



Propose a specific and concrete project with an associated business case that you hope will disrupt the aerospace industry by 2040

USAIRE Student Awards

**Sous le patronage de Monsieur
Emmanuel CHIVA**
Délégué Général pour l'Armement (DGA)

19th edition
2024

Table des matières

Préface de Monsieur Emmanuel Chiva	4
Le mot du président d'USAIRE	6
Nos sponsors	7
Membres du Jury 2024	8
ORAJe	9
Les lauréats 2024	10
Les prix 2024	11
Le Paris Air Forum 2024	12
Les gagnants de l'édition 2024	14
Les deuxièmes lauréats	29
Les troisièmes lauréats	44
Les quatrièmes lauréats	63
Les cinquièmes lauréats	76
L'annonce du sujet 2025	88



Préface de Monsieur Emmanuel Chiva

Chers lauréats,

Cette année encore, je suis très heureux de vous accompagner en tant que parrain des USAIRE Student Awards. Je salue votre engagement en faveur de l'adaptation de notre pays aux grands défis qu'il rencontre, y compris au niveau industriel.

Depuis quelques années, le secteur aéronautique connaît des transformations profondes. La compétitivité internationale, l'innovation technologique ou encore la prise en compte des considérations environnementales, sont autant de défis à relever. Les entreprises aéronautiques, civiles et militaires, cherchent donc à se réinventer pour s'adapter à ces nouvelles exigences.

Dans ce domaine comme dans les autres, la DGA est l'autorité stratégique, en charge de préparer notre industrie aux défis à venir. Afin de répondre à cet enjeu stratégique, la DGA affirme ses ambitions : stimuler la recherche, renforcer la compétitivité des entreprises mais aussi générer des synergies avec le domaine civil. Ensemble, nous devons renforcer le tissu industriel aéronautique et spatial pour préserver et développer le savoir-faire français et le transmettre aux générations futures.

Notre écosystème industriel a toujours su se transformer au gré des évolutions de l'aviation. Cette adaptation lui a permis de se structurer et de faire preuve de résilience face à la concurrence internationale. Il s'agit d'un atout majeur qui doit continuer de faire la force de notre modèle aéronautique. Nous avons les capacités de nous distinguer dans ce domaine, en exploitant le haut potentiel des acteurs français et européens. Nous devons développer de nouveaux succès portés par des entreprises innovantes, y compris des start-ups et des PME.

Les défis sont à la hauteur de nos ambitions. Chacun peut participer à renforcer la place de la France comme une nation incontournable de l'aéronautique, que les finalités soient civiles ou militaires. Pour y parvenir, mobiliser la jeunesse, son dynamisme et sa force de proposition est indispensable. Les compétences développées par notre jeunesse seront des atouts majeurs, particulièrement dans ce secteur extrêmement concurrentiel.

C'est bien l'empreinte des USAIRE Student Awards, de capitaliser sur la curiosité et l'esprit innovant de la jeunesse pour relever ces challenges. L'anticipation de l'avenir et la préparation de la défense de demain passent par vous. Je félicite tous les participants et tous les lauréats pour leur mérite et leur engagement.

Bravo à vous tous !

Emmanuel Chiva,
Délégué Général pour l'Armement (DGA)





Le mot de notre Président, Carl Chevillon

Chères lectrices, Chers lecteurs,

Sous le patronage de Monsieur Emmanuel Chiva, Délégué Général à l'Armement, le sujet du Student Awards 2024 a encouragé la jeunesse à définir une *business case* qui leur permettrait de révolutionner l'industrie aéronautique à horizon 2040. Ce sujet a notamment été l'opportunité pour les candidats d'allier créativité, connaissances techniques et sens *business*.

Créés il y a 19 ans, les Student Awards visent à dynamiser les relations entre les grands acteurs du secteur, leaders d'aujourd'hui, avec les jeunes talents aéronautiques, leaders de demain. Ce lien entre la jeunesse et les industriels est fondamental pour la pérennité de notre industrie. Des travaux ont été reçus de la part de 120 étudiants de 31 nationalités différentes. Les étudiantes représentent cette année un quart des participants et 27% des finalistes. Les équipes sélectionnées ont pu assister au Paris Air Forum 2024 au cours duquel elles ont pu assister à des conférences animées par les leaders de l'industrie aéronautique.

Un jury de professionnels issus d'AAR, Airbus, Air France-KLM, l'AIT, Ascendance, Boeing, la DGAC, Embraer, la DGA, le GIFAS, ORAJe, Safran et, Raytheon, a sélectionné les lauréats et les prix ont été remis durant la cérémonie USAIRE des Student Awards qui s'est tenue à l'occasion du dîner de Thanksgiving 2024 de l'USAIRE.

Je tiens également à remercier les nombreuses sociétés et organisations partenaires qui, en apportant leur soutien avec la remise de nombreux lots prestigieux, témoignent de l'essor et de la notoriété de ce concours à travers ces presque deux décennies d'existence.

Enfin, l'organisation du concours, ainsi que l'édition de ce livret, doit beaucoup à l'association ORAJe, regroupant les alumni finalistes des éditions du concours depuis sa création.

Je vous souhaite donc une très bonne lecture de ces travaux.

Carl Chevillon, Président d'USAIRE

Avec le généreux soutien de nos sponsors

Sponsors du gala



Sponsors des USAIRE Student Awards



Sponsors de la tombola



Brochure imprimée avec le généreux soutien de



Membres du jury

William AST

Embraer

*

Carl CHEVILLON

Raytheon

*

Gervais GAUDIERE

AIT - DGAC

*

Philippe KOFFI

DGA

*

Jean-Christophe LAMBERT

Ascendance Flight Technologies

*

Quitterie MAGNIN

ORAJe

Arnaud MARFURT

Airbus

*

Arthur NICHANIAN

ORAJe

*

Johann PANIER

Air France-KLM

*

Pascal PARANT

Then AAR Corp, now Vallair

*

GCA (2S) Frédéric PARISOT

GIFAS

*

Hadrien RHONAT

Safran

*Organisé avec le concours de Vincent MÉRIAUX (Airbus),
de Thibaud FIGUEROA (DGAC), et d'ORAJe.*

ORAJe

Organisation des Rencontres Aéronautiques de la Jeunesse

Soutenir et intensifier les relations entre nos industries et la jeunesse

ORAJe rassemble l'ensemble des finalistes du concours USAIRE. Après 10 années, cette communauté rassemble près de 300 membres aux profils variés, allant de l'étudiant au dirigeant, de l'ingénieur à l'officier, tous réunis autour d'une passion commune et d'une volonté simple : apprendre, partager, et transmettre notre passion pour l'aéronautique.

C'est dans cet objectif qu'ORAJe organise de nombreux événements : des visites d'entreprises, des conférences, et des dîners rassemblant les ORAJés autour de personnalités d'exception. ORAJe, c'est aussi une communauté animée par l'engagement associatif et le partage de connaissances. En témoigne les nombreux ORAJés enseignant bénévolement le BIA dans des collèges et lycées, mais aussi notre projet de mentorat Un Jeune Une Solution soutenu par Airbus.

En 2024 ORAJe, a organisé un grand nombre d'évènements en présence d'invités prestigieux tels que le Général Mille (CEMAAE), Stéphane Cueille (Safran), ou encore Nicolas Chrétien (Airbus). ORAJe a également été présent lors du Paris Air Forum sur la scène principale, ainsi qu'au Forum by Aerospace Valley et au Sommet Aéronautique de Bordeaux. Enfin, l'association a également organisé des visites exclusives de l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle, ou encore du site d'ArianeGroup à Vernon.



Les membres ORAJe lors de la visite de l'aéroport CDG

Sponsors d'ORAJe



NYCO

Premier Prix

Victor **POUILLE** & Valentin **PRUVOST**
Toulouse Business School & ISAE-Supaéro

*

Deuxième Prix

Erik **STYLIANIDIS** & Hector **VESPROUMIS**
Sciences Po - ISAE-Supaéro

*

Troisième Prix

Aliénor **ROYER** & Domitille **MALLET**
UTC Compiègne

*

Quatrième Prix

Yi **LI** & Akinori **FURUKAWA**
Purdue University & Institute of Science Tokyo

*

Cinquième Prix

Adrien **PICOUET POMBO** & Maxence **CARDONA**
ENAC

Lauréats 2024

Prix USAIRE Student Awards 2024

Pour tous les lauréats, en plus des prix ci-dessous :

Un abonnement numérique à **Air & Cosmos** d'un an. Des goodies et maquettes offertes par **Airbus** et **Embraer**. Des goodies offerts par l'**AIT**.

1er prix

Une visite des essais en vol de la **DGA**.
Une visite de l'unité de fabrication et du centre d'excellence d'**Embraer** à São José dos Campos au Brésil (vols A/R inclus).
Deux chèques de 700 euros offerts par **USAIRE**.

2ème prix

Deux billets A/R pour New York offerts par **Air France**.
Un vol en Fouga offert par **SEM Aérospatiale**.
Deux modèles haut de gamme E195-E2 offerts par **Embraer**.
Deux chèques de 500 euros offerts par **USAIRE**.

3ème prix

Deux billets A/R offerts par **Transavia**.
Une visite du site TLSE offerte par **Safran**.
Deux chèques de 400 euros offerts par **USAIRE**.

4ème prix

Une visite exclusive d'un site aéroportuaire par l'**AIT**.
Deux chèques de 350 euros offerts par **USAIRE**.

5ème prix

Une visite exclusive d'un site aéroportuaire par l'**AIT**.
Deux chèques de 200 euros offerts par **USAIRE**.

Le 13 juin dernier, USAIRE et ORAJe se sont associés au Paris Air Forum 2024 afin d'accueillir les finalistes des USAIRE Student Awards 2024.



Le Paris Air Forum fut l'occasion de présenter les attendus des Student Awards plus en détail aux finalistes, ainsi que de les inviter à découvrir, ce qu'est un événement aéronautique majeur comme le Paris Air Forum. USAIRE a alors réitéré son soutien aux jeunes talents de l'industrie aéronautique et de défense, tant par ses précieux conseils aux finalistes que par l'opportunité d'assister aux conférences passionnantes du Paris Air Forum 2024.



Présentation par USAIRE et ORAJe aux finalistes des Student Awards 2024 lors du Paris Air Forum 2024.



Power to Protect and Connect

Our world-class technologies deliver clean, safe and competitive solutions to meet our customer's vital power and propulsion needs. As next generation thinkers, we are committed to tackling the challenges of the future for customers worldwide.



Victor POUILLE

Toulouse Business School



Valentin PRUVOST

ISAE-Supaéro

Victor Pouille and Valentin Pruvost are both from Dunkirk, pilots since they were 16 and have always been absolutely passionate about aeronautics and space. Guided by their instinct, it was in Toulouse that they studied business at TBS (Toulouse Business School), for one, and engineering, for the other, at ISAE-SUPAERO. After taking their first steps in the Toulouse industrial ecosystem, as vice-presidents of their respective Junior-Enterprises, Victor and Valentin launched TYLER to support students in their areas of passion. Today, while Valentin is completing his study cycle at HEC Paris and Victor is working at the direction of industrial affairs department at Airbus, the two Northerners carry and defend a disruptive vision for the aviation of tomorrow.

