages inclus).

Cette étude révèle également de fortes consommations d'éléments paraissant anecdotiques au premier abord comme les parkings pour voitures. Les moyens d'accès à la plateforme semblent eux aussi pouvoir être notablement améliorés.

MOTS-CLEFS

Aéroport, durabilité, nuisance sonore, consommation d'énergie, émissions CO₂ de la construction, émissions CO₂ des transports.

1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'environnement est une préoccupation croissante dans nos sociétés. En effet, de grandes conférences mondiales comme la COP21 ont mis au premier plan un des plus grands défis du siècle : le changement climatique. L'impact grandissant de ce problème inquiète, sans qu'il existe de solution afin de contrer les terribles dynamiques environnementales existantes et émergentes. Cette évolution de la vision du monde a mis en lumière les acteurs responsables de ce changement environnemental, dont le transport aérien fait partie [1].

Les aéroports, en particulier, sont très critiqués, car l'avion est un moyen de transport polluant, bruyant et plutôt réservé aux plus riches. L'impact de l'aviation est donc large et les nuisances induites sont diverses. La **figure 8** (annexe) montre graphiquement ces différents aspects.

Afin de dévoiler le potentiel de ce nouveau type d'aéroport, il est nécessaire dans un premier temps de définir les contraintes que celui-ci devra respecter afin d'être plus durable. De fait, il faut distinguer les problématiques liées à la durabilité. Nous en avons donc établi trois que l'on considérera comme majeures, et qui seront développées plus tard :

1. Tout d'abord une environnementale : L'aéroport devra subvenir de façon propre à ses besoins énergétiques, qu'ils soient électriques, thermiques ou autres.
2. Ensuite une économique : L'aéroport devra être viable économiquement et opérer de façon pérenne.
3. Enfin une sociale : Il faudra un aéroport s'intégrant dans le plan urbain de la commune ou ville à laquelle il appartient et qu'il soit bénéfique à sa population, en limitant les nuisances qu'il engendre.

Afin d'étudier de nouveaux types d'aéroport s'inscrivant dans la transition écologique, nous proposons de modéliser ce que serait un aéroport durable. Cette étude tente de faire l'ébauche d'une telle infrastructure, elle se décompose en trois parties : 1) Un état de l'art et une étude bibliographique de l'existant ; 2) Une mise en place d'une modélisation aéroportuaire et 3) Un développement logiciel.

2 ETAT DE L'ART

2.1 La durabilité

La notion de plate-forme durable est difficile à définir [2], [3]. Ce mot, entré dans la culture populaire et souvent associé à l'écologie, ou même, comme le souligne Kiss dans "Rise and Fall of the Concept Sustainability." [4], simplement comme « un synonyme de tout ce qui est positif », a en fait un sens très large, et sa définition pose problème depuis plus d'une décennie. Il semble en effet que deux visions évoluent en parallèle depuis les années 80 [5] :

1. Une première qui associe la durabilité au lien entre la société humaine et la Nature, comme développé par Robinson dans "Squaring the Circle? Some Thoughts on the Idea of Sustainable Development." [6]
2. Une seconde qui divise et simplifie la notion en considérant qu'est durable ce qui est

environnementalement, économiquement et socialement « viable ».

Dans l'étude présentée, on se focalise sur cette deuxième vision, qui permettra de mieux séparer les différentes problématiques auxquelles font face aujourd'hui les aéroports. Ainsi la durabilité peut se représenter graphiquement comme une intersection de trois aspects représentés sur la **figure 1** [7].

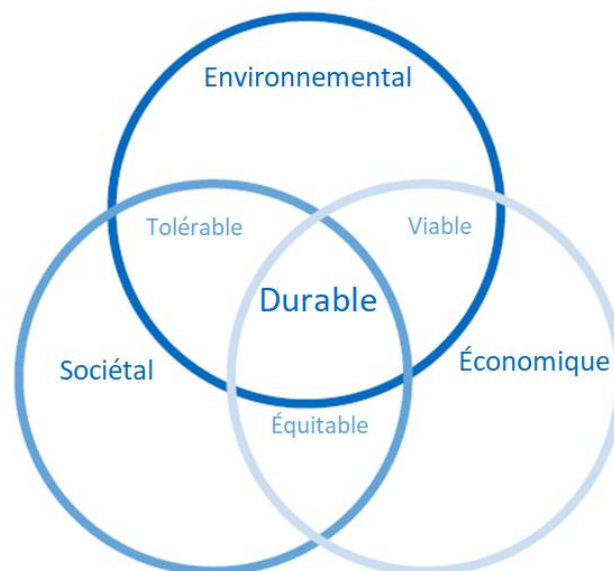


Figure 1 : Diagramme de Venn définissant la durabilité [7]

- La durabilité économique se développe positivement si une valeur économique est générée. Les modèles économiques traditionnels sont concentrés sur la performance économique sans nécessairement considérer l'aspect environnemental. Pour des raisons pratiques, l'évaluation de la durabilité économique est souvent menée au niveau de l'entreprise, pour laquelle le "Life Cycle Costing" est un outil possible.
- La durabilité environnementale se développe positivement si moins de dommages sont causés à l'environnement, par exemple si l'impact sur le changement climatique est réduit ou si l'habitat naturel des animaux est mieux protégé. Même si le concept de durabilité est souvent associé simplement à la protection de l'environnement, il est en fait plus complexe et cet aspect environnemental ne représente bien qu'un tiers du problème. Nous avons donc besoin de bien équilibrer tous les trois aspects pour s'assurer d'un fonctionnement correct d'un tel système durable. L'analyse du cycle de vie est un outil couramment utilisé pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes de produits. Notre étude portera

principalement sur l'aspect énergétique et sur ses conséquences.

- La durabilité sociétale se développe positivement si de meilleures conditions sociales sont créées pour tous les humains. Elle représente les employés d'une compagnie ainsi que la population en général. Mesurer la durabilité sociale est délicat, parce qu'elle doit également répondre à des questions telles que «Qu'est-ce qui constitue une vie saine ?». Cependant, il y a eu quelques tentatives initiales de création d'outils et d'indicateurs pour la durabilité sociale, l'un d'entre eux étant le Social Life Cycle Assessment [8] [9].

2.2 Etude de Cas : l'aéroport Toulouse-Blagnac (ATB)

Étudions d'abord les mesures déjà prise par les aéroports. Le choix est fait de se concentrer sur l'aéroport de Toulouse Blagnac, dont les efforts se retrouvent sur beaucoup de plateformes, et sur lequel cette étude se concentrera dans la suite. Ce choix est justifié par une certaine transparence de l'aéroport rendant un grand nombre de données disponibles, mais aussi par sa proximité géographique ;

2.2.1 Les mesures durables prises à ATB

2.2.1.1 Durabilité environnementale.

L'aéroport de Toulouse-Blagnac (ATB) s'est déjà engagé dans de nombreuses solutions afin d'améliorer son site. En effet, celui-ci provoque dans un premier temps les bruits et gênes sonores. Pour ce faire, de 0h00 à 6h00 :

- Interdiction des avions les plus bruyants ;
- Majoration des redevances pour le trafic de nuit
- Mise en œuvre de nouvelles procédures de décollage vers le nord, pour réduire l'impact sonore sur Toulouse et de procédures d'atterrissage en descente continue, en phase d'approche ;
- Poursuite de la politique d'insonorisation ;
- Création et mise en place d'un observatoire « cœur de nuit ».

D'autre part, pour réduire la pollution de l'air les avions bénéficient :

- d'un moteur auxiliaire dit APU (Auxiliary Power Unit) : il assure l'alimentation électrique et l'air climatisé et permet également le démarrage des réacteurs;
- d'un groupe électrogène spécifique : le GPU (Ground Power Unit).

De plus, les eaux pluviales et de ruissellements sont collectées via un réseau d'environ 12km composé :

- de fossés collectant les secteurs enherbés (contour des pistes par exemple);
- de canalisations équipées de regards et de séparateurs d'hydrocarbures, pour les secteurs imperméabilisés (voiries).

Un certain nombre de séparateurs-débourbeurs, permettant de filtrer les hydrocarbures et les huiles, est réparti sur les zones imperméabilisées :

- parkings avions de Blagnac 1,
- parcs de stationnement des véhicules,
- aires de lavage des véhicules.

Pour les eaux souterraines, plusieurs puits de captage des eaux de nappe phréatique sont installés sur l'aéroport. Ils permettent de pomper de l'eau pour plusieurs usages qui ne nécessitent pas une qualité d'eau potable :

- Le fonctionnement des systèmes de climatisation de l'aérogare,
- Certains exercices réalisés par les pompiers ;
- L'arrosage des espaces verts ;
- Le balayage des voiries.

Pour sa gestion contre les déchets, mise en place d'une déchetterie verte pour les entreprises présentes sur la plateforme. La réglementation interdit :

- le brûlage des déchets,
- l'abandon des déchets,
- les rejets dans les réseaux d'assainissement,
- le mélange de certains types de déchets (par exemple les déchets dangereux et non dangereux),
- la mise en décharge de déchets valorisables.

Les exploitants aéroportuaires font aussi de leur mieux pour protéger la faune et la flore en utilisant des méthodes d'effarouchement pour les oiseaux notamment. Pour éviter la prolifération de lapins, ceux-ci sont prélevés et relâchés dans l'Aude. En dernier recours, l'abattage d'espèces est autorisé.

2.2.1.2 Problématique sociétale.

Grâce au Projet Sentinelle, l'aéroport suit et enregistre les trajectoires précises empruntées par les avions, permettant ainsi de vérifier le respect des procédures publiées sur les horaires de vol, et de vérifier qu'un seuil de bruit n'est pas atteint. La réponse aux plaintes des riverains est donc plus aisée, ce qui permet de mieux les protéger contre la pollution sonore engendrée par l'activité. A cela s'ajoute un Plan d'Exposition au Bruit (PEB) ; l'objectif de celui-ci est de permettre le développement des communes avoisinantes sans exposer les nouvelles populations à un niveau de bruit trop élevé. Enfin, ATB propose une aide à l'insonorisation pour les habitants vivant dans le voisinage de l'aéroport [10].

2.2.2 de nouveaux projets durables en cours de développement à ATB

L'aéroport de Toulouse-Blagnac est devenu récemment (le 20 juin 2020), après la signature du projet Hyport, le premier site aéroportuaire à développer une station de production et de distribution d'hydrogène vert, qui sera ouverte au personnel et aux particuliers. La station alimentera 4 bus assurant le transport de passagers.



Figure 2: Station Hydrogène ATB [11].

Ce projet affirme l'engagement de ATB vers le "zéro émission de carbone" en 2050. Ce projet est important et nécessaire pour rendre les solutions hydrogènes pour les véhicules plus compétitifs aux yeux des usagers, vis à vis des solutions thermiques ou carbonées classiques [11].

L'installation d'une telle station peut aussi représenter un véritable atout pour la vie économique de l'aéroport, puisque celle-ci pourra permettre l'afflux d'un nouveau public qui viendra faire son plein à l'aéroport [12].

2.3 Etude de nouvelles technologies durables

2.3.1 L'éolien

Pour des raisons de sécurité, il est impossible d'installer de grandes éoliennes à turbines sur le site d'un aéroport. Toutefois de nouveaux modèles sont développés : il s'agit des éoliennes sans pales. Celles-ci présentent de nombreux avantages.

Tout d'abord, leur impact environnemental est réduit par rapport à des éoliennes classiques. Sa conception simple et son poids léger permettent une utilisation très efficace des matières premières, et l'absence de lubrifiants rend inutile la gestion de ces déchets.

D'autre part, celles-ci ne seront pas contraignantes sur un site aéroportuaire si on les imagine frangibles. Leur mouvement, avec un étalonnage et un ancrage approprié, devrait être plus silencieux.

De plus, les interférences de la conception sans lame Vortex sur les signaux radio sont négligeables. Elles sont aussi plus respectueuses de la faune et de la flore et l'impact de cette énergie éolienne sans lame sur la population d'oiseaux devrait ainsi être beaucoup plus faible. La conception de Vortex permet au mouvement oscillatoire sur les turbines sans pales d'être minuscule et moins agressif que les éoliennes traditionnelles. Elles ne perturbent donc pas la

faune et permettent aux oiseaux et aux chauves-souris de les éviter facilement en vol.

Toutefois, il est à noter qu'elles produisent moins d'électricité que les éoliennes classiques, leur rendement étant 30% inférieur à dimension similaire. Cependant, la technologie vise une réduction de plus de 50% sur les coûts de construction et de fonctionnement par rapport à une turbine classique, et de 80% concernant les coûts d'entretien, leur donnant ainsi une rentabilité très attirante pour de nouveaux investisseurs (Figure 10 et Figure 11 voir annexe) [13].

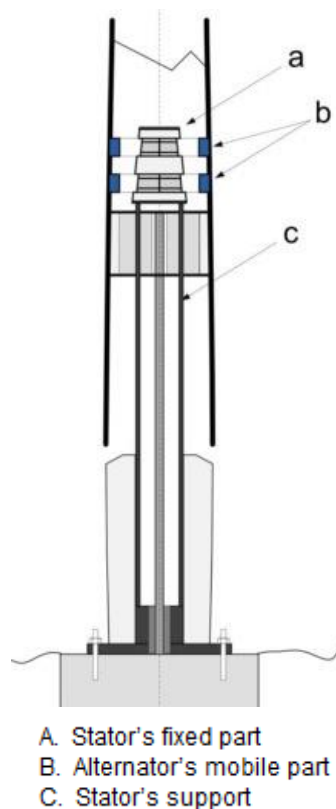


Figure 3 : Eolienne sans pale [14]

2.3.2 Le photovoltaïque.

Même si la législation ne permet pas pour le moment d'installer des panneaux solaires sur les terrains autour du tarmac et des pistes. Ils peuvent néanmoins être implantés sur les halls et bâtiments principaux de l'aéroport. Ceci va d'ailleurs être appliqué à l'aéroport Roland Garros où l'installation sera posée sur la toiture du hall public de l'aérogare, elle couvrira une surface totale de 2800 m². Cela permettra d'engendrer une puissance globale de 496 kilowatts crête (kWc), couvrant environ 10% des besoins de l'aérogare passagers. Cela permettra aussi d'éviter annuellement environ 600 tonnes de rejets de CO₂.

Ces résultats très positifs sont toutefois obtenus avec la technologie actuelle de panneaux photovoltaïques, dont le rendement reste assez faible : Entre 7% pour les moins bon et 15% pour les meilleurs. Actuellement, en laboratoire, de nouveaux concepts (comme les multijonctions) visent les

60% de rendement. Certaines technologies prétendent même être capables de transformer l'énergie thermique reçue sur les panneaux la journée en électricité, ceci pendant la nuit [15][16].

2.3.3 La géothermie.

C'est une technologie intéressante, car elle exploite une partie inoccupée du site aéroportuaire. En effet, celle-ci va utiliser l'énergie terrestre sous la surface. Elle pourra être utilisée de deux manières différentes :

1. Soit pour chauffer les bâtiments de l'aéroport (hall, salle d'embarquement, bureaux...) en hiver, et les refroidir en été ;
2. Soit pour produire de l'électricité comme l'envisage l'aéroport de Paris Orly afin de réduire son empreinte carbone. L'installation géothermique permettra de produire une puissance de 10MW, réduira la consommation de gaz d'Orly de 4 000 tonnes équivalent pétrole (TEP) et évitera ainsi le rejet d'environ 9 000 tonnes de CO₂ par an [17].