Here is their work about regional aviation :



FLASHEZ CE QR CODE POUR CONTINUER

AUTEURS :
VICTOR FOUILLE & VALENTIN PRUVOST

*Copyright. Tous droits réservés. Ce document est soumis à une licence Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans l'autorisation préalable de l'auteur est interdite. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans l'autorisation préalable de l'auteur est interdite.

VICTOR POUILLE & VALENTIN PRUVOST

« Propose a specific and concrete project with an associated business case that you hope will disrupt the aerospace industry by 2040 »

INTRODUCTION

Il y a moins d'un an, la France adoptait la « loi climat » [1] bannissant les vols intérieurs courts pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, nous affirmons que d'ici à 2040, l'aéronautique relèvera le défi de la **décarbonation** en misant d'abord sur le **transport régional** et ses **nouveaux usages**. Pour décarboner le secteur, quatre axes sont habituellement identifiés [2] : développement de nouvelles technologies, amélioration de l'efficacité des opérations et infrastructures, déploiement de carburants durables (SAF), et mesures basées sur le marché. Les nouvelles technologies décarbonées, notamment les systèmes de propulsion innovants, présentent cependant d'importantes limitations en autonomie et capacité. Les avions électriques, bien qu'éliminant les émissions de CO₂, nécessitent des batteries avec une densité d'énergie sept fois supérieure pour être viables. Les avions hybrides-électriques, combinant moteurs à combustion et batteries, s'imposent comme le **premier pas** vers une propulsion 100% électrique. L'hydrogène, quant à lui, offre une autre option pour produire de l'électricité, mais son volume, même sous forme liquide, nécessite des réservoirs plus grands et des modifications structurelles majeures des appareils. Ainsi, la décarbonation commencera résolument par **l'aviation légère**, qui, grâce à des processus de **certification** simplifiés et un accès facilité aux petites infrastructures, permet de réduire significativement les coûts de **développement**. Cette aviation régionale décarbonée offre également l'opportunité de **désenclaver** et **dynamiser** les territoires. Si cette perspective se concrétise en une demande de ces territoires, une partie importante du secteur aéronautique pourra alors se réorganiser et accélérer sa décarbonation en **mettant à l'échelle** ce premier cas d'usage.

Avec ce dossier, notre ambition est de démontrer la viabilité du business case de l'exploitation d'avions décarbonés dans un cadre régional, et de montrer comment la duplication de ce modèle peut conduire à une disruption globale du secteur d'ici 2040.

La décarbonation du secteur aérien étant un problème **systémique**, il convient d'y apporter une réponse **pluridisciplinaire**. Cependant, par soucis de réalisme, dans les contraintes de temps de l'exercice, nous nous mettrons ici dans la peau d'une compagnie aérienne commerciale régionale souhaitant exploiter des avions décarbonés d'ici 2040. Cette focale, nous permettra – tout au long du dossier – d'impliquer toutes les **parties prenantes** de la décarbonation du secteur aérien. Nous prendrons le parti que cette compagnie aérienne opérera des avions hybrides-électriques du secteur régional, avec une autonomie inférieure à 1h30. En effet, le rapport technique Waypoint 2050 [3] prévoit qu'en 2040, les petits avions short range adopteront une propulsion hybride-électrique (batteries ou piles à combustible) déployable plus rapidement, tandis que l'hydrogène sera utilisé en complément du SAF pour les avions de plus de 100 places. Aussi, nous ferons le choix de mener cette étude en **France métropolitaine**, territoire affranchi de contraintes topologiques. Contraintes qui impliquent généralement, de fait, un usage de **business case** affranchi de toutes les contraintes nouvelles est également possible. C'est la condition de création d'un marché **réplicable** et **exportable**: deux aspects nécessaires à une transition générale – nous verrons comment – du secteur aéronautique. Enfin, dans la suite du dossier le terme "régional" qualifiera une compagnie entrant dans ce périmètre : un avion de **19 places à courte portée** (250NM max), opérant sur route continentale.

NOTRE MÉTHODE

Pour ancrer notre étude dans le réel et **plonger nos lecteurs** au cœur des enjeux de l'aviation régionale décarbonée, nous avons décidé de baser notre méthodologie sur trois piliers. Dans un premier temps, nous avons mené un travail de recherche littéraire afin de **comprendre en profondeur** le monde singulier de l'aérien régional. Dans un second temps, nous avons décidé de nous immerger totalement dans ce secteur et d'aller à la rencontre de **celles et ceux** qui font l'aviation régionale d'aujourd'hui et qui pensent celle de demain. Sur les 3 derniers mois, nous avons pu présenter notre projet à **31 experts** issus d'une multitude de disciplines : aviateurs, investisseurs, collectivités, régions, organismes de certification et de régulation, directeurs d'aéroports, chercheurs, ingénieurs, leasers, ingénieurs, passagers, pétroliers, sénateurs, compagnies aériennes, pilotes ou encore ambassadeurs. Ces collaborations nous ont permis de cerner les **besoins** et les conditions nécessaires à la genèse d'une **demande**, en plus de nous aider à penser de nouveaux mécanismes de **rentabilité** pour notre **business case**. Puis, pour pousser plus loin ce travail de terrain, nous avons décidé de faire se rencontrer ces acteurs et de provoquer le débat sur l'avenir de l'aviation régionale décarbonée. C'est ainsi que nous avons décidé d'organiser un **événement** (cf page 6) ayant réuni **19 professionnels**, événement qui allait devenir la clé de voûte de notre méthodologie. En effet, ce travail d'**intelligence collective** nous a permis d'identifier avec précision les paramètres influant sur la rentabilité d'un usage régional de l'avion. De là nous avons, dans un troisième et dernier temps, pu produire nos propres **scénarios** (reposant sur nos propres programmes et outils), nous ayant permis d'identifier les **facteurs clés** de succès relatifs à notre projet. Ce triple travail, rend alors possible la formulation d'un **business case** et d'un **plan d'action** visant à **disrupter**, par le régional, l'ensemble du secteur aéronautique.

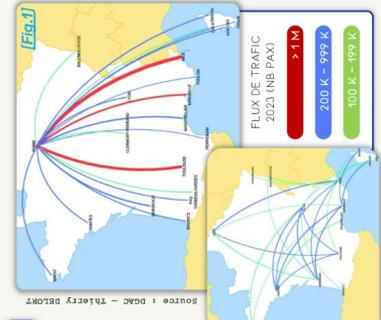
SOMMAIRE

- 02 Étude du **besoin** de transport régional en France Métropolitaine
- 04 Étude des conditions nécessaires à l'émergence d'une **demande**
- 05 Réimaginer le **parcours utilisateur** de 2040
- 06 Exploration des **modèles de rentabilité** envisageables d'ici 2040
- 09 Présentation de notre **Business Case** concret
- 10 Présentation du plan de **mise à l'échelle** et **conclusion**

Pour cerner les besoins de mobilité intérieure, nous analysons ici les flux de passagers aériens mais aussi ceux des usagers que l'avion n'a pas encore captés : les flux ferroviaires et routiers

LES FLUX AÉRIENS EN MÉTROPOLIE

D'abord, nous souhaitons définir les différentes routes aériennes intérieures, et analyser la croissance potentielle de leurs fréquentations. Nous nous sommes donc rendus le 9 juillet dernier à la DGAC. Selon leurs données, le trafic radial (liaison Paris - Régions) est resté stable entre 2000 et 2023 : entre 15 et 20 millions PAX. En 2023, il en concernait 12,25 millions. Le trafic transversal (liaison Régions - Régions), a quant à lui, doublé depuis l'année 2000, pour atteindre 8,98 millions en 2023. Nous constatons alors que les flux aériens transversaux s'intensifient, bien que dominés par le radial. Nous pouvons à ce stade conjecturer l'émergence - latente - d'un marché substantiel du transport aérien intérieur, voire même d'un marché du transport transversal, pour connecter les territoires entre eux et aux hubs internationaux. Confirmons cette hypothèse en s'intéressant maintenant aux usagers n'utilisant pas encore l'aérien pour leurs mobilités intérieures.

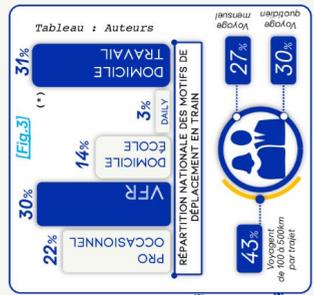


ZOOM : NOTRE INVESTIGATION SUR LE TRANSVERSAL

Pour s'ancrez dans la réalité, nous avons analysé 90 liaisons sur le site BlaBlaCar (6 entre 10 villes de « petite taille » (10K-100K hab.) entre elles (CAS2) et 10 villes de « taille moyenne » (100K-1M hab.) entre elles (CAS2). L'étude du CAS2 nous indique que, pour une liaison donnée, 3,75 trajets sont proposés en moyenne et qu'un trajet sur deux est complet. Ainsi, pour un trajet routier transversal entre petites villes, bien que la demande soit relativement faible, l'offre semble trop limitée pour y répondre. Dans le CAS2, pour des liaisons données, c'est 25-4 trajets qui sont proposés en moyenne et 15% des trajets sont complets. Ici, pour des trajets routiers transversaux inter-métropoles, la demande paraît élevée et bien satisfaite par l'offre. Cette étude de couverture révèle alors l'inhomogénéité du besoin de transport transversal et de l'offre associée. Dressons maintenant les profils types des usagers manifestant un besoin de mobilité régional.

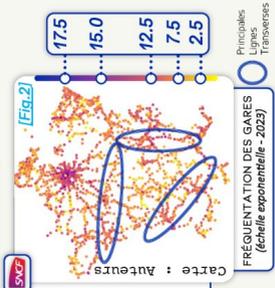
CARACTÉRISATION DE PERSONNE

Dans la littérature relative au transport aérien, la description des typologies d'usagers se concentre quasiment exclusivement sur les trajets métropole-international. Ainsi, nous avons entrepris de caractériser nous-mêmes les personnes pour les trajets intérieurs (transversaux et radiaux) en traitant les données existantes de la SNCF. Deux typologies majoritaires se distinguent : l'usager professionnel voyageant quotidiennement pour des trajets courts (moins de 25 km), et l'usager VFR, se déplaçant en train moins d'une fois par mois pour des trajets plus longs (plus de 100km). Notons qu'il serait imprudent de considérer qu'extrapoler cette analyse du voyageur SNCF suffirait à dessiner le persona général de l'usager en liaisons intérieures. Cependant, cette étude nous permet assurément d'avoir une première idée des usagers types à adresser pour notre business case.