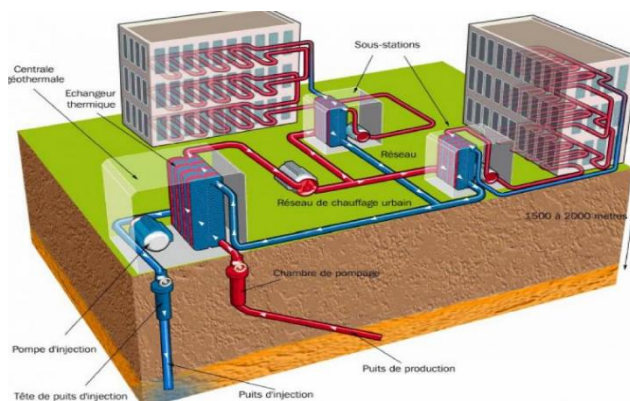


Figure 4 : Pompes géothermiques [17]

2.4.4 La power road. Une autre nouvelle technologie développée par la société Vinci est la Power Road.



Figure 5 : Power road [18]

C'est une route (elle pourrait être assimilée aux différentes pistes d'avions ainsi qu'aux autres infrastructures routières du site) qui produirait une énergie thermique. Cette énergie, provenant des rayonnements solaires serait captée par la route, stockée puis restituée aux bâtiments et infrastructures environnants via un système de pompes à chaleur. Elle peut également être utilisée pour déneiger et déverglacer les voiries et pistes d'aéroports en hiver, réduisant ainsi les interventions de salage. En été, elle permettrait de refroidir les chaussées et de résorber les îlots de chaleur urbains grâce au captage de chaleur en surface. Il est estimé actuellement que pour de grands aéroports cette infrastructure permettrait non seulement d'avoir une énergie propre, mais aussi de faire économiser plus de 10M d'euros rien que pour lutter contre le verglas, 25m² de chaussée permettant de capter les besoins énergétiques d'un foyer de 75m² [18].

2.3.5 L'Hydrogène :

Avec le projet Hyport, ATB va être le premier site aéroportuaire à posséder sa propre installation de production et de distribution d'hydrogène vert. Toutefois, l'aéroport pourrait voir plus grand. En effet l'hydrogène semble représenter un véritable enjeu pour l'avenir, car il apporte de nombreuses solutions complémentaires à la maîtrise des consommations d'énergie et au développement des sources renouvelables : stocker l'électricité, gérer les réseaux énergétiques, se déplacer plus proprement.

La création d'hydrogène se fait à partir d'électricité. Si celle-ci est d'origine renouvelable, l'hydrogène permet alors de stocker, transporter et distribuer cette électricité intermittente. De plus, l'hydrogène permet de recréer un courant électrique si on le recombine avec de l'oxygène pouvant ainsi devenir un carburant pour alimenter les moteurs des engins électriques (bus, voitures, etc) présentes sur le site de l'aéroport ou même de particulier venant chercher leur "carburant").

L'hydrogène permet donc d'envisager pour les années à venir quatre grands axes de développement :

- Dans l'hypothèse d'un futur développant fortement les énergies renouvelables, l'hydrogène apporte des solutions de flexibilité et d'optimisation aux réseaux énergétiques, grâce au Power to Gas. Le Power to Gas va donc permettre de transformer les surplus d'électricité d'origine renouvelable en hydrogène par électrolyse de l'eau : grâce à un simple courant électrique, l'eau est transformée en oxygène ou en hydrogène gazeux. Cet hydrogène produit est utilisé sur place ou injecté dans les réseaux existants (de distribution ou de transport) de gaz naturel en l'état, ou après une étape de méthanation (l'hydrogène associé à du CO₂ est converti en méthane de synthèse). Le Power to Gas permettra donc de stocker plus efficacement les surplus d'électricité des énergies renouvelables et de les mettre au service de différents usages : chauffage, eau chaude, mobilité (véhicules

électriques fonctionnant avec de l'hydrogène, cf projet Hyport) [18]–[20].

Ainsi l'association de l'hydrogène avec le Power to Gas permettra d'apporter plus de stabilité pour les énergies renouvelables. Effectivement, pour les sources d'énergies renouvelables dont la production ne fonctionne que par intermittence, celle-ci est de fait difficilement prévisible à cause des conditions climatiques qui ne sont pas toujours les mêmes.

- L'hydrogène donne également de nouvelles opportunités pour l'autoconsommation d'énergies locales à l'échelle d'un bâtiment, d'un îlot ou d'un village, tout particulièrement pour les zones non connectées au réseau électrique ;
- Le développement des véhicules électriques hydrogène vient diversifier l'offre d'électromobilité, répondant aux besoins de la mobilité professionnelle
- Les nouvelles technologies permettent enfin de réduire les impacts liés à l'emploi actuel d'hydrogène produit à l'aide d'énergie fossile dans l'industrie [21] [22].

2.3.6 Bilan

L'aéroport, avec l'apport de ces nouvelles technologies comme la géothermie, la power road, et même des stations d'hydrogène, pourrait devenir une source énergétique, pour l'écosystème et le voisinage cela permettrait non seulement d'aider à la durabilité environnementale, mais aussi économique et sociétale. On peut en effet imaginer l'aéroport comme ayant une activité encore plus diversifiée, et capable de subvenir aux besoins d'énergie des riverains, en plus de leur offrir une importante surface commerciale. Ainsi l'aéroport s'inscrirait de manière durable dans son environnement et serait essentiel au développement de son voisinage, sa région.

3 MODELISATION DES FLUX DE PERSONNES ET D'ÉNERGIE SUR L'AÉROPORT DE TOULOUSE-BLAGNAC

3.1 Idée générale

La complexité, et surtout la multiplicité des enjeux liés à l'aéroport et à son environnement, rend nécessaire une simplification et une approche « au cas par cas », où un nombre limité d'acteurs et un certain nombre d'hypothèses simplificatrices permettent de cibler quelques axes d'amélioration de l'aéroport, et une quantification des progrès possibles.

Cette étude propose donc une modélisation des flux de personnes et d'énergie sur l'aéroport de Toulouse-Blagnac (code OACI : LFBO). Des hypothèses fortes, détaillées plus

tard, ont été faites lors de son développement, et il convient de rappeler que les débats houleux sur les énergies renouvelables au sein de la communauté scientifique, et même de l'opinion publique, peuvent amener à les discréditer. Des efforts ont donc été faits pour intégrer un maximum d'options à la modélisation, afin que des hypothèses différentes puissent être faites facilement et fournir d'autres résultats.

Par exemple : nous avons choisi de quantifier l'impact environnemental de l'aéroport en mesurant sa surface et ses émissions en équivalent CO₂ (eqCO₂), qui quantifie la capacité d'un gaz à retenir le rayonnement solaire. Il convient donc, pour évaluer ces émissions, d'évaluer les besoins énergétiques à LFBO et d'étudier les solutions possibles pour y subvenir. Le rapport 2014 du GIEC [bibliographie] fournit en détail une évaluation des émissions liées à différents types de centrales, présentée sur la [Figure 14](#) disponible dans l'annexe.

La [figure 14](#) présente le nucléaire comme un des plus faibles émetteurs de CO₂, en émettant presque 4 fois moins d'eqCO₂/kWh que le photovoltaïque, largement considéré comme une énergie « verte » dans l'opinion publique. La précédente hypothèse simplificatrice pose donc un problème et est sujette à débat. Pour pallier ceci, notre étude rend possible l'utilisation de nombreuses centrales, à choisir par l'utilisateur, chacune associée à un coefficient lié à son impact environnemental. Le choix a été fait, pour la suite, de n'utiliser que de l'énergie photovoltaïque et éolienne sans pale, que nous imaginons frangibles pour répondre aux besoins de sécurité du secteur aéronautique. Ce choix est justifié par le besoin en surface de l'aéroport souvent, surface souvent non utilisée en grande partie, ce qui s'accorde avec les besoins de ces technologies.

Passons maintenant à la modélisation proprement dite ; celle-ci se base sur un schéma très répandu de l'aéroport [figure 6](#) (aussi disponible dans l'annexe) :

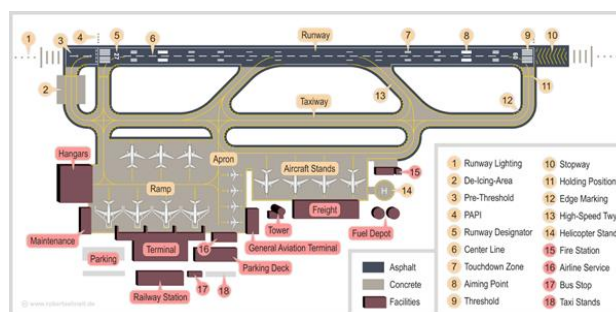


Figure 6 : Schéma des acteurs de l'aéroport, supposés tous consommateurs d'énergie [23].

Un grand nombre d'acteurs est identifié, dont les besoins sont divers. Le terminal par exemple, requiert une alimentation en électricité pour l'éclairage ou le système d'enregistrement des bagages, mais aussi un système de génération d'eau chaude et froide. On distingue aussi plusieurs secteurs d'activités regroupés que l'on regroupe

dans 3 catégories : les moyens d'accès, l'Aire de manœuvre et l'Aire de trafic.

Bien que le modèle se concentre sur les aspects énergétiques, soulignons que l'aspect sociétal et le bruit apparaîtront dans le modèle grâce à la présence d'un paramètre simple : la distance Ville-Aéroport. L'aspect économique quant-à-lui, est simplement abordé par la diversification des activités de l'aéroport, qui pourrait devenir une station fournissant de l'énergie aux riverains alentour.

3.2 Modèle conceptuel des entités énergétiques d'un aéroport

La modélisation précédente est maintenant développée sous format UML sur la [figure 15](#) disponible en annexe. Les précédentes catégories sont intégrées, auxquelles on ajoute les moyens de production d'énergie. Chaque acteur se voit affecté de coefficients, facilement modifiables, liés à sa consommation d'énergie, sa capacité de production, ou ses rejets en CO₂. Les figures 16 – 19 viennent de ce même diagramme mais chaque catégorie est isolée.

Le choix est fait de modéliser les moyens d'accès comme montré sur la [figure 18](#). L'étude choisit de modéliser le flux des passagers empruntant chaque moyen d'accès par un coefficient d'attractivité entre 0 et 1. Le besoin énergétique de chaque composant correspond uniquement au besoin de l'infrastructure, c'est-à-dire au besoin de l'éclairage d'un parking par exemple. En revanche, les émissions sont bien associées au trajet des moyens de transports (bus, train, taxi ou voiture de particuliers). A noter que l'élément « parking voitures » est composé de tous les parkings, du dépose minute au parking dit « longue durée », et que les émissions associées sont différenciées, puisque les passagers se faisant déposer nécessitent un trajet deux fois plus long (1 aller-retour de la voiture correspond à 1 aller pour le passager).

Remarquons que toutes les centrales présentées dans la [figure 19](#) ne fournissent pas le même type d'énergie. Pour simplifier la modélisation, il a finalement été décidé que tous les besoins de l'aéroport s'exprimaient en besoin électrique, c'est-à-dire que l'étude assimile tous les types d'énergies et les considère identiques. Cette hypothèse est forte, car si on imagine un aéroport dont les besoins sont de 80W d'électricité et de 20W de chaleur (fournie par des chaudières, ou des moyens de géothermie), nous considérerons que l'aéroport consomme en fait 100W d'électricité. Lors de notre étude, nous avons évalué la part de l'énergie thermique à 15% du besoin total en énergie.

Les différents coefficients de consommation et d'émissions ont, lorsque c'est possible, été calculés pour l'étude. Nous avons cependant choisi d'utiliser les valeurs du GIEC si un écart important avec nos valeurs calculées était constaté.

4 LOGICIEL DE CALCUL DE L'EMPREINTE DE L'AEROPORT

La contribution de ce projet se trouve dans l'amélioration d'un code python précédemment développé par Thierry DRUOT et des élèves de l'ENAC. Celui-ci est décrit brièvement ci-après :

4.1 Structure

Le logiciel se compose de 7 fichiers Python qui représentent respectivement : l'aéroport, les centrales d'énergie, les avions, un fichier de conversion d'unité, des données physiques et les autres outils nécessaires pour les calculs et finalement le fichier qui prend les entrées de dimensionnement et lance le calcul. Les entrées primaires sont les suivantes :

- Nombre de pistes
- Répartition d'avions par type (court, moyen, long courrier)
- Distance de l'approche
- Horaires d'ouverture de l'aéroport
- Distance ville-aéroport
- Répartition des centrales par type (photovoltaïque, éolien, nucléaire etc.)

Il est important de remarquer qu'il s'agit bien des entrées primaires et qu'il est aussi possible de changer quelques autres données dans le fichier qui lance le calcul, notamment des coefficients de consommation des différents modes de transport, la répartition des passagers entre eux, l'ensoleillement local etc.

Les sorties de logiciel sont ensuite :

- Flux des passagers (entrants/sortants) avec leur moyen d'accès utilisé
- Nombre de mouvements d'avions (posé/décollé)
- Surface (totale + par composant en incluant les centrales)
- Puissance nécessaire nominale/max (totale + par composant)
- Consommation d'énergie jour/an (totale + par composant)
- CO₂ incorporées dans la construction (totaux + par composant)
- Données détaillées de fonctionnement prévu pour les centrales choisies (puissance, rendement, chiffrage des besoins en termes des matériaux, etc.)

Les composants évoqués précédemment sont les suivants :

- Pistes
- Taxiways
- Terminaux
- Stationnements d'avions
- "Station radar" (toutes les aides IFR ainsi que les besoins du contrôle)

- Ateliers d'entretien d'avions
- Parking voitures
- Gare de train
- Station de bus/taxi

La taille de chaque composant varie selon les entrées. Finalement, le logiciel produit une représentation graphique de la surface de ces derniers. Rq. : La surface du terminal correspond à la surface totale de tous les étages, l'empreinte réelle serait donc réduite de moitié dans un terminal conventionnel de deux étages. La [Figure 7](#) représente la sortie graphique du logiciel avec des entrées cohérentes à l'aéroport Toulouse-Blagnac.

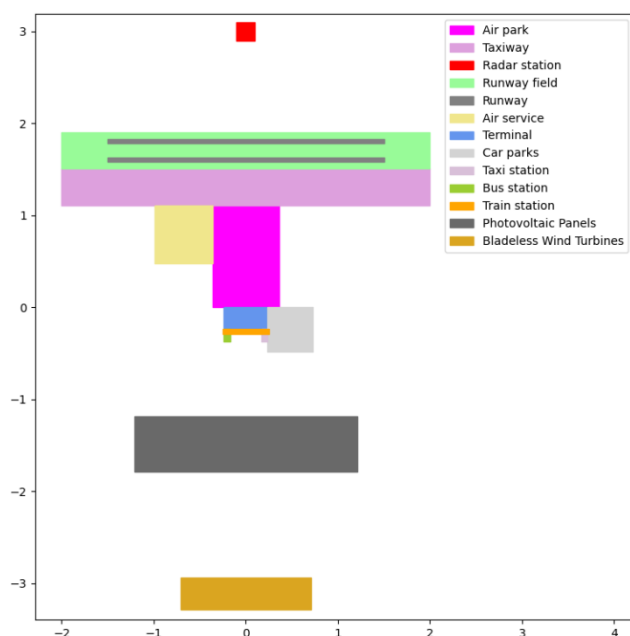


Figure 7 : Représentation graphique d'un aéroport type Toulouse-Blagnac.