LES FLUX FERROVIAIRES EN MÉTROPOLIE

Pour ce faire, nous avons traité les données publiques brutes SNCF. Le bilan est analogue au précédent : le flux radial domine et le transversal est en forte croissance. En effet, les liaisons radiales, représentées à 85% par les lignes à Grandes Vitesse, accueillent 122 millions d'usagers en 2023 : une augmentation de +4% par rapport à 2022. Le trafic transversal a connu lui aussi une croissance notable de +8% entre 2022 et 2023. D'ailleurs, certaines lignes transversales se distinguent par leur fréquentation comparable aux lignes radiales (cf. carte). Il s'agit maintenant d'étudier plus en détail ces flux transversaux.



11M Passagers Intéressés / an (2022-2023)

+5% (2022-2023)

40% Passagers TER (2020-2024)

NOTRE CONCLUSION SUR LE BESOIN PAX

Nous observons un besoin de mobilité régionale défini par une domination des routes radiales, et un marché du transversal émergent. Nous le verrons, l'aérien peut, sous certaines conditions, pénétrer ce marché radial et même lancer un nouveau marché du transport transversal de proximité.

Professeur Emmanuelle BALDWINIA - COFOUNDER

RÉACTION D'UN PROFESSIONNEL : BALDWINIA - COFOUNDER

«Les lignes de trains à Grande Vitesse ne desservent que 15% de liaisons non-radiales. Il y a une nécessité de développer des liaisons aériennes sur ces routes transversales.»

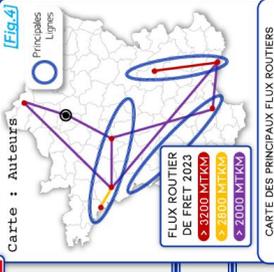
Ascendance

De la même manière, caractérisons le besoin de transport intérieur de fret et le besoin général de mobilité des territoires en France

LES FLUX ROUTIERS DE FRET EN MÉTROPOLIE

Pour **quantifier et caractériser** les flux intérieurs de fret dans lesquels l'avion pourrait s'insérer, nous pouvons commencer par nous concentrer sur le **transport routier de marchandises** (TRM). En effet, à lui seul, le transport routier pèse pour plus de 80% des flux intérieurs de fret. En 2022, il représentait 168 Mds de tonnes-km (TKM) sous pavillon français [8], contre seulement **0,04 Mds de tonnes-km pour l'aérien** l'année suivante [9]. Selon les données gouvernementales, le trafic routier a connu une croissance assez lente de 46% entre 2014 et 2022. Notons que ce sont les routes transversales qui sont les plus fréquentées, avec des liaisons marquées comme Lyon-Marseille (43200 MTKM) ou la connexion entre le Pays-de-la-Loire et la Bretagne (42800 MTKM) (cf. carte), [10].

Continuons l'étude en analysant avec quel **type de fret** l'avion peut concurrencer le transport intérieur de fret routier.



L'aviation, rapide et peu sensible aux contraintes topologiques s'avère compétitive pour le transport de certains types de fret. En témoigne l'entreprise MAERSK qui investit pour développer ses activités de transport de fret aérien pour effectuer des **livraisons urgentes**, notamment pour l'automobile [11]. L'aérien peut ainsi adresser, par exemple, cette **verticale 'produits industriels'** qui représente 9% du fret intérieur routier. [12]



L'AVIS DU PILOTE - S. BARBEY - COMMANDANT DE BORD ATR

«Pour l'avoir vécu pendant la COVID, l'avion était particulièrement utile pour le transport de produits très spécifiques à livrer rapidement entre les territoires.»

NOTRE ANALYSE DU BESOIN FRET

Les flux intérieurs de fret en France sont majoritairement **dominés par les routes transversales**. Sur ces trajets, l'avion se révèle particulièrement idoine pour le transport de marchandises à **haute valeur ajoutée** ayant une **faible élasticité-temps**. Pour exemple, en faisant l'hypothèse que l'aviation régionale soit privilégiée sur 1% des produits industriels aujourd'hui transportés; par routier, il s'agit d'un marché non négligeable de 158MTKM (A noter que l'aérien transporte à date 40MTKM à l'intérieur du territoire, tous types de fret confondus). Les **besoins de transport de PAX et de fret** sur les routes intérieures sont désormais caractérisés. Par ailleurs, les **collectivités locales** se trouvant au carrefour de ces flux, il convient maintenant d'examiner les besoins à l'échelle des territoires, où l'avion apparaît déjà comme une réponse à leurs **besoins de connectivité**.



L'OPINION D'UN SÉNATEUR - P. MEDEVIELLE - HAUTE-GARONNE

«Il existe sur l'hexagone une réelle volonté des territoires de se désenclaver et de se connecter entre eux. Bien que cela soulève des questions d'aménagement des territoires et d'acceptabilité sociale, l'aérien est un vecteur de développement certain pour nos régions.»

L'AVIATION POUR RÉDUIRE LES DISPARITÉS TERRITORIALES

Selon les chercheurs Mukkala & Tervo [13], dans les régions « centres », c'est principalement la croissance économique qui attire le transport aérien. La croissance du trafic y est majoritairement induite. En revanche, dans les régions périphériques, le **transport aérien stimule directement l'activité économique**. Le trafic n'y est pas induit, mais il est moteur et porteur d'**externalités positives pour l'économie locale**. Ainsi, le sens de causalité est lié à la typologie des régions concernées. C'est dans cette logique que la France assume sa vision pour le transport aérien : un **vecteur de connectivité** des territoires. En témoigne le financement, additionnel de 15 millions d'euros en autorisations d'engagement pour les lignes d'aménagement du territoire (LAT) [14] qui a été octroyé, tandis qu'une clarification des **responsabilités des collectivités** territoriales en matière de gestion des aérodrômes et d'organisation des services de transport aérien a été apportée [15]. Pour illustrer, prenons l'**exemple de l'Occitanie** qui a d'ores et déjà pris des mesures en ce sens.

ZOOM : CONNECTER SES TERRITOIRES PAR L'AÉRIEN EN OCCITANIE

Depuis 2018, l'Occitanie a mis en place une **stratégie pour le transport aérien**, après avoir évalué l'impact économique des investissements publics dans ce secteur. Il a été estimé qu'un euro investi génère quatre euros de PIB. La stratégie régionale vise trois objectifs : **l'aménagement du territoire, le développement économique, et l'ouverture internationale** de la région. Pour renforcer la **compétitivité des aéroports régionaux**, la région soutient les aéroports de Toulouse et Montpellier et envisage de créer une gouvernance intégrée pour les aéroports de Perpignan, Carcassonne, et Tarbes-Toulouse. De plus, la région prévoit d'**entrer au capital** de tous les aéroports régionaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE SUR L'ÉTUDE DU BESOIN

A ce stade, nous pouvons raisonnablement miser sur l'émergence d'un besoin de transport aériens de PAX sur les routes transversales et sur une croissance linéaire du besoin radial. Concernant le FRET, à l'exception de colis particulièrement adaptés au transport aérien, le besoin est aujourd'hui bien adressé par le camion, flexible et très probablement décarboné d'ici 2040 [16]. Dans la suite - sans négliger le FRET - nous supposons que c'est le **PAX** qui présente le **plus grand besoin de mobilité régionale** et la **plus belle opportunité de marché** pour opérer l'avion décarboné d'ici la 2040.

Décrivons maintenant les conditions nécessaires à la conversion de ce besoin PAX (et fret) en une réelle demande pour un transport aérien de proximité



Professionnel rencontré le 17-06-2024

LES MOTS D'UN PROFESSIONNEL : CAUSSADE - CEO

« Si les infrastructures sont adaptées et prêtes, alors la demande suivra naturellement. »



CONDITION 1 : AVOIR L'INFRASTRUCTURE DISPONIBLE

La présence d'infrastructures aéroportuaires est la première condition nécessaire à l'émergence d'une demande. Infrastructures qui sont, par ailleurs, **déjà existantes** : rien qu'en France métropolitaine, on ne trouve pas une piste à moins de 50km d'une autre [17]. Ce maillage d'aérodromes reste cependant, en immense majorité, **commercialement inexploitable** pour un opérateur. Bien que ces aérodromes soient équipés de pistes courtes adaptées pour accueillir des avions légers, ils ne sont, à date, pas encore équipés pour **opérer et alimenter** en **nouvelles énergies** nos futurs avions décarbonés. Nous verrons qu'équiper ces infrastructures sera l'opportunité d'opérer des avions décarbonés sur tout le territoire pour **connecter** les régions entre elles.



CONDITION 2 : AVOIR L'INFRASTRUCTURE ÉQUIPÉE

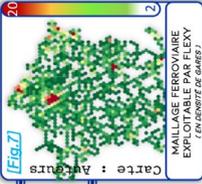
Pour favoriser l'émergence d'une demande, il faut rendre l'**opération réalisable**. Il est donc essentiel de disposer d'une **énergie disponible** localement, **abordable** et **durable** pour ces futurs aéronefs. A ce titre, les aérodromes peuvent jouer un rôle pivot en se réinventant **hubs énergétiques**. L'idée est de produire de l'électricité verte sur site pour la recharge de véhicules terrestres et aériens hybrides-électriques, mais aussi, à terme, pour la production locale d'hydrogène vert. Mais pour lancer une telle initiative, il convient d'identifier un **premier cas d'usage adressable**. A ce sujet, nous avons donc rencontré **Guilhem Cuny** (chef de projet - hubs énergétiques & innovations **ENERG**) le 01 juillet dernier. Résultat net : la **flotte captive** terrestre d'une commune semble être le candidat idéal. En effet, pour ses services publics (aménagement scolaire, collecte des déchets,...), une **commune** emploie souvent une **flotte captive** - ensembles de véhicules professionnels dont le passage à des énergies neutres en émission carbone est difficile à mettre en place. Les aérodromes, souvent à cheval sur plusieurs communes, sont une opportunité pour une collectivité de **mutualiser** et **concentrer** ses investissements pour en faire une zone de recharge mutuelle qui permettra à chaque commune de décarboner et d'opérer sa flotte à moindre coût. Adresser ces flottes terrestres permettra de créer un **effet de volume** et de **massifier les usages**. L'objectif : avoir une infrastructure prête avant le développement des premiers avions décarbonés. Pour illustrer cette transformation des infrastructures aéroportuaires, étudions le cas de l'aéroport **Auch-Gers** qui a pour ambition de devenir un hub énergétique au service de la mobilité décarbonée du territoire.



Cette transformation présente plusieurs avantages : une nouvelle **source de revenus** grâce à la capitalisation sur le foncier pour la production d'électricité, une production locale d'hydrogène qui résout les problèmes de stockage et de transport, la création d'une **expertise** sur la maintenance de technologies décarbonées, un **regain d'attractivité** de l'aéroport pour des activités de formation et d'essais en vol.

CONDITION 3 : AVOIR L'INFRASTRUCTURE RELIÉE

Une infrastructure aéroportuaire équipée n'a pas de valeur si elle n'est pas efficacement **reliée au reste du territoire**, en particulier aux points de départ et d'arrivée des PAX ou des biens transportés. Il est donc nécessaire que l'aéroport joue le rôle de **plate-forme multimodale**. A ce propos, compte tenu de l'alignement entre le maillage ferroviaire et aéroportuaire français, le projet FLEXY (SWCF [19]), se présente comme une solution réaliste pour le point à point, en particulier en campagne. FLEXY propose une navette électrique de 14 places capable de circuler **sur route et sur les rails** non-exploités (42% du réseau français). Avec ses 200km d'autonomie et ses 80km/h, elle offre une **alternative compétitive** aux autocars et voitures grâce à des trajets sans contraintes routières.



CONDITION NÉCESSAIRE À LA DEMANDE : NOTRE CONCLUSION

Des infrastructures aéroportuaires prêtes et bien reliées sont essentielles pour stimuler la demande, voire même, par la suite, **l'assurer** - par ce premier usage - le développement d'une filière énergétique plus large.

Au-delà des conditions matérielles indispensables à l'émergence d'une demande de transport aérien régional, il est également nécessaire d'adapter le parcours utilisateur



RÉACTION D'UN PROFESSIONNEL : BDAHAN – DIRECTEUR DÉLÉGUÉ AÉRONAUTIQUE

« Dans votre cas, il est essentiel de repenser le point à point. Ne pas se concentrer seulement sur le trajet de l'avion mais imaginer un service client complet du point de départ au point d'arrivée. »

Professionnel rencontré le 12.04.2024



POURQUOI ADAPTER LE PARCOURS UTILISATEUR CLASSIQUE À UN USAGE RÉGIONAL ?

Sur des trajets intérieurs, contrairement au cas du voyage à l'international, un PAX a beaucoup d'alternatives de transport. Ce genre de PAX risque d'être bien plus sensible au temps de voyage. En effet, sur un flux intérieur, le voyage en voiture et en train – qui permettent de réaliser du point à point – est solidement ancré dans les **mœurs** [20]. Le voyage en avion n'offrant pas de trajet direct, il faut donc, pour inciter au **report modal**, imaginer un parcours PAX amont et aval et s'assurer que le temps de trajet cumulé soit compétitif par rapport aux autres moyens de transports cités. Dans cette optique, nous imaginons ci-dessous le parcours d'un PAX typique en 2040.

PARCOURS D'UN PAX EN 2040 - LOUISE

Louise est une habitante du village de Sainte-Christie dans le Gers, à quelques kilomètres de Auch. La semaine, elle travaille à Marseille en qualité de professeure émérite de médecine à la faculté. Du lundi au vendredi, Louise vit à Marseille, logée par la faculté dans un logement de fonction afin de pouvoir dispenser ses cours, mener ses travaux de recherche, et conduire ses conférences. Chaque week-end, Louise rentre auprès de sa famille, dans son village de Sainte-Christie. Grâce à l'aérien régional et à un parcours multimodal adapté, Louise peut rejoindre son village d'origine en un peu plus de 2h contre 5h et 6h, respectivement en voiture et en train, avec un impact très faible sur son empreinte carbone.

17:20

Louise est déposée au terminal régional de l'aéroport de Marseille qui ne propose que de l'accueil et du contrôle de passager. En 2040, les procédures de sécurité pour les passagers d'avions de moins de 19 places sont allégées pour accélérer l'embarquement.



17:30

Vendredi, Louise marche vers l'arrêt de bus où l'attend une navette publique, à hydrogène vert, pour l'aéroport.

18:48

Après 11 minutes d'attente, Louise et 14 autres passagers embarquent dans l'appareil.



18:56

Pendant que Louise passe le scanner de sécurité, ses valises sont transportées sur chariot par le manutentionnaire vers l'avion.

19:06

Louise a atterri sans bruit à l'aéroport d'Auch-Gers et récupère ses valises sur un chariot sur le tarmac. Elle passe ensuite une grille qui l'amène sur un parking.



Après 150 mètres à pied et 6 minutes d'attente, Louise entre dans un FLEXY opéré sur un rail désaffecté et rejoint, par rail puis par route, la mairie de Sainte-Christie.



ZOOM : L'AÉRIEN RÉGIONAL AU SERVICE DES INDUSTRIELS

Nous croyons que l'aviation régionale peut aussi servir un usage d'échange de fret entre industriels inscrits au sein d'une même supply-chain. L'aviation de proximité peut – à condition d'être financée – en effet optimiser l'**efficacité opérationnelle** d'une entreprise et soulager toute une filière. Un avion régional permettrait, en effet, une liaison rapide et régulière de fret à haute valeur ajoutée entre différents **partenaires**, ou entre les différents sites d'un même industriel. Par exemple, ce nouvel outil serait opportun pour la filière de construction aéronautique, aujourd'hui en plein **ramp-up**. Par ailleurs, cette idée peut être mise en place à l'échelle d'une zone industrielle (ZI). Pour illustrer, prenons l'exemple de la ZI en couronne de l'aéroport Pau-Pyrénées. Ici, la **communauté d'agglomération** finance, en ce moment même, un **taxiway** [21] reliant directement la piste aux entrepôts des entreprises de la zone **Aérosite** voisine pour inciter celles-ci à faire usage de l'aéroport de Pau et de l'aérien pour le fret. Cette initiative, permettant le transport point à point de fret industriel, ouvre l'opportunité pour tous les industriels de la ZI de **mutualiser leurs coûts** de transport en plus de pouvoir s'aligner sur leur politique **RSE**.

TRANSITION VERS NOTRE BUSINESS CASE

A ce stade nous avons démontré qu'il existait un **besoin réel** de mobilité régionale en France et vu les conditions nécessaires à la conversion de ce besoin en une **demande de transport aérien**. Ce faisant, l'aérien peut offrir une réponse reposant sur un nouvel usage et faire émerger un nouveau marché d'ici 2040. Nous pouvons, désormais, nous placer en 2040 et confronter cette réponse au réel, en analysant les **leviers de rentabilité** d'une compagnie aérienne régionale opérant une flotte d'avions décarbonés de 19 places. Cela nous permettra de déployer un **plan d'attaque** pour rendre viable une telle mise en opération, décrite au sein de notre **business case**. Après cela, nous élaborerons un plan de **mise à l'échelle** visant à étendre la décarbonation plus largement, disruptant l'ensemble du secteur aéronautique.



Carte : Aéroports de France
Schéma du projet de Taxiway industriel

Description générale de notre méthodologie permettant à un opérateur d'avions régionaux décarbonés de déployer un modèle d'affaires viable d'ici à 2040

IMAGINER LA STRUCTURE DE COÛTS ET DE REVENUS

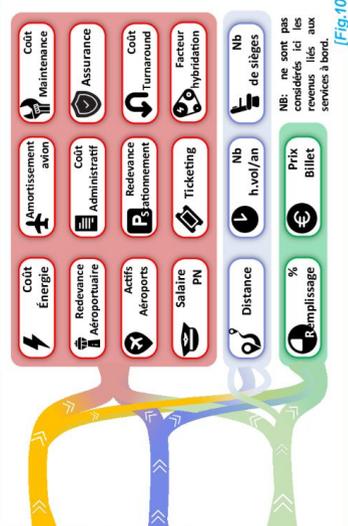
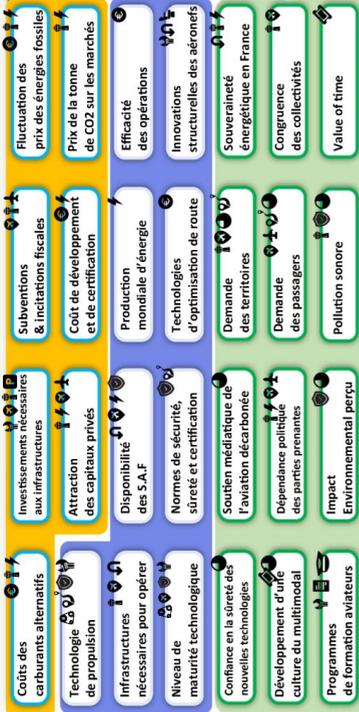
Pour établir un modèle de rentabilité, nous choisissons les métriques décrites par E. Combe et P. Chiambaretto dans "Le transport aérien". Nous avons donc sélectionné une quinzaine de paramètres (sources de coûts, de revenus et paramètres physiques clés) influant directement sur la rentabilité d'un opérateur d'avions décarbonés en 2040. De là, nous souhaitons déterminer les principaux sous-paramètres sociologiques, économiques et techniques pouvant influencer cette quinzaine de paramètres. Alors, nous avons rencontré une série d'experts sectoriels : politiques, industriels, chercheurs, financiers, individuellement. Néanmoins, ce problème systémique nécessitait un vrai dialogue entre ces diverses disciplines.



Photo : Aéroports - Notre déjeuner-travail : Imaginer l'aviation régionale de 2040

EN RASSEMBLANT TOUTES LES DISCIPLINES

Nous avons donc organisé, un événement inédit le 12 juillet 2024 afin de les réunir et de travailler ensemble à anticiper l'opération de l'aviation régionale de demain. Sont ressortis des débats environ 30 sous-paramètres sociologiques, technologiques et économiques à considérer. Étaient présents : Bruno Dahon, Florent Querol, Nicolas Granier, Stéphane Charty, Damien North, Stéphane Morrey, Laurent Jolly, Eric Baldassarri, Thomas Planes, Tarek Ben Omrane, Quentin Barascud, Christian Goguy, Joseph Risson, Frédéric Panchout, S. Juaneda, P. Bailey, C. Benaraya...



Les sous-paramètres étant désormais associés aux paramètres de rentabilité, nous définirons plusieurs scénarios, en partant d'un scénario 0 témoin. Chaque scénario ajuste les sous-paramètres, ce qui impactera la rentabilité. La méthode est la suivante : pour chacun des paramètres de rentabilité, l'arborescence nous renseigne sur les sous-paramètres socio/techno/éco associés. Par exemple, si l'aspect technologie est favorable, le paramètre est augmenté de +15% par rapport au scénario 0, sinon diminué de -15%, idem pour les aspects socio/éco. Ainsi, un paramètre de rentabilité peut varier de -45% à +45%. A noter qu'une valeur de ±15% n'est appliquée que si au moins deux sous-paramètres de l'aspect concerné (socio/techno/éco) influencent directement le paramètre de rentabilité. L'analyse de ces scénarios permettra de discerner les facteurs clés de succès pour notre opérateur.