4.2 Calcul des coefficients liées aux émissions CO₂

4.2.1 CO₂ incorporées dans la construction

Les émissions liées à la construction des différents composants de l'aéroport ont été calculées à l'aide du rapport d'évaluation de l'empreinte carbone pendant la construction d'une nouvelle piste à l'aéroport Londres-Heathrow [24]. Les résultats sont présentés dans la dernière ligne du tableau de composants entre les sorties du logiciel. Il y a aussi une valeur totale des émissions liées à la construction de l'aéroport qui prend 15% de marge en plus de la somme des émissions des composants individuels.

4.2.2 CO₂ liées au transport des passagers (ville-aéroport)

Pour le calcul des émissions liées aux transports, une estimation de l'énergie nécessaire au mouvement d'un passager sur 1km a été faite pour chaque mode, puis croisée aux estimations du GIEC [25] d'émission en eqCO₂ par

passager et par kilomètre. Le logiciel est ainsi capable de calculer l'énergie nécessaire au transport et de la traduire en émission eqCO₂.

4.3 Implémentation des éoliennes sans pales

Comme il était déjà abordé dans le chapitre 2, les éoliennes sans pales imaginées frangibles représentent une nouvelle piste d'utilisation de l'énergie éolienne qui devrait être utilisable même par les aéroports. Pour le calcul de l'utilisation de ces dernières, les données du projet Vortex Bladeless ont été utilisées [13]. Cette compagnie propose des turbines en 3 tailles. Pour l'utilisation dans les alentours d'un aéroport, la turbine de 12 mètres de hauteur et d'une puissance maximale de 4kW a été choisie. Soulignons cependant que celles-ci pourraient être de taille réduite jusqu'à 3 mètres.

L'emplacement du champ des turbines va devoir satisfaire les exigences réglementaires qui ne sont pas encore formulées, mais on peut imaginer une note de dispositions qui serait publiée dans quelques années, comme cela existe déjà pour les panneaux photovoltaïques [26].

4.4 Scénarios de développement d'aéroport Toulouse-Blagnac

Les scénarios suivants imaginent un modèle d'aéroport type Toulouse-Blagnac disposant d'un site de production d'énergie hypothétique, qui se composerait d'une centrale photovoltaïque et d'une centrale éolienne sans pales frangibles, couvrant respectivement 75% et 25% du besoin total énergétique de l'aéroport.

L'énergie d'ensoleillement reçue par les panneaux peut être choisie librement comme une moyenne à l'année, ou une moyenne sur l'hiver de façon à dimensionner l'installation photovoltaïque pour "le pire des cas". Les valeurs moyennes d'ensoleillement peuvent être trouvées dans la [figure 9](#) (annexe). Pour ces scénarios, un ensoleillement moyen de la zone de Toulouse en l'hiver de 1,62 kWh/m²/jour a été choisie. Cette valeur correspond au rayonnement solaire moyen de 135 W/m².

Un vent moyen de 8 nœuds est utilisé pour l'éolien, comme trouvé sur le site windfinder.com [27]. Le logiciel permet ensuite de chiffrer l'excès d'énergie disponible en été, qui pourrait être revendu aux particuliers ou réinjecté sur le réseau électrique. L'ordre de grandeur de la consommation électrique de l'aéroport et la forte différence de rayonnement entre les saisons pourrait ainsi permettre à l'aéroport de subvenir aux besoins électriques de nombreux riverains en été, en générant un excès d'énergie de l'ordre du GWh sur une année. Toutes les autres valeurs resteront inchangées.

4.4.1 Amélioration de la production d'énergie et de l'efficacité de la consommation dans 20 ans.

Ce scénario compare l'utilisation des centrales dans le rapport décrit précédemment avec la technologie d'aujourd'hui, et celle prévue pour les années 2040.

Comme nous pouvons voir sur la [figure 13](#) (annexe), l'efficacité des cellules utilisées dans les panneaux solaires montre un taux de croissance non négligeable pendant les dernières décennies. Le rendement maximal théorique des cellules est de 68,7% [28]. De nos jours, le rendement des panneaux solaires est aux alentours de 15% [29], [30]. Le calcul de ce scénario fait alors une hypothèse d'augmentation du rendement des panneaux solaires de 15% à 25% entre 2020 et 2040.

Pour les éoliennes sans pales, il est évident qu'il s'agit d'une nouvelle technologie qui n'est pas encore utilisée dans la vie courante. Le calcul fait donc une hypothèse d'une augmentation légère de la puissance maximale de 5%, c'est à dire de 4kW à 4.2kW.

Finalement, pour faire apparaître l'amélioration de l'efficacité de la consommation, le composant "terminal" a été choisi car il représente la majorité de la consommation journalière (plus de 80%). Par conséquent, ce composant est imaginé être la cible des améliorations de la consommation, grâce notamment à une amélioration du chauffage et de l'éclairage, ou à l'abandon des systèmes automatisés de traitement des bagages (dont l'impact est évalué à 10% des besoins du terminal). Le calcul prévoit donc une diminution de la puissance nominale du terminal de 20%. La [table 1](#) présente les résultats de ce scénario.

Table 1 : Comparaison du modèle avant et après une amélioration de la production d'énergie et de l'efficacité de la consommation.

	2020	2040
Consommation journalière [MWh]	179.7	152.7 (-15%)
Empreinte totale des centrales [km ²]	1.96	1.09 (-44%)

Le modèle prévoit une réduction de la consommation de 15%, et de l'empreinte des centrales de 44% avec les trois améliorations évoquées précédemment.

4.4.2 Augmentation de l'attractivité des transports en commun

Ce scénario fait une hypothèse d'amélioration de la répartition des passagers parmi les différents modes de transport. Ceux-ci sont comparés selon ces trois valeurs relatives :

- Offre - proportion de toutes les destinations possibles qui peuvent être atteintes
- Commodité - confort, vitesse et ponctualité
- Coût

Ces trois valeurs entrent dans une formule simple pour calculer l'attractivité du mode de transport (Equation 1).

$$\text{attractivité} = \frac{\text{offre} * \text{commodité}}{\text{coût}} \quad (1)$$

Finalement, les attractivités des modes sont comparées entre elles et transformées en coefficients qui répartissent le nombre total de passagers dans les moyens de déplacement. Afin de pouvoir décrire la situation actuelle de la répartition des passagers, l'étude d'accessibilité des aéroports en Europe du Centre Aérospatial Allemand [31] ainsi que les résultats de l'enquête sur les passagers menée par l'autorité de l'aviation civile du Royaume-Uni [32][33] ont été utilisés. À partir de ces études, surtout de la [Figure 12](#) (annexe), les coefficients approximatifs actuels ont été établis et notés dans la [table 2](#).

Table 2 : Situation actuelle de l'attractivité (répartition des passagers), offre, coût et commodité des différents modes de transport.

	Attractivité	Offre	Commodité	Coût
Taxi	18%	1	1.7	1.2
Voiture - dépose minute	33%	1	1.7	0.7
Voiture - parking	16%	1	3.4	1
Bus	9%	0.4	0.7	0.4
Train/Tram	24%	1	0.8	0.4

La solution la plus simple et efficace pour une augmentation de l'attractivité des transports en commun (le tram et le bus dans ce cas) est de réduire les prix des billets de ces derniers. Ce scénario fait alors l'hypothèse d'une subvention sur le bus et le tram de 50%, ce qui doublerait l'attractivité de ces modes. La [Table 3](#) montre le changement de la répartition des passagers après cette subvention. Les valeurs des changements des rapports sont calculées par rapport aux coefficients avant la subvention.

Table 3 : Situation de l'attractivité, offre, coût et commodité des différents modes de transport suite à l'augmentation de l'attractivité des transports en commun.

	Attractivité	Offre	Commodité	Coût
Taxi	13% (-28%)	1	1.7	1.2
Voiture - d. min.	25% (-24%)	1	1.7	0.7
Voiture - parking	12% (-25%)	1	3.4	1
Bus	13% (+31%)	0.4	0.7	0.2 (-50%)
Train /Tram	37% (+35%)	1	0.8	0.2 (-50%)

Finalement, une comparaison des émissions d'équivalent CO₂ liées au transport est faite dans la [table 4](#) en utilisant le taux d'utilisation de la capacité de l'aéroport de 0.4, ce qui

correspond approximativement au nombre réel des passagers accueillis par l'Aéroport de Toulouse-Blagnac [34].

Table 4 : Comparaison des émissions CO₂ liées au transport avant et après une augmentation de l'attractivité des transports en commun.

	Avant	Après
Emissions CO ₂ liés au transport [tonnes eqCO ₂]	423.77	320.70 (-24%)

Le modèle prévoit alors réduction d'équivalent CO₂ de 24% avec une subvention des coûts des transports en commun de 50%.

5 CONCLUSION

L'étude a modélisé les flux d'énergie et de personnes au sein de l'aéroport Toulouse Blagnac. Elle a mis en évidence les gros contributeurs énergétiques et d'émissions, et leur sensibilité au changement.

Le potentiel de développement de l'aéroport est important, mais les défis à relever le sont d'autant plus. Dans cette étude, des hypothèses fortes ont été faites de façon à développer une intuition de ce que pourrait être l'aéroport de demain, et fait apparaître de nombreux axes d'améliorations. Il apparaît par exemple que les parkings et les systèmes de traitement de bagages robotisés ont un impact non négligeable sur le besoin en énergie. La réponse à apporter est cependant à nuancer, car la suppression d'un système robotisé crée des emplois et réduit la consommation d'un côté, mais augmente les coûts pour l'exploitant de l'autre. Ce surcoût pourrait en revanche être compensé par des coûts de mise en place et d'entretien plus raisonnables des énergies renouvelables.

Afin de valoriser les nombreuses possibilités d'une plateforme aéroportuaire, la mise en place d'une variété de sources d'énergies nous semble aussi nécessaire, l'énergie devant être disponible tout le temps aux heures d'ouvertures et quelles que soient les conditions météo. L'éolienne sans pale frangible, utilisée en complément d'une centrale photovoltaïque, a semblé intéressante lors de notre étude et pourrait être développée. De très nombreuses autres possibilités, présentées en première partie, existent aussi et devraient être étudiées au cas par cas par un exploitant qui devra considérer chaque option en fonction du flux de passagers attendu et de sa position géographique par exemple.

REFERENCES

[1] 11115916, « Sustainable Innovation Forum - Post Event Report », *Issuu*.
https://issuu.com/climateaction/docs/sif15_post_event_report_v7 (consulté le janv. 19, 2021).

[2] B. J. Brown, M. E. Hanson, D. M. Liverman, et R. W. Merideth, « Global sustainability: Toward definition », *Environ. Manage.*, vol. 11, n° 6, p. 713-719, nov. 1987,

doi: 10.1007/BF01867238.

- [3] J. E. Moore, A. Mascarenhas, J. Bain, et S. E. Straus, « Developing a comprehensive definition of sustainability », *Implement. Sci.*, vol. 12, n° 1, p. 110, sept. 2017, doi: 10.1186/s13012-017-0637-1.
- [4] K. Károly, « Rise and Fall of the Concept Sustainability », *J. Environ. Sustain.*, vol. 1, n° 1, p. 1-13, nov. 2011, doi: 10.14448/jes.01.0001.
- [5] U. N. W. C. on E. and Development, *Our Common Future*. United Nations, 1987.
- [6] J. Robinson, « Squaring the circle? Some thoughts on the idea of sustainable development », *Ecol. Econ.*, vol. 48, n° 4, p. 369-384, avr. 2004, doi: 10.1016/j.ecolecon.2003.10.017.
- [7] J. Morelli, « Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals », *J. Environ. Sustain.*, vol. 1, n° 1, p. 1-10, nov. 2011, doi: 10.14448/jes.01.0002.
- [8] N. U. Blum, M. Haupt, et C. R. Bening, « Why "Circular" doesn't always mean "Sustainable" », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 162, p. 105042, nov. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105042.
- [9] M. Cottignies, « Transport et développement durable », p. 28, 2019.
- [10] « Aéroport Toulouse Blagnac », *Aéroport Toulouse-Blagnac*. <http://www.toulouse.aeroport.fr/societe-aeroport> (consulté le janv. 16, 2021).
- [11] « Hyport, première station hydrogène vert à l'aéroport », *Aéroport Toulouse-Blagnac*. <http://www.toulouse.aeroport.fr/passagers/infos-vols/actualites-passagers/hyport-premiere-station-hydrogene-vert-l-aeroport> (consulté le janv. 16, 2021).
- [12] I. Laplace et E. Malavolti, « Disruptive and sustainable innovation at airports: the case of hydrogen », présenté à TRA2020, 8th Transport Research Arena : Rethinking transport – towards clean and inclusive mobility, avr. 2020, Consulté le: oct. 20, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-02952163>.
- [13] « How it works? - Vortex Wind Turbine in a Nutshell », *Vortex Bladeless Wind Power*. <https://vortexbladeless.com/technology-design/> (consulté le janv. 16, 2021).
- [14] « Vortex Technical Paper - Bladeless Wind Turbines explained », *Vortex Bladeless Wind Power*, juin 07, 2018. <https://vortexbladeless.com/download-green-paper/> (consulté le janv. 19, 2021).
- [15] T. Deppe et J. N. Munday, « Nighttime Photovoltaic Cells: Electrical Power Generation by Optically Coupling with Deep Space », *ACS Photonics*, nov. 2019, doi: 10.1021/acsp Photonics.9b00679.
- [16] « Une centrale photovoltaïque à l'Aéroport Roland Garros | Air Journal ». <https://www.air-journal.fr/2019-11-18-une-centrale-photovoltaique-a-laeroport-roland-garros-5216302.html> (consulté le janv. 18, 2021).
- [17] « Un réseau géothermique pour l'aéroport d'Orly », *Eco CO2*, juin 01, 2010. <https://www.ecoco2.com/blog/un-reseau-geothermique-pour-laeroport-dorly/> (consulté le janv. 18, 2021).
- [18] « Power Road® ». <https://www.power-road.com/> (consulté le janv. 16, 2021).
- [19] « Le Power-to-Gas n'est pas indispensable pour passer au 100% renouvelable », *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur->