L'analyse des scénarios nous permet de déterminer les facteurs clés pour une rentabilité durable en 2040. Il restera alors à déterminer par quels mécanismes y transférer

LES FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS IDENTIFIÉS

En se basant sur le travail précédent, on comprend que, la structure de coûts variant peu d'un scénario à l'autre, c'est la **recette** qui a l'impact le plus significatif sur la rentabilité d'un opérateur sur du régional. Sachant qu'à prix du billet fixe, seul le **taux de remplissage** agit sur la recette (cf. arborescence), cherchons alors quels **sous-paramètres** agissent sur ce facteur de remplissage. Nommément (cf. arborescence) : la confiance en la sûreté des nouvelles technologies, le développement d'une culture du multimodal, le soutien médiatique de l'aviation décarbonée, la demande des territoires ou des passagers, la réduction des nuisances sonores et la reconnaissance par la population des efforts de décarbonation du secteur aérien. **Discutons ce résultat** : A première vue, on pourrait penser que les paramètres techno/socio/éco influencent la rentabilité de manière équivalente. Bien que la rentabilité suive une **relation linéaire** simple avec le prix du billet, influencée par le taux de remplissage et les coûts, il n'était en réalité **pas évident** de déterminer quel facteur influencerait le plus efficacement le seuil de rentabilité. Notre étude révèle alors que ce sont les paramètres sociologiques qui ont l'impact le plus significatif. Malgré des améliorations techniques et économiques, les coûts ne peuvent être réduits indéfiniment en raison des limites imposées par la capacité et la portée des avions utilisés. Pour compenser sans augmenter les tarifs pour l'utilisateur, il est crucial d'assurer un taux de remplissage optimal, et de se concentrer, donc, sur l'**acceptabilité sociale** du transport aérien régional.

ZOOM : NOTRE OUTIL DE CRÉATION DE SCÉNARIOS

Dans cette démarche, nous avons **créé un outil** et une **interface interactive** pour vous permettre d'imaginer et de matérialiser n'importe quel scénario. **Tentez l'expérience via ce lien** : <https://promether.fr/calcul-rentabilite/>

QUELS MÉCANISMES TRANSITOIRES DE RENTABILITÉ ?

Pour nos calculs de rentabilité, nous sommes partis d'une hypothèse forte : supposer une fréquence de **2000h de vol par an** pour une telle compagnie de transport d'utilisateurs (par exemple pour une compagnie opérant un *Beechcraft 1900D 1000h/an comme Twinjet, notre modèle prédit un seuil de rentabilité à 325€ par billet*). Afin d'anticiper la période précédant un tel volume opérationnel, nous avons étudié et repensé plusieurs **mécanismes transitoires** de rentabilité. De tels mécanismes accompagneront les compagnies dans la mise en opération de leurs avions régionaux décarbonés, tout en contribuant à respecter la **supportabilité du prix** pour l'utilisateur. De plus, ces mécanismes peuvent permettre aux compagnies naissantes de s'aligner avec les exigences de **résilience financière** [27].

MÉCANISME 1
Pour soutenir des services aériens essentiels au développement régional, un État membre de l'UE peut instaurer une **Obligation de Service Public (OSP)** [28]. Il existe deux types d'OSP : l'OSP ouverte, accessible à toutes les compagnies sans exclusivité ni compensation, sous certaines conditions ; et l'OSP restreinte, où l'État, par appel d'offres, garantit une route à une seule compagnie, compensant ses pertes si aucune autre n'est intéressée.

MÉCANISME 2
Il existe aujourd'hui un marché du quota Carbone calqué sur l'EU-ETS propre à l'aérien : **CORSIA** [29]. Cependant, ce mécanisme basé sur le marché ne couvre ni les vols domestiques, ni la **CS-23**.

MÉCANISME 3
Participant à l'entretien des infrastructures, les redevances aéroporтуaires sont aujourd'hui majoritairement indexées au **prorata de la masse des appareils**.

MÉCANISME 4
Il existe, pour l'achat d'un véhicule électrique, une exemption de taxe à l'achat ayant permis et favorisant encore la **pénétration** des véhicules électriques sur le marché automobile.

MÉCANISME 5
Certaines compagnies aériennes, comme AIRCORSA avec AIRBUS [30], établissent des partenariats pour transporter employés ou fret entre sites, offrant ainsi une efficacité opérationnelle pour l'industriel et une ligne de revenu stable pour l'opérateur. Cela permet de **minimiser les risques** liés au renouvellement de flotte ou à l'ouverture de nouvelles lignes. De plus, la compagnie exploitera l'appareil sur d'autres lignes les jours non-ouverts.



RECOMMANDATION D'A TOULÉMONT – HO SUSTAINABILITY

Ajouter un **critère d'éligibilité** au cahier des charges des OSP favorisant les compagnies opérant des appareils émettant moins de **55%** de CO2 comparativement aux flottes actuelles, incitant les opérateurs à se placer sur le marché du régional décarboné.

NOTRE RECOMMANDATION

Adapter le template CORSIA aux vols domestiques, pour permettre aux opérateurs de capter de la valeur sur la tonne de CO2 évitée en émettant des **certificats d'émission**.



RECOMMANDATION DE DIBIDOU – DIRECTEUR DE L'AÉROPORT AUCH-GEES

« Indexer ces redevances sur les volumes d'émissions des appareils afin d'alléger la structure de coûts des opérateurs les plus sobres est un choix qui va dans le sens de l'histoire. »

NOTRE RECOMMANDATION

Le marché de l'aérien étant moins dense, nous pouvons imaginer une **exemption de taxes**, pas à l'achat, mais sur le coût de l'électricité utilisée pour recharger les appareils.

NOTRE RECOMMANDATION

Détourner le financement des flottes décarbonées et l'ouverture de lignes transversales pour les compagnies aériennes, par ce procédé.

VII. PLAN DE MISE À L'ÉCHELLE & CONCLUSION

VICTOR FOUILLE & VALENTIN PRUVOST 10

Après avoir démontré la viabilité de l'opération d'avions régionaux décarbonés en 2040, montrons maintenant comment ce premier usage peut disrupter l'ensemble du secteur

METTRE À L'ÉCHELLE CE PREMIER USAGE

Selon nous, le défi de la décarbonation sera l'opportunité d'une **disruption totale** du secteur. Bien que l'aviation régionale représente moins d'1% des émissions de l'aérien [34], et que la décarbonation de cette verticale, seule, n'impactera pas substantiellement les émissions du secteur, c'est la mise en opération d'appareils légers décarbonés qui constituera la **première étape d'une transformation générale**. En effet, avoir un premier cas d'usage viable, pour l'avion décarboné, permettra de **rassembler** les acteurs impliqués. Cela suscitera, *in fine*, les **investissements massifs nécessaires**, d'abord à l'**industrialisation** des petits porteurs, puis surtout au **développement** des futurs moyen & long-courriers décarbonés, responsables de la majorité des émissions de la filière. Cela dit, ces derniers investissements n'émergeront qu'en présence d'un marché de l'aérien régional considérable. Il est donc nécessaire de s'intéresser au caractère **duplicable** du business case présenté précédemment : nous détaillerons maintenant, une série d'actions de **mise à l'échelle** permettant d'envisager un développement international de l'usage décrit dans ce dossier.

L'AFFIRMER LE RÔLE DES ÉTATS ET DES MÉDIAS PUBLIQUES

Nous le savons maintenant, c'est le facteur d'acceptabilité sociale qui détermine majoritairement la rentabilité des compagnies régionales décarbonées et qui **dimensionnera** donc ce marché. Pour jouer sur ce levier social, ce sont les **États** qui jouent le rôle principal. Pour exemple, **Patrick Gandi**, estime que les avions à hélice sont encore vu comme moins fiables et moins modernes que les jets, faute d'une communication adéquate de la part de l'État [35]. Nous pourrions alors imaginer une campagne de sensibilisation financée par une région, **soutenue par l'État**, permettant à des usagers tests de voyager à moindre coût sur de nouvelles lignes régionales.

IL IMPLIQUER LES MAJORS AIRLINES

Bien que la technologie ne permette pas encore une aviation zéro émission à grande échelle, certaines compagnies, comme EasyJet, explorent des options innovantes comme l'avion électrique pour des vols courts (moins de 500 km) [36]. À ce titre, nous pourrions imaginer que les principales Majors utilisent des **lignes régionales** décarbonées comme **laboratoire**. Tout en restant concentrées sur leur **core business**, cela permettra de se familiariser avec les nouvelles technologies et de créer une expertise au sein des filiales **MRO**, indispensable pour préparer la transition de leur flotte principale – en plus de contribuer à l'industrialisation des appareils légers décarbonés.

Professionnel rencontré le 14.06.2024 à 15h00, à l'ambassade d'Inde

LE CAS DE L'INDE – COMMODORE PARYA – ATTACHÉ DE L'AIR DINDE À PARIS

« L'Inde utilise un classement des aéroports : 1er, 2ème, ou 3ème rang » : si une compagnie accroît son trafic dans les aéroports de 1er rang, elle doit également s'engager à augmenter proportionnellement ses capacités dans les aéroports de 2ème et 3ème rang. Bien que très digite et peu alignée avec le droit communautaire, cette approche non coûteuse pour la puissance publique permettrait d'étendre la flotte et l'opération des nouvelles compagnies "décarbonées" sur tous les aéroports d'un territoire, contribuant à nouveau à **nourrir et dupliquer** le marché de l'aérien régional.

IV. FINALEMENT : REPENSER LA GOUVERNANCE INTER-RÉGIONALE

Du point de vue institutionnel, notre business case est en mesure d'apporter des réponses à – au moins – trois enjeux majeurs : l'aménagement des territoires, la mobilité inter-régionale et la politique environnementale & sociale. Ces trois domaines entrent dans le champ des compétences exercées par les **Conseils Régionaux**, en partenariat avec les autres collectivités, et en cohérence avec les **prérogatives que l'État** exerce au titre de **l'intérêt général**. À ce titre, le projet de renouveau du transport aérien régional décarboné à l'échelle du territoire national représente une opportunité pour les **Régions** de dialoguer entre elles (puisque l'on sort des limites des territoires), dans le cadre de leurs compétences : pour ce faire, nous posons donc l'hypothèse d'une architecture institutionnelle de niveau inter-régional, sous la forme d'un **Comité des Régions** dédié à l'organisation de la mobilité inter-régionale, en lien avec le **Ministère des Transports** et les services de l'État. Au-delà du périmètre de notre proposition, nous avons la conviction qu'une vision européenne a également du sens, et que cet éventuel Comité gagnerait à être l'espace de dialogue et le creuset d'une véritable politique de transport régional à l'échelle des territoires européens.

CONCLUSION GÉNÉRALE DU DOSSIER

L'aviation régionale, telle que nous la concevons, est le laboratoire idéal pour le développement du transport aérien décarboné à l'échelle mondiale d'ici 2040. À ce stade, nous avons étudié les besoins de mobilité intérieure, qu'ils soient aériens, ferroviaires, routiers, ou liés au transport de fret, et identifié les conditions nécessaires pour convertir ces besoins en une demande tangible pour l'aérien régional décarboné. De plus, nous avons également démontré la faisabilité d'un modèle d'affaires viable pour les futurs opérateurs d'avions régionaux décarbonés grâce à différents scénarios, nous ayant permis de déployer notre business case. Ce premier usage, centré sur l'exploitation d'avions régionaux décarbonés, dépasse largement le cadre d'un simple segment de marché et possède le potentiel de transformer et de révolutionner l'ensemble du secteur aérien en étant la première démonstration qu'une aviation durable est possible.

En franchissant cette étape initiale, nous posons ensemble, les bases d'une aviation décarbonée à une échelle plus vaste.

RÉFÉRENCES DU DOCUMENT

- (1) <https://www.service-public.fr/articuler/actualites/A16193> Direction de l'information légale et administrative (Premier ministre)
- (2) https://aviationbenefits.org/media/167417/w/2050_v2021_27sept_full.pdf (2021) Rapport Waypoint 2050
- (3) https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/bulletin_statistique_trafic_aerien_commercial_1997_2017.zip
- (4) https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Bulletin_Statistiques_trafic_aerien_2023.pdf Bulletins statistiques du trafic aérien commercial, DGAC
- (5) <https://www.capital.fr/entreprises-marches/2023-une-annee-record-pour-le-nombre-de-voageurs-1490785> (2024) Capital
- (6) <https://www.bibliaher.fr>, Site officiel de BibliAHer
- (7) <https://ressources.data.sncf.com/explorer/?sort=modified> Données brutes SNCF
- (8) <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-transport-routier-de-marchandises-trm-en-france-et-en-europe> (2023) SDES, enquête TRM 2014-2022
- (9) https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Bulletin_Statistiques_trafic_aerien_2023.pdf (2023) Bulletins statistiques du trafic aérien commercial, DGAC
- (10) https://github.com/USER/FINAL/commits/USAIR/flux_fret_routier (2023) Données brutes SDES, enquête TRM 2014-2022, résultats établis par auteurs
- (11) <https://www.keschos.fr/industrie-services/tourisme/maersk-se-renforce-dans-le-fret-aerien-avec-ses-benefices-record-1360264> (2021) Les Echos
- (12) <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-transport-routier-de-marchandises-trm-en-france-et-en-europe?publications&documents=1341> (2023) SDES, enquête TRM 2014-2022
- (13) https://www.senat.fr/rap/18_734/18_734.pdf (2019) Rapport d'information du Sénat fait au nom de la mission d'information sur « l'Environnement and Planning A, vol. n°45, 2013.
- (14) <https://www.legifrance.gouv.fr/circular/cid/44752> (2019) Note relative aux compétences des collectivités territoriales en matière de transports aériens et l'aménagement des territoires
- (15) <https://www.transportenvironment.org/fr/france/articles/le-pailement-europeen-approuve-la-loi-sur-la-reduction-des-emissions-de-co2-des-avions>
- (16) <https://www.transportenvironment.org/fr/france/articles/le-pailement-europeen-approuve-la-loi-sur-la-reduction-des-emissions-de-co2-des-avions>
- (17) <https://agence-cohesion-territoires.gouv.fr/sites/default/files/2021-01/rapport-maillage-aeroportuaire-francais-2017.pdf> (2017) Agence pour la cohésion des territoires (source de donnée : DGAC)
- (18) <https://lejournaldugers.fr/article/47547-aircass-deploie-son-immense-seawing-a-l-aeroport-dauch> (2021) Le journal du Gers
- (19) <https://www.groupe-sncf.com/fr/innovation/mobilite-territoires/flexy> FLEXY : le système rail-route pour les petites lignes (Groupe SNCF)
- (20) <https://www.autonite-transport.fr/wp-content/uploads/2022/12/Rapport-multimodal-2022.pdf-final-2.pdf> (2022) LE TRANSPORT DE VOYAGEURS EN FRANCE
- (21) <https://www.en2dmoz.info/en/2023/04/06/092589-1-airway-went-e-a-c3%a9-airport-set-t-z-a-projet-c3%a9-c3%a0-pau> (2023)
- (22) <https://www.guardianjet.com/jet-aircraft-online-tools/aircraft-brochure.cfm?m=Beech-1900D-198> Guardian Jet
- (23) https://aviationbenefits.org/media/167417/w/2050_v2021_27sept_full.pdf (2021) Rapport Waypoint 2050
- (24) <https://www.keschos.fr/jms-regions/occeanie/avions-hybrides-aura-aero-marque-des-points-1872344> (2022) Les Echos
- (25) https://aviationbenefits.org/media/167417/w/2050_v2021_27sept_full.pdf (2021) Rapport Waypoint 2050
- (26) <https://www.aerotime.aero/articles/aura-aero-revels-final-design-for-hybrid-electric-aircraft-concept> (2023) AeroTime
- (27) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:3A32008R1008> (2008) Règlement (CE) n° 1008/2008 du Parlement européen et du Conseil du 24 septembre 2008 établissant des règles communes pour l'exploitation de services aériens dans la Communauté
- (28) https://www.eraso.org/system/files/170105_ob_pso_brochure_2016.pdf (2016) ERA's summary and advice to members on the provisions and conditions for operating public Service Obligation (P50) routes in Europe
- (29) <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>, Site web ICAO
- (30) <https://www.air-journal.fr/2019/06/13-une-ligne-air-corsica-2-5213044> (2019) Air Journal
- (31) https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Bulletin_Statistiques_trafic_aerien_2023.pdf Bulletins statistiques du trafic aérien commercial DGAC
- (32) https://github.com/USER/FINAL/commits/USAIR/renouvelable_fret_ait Données brutes SNCF, résultats établis par auteurs
- (33) https://github.com/USER/FINAL/commits/USAIR/renouvelable_fret_ait Programme Python : auteurs
- (34) https://aviationbenefits.org/media/167417/w/2050_v2021_27sept_full.pdf (2021) Rapport Waypoint 2050
- (35) https://www.senat.fr/rap/18_734/18_734.pdf (2019) Rapport d'information du Sénat fait au nom de la mission d'information sur les transports aériens et l'aménagement des territoires
- (36) <https://www.la Tribune.fr/entreprises-finances/Services/Transports-logistique/Esajoyet-annonce-les-premiers-essais-moteur-pour-le-projet-d-avion-zero-em> 891859.html?text=Soutien%20par%20la%20compagnie%20K%3A%0A,le%20voir%20voile%20(2021) La Tribune

FIGURES PRÉSENTÉES

- (Fig.1) Cartes issues du bulletins statistiques du trafic aérien commercial, DGAC
- (Fig.2) Données brutes SNCF, graphes générés par auteurs
- (Fig.3) Données brutes SNCF, graphes générés et résultats établis par auteurs
- (Fig.4) Données brutes SDES, enquête TRM 2014-2022, graphes générés et résultats établis par auteurs
- (Fig.5) Cartes Aerobreak
- (Fig.6) Image VFR Pilotes, schéma imaginé par auteurs
- (Fig.7) Données brutes SNCF, graphe généré par auteurs
- (Fig.8) Cartes SNCF Réseau
- (Fig.9) Photo issue de Google Earth
- (Fig.10) Arborescence : auteurs
- (Fig.11) Programme Python : auteurs, graphes et résultats générés par auteurs
- (Fig.12) Programme Python : auteurs, graphes et résultats générés par auteurs
- (Fig.13) Programme Python : auteurs, graphes et résultats générés par auteurs
- (Fig.14) Photo générée sur FlightPlanDatabase
- (Fig.15) Photo issue de Google Earth
- (Fig.16) Photo issue de Google Earth
- (Fig.17) Image issue du site web AURA AERO
- (Fig.18) Programme Python : auteurs, graphes et résultats générés par auteurs

ETHAIR

VICTOR FOUILLE & VALENTIN PRUVOST



Erik STYLIANIDIS

Sciences Po - ISAE-Supaéro

Currently finalizing a dual master's in International Economic Policy at Sciences Po and Aerospace Engineering at ISAE-Supaéro, I am thrilled to have been able to combine technical aerospace knowledge and social sciences throughout my academic journey. Over the past 4 years, I've been privileged to work in different professional and cultural environments at Avascent, Thales, and Alton Aviation Consultancy. At Thales, I helped develop an competitive ecosystem analysis tool and conducted strategic studies on C4ISR and the Metaverse. Moreover, during consulting internships I worked with major OEMs and suppliers on commercial growth projects and acquisitions.

Outside work, find me playing volleyball or backpacking through the Pyrénées and the Alps, as well as continuing to explore the fields of defense, finance, AI, and geopolitics which keep me inspired and engaged with global trends.



Hector VESPROUMIS

Sciences Po - ISAE-Supaéro

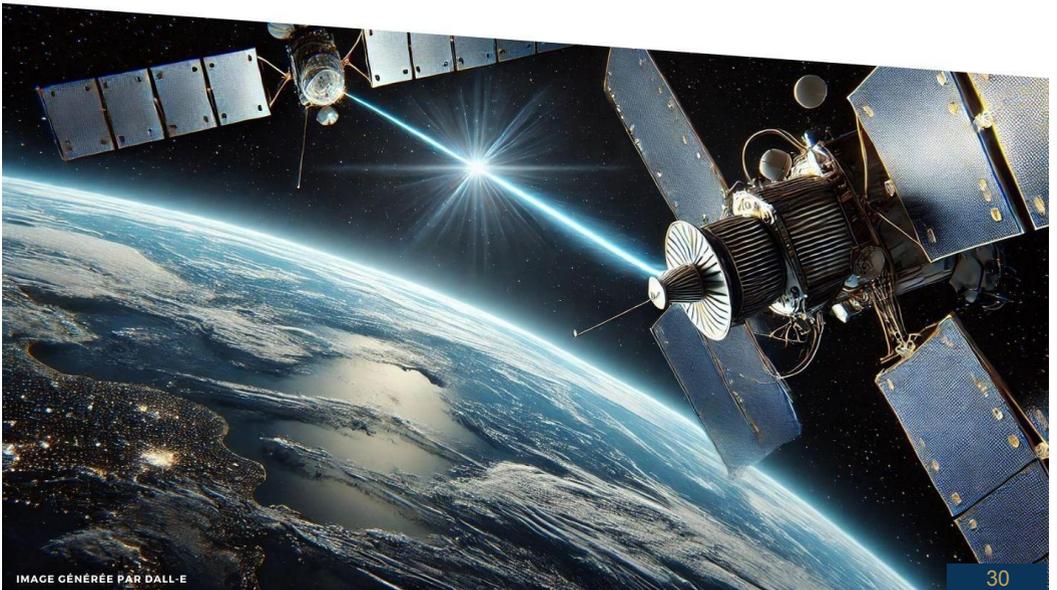
I am currently pursuing a dual degree at Sciences Po (Master in Public Affairs) and SUPAERO (Aerospace Engineering), where I specialize in aircraft design and financial engineering. Passionate about both aeronautics and politics, I am particularly interested in the strategic issues that connect technological innovation, economics, and geopolitics. My academic journey reflects a desire to contribute to the aerospace and defense sectors by combining technical expertise with a deep understanding of global challenges. In the long term, I am aiming for strategic analysis roles where I can work at the intersection of technology and high-level policy decisions. Alongside my studies, I serve as a local elected official in Paris' 15th arrondissement and represent students within the European UNIVERSEH alliance. Outside of my professional interests, I am also a pilot and a pianist, which allow me to fully explore my passions.