- fr.proxy.lib.enac.fr/actualite/articles/100-pour-cent-renouvelable-energie-hydrogene-42495/ (consulté le oct. 21, 2020).
- [20] J. Deschamps, « Filière hydrogène : principaux verrous et intérêt du Power to Gas », p. 13, 2019.
- [21] « | ENGIE », *Engie.com*.
<https://www.engie.com/activites/infrastructures/power-to-gaz> (consulté le janv. 18, 2021).
- [22] « Le vecteur hydrogène », *ADEME*.
<https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/vecteur-hydrogene> (consulté le janv. 18, 2021).
- [23] « Infographics ».
<http://www.robtaehnel.de/index.php/infodesign/infografiken> (consulté le janv. 18, 2021).
- [24] « 04_Heathrow_3RNW_-_Carbon_Footprint_Assessment.pdf ». Consulté le: janv. 16, 2021. [En ligne]. Disponible sur:
https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/about/airports-commission/technical-assessment/04_Heathrow_3RNW_-_Carbon_Footprint_Assessment.pdf.
- [25] Working Group III Technical Support Unit, « Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change ». Cambridge university press, [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- [26] « 3_2_NIT_Photovoltaique_V4_signee_27juillet11.pdf ». Consulté le: janv. 16, 2021. [En ligne]. Disponible sur:
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/3_2_NIT_Photovoltaique_V4_signee_27juillet11.pdf.
- [27] Windfinder.com, « Windfinder.com - Wind and weather statistic Toulouse/Blagnac », *Windfinder.com*.
https://www.windfinder.com/windstatistics/toulouse_blagnac (consulté le janv. 18, 2021).
- [28] A. De Vos et H. Pauwels, « On the thermodynamic limit of photovoltaic energy conversion », *Appl. Phys.*, vol. 25, n° 2, p. 119-125, 1981, doi: 10.1007/BF00901283.
- [29] L. Dai-Prá, J. Dias, et A. Kieling, « Comparison between the Energy Required for Production of PV Module and the Output Energy Throughout the Product Life Time », *J. Energy Power Eng.*, vol. 9, juin 2015, doi: 10.17265/1934-8975/2015.06.011.
- [30] M. Raugei, P. Fullana-i-Palmer, et V. Fthenakis, « The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles », *Energy Policy*, vol. 45, p. 576-582, juin 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.03.008.
- [31] W. Grimme, D. P. Berster, et D. M. Gelhausen, « Airport Accessibility in Europe », *Final Rep.*, p. 32.
- [32] « T07_2019.pdf ». Consulté le: janv. 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur:
https://www.caa.co.uk/uploadedFiles/CAA/Content/Standard_Content/Data_and_analysis/Datasets/Passenger_survey/2019/T07_2019.pdf.
- [33] « Modes of transport to selected UK airports 2019 », *Statista*.
<https://www.statista.com/statistics/303824/modes-of-transport-to-selected-uk-airports/> (consulté le janv. 17, 2021).
- [34] « bulletin_statistiques_mensuel-201906.pdf ». Consulté le: janv. 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur:
http://www.toulouse.aeroport.fr/sites/default/files/contrib/societe/lasociete/Stats_2019/bulletin_statistiques_mensuel-201906.pdf.
- [35] Preist, Jonathan, « Sustainable development and the role of engineering », Airbus, nov. 06, 2020.
- [36] « L'enseiement en France ».
<https://www.lepanneausolaire.net/l-enseiement-france.php> (consulté le déc. 12, 2020).
- [37] « Figure 1. Best Research-Cell Efficiencies from NREL. [2] », *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/figure/Best-Research-Cell-Efficiencies-from-NREL-2_fig1_327935098 (consulté le janv. 16, 2021).

ANNEXES

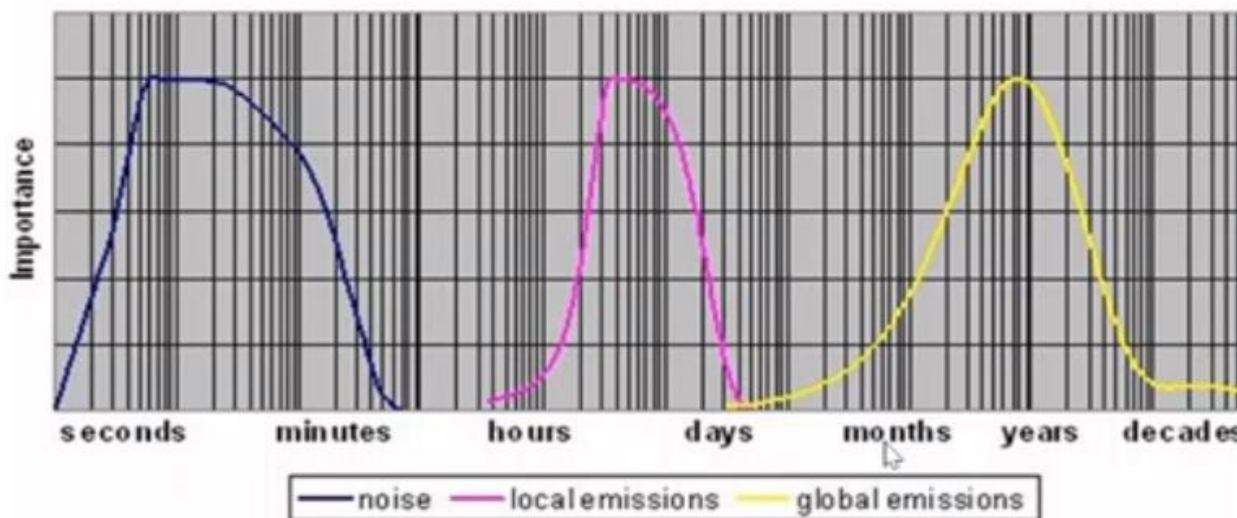


Figure 8 : Importance des nuisances sonores, émissions locales et globales en cours de temps[35]

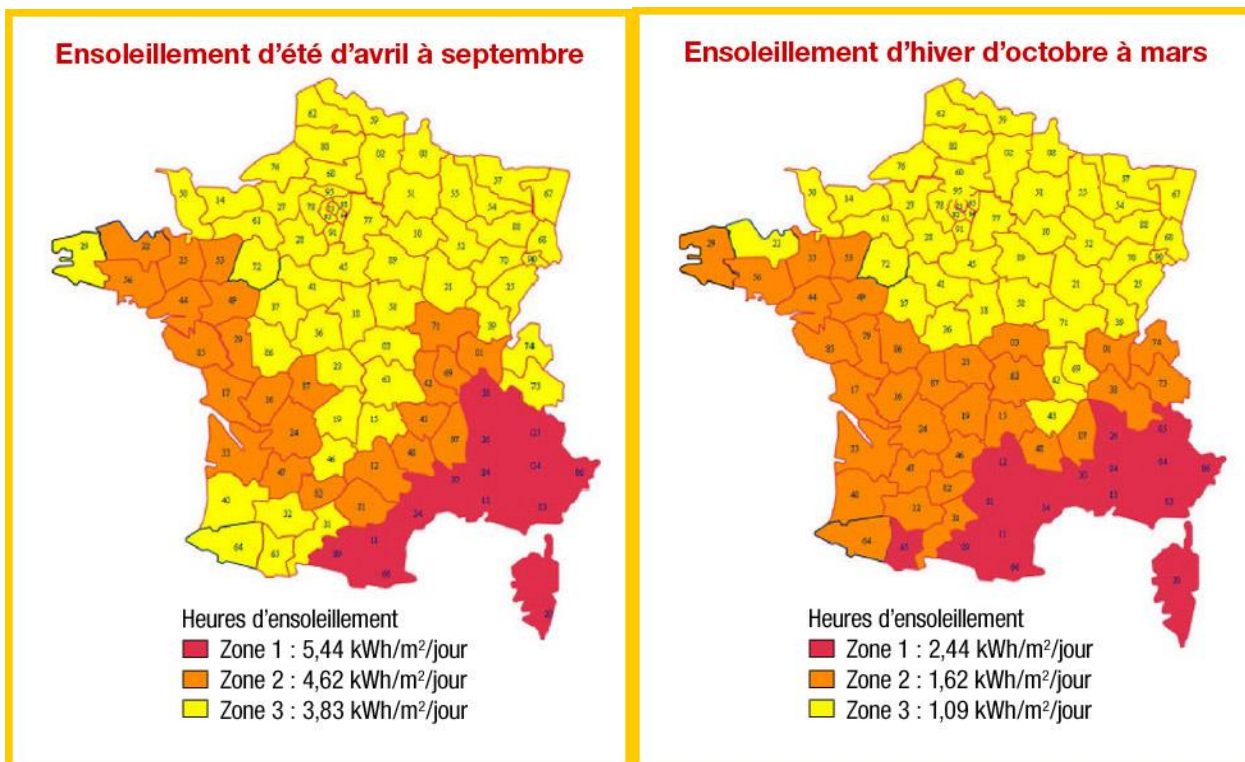


Figure 9 : Valeurs d'ensoleillement en France.[36]

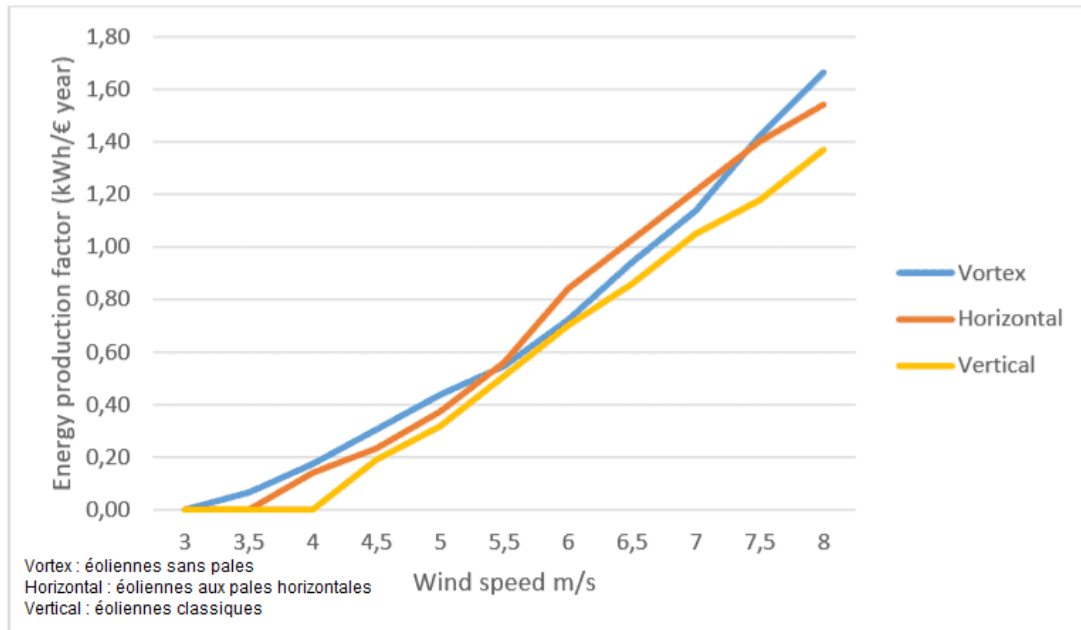


Figure 10 : Comparaison du facteur de production d'énergie pendant un an des différents types d'éoliennes.[13]

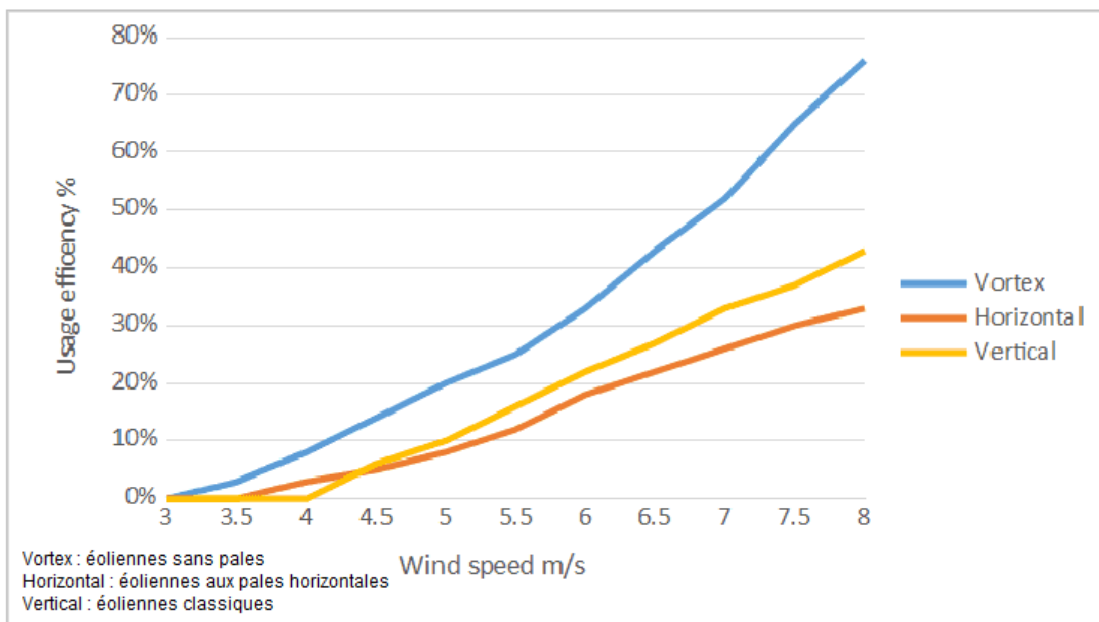


Figure 11 : Comparaison de l'efficacité de sortie des différents types d'éoliennes.[13]

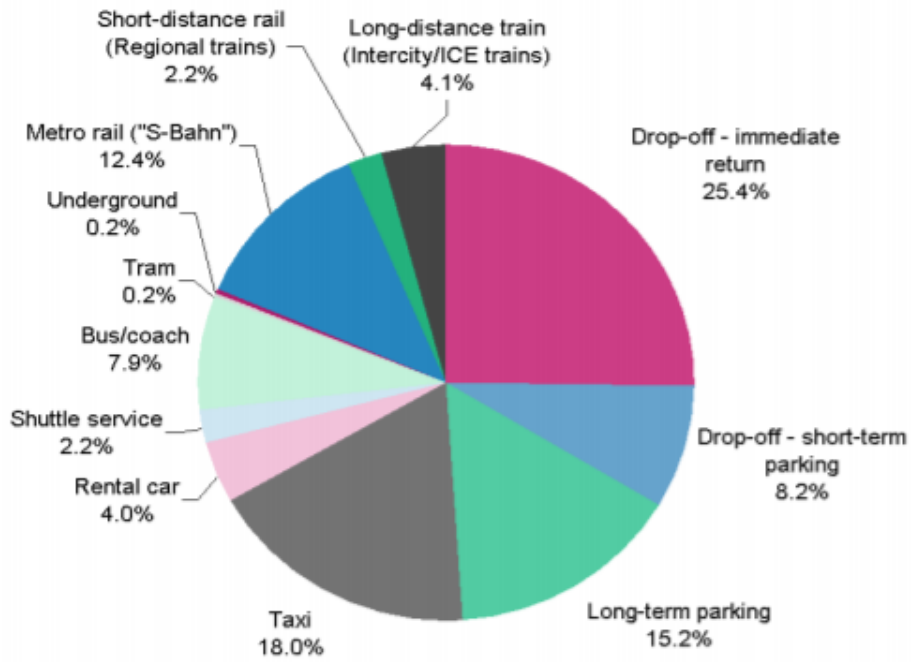


Figure 12 : Modes d'accès pour tous les passagers des aéroports allemands en 2008.[31]

Best Research-Cell Efficiencies

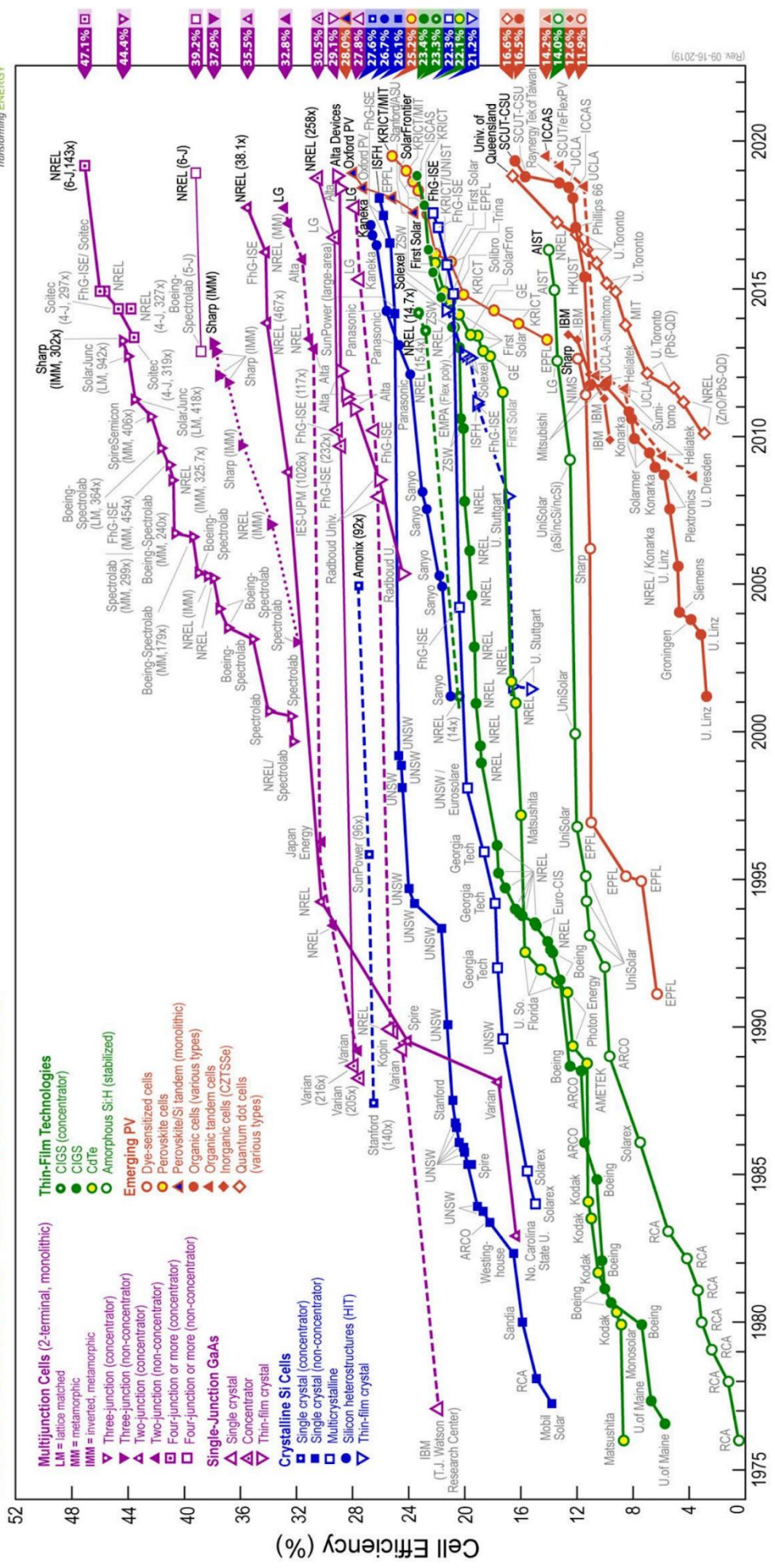


Figure 13 : Amélioration du rendement des cellules solaires entre années 1975 et 2020. [37]

Options	Direct emissions		Infrastructure & supply chain emissions	Biogenic CO ₂ emissions and albedo effect		Methane emissions	Lifecycle emissions (incl. albedo effect)	
	Min/Median/Max	Typical values		Min/Median/Max	Min/Median/Max			
Currently Commercially Available Technologies								
Coal—PC	670/760/870	0	9.6	0	47	740/820/910		
Gas—Combined Cycle	350/370/490	0	1.6	0	91	410/490/650		
Biomass—cofiring	n. a. ⁱ	–	–	–	–	620/740/890 ⁱⁱⁱ		
Biomass—dedicated	n. a. ⁱⁱ	27	210	27	0	130/230/420 ^{iv}		
Geothermal	0	0	45	0	0	6.0/38/79		
Hydropower	0	0	19	0	88	1.0/24/2200		
Nuclear	0	0	18	0	0	3.7/12/110		
Concentrated Solar Power	0	0	29	0	0	8.8/27/63		
Solar PV—rooftop	0	0	42	0	0	26/41/60		
Solar PV—utility	0	0	66	0	0	18/48/180		
Wind onshore	0	0	15	0	0	7.0/11/56		
Wind offshore	0	0	17	0	0	8.0/12/35		
Pre-commercial Technologies								
CCS—Coal—Oxyfuel	14/76/110	0	17	0	67	100/160/200		
CCS—Coal—PC	95/120/140	0	28	0	68	190/220/250		
CCS—Coal—IGCC	100/120/150	0	9.9	0	62	170/200/230		
CCS—Gas—Combined Cycle	30/57/98	0	8.9	0	110	94/170/340		
Ocean	0	0	17	0	0	5.6/17/28		

Figure 14 : Émissions de certaines technologies d'approvisionnement en électricité (gCO₂eq/kWh) [25] - page 1333.

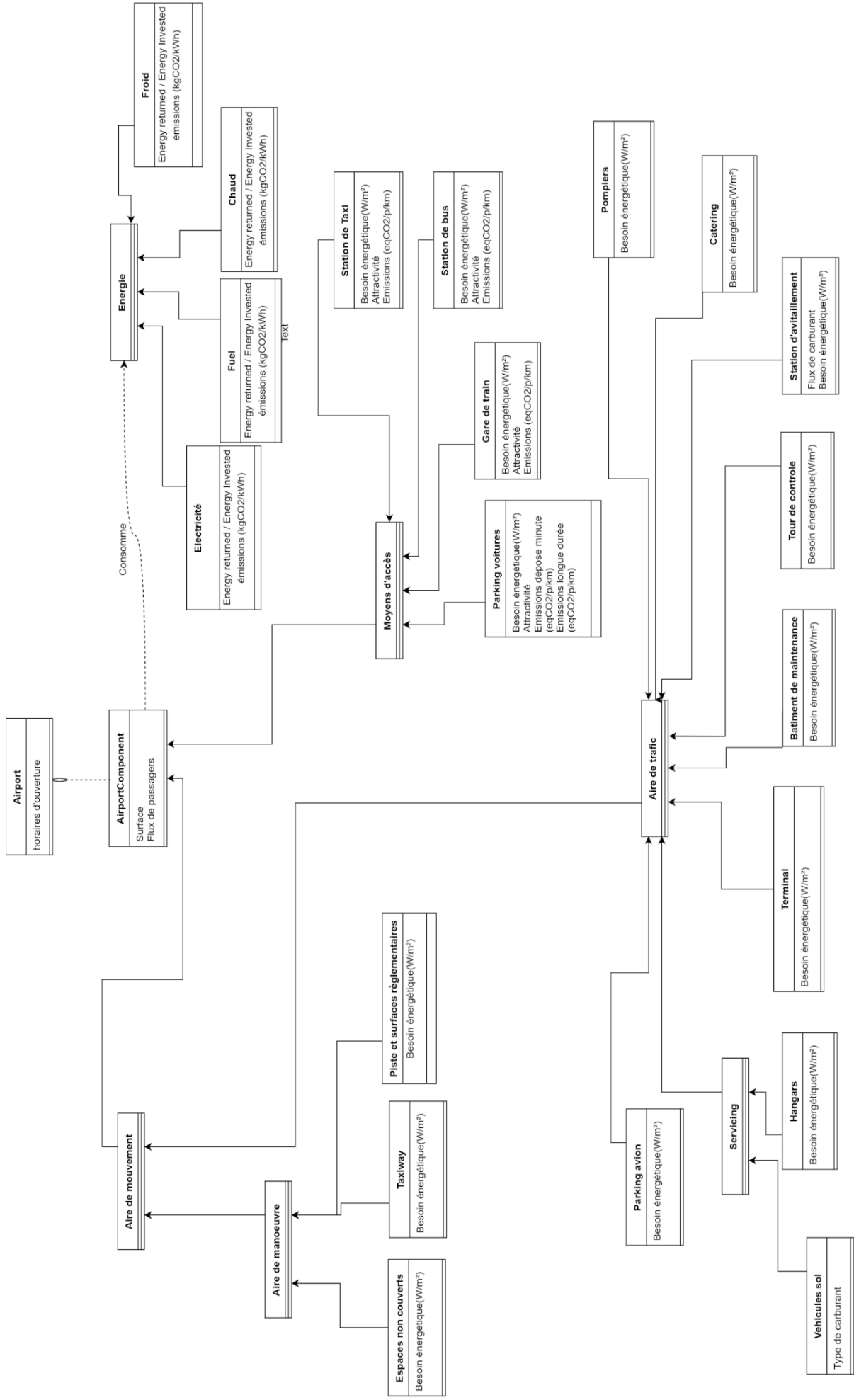


Figure 15 : Schéma UML d'une première approche de modélisation d'aéroport.

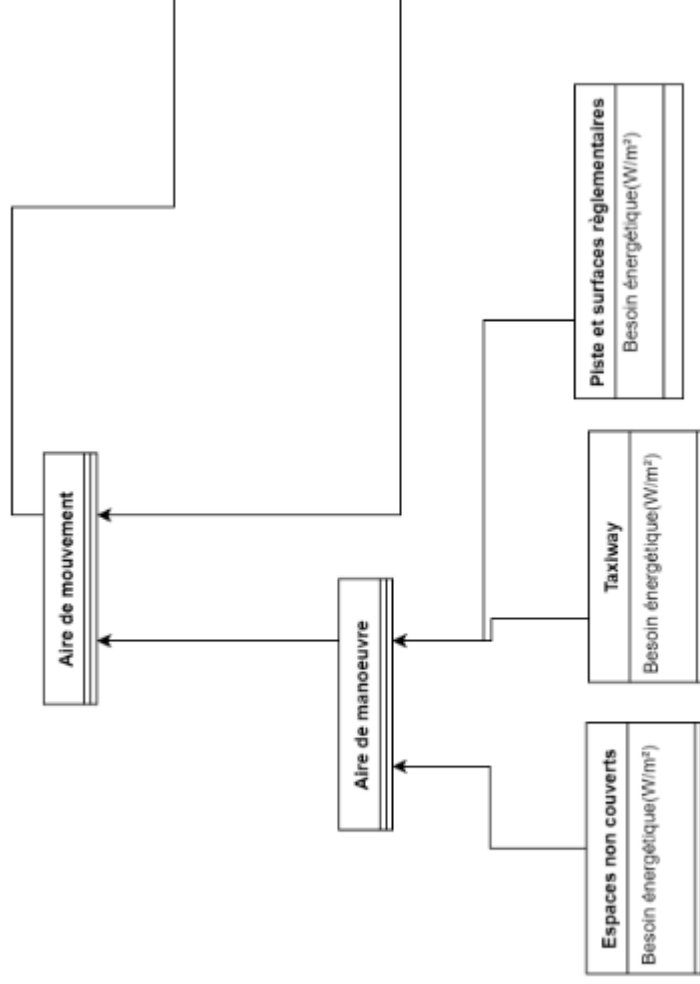


Figure 16 : Première approche d'une modélisation de l'aire de mouvement.

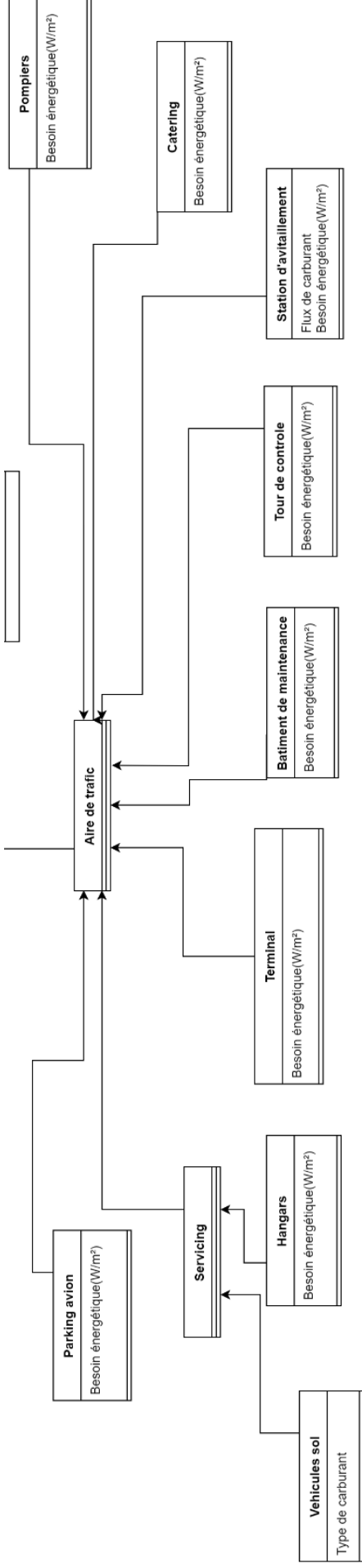


Figure 17 : Première approche d'une modélisation de l'aire de trafic.

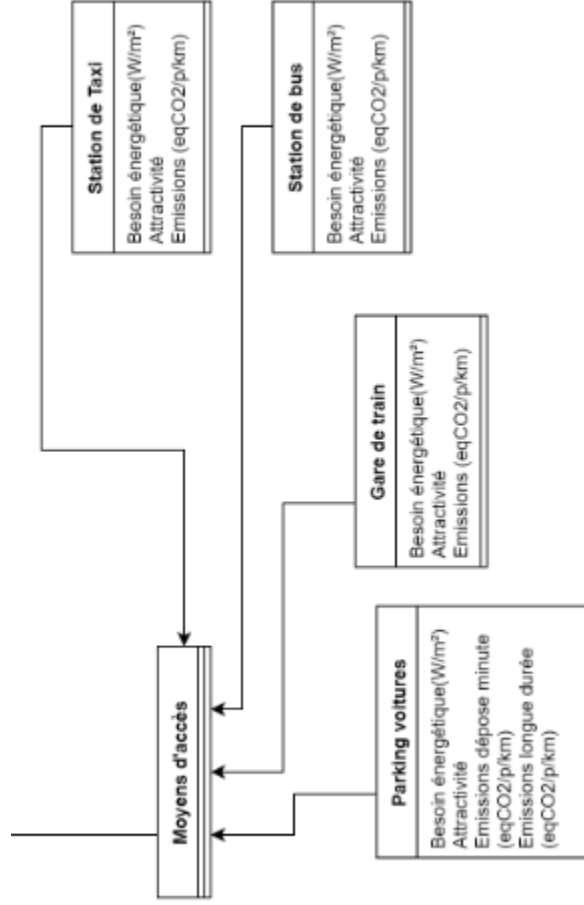


Figure 18 : Première approche d'une modélisation des moyens d'accès.