USAIRE STUDENT AWARDS
10 PAGER • 2024

SATCHARG

BUSINESS PLAN ET PROPOSITION TECHNIQUE

SatCharge est une entreprise fictive créée dans le cadre du travail de recherche.
Le rapport est rédigé dans cet esprit.



03

**Recharger
et sécuriser**

04

**Modèles de
vente et clients**

05

**Faisabilité
technologique**

07

**Marché de
l'électrique spatial**

08

**Overview du
Business Plan**

09

**Performance
financière**

10

**Législations et
Lobbying**

11

**Lettre aux
investisseurs**

1. RECHARGER ET SÉCURISER

L'espace comme l'aéronautique font face à un défi de taille : **concilier croissance de la demande et soutenabilité de la croissance de l'offre** [1]. Dans les airs, cela se traduit par la recherche de solutions de propulsion décarbonées et par la décarbonation de l'industrie [2]. Dans l'espace, la gestion des débris devient une urgence [3], avec à ce jour pour premières réponses la commercialisation de lanceurs réutilisables [4] ou générant au moins moins de débris [5].

Les solutions de « nettoyage » de l'espace font face à des contraintes importantes, en premier lieu leur modèle économique, en second lieu la complexité technique de telles opérations. Elles seraient pourtant bénéfiques à l'industrie [6].

Par ailleurs, la décarbonation des opérations de mise en orbite comme la recherche de profits dans la commercialisation du spatial incitent à **produire des satellites plus légers** [7], disposant de moyens de propulsion plus efficaces nécessitant moins d'ergols [8].

Cependant, l'alternative existante et employée aux propulsions traditionnelles chimiques, la **propulsion électrique** -substantiellement plus légère [9]-, **est contrainte par la capacité des satellites à produire et conserver de l'énergie** aussi bien pour leur mission que leur propulsion. Cela contraint leur manoeuvrabilité, aussi bien que leur durée de vie, l'electro-propulsion perdant en efficacité et consommant davantage de gaz à faible puissance [10].

La solution que nous proposons vise à **concevoir dans un premier temps une solution de recharge rapide des satellites positionnés en Orbite Basse Terrestre (LEO) et de prévention des risques posés par les débris en orbite**. Dans un second temps, elle prendra la forme d'un réseau de production et de distribution électrique positionné en LEO.

Ses applications sont triples : immédiates, conditionnées à une adaptation client ou futures.

Dès la mise en orbite de la première centrale de production électrique en orbite, il nous sera possible de **suivre et de mettre hors d'état de nuire plus d'un millier de déchets annuellement** [11]. Aussi, nous serons en mesure de proposer une recharge améliorée voire rapide des satellites temporairement ou plus longuement dans le rayon d'émission de notre centrale, afin de rendre leur propulsion plus performante pour une manoeuvre d'urgence, scientifique ou de désorbitation.

D'autres applications suivront. **1.** Les premières conditionnées à une modification de l'architecture des satellites des clients potentiels, les rendant compatibles à une distribution d'électricité à distance en continu. **2.** Les secondes dépendant de développements ultérieurs impliquant le secteur aérospatial plus largement. Celles-ci ouvriraient la voie à **3.** une optimisation du poids mis en orbite afin de prolonger la durée de vie d'un satellite, la qualité et le nombre de ses composants ou sa capacité à être opérationnel sans interruption. **4.** Elles permettraient également l'emport de solutions de propulsion plus puissantes, dans le contexte des programmes de retour de l'homme sur la lune et de construction de bases éventuelles ou d'envoi de l'homme vers Mars. **5.** Enfin, elles seraient aussi liées à l'aéronautique, la transmission d'énergie à distance étant une solution putative au défi de décarbonation des avions de ligne [12].

2. MODÈLES DE VENTE ET CLIENTS

Notre modèle de vente repose sur trois sources différentes qui permettent de cibler une variété de clients

MODÈLES DE VENTE

Le service d'**alimentation ponctuelle** offre une alimentation électrique intermittente mais prévisible pour la gestion des manœuvres et tout autre emploi des moteurs électriques. Deux types de pricing permettent de répondre aux besoins du marché:

- **Pay-as-you-go** : Paiement uniquement pour l'énergie consommée, avantageux pour les petits opérateurs et les ajustements occasionnels
- **Subscription** : Format qui garantit un approvisionnement stable en électricité tout en facilitant la planification budgétaire pour les grands opérateurs ou gouvernements

Le service d'**alimentation continue** offre une alimentation électrique ininterrompue, négociée directement avec les opérateurs au fur et à mesure du déploiement de notre réseau. Cela permet une approche personnalisée en fonction des besoins énergétiques spécifiques de chaque constellation de satellites à la fois à des fins de propulsion que des fins d'alimentation pour les systèmes embarqués.

Le service de **gestion des débris spatiaux** offre grâce à la technologie d'ablation et de forçage radiatif une possibilité de détruire ou déplacer les débris spatiaux. Trois types de contrats sont envisageables pour ce type de revenus:

- **Institutional Clean-Up** : Modèle destiné aux gouvernements et organisations internationales qui profitent d'un tarif préférentiel au kWh d'énergie utilisée
- **Private Clean-Up** : Modèle destiné aux grands opérateurs de satellites et constellations contraints par la législation anti-débris de souscrire à des services de gestion des débris.

- **Emergency Ablation Procedures** : Ce service sera vendu plus cher et s'agit d'interventions d'urgence pour l'ablation de débris menaçant des satellites opérationnels.

TYPOLOGIE DES CLIENTS

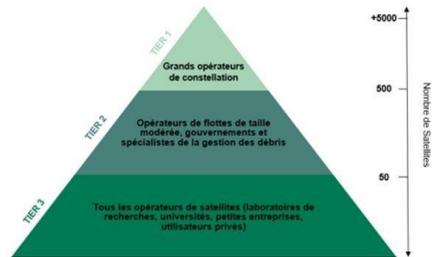


FIGURE 2.1. SCHEMA DES TIERS DES CLIENTS

Tier 1 : Ces clients seront la première cible de nos démonstrateurs et serviront de partenaires stratégiques lors des essais dans l'espace. Les premières entreprises privées contactées seront SpaceX avec Starlink, Eutelsat avec OneWeb, et Amazon avec Kuiper.

Tier 2 : Le deuxième tier englobe les clients opérant des flottes plus limitées entre 50 et 500 satellites ce qui correspond idéalement aux besoins des agences gouvernementales à la fois civiles et militaires (NASA, ESA, JAXA).

Tier 3 : Le Tier 3 générera la plus faible part de revenus mais regroupe néanmoins tous autres opérateurs de satellites qui sont voués à se multiplier avec la démocratisation de l'espace et l'abaissement des coûts de lancement.

3. FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE

Notre projet repose sur 3 piliers. Premièrement, mettre en orbite 10 centrales nucléaires. Deuxièmement, transmettre leur énergie directement à un satellite demandeur ou par l'intermédiaire de relais. Troisièmement, déplacer par ablation laser des débris dans le champ d'action des centrales primaires. (Voir annexe n°1).

CONTRAINTE DE MASSE

Actuellement, satellites, sondes et stations en orbite sont conçus pour produire l'énergie qu'ils consomment, dans la limite des contraintes de masse de chacun de ces satellites. Dans le cadre d'une production d'électricité indépendante de la mission scientifique, militaire ou commerciale d'un satellite, le satellite producteur voit sa masse entièrement consacrée à la production d'énergie. La première limite qui s'impose à notre solution en gardant à l'esprit un développement limité dans le temps est la capacité d'emport maximale des lanceurs actuellement en fin de développement.

Le lanceur qui semble à ce jour le plus abouti est le Starship de SpaceX, qui est déjà parvenu à mettre en orbite son second étage chargé de transporter 100 à 250 Tonnes en LEO. Cette capacité est censée évoluer à la hausse. Ici, nous considérerons un emport maximal de 200T en LEO, le plafond actuel de réutilisation du Starship [1].

PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Sur Terre, la production d'électricité est caractérisée par sa disponibilité, sa pilotabilité, son efficacité, son efficacité, son impact environnemental et son coût. Si les technologies les plus efficaces en terme de conversion d'énergie primaire en énergie électrique sont les centrales hydroélectriques, l'éolien ou les centrales à gaz, celles-ci ne sont pas concevables en orbite.

Les alternatives à ces technologies efficaces sont les centrales nucléaires (efficacité comprise entre 33 et 37%) [2] et les centrales solaires photovoltaïques (20%) [3].

Un équipement respectant la contrainte de masse fixée précédemment serait un SNPP (Système Nucléaire de Production de Puissance). Nous excluons le solaire comme source de production principale étant donnée l'efficacité par unité de surface des panneaux solaires actuels. Plusieurs dizaines d'ha. seraient nécessaires à la production de 14MW (3.4ha à 30% d'efficacité) (annexe n°2).

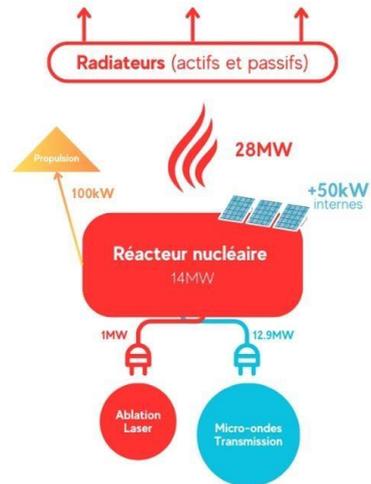


FIGURE 3.1. SCHÉMA DU SNPP SATCHARGE EN ORBITE

L'eau ne pouvant être utilisée comme fluide de refroidissement considérant le comportement des fluides en micro-gravité, nous pouvons faire le choix d'un réacteur se refroidissant par l'intermédiaire de métal liquide ou de gaz. La solution au gaz est privilégiée pour les réacteurs délivrant une forte puissance à haute température de fonctionnement, ce qui correspond à notre cas [4].