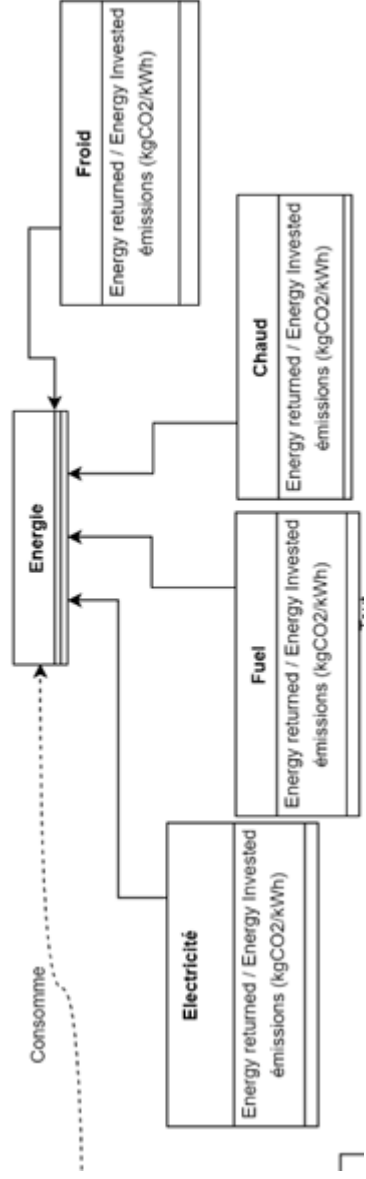


Figure 19: Première approche d'une modélisation des centrales de production.

Are Electricity and Hydrogen the solutions to reduce CO₂ emissions?

Patrícia Oliveira Palmelão

Pilar Tagliero

Thomas Planès

Valérie Budinger

January 28th, 2021

Forum 3AF : To Reinvent Air Transport



Agenda

1. Motivation
 2. Today's Air Travel: two case studies
 - a. Europe: Porto-Barcelona
 - b. Argentina: Córdoba-Tucumán
 3. Reinvent Air Travel
 - a. Electric vs Conventional Aircraft
 - b. CO2 emissions of an A320 modified to use hydrogen
 4. Conclusions
-

1. Motivation

Is it possible to reduce the CO₂ emissions caused by the aviation industry without compromising on other aspects? (travel time, comfort, logistics...)

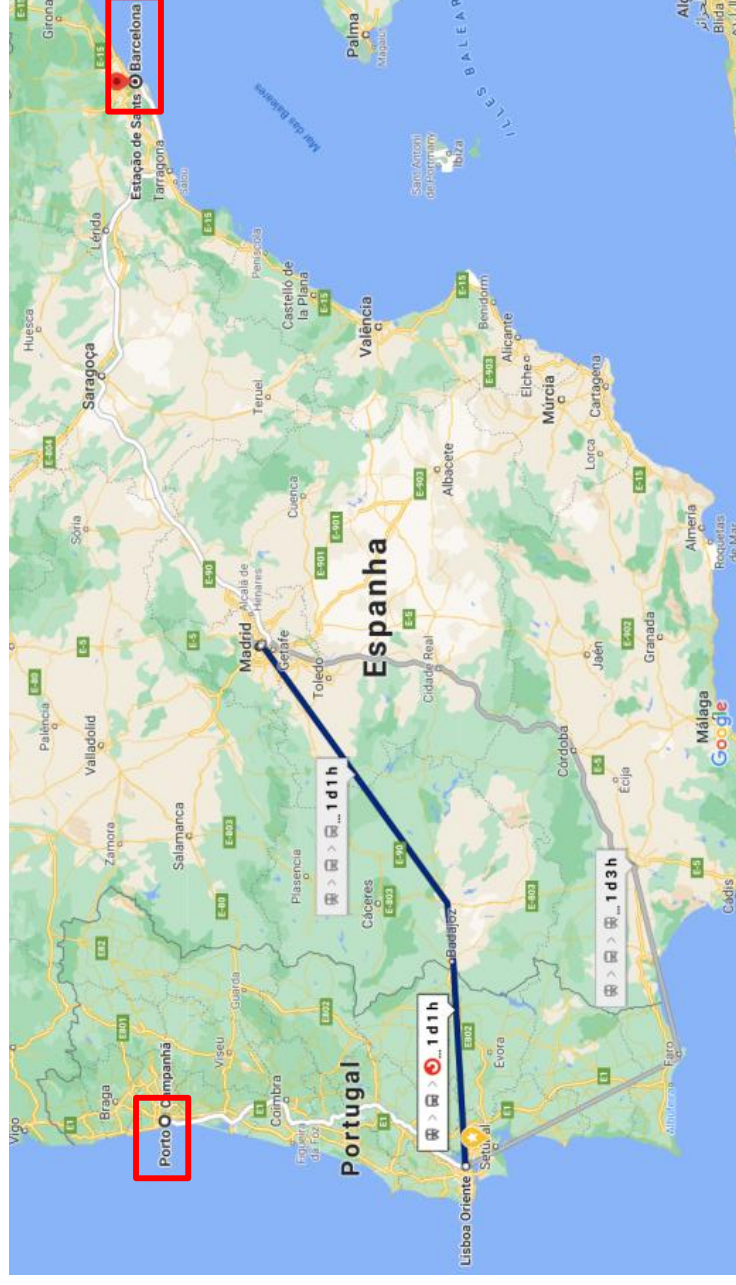
What are the possible alternatives?

2. Today's Air Travel: two case studies

- To analyse the emissions caused by different means of transportation in different situations, two particular cases were studied:
 - Porto - Barcelona (Portugal + Spain)
 - Córdoba - Tucumán (Argentina)
- Main characteristic:
 - Cities with no direct connections by train

Case Study: Porto - Barcelona

- Travel options available:



Source: Google Maps

Air travel

Direct flight

900 km

1h45

Bus + train

Porto – Lisbon
– Madrid -
Barcelona

1607 km

13h

Car

Electric/
Conventional

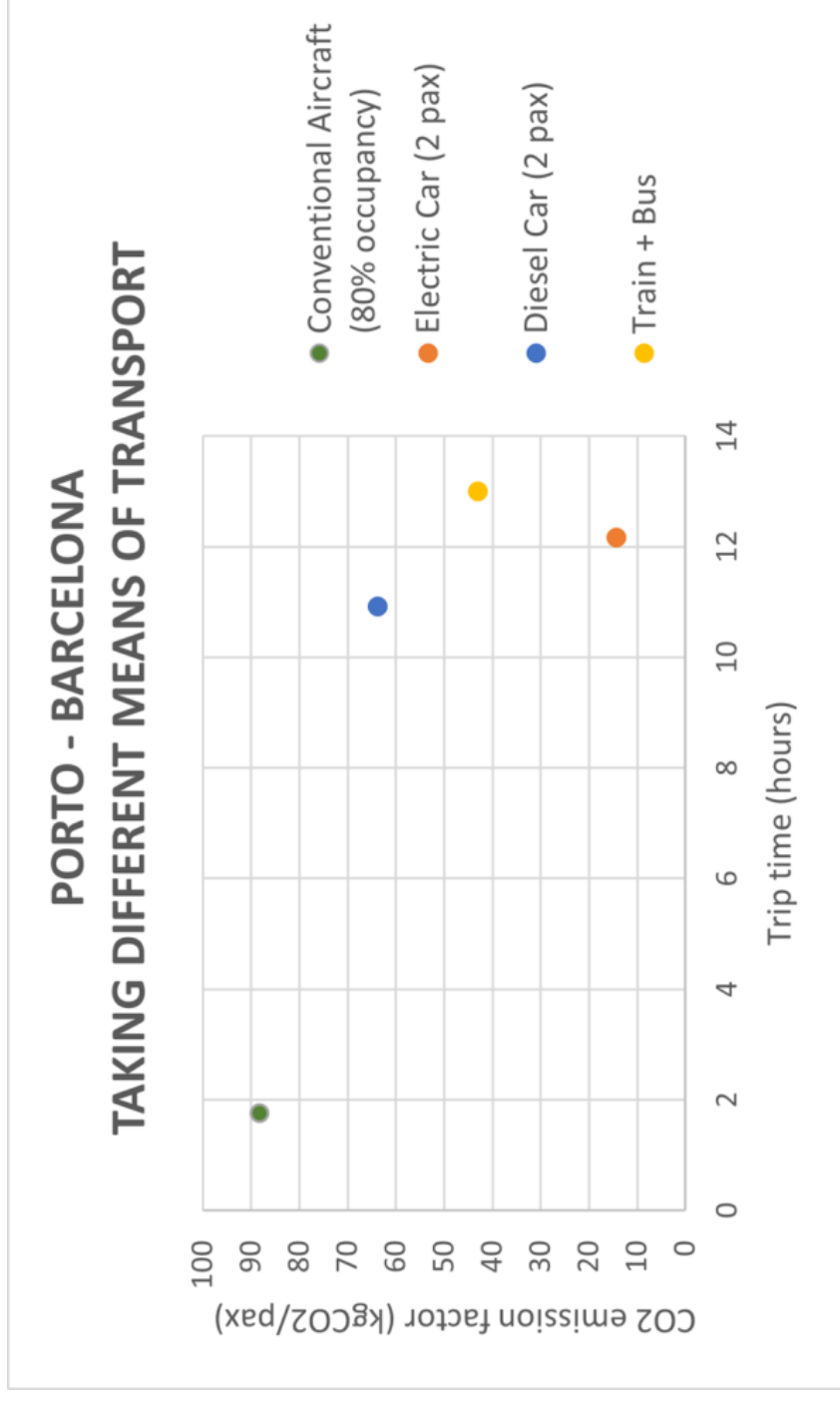
1127 km

12h10/10h55

Case Study: Porto - Barcelona

- Transports chosen:
 - Conventional aircraft ATR 72-600 (load factor: 80% max capacity)
 - Car Volkswagen Golf using diesel (occupancy rate: 2 pax)
 - Electric car Tesla Model 3 (occupancy rate: 2 pax)
 - Public transportation available (train + bus)
- In all cases, only direct emissions are considered

Case Study: Porto - Barcelona



Shortest time: Conventional aircraft

88,2 kgCO2/pax

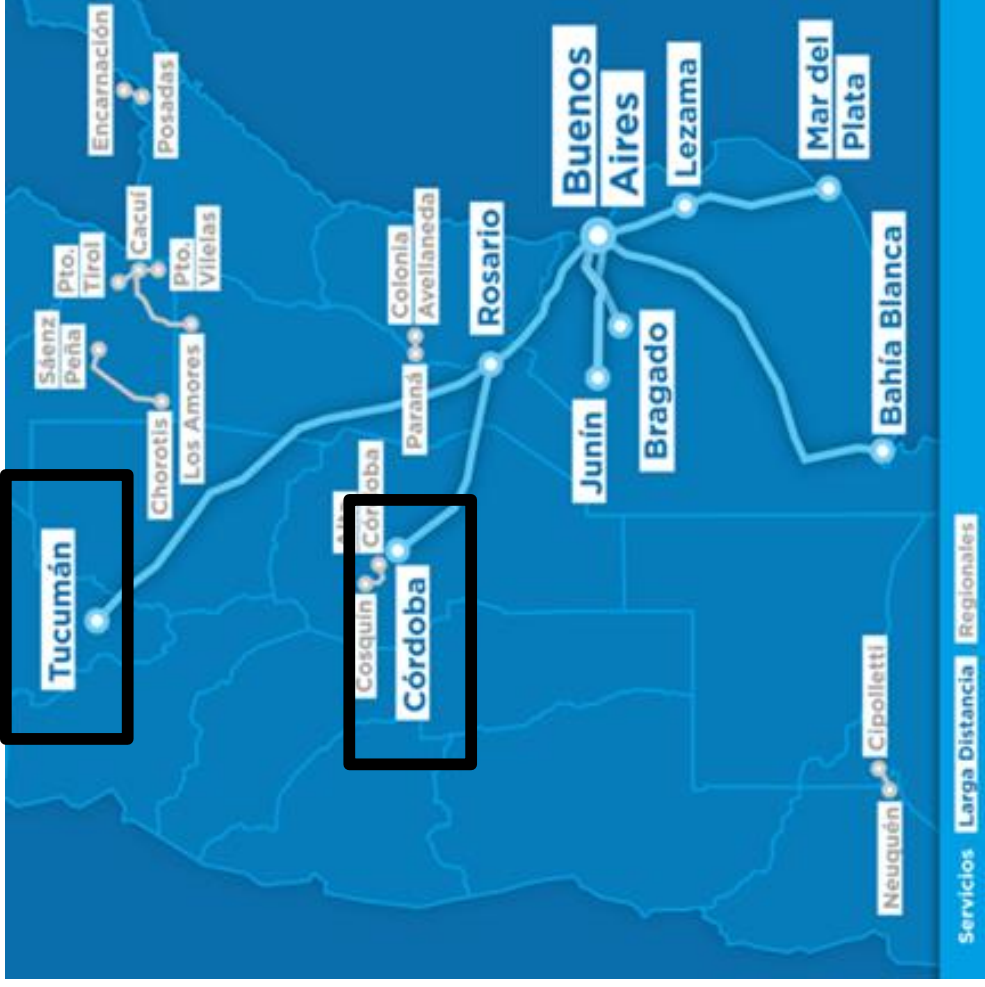
1h45

Lowest emissions: Electric car

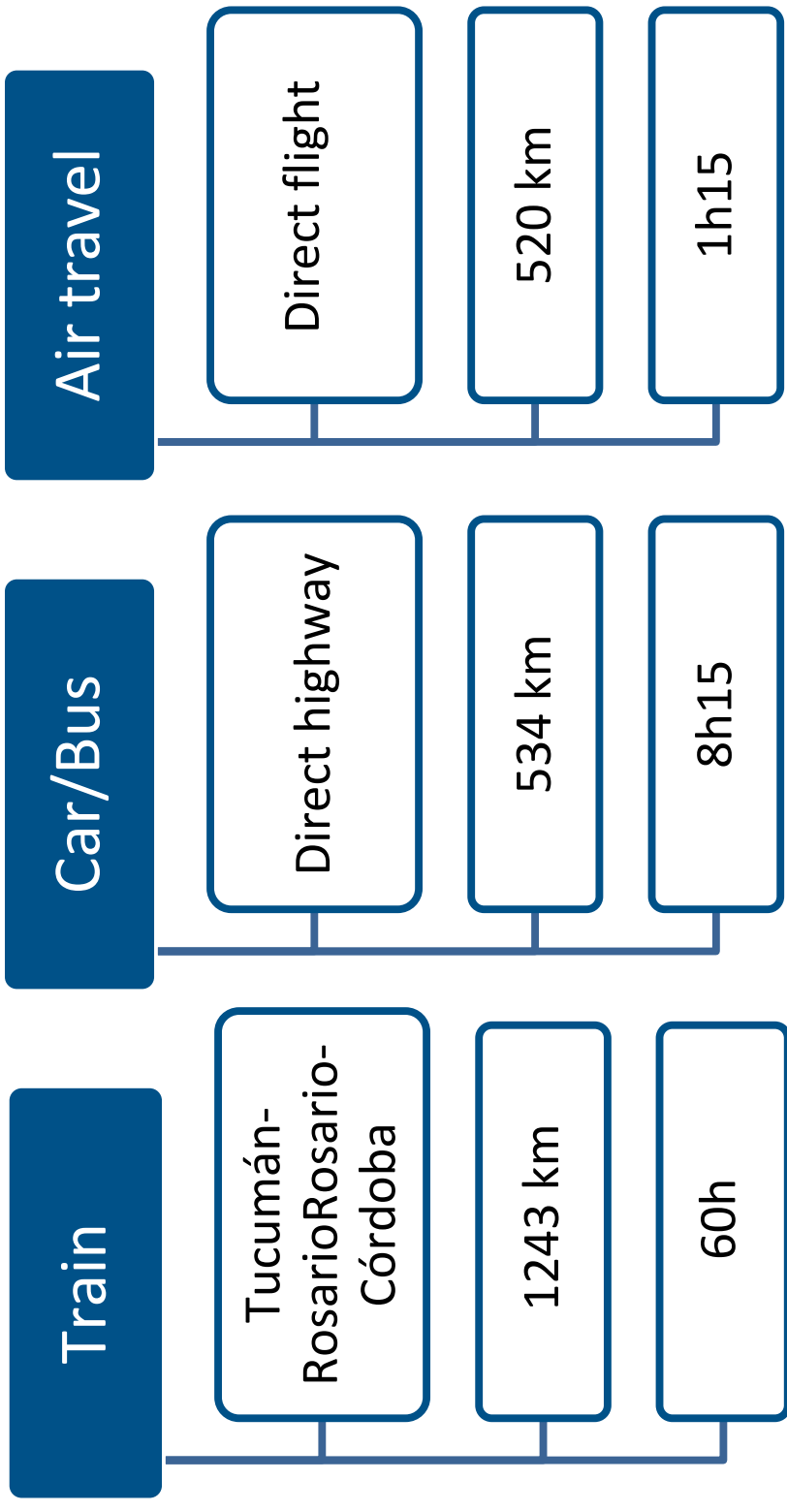
14,2 kgCO2/pax

12h10

Case Study: Córdoba - Tucumán



- Travel options:

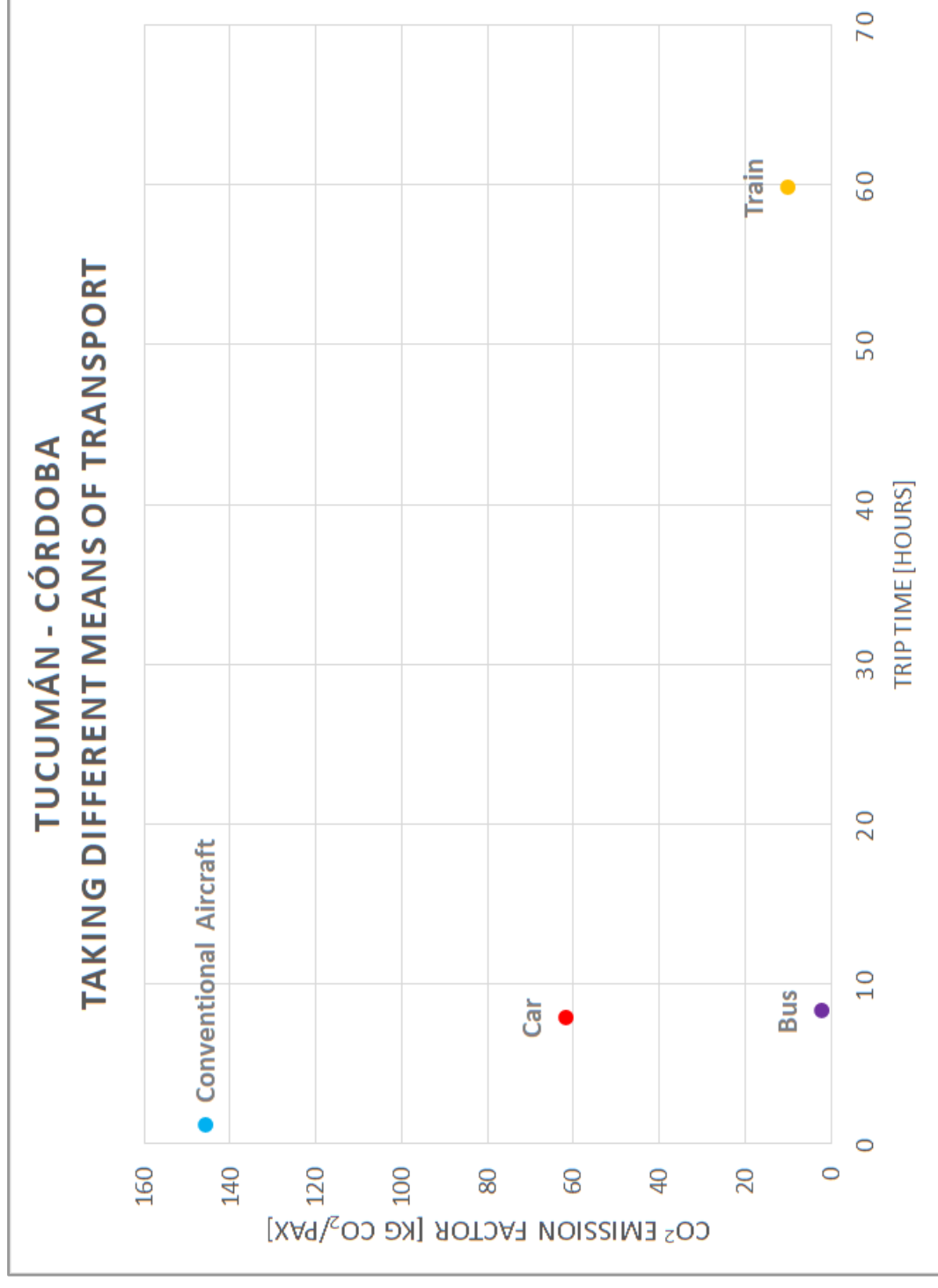


Source: Ministerio de Transporte, Argentina

Case Study: Córdoba - Tucumán

- Transports chosen:
 - Conventional aircraft Embraer RJ-190 (load factor: 83%)
 - Car Volkswagen Golf using gas (occupancy rate: 1.6)
 - Bus using diesel (35 pax per service)
 - Train diesel-electric (T-R: 422, R-C: 237 average pax/train)
- In all cases, only direct emissions are considered

Case Study: Córdoba - Tucumán



Shortest time: Conventional aircraft

145.9 kgCO₂/pax

1h15

Lowest emissions: Bus

2.37 kgCO₂/pax

8h15

3. Reinvent Air Travel

- Kerosene produces an unacceptable quantity of CO₂ emissions.
- Is there a better alternative to conventional aviation?
- Two innovative alternatives are proposed:
 - Electric aircraft
 - Aircraft using hydrogen propulsion

Electric vs. Conventional Aircraft

- The electric aircraft is a good solution to provide a fast travel time while having lower CO2 emissions than when using a conventional aircraft.

**Conventional Aircraft:
ATR 72-600**

Range: 758 NM

72 pax

Electric Aircraft: Alice

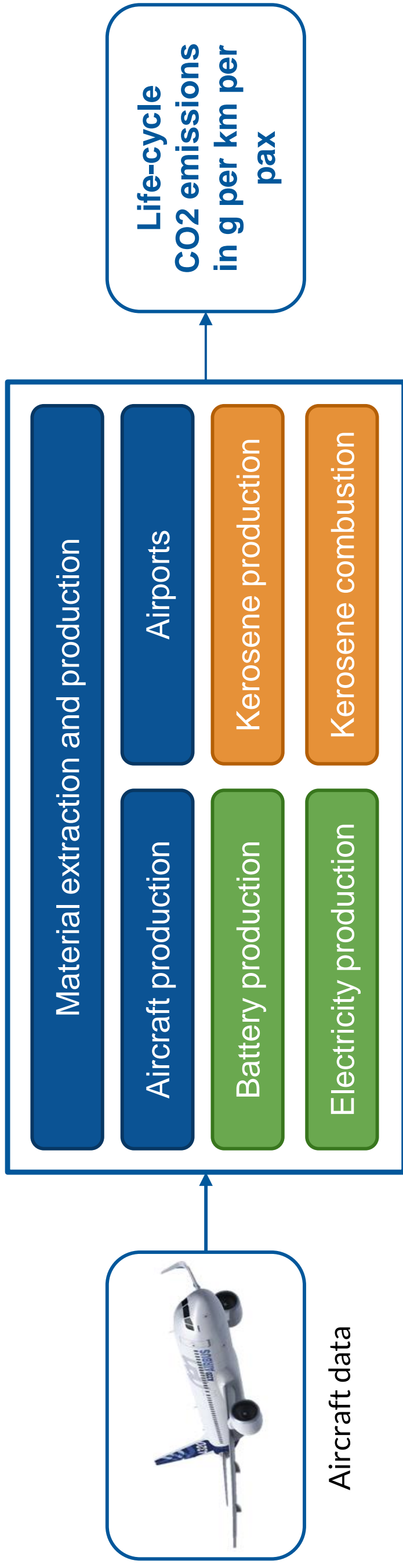
Range: 440 NM

9 pax + 2 crew



Alice aircraft by Eviation

Electric vs. Conventional Aircraft

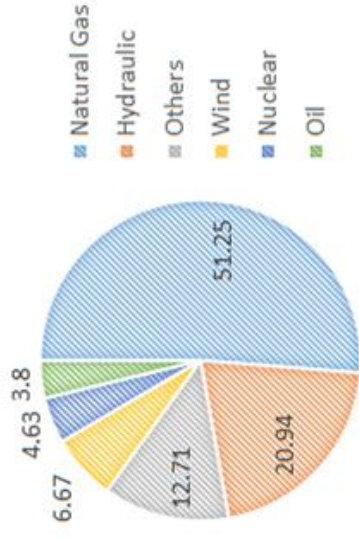


Tool composed of models that compute CO2 emissions associated to each phase

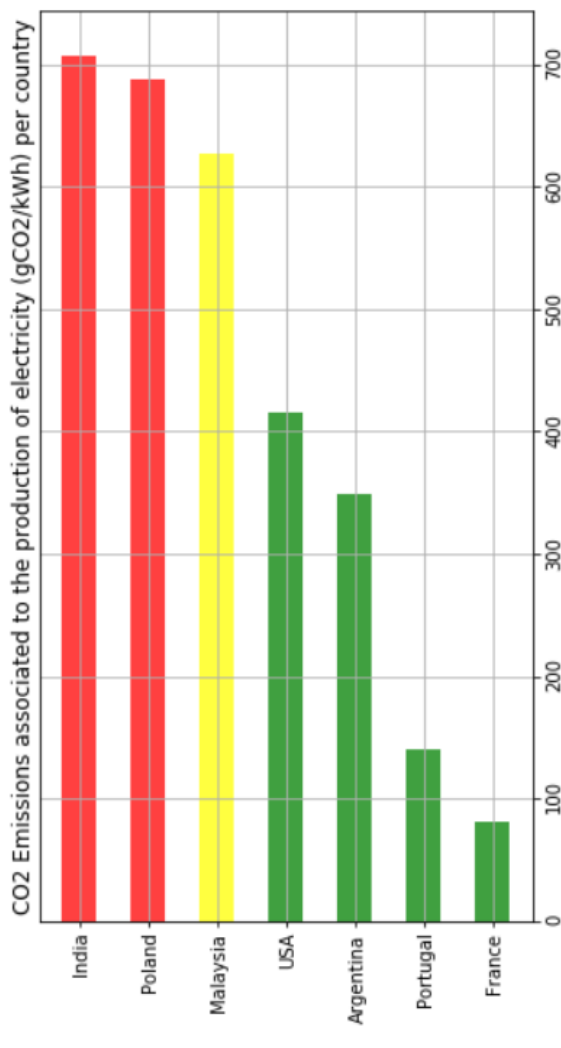
Electric vs. Conventional Aircraft

- CO2 emissions for the electric aircraft are highly dependant on the production of electricity.

ELECTRICITY MIX ARGENTINA

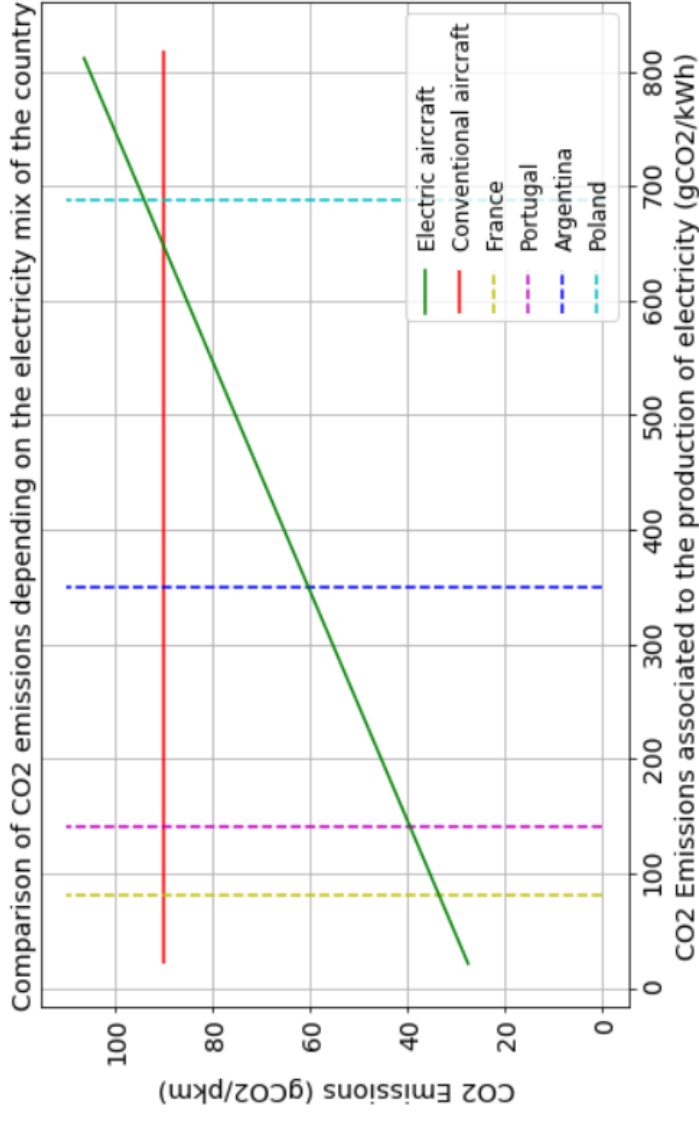


Source: Electricity Map



Sources: Electricity Map; World Bank

Electric vs. Conventional Aircraft



Electric aircraft is not useful when emissions for production of electricity
> 650 gCO2/kWh

Electric vs. Conventional Aircraft

- Results for the electric aircraft applied to the study cases:

900 km
142 gCO₂/kWh

35.5 kgCO₂/pax

ATR 72-600:
88.2 kgCO₂/pax

520 km
351 gCO₂/kWh

31.7 kgCO₂/pax

Embraer RJ-190:
145.9 kgCO₂/pax

Electric vs. Conventional Aircraft

- What percentage of the population can benefit of the advantages of an electric aircraft nowadays?

743 million hab

Europe

94%

6%

46%

4 663 million hab

Asia

13%

41%

46%

Benefit

Do not benefit

Not studied

Electric vs. Conventional Aircraft

Electric aircraft can greatly decrease CO2 emissions for air travel

But...

Emissions depend on countries manner of producing electricity

Solution is only feasible for short haul flights (technological limitations)

Aircrafts under development have a small number of seats

CO₂ emissions of an A320 modified to use hydrogen

Why hydrogen?

- Lack of direct carbon emissions
- Up to 80% less nitrogen emissions
- A kilogram of liquid hydrogen contains 2.8 more energy than a kilogram of kerosene $SFC_{LH} < SFC_K$
- Hydrogen is abundant on Earth (renewable, price)

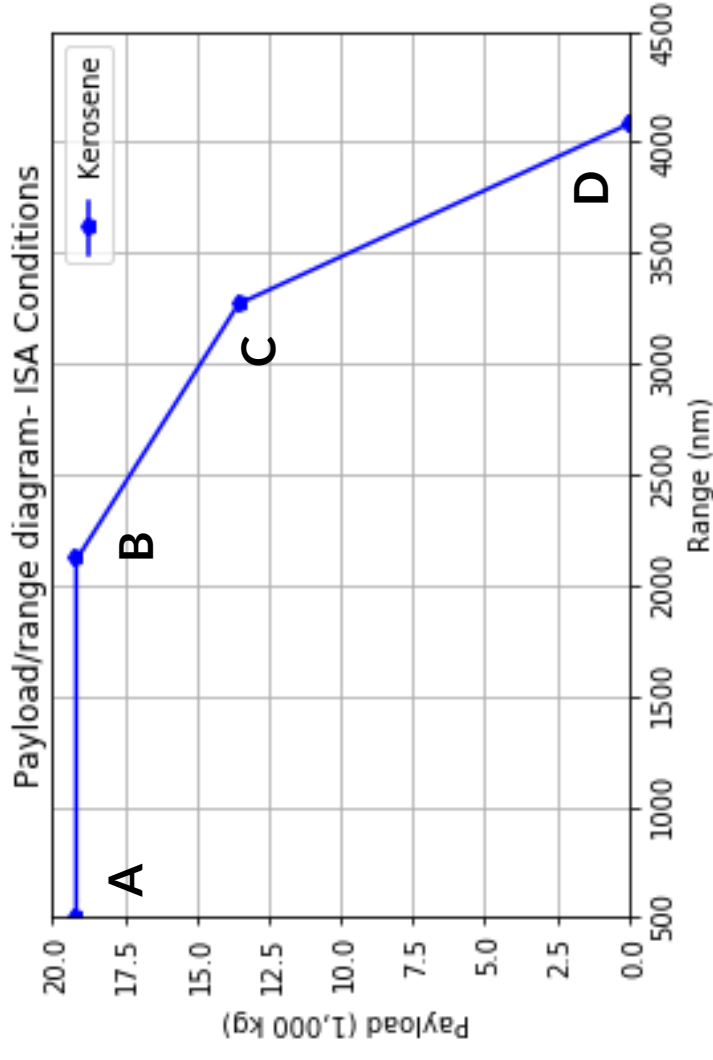
Main drawbacks

- Hydrogen production based in fossil fuel is not a sustainable solution
- High volumes are required: hydrogen density is 10 times lower than kerosene density
- Liquid hydrogen must be stored at very low temperatures, so tanks are very heavy

CO2 emissions of an A320 modified to use hydrogen

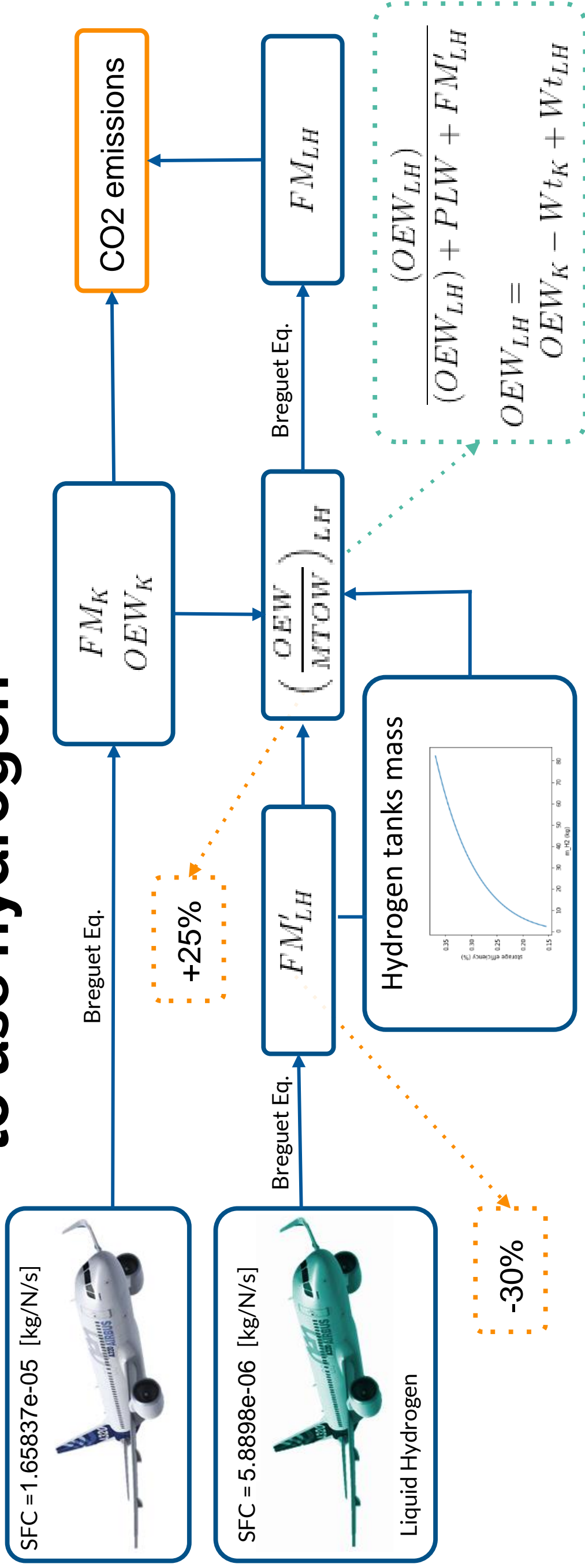


- Aircraft: A320-200 (without Sharklet)
- MTOW: 78 000 kg
- Engine: V2527A5
- Passenger Compartment Volume: 139 m³
- Passenger Capacity: 180
- Usable Fuel Capacity: 21 005 kg



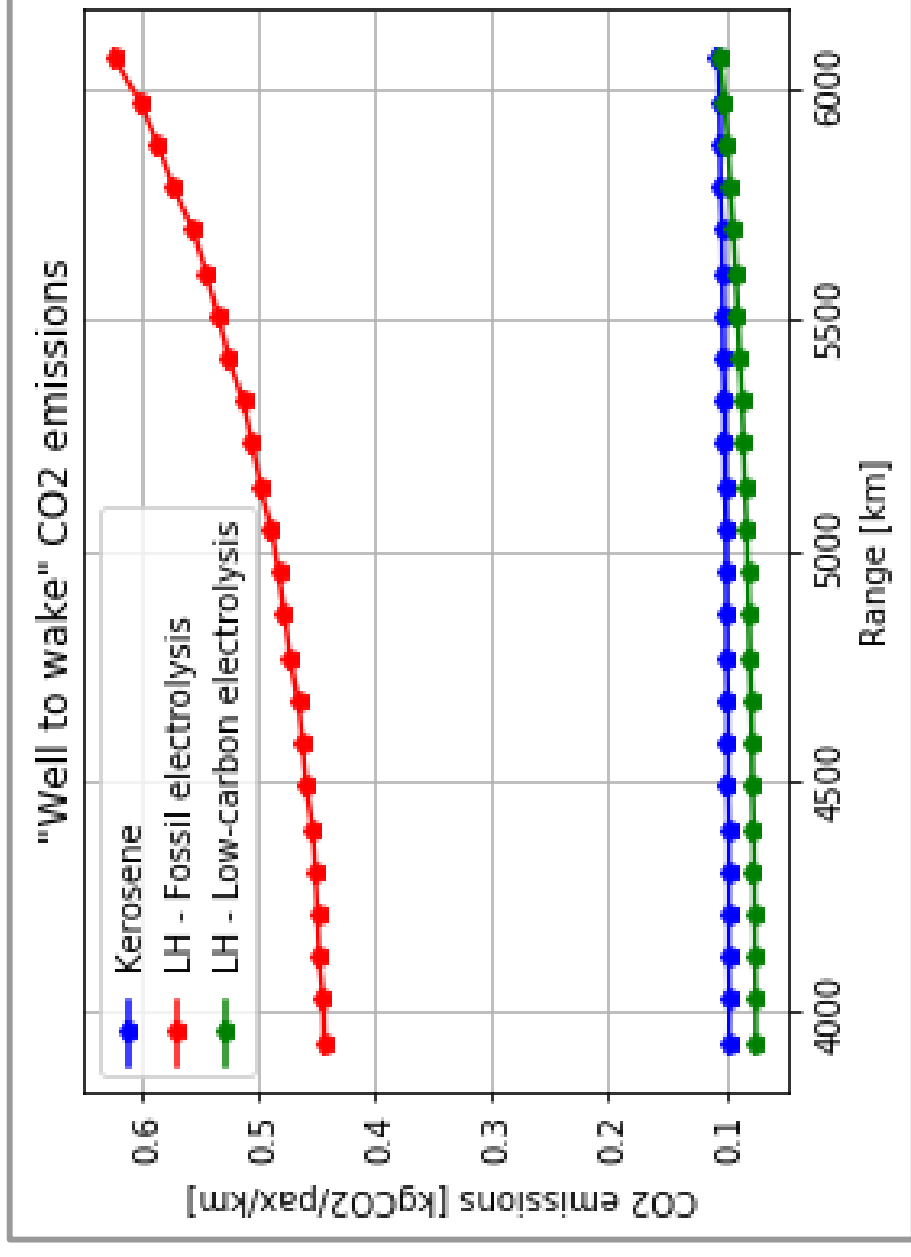
Source: A320 AIRCRAFT CHARACTERISTICS - AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING. AIRBUS S.A.S. Customer Services. Issue: Sep 30/85 - Rev: Dec 01/20

CO2 emissions of an A320 modified to use hydrogen



CO2 emissions of an A320 modified to use hydrogen

Hydrogen aircraft produce less CO2 emissions only if hydrogen production is low-carbon



Hydrogen vs. Conventional

- Results for the [hydrogen aircraft](#) (low-carbon hydrogen production) applied to the study cases (only fuel "well to wake" emissions are considered):

Porto-Barcelona:

67.4 kgCO₂/pax

ATR 72-600:
88.2 kgCO₂/pax

Tucumán-Córdoba:

111.5 kgCO₂/pax

Embraer RJ-190:
145.9 kgCO₂/pax

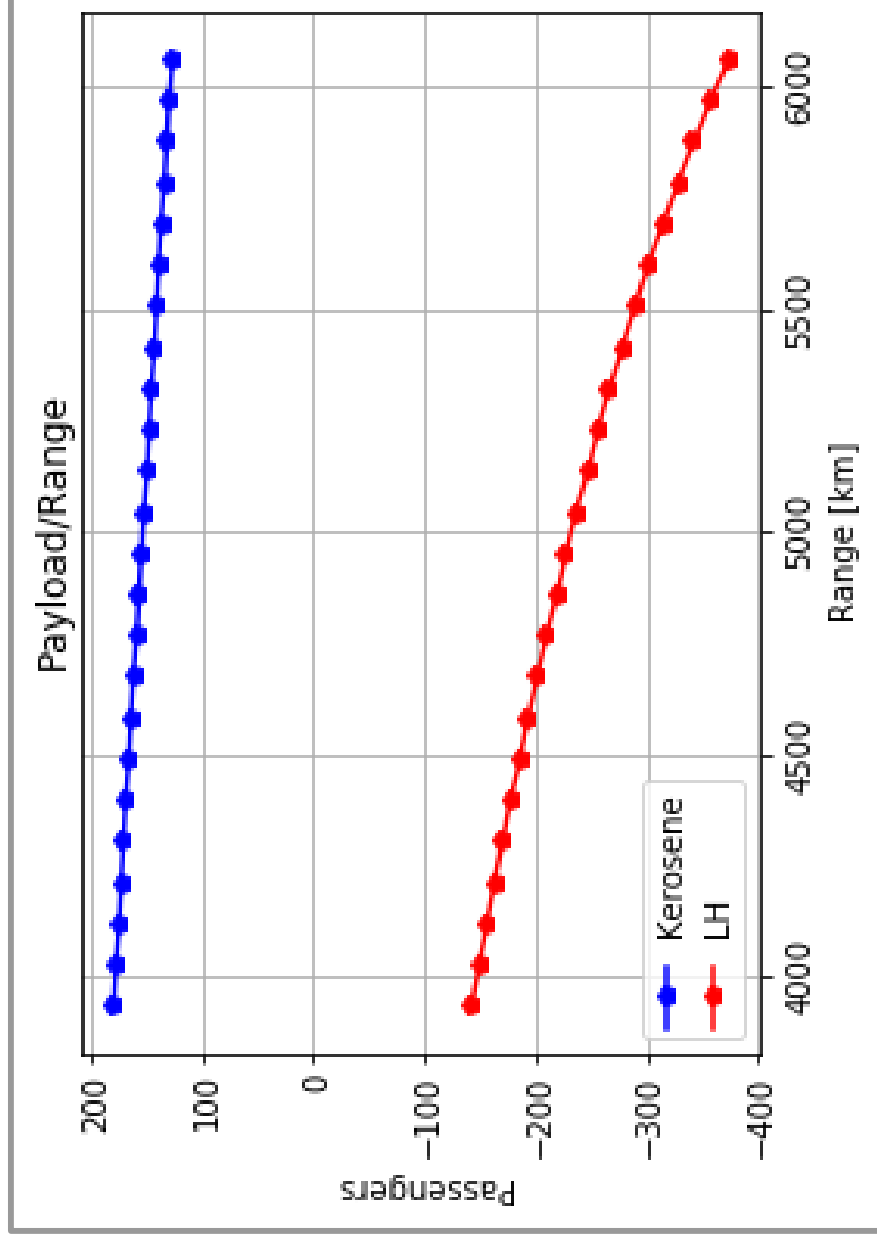
CO₂ emissions of an A320 modified to use hydrogen

Up to here, fuel was considered in terms of mass but:

$$\rho_{LH} \approx 10\% \rho_K$$

Hydrogen aircraft must be bigger to avoid high payload reduction

New designs are required to cope with bulky tanks



Conclusions

Are Electricity and Hydrogen the solutions to reduce CO₂ emissions?

Electric aircraft

Emissions depend on production of electricity

Non-homogeneous value of kgCO₂/pax/km

Technical limitations that lead to short range

Hydrogen aircraft

Emissions depend on production of hydrogen

Key development: lighter hydrogen tanks

New designs to store high volumes of fuel



Association Aéronautique
Astronautique de France

6, rue Galilée - Paris

Tél. : 01 56 64 12 30

Fax : 01 56 64 12 31

Email : gestionmembres@aaaf.asso.fr

www.3af.fr