DISSIPATION D'ÉNERGIE

Centrale nucléaire et panneaux photovoltaïques (PV) présentent la même contrainte, leur efficacité. Considérant les PV actuellement en développement, nous pouvons acter que ces deux modes ont le même rendement : 35% en moyenne [3]. **Pour 14MW de puissance utile, 28MW sont à dissiper.** La solution actuellement majoritairement déployée, le radiateur, présente une contrainte de taille et de poids qui a contribué à la limite supérieure en puissance du réacteur. La surface de radiation est déterminée par la relation de Stefan-Boltzmann (annexe n°3). Celle-ci dépend de la puissance à dissiper, ainsi que de la température de surface du radiateur. On trouve ici 0.4ha de surface de radiateur, 0.2ha effectifs en considérant un **radiateur double face**, 550K en surface. La masse des radiateurs pouvant être estimée à 6.6kg/m² (ISS)[5], nous prévoyons 26T de radiateurs. L'ajout de systèmes de **refroidissement actif** pourrait contribuer à une réduction de la masse et de la surface nécessaires.

CONTRIBUTIONS À LA MASSE

La détermination de la masse du réacteur nucléaire nous est permise par une étude (NASA) qui a évalué la masse de SNPP refroidis au gaz pour une production >10MW avec cycle de **Brayton-Stirling** [6]. Celle-ci est de 2kg/kW, d'où une masse du réacteur de 28T. La propulsion électrique de 100kW du réacteur et le Xenon embarqué occupent 5.1T, auxquels s'ajoute la structure externe au réacteur (10T).

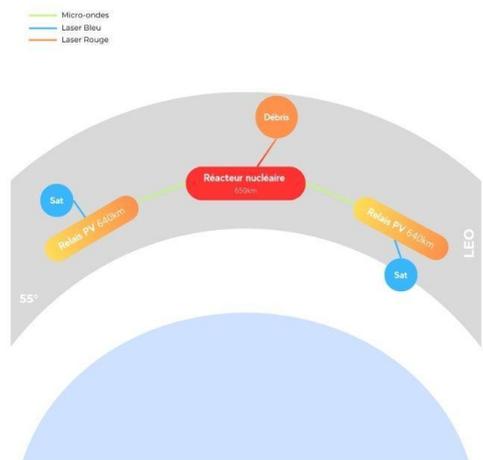
TRANSMISSION D'ÉNERGIE

La transmission énergétique pose deux défis principaux : transmettre précisément et avec le moins de pertes possibles. La précision nous est permise par le choix d'optiques adaptatives [7], précises et dimensionnées afin, pour un laser, de ne pas dépasser 5m de divergence après 300km de voyage (nous considérons le laser gaussien et un diamètre de départ proche d'1m) [8]. Néanmoins, les pertes induites par une transmission laser en raison de la conversion énergétique en amont comme en aval de la transmission avoisinent 90% [8].

En considérant qu'un développement ultérieur pourrait minimiser les pertes, nous ne pouvons pas uniquement compter sur la technologie laser.

Nous projetons alors de déployer une constellation proche de la majorité des satellites en LEO, inclinée à 55°, sur une orbite de 650km d'altitude, inférieure à celle de la majorité des débris [9]. Elle sera composée de 3000 relais répartis à 500km d'intervalle (constellation de Walker). Les relais reposeront sur un ensemble producteur (PV)- récepteur (antenne souple, annexe n°4)- transmetteurs (radio-ondes / laser bleu [10]) afin de transmettre l'énergie à nouveau ou de la transmettre à un satellite en laser (caractéristiques en annexe). Les pertes des transmissions par ondes (ici 30GHz), sont actuellement de 1 à 8% par composant de la chaîne de transmission, nous espérons les minimiser afin d'atteindre une efficacité supérieure à 95%, quitte à combiner la puissance de plusieurs centrales pour une transmission majeure. **L'ablation sera elle assurée depuis la centrale, à l'aide d'un laser (rouge) de 100kW** [11].

FIGURE 3.2. SCHÉMA DE LA CONSTELLATION



4. MARCHÉ DE L'ÉLECTRIQUE SPATIAL

GRANDES TENDANCES

L'exploration spatiale et les missions en orbite basse terrestre (LEO) connaissent une croissance rapide, soutenue par les avancées technologiques et l'expansion des activités commerciales. Selon Euroconsult, le nombre de satellites en orbite basse pourrait atteindre environ 25 000 d'ici 2032 avec plus de 50% de ces satellites présents au sein de cinq grandes méga-constellations [1]. La croissance du secteur est notamment motivée par les progrès dans le domaine des lancements (réutilisabilité, charge utile) et la popularisation des nanosatellites.

CONSOMMATION À BORD DES SATELLITES

La majorité de la consommation électrique à bord des satellites émane des systèmes embarqués tels que les expériences, systèmes de communication, radars, ou lasers. Actuellement, la consommation moyenne est de l'ordre de 2000W pour les satellites en LEO [2] et est fournie par des panneaux solaires mesurant entre 10m² et 50m². Par ailleurs, la transition vers une motorisation électrique des satellites est déjà en marche, appuyée par l'ISP 5 à 10 fois plus grand des moteurs à effet Hall par rapport aux moteurs chimiques classiques[3].

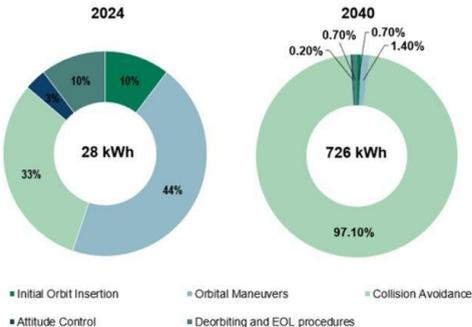


FIGURE 4.1. CONSOMMATION À BORD DES SATELLITES POUR DES FINS DE PROPULSION 2024 VS 2040

On remarque la part largement majoritaire qu'occupera les manœuvres anticollisions d'ici 2040 dû à la multiplication des débris.

Concernant les besoins pour les systèmes embarqués et le fonctionnement habituel du satellite nous avons estimés une demande de 750 TWh pour la totalité de la flotte de satellites en LEO d'ici 2040, une quantité équivalente à la consommation annuelle d'électricité du Brésil [4].

CONSOMMATION POUR LA GESTION DES DÉBRIS SPATIAUX

La densité des débris spatiaux croît de manière exponentielle depuis les dernières années tel qu'il a été théorisé par Donald Kessler en 1978. En effet, les collisions entre débris génèrent des nouveaux débris augmentant ainsi le nombre et la probabilité de collisions futures. En 2010, l'ESA recensait 14000 objets dont une majorité était identifié, dans leur étude sur l'Environnement Spatial en 2024, l'agence recense plus de 34000 objets dont 7500 non-identifiés [5]

Types de Débris	2024	2040
>10cm	40,500	1.7B
1-10cm	1.1M	1,575B
>1mm	130M	18,623B

FIGURE 4.2. TABLEAUX DES ESTIMATIONS DU NOMBRE DE DÉBRIS EN FONCTION DE LEUR TAILLE 2024 -2040

La demande en électricité pour des fins d'ablation et d'application de forçage radiatif a été estimé en modélisant la croissance des débris par des fonctions exponentielles dérivées des tendances entre 1960 et 2024 pour les débris de plus de 10cm, de 1cm à 10cm, et de 1cm à 1mm.

5. OVERVIEW DU BUSINESS PLAN

À la suite de l'analyse du marché ainsi que le bilan des solutions technologiques existantes et potentielles, nous avons décidé de lancer une start-up spécialisée dans les solutions de distribution d'électricité dans l'espace. Le projet est ambitieux et demande une roadmap commerciale et financière complexe mais faisable.

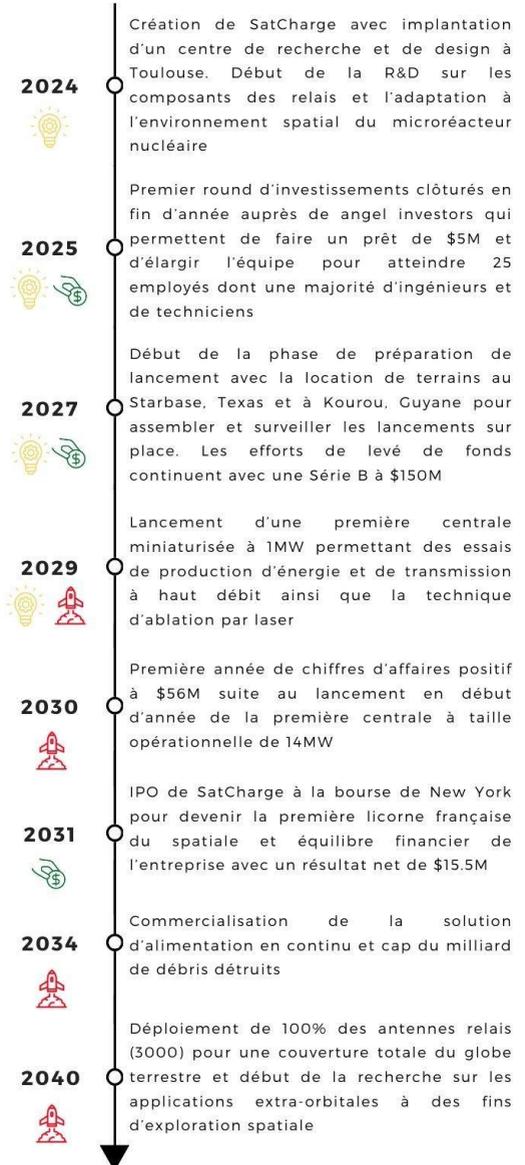
AVANTAGE COMPÉTITIF ET TIMING

Le marché de l'électricité dans l'espace à des fins opérationnels ou de gestion des débris est voué à atteindre plus de 50 000 TWh. SatCharge cherche à exploiter l'avantage compétitif du primo-rentant sur le secteur avec la première centrale nucléaire dans l'espace et le premier réseau de distribution par micro-ondes et lasers. En effet, les briques technologiques existent et ont souvent été limitées par le passé par des contraintes de masse au lancement, une réalité bousculée par le développement des méga-lanceurs comme Starship avec une capacité d'emport de plus de 200 tonnes [1]. En somme, notre startup se positionne sur le marché avec un timing idéal lui permettant de profiter des avancées technologiques du secteur tout en restant pionnière dans le domaine.

STRATÉGIE GO-TO-MARKET

Les premiers clients seront les opérateurs de constellations qui seront initiés au pay-as-you-go avant d'être fidéliser sur le modèle de souscription leur permettant de répondre à tous les besoins de propulsion de leur flotte. La motorisation 100% électrique à haute puissance leur donnera plus de flexibilité et augmentera le champ d'opération de leur constellation. Lorsque le réseau en alimentation continu est opérationnel à travers nos satellites relais, ces premiers clients seront prêts à faire le pas vers du 100% électrique en réseau pour faire des gains de masse sur les panneaux solaire et batteries.

ÉTAPES MAJEURES ET TIMELINE



6. PERFORMANCE FINANCIÈRE

REVENUS

Sur la base du marché accessible et le déploiement de notre réseau de distribution nous avons constaté une évolution de la part des revenus attribués à chacune des sources (alimentation ponctuelle, continu, et gestion des débris). En effet, dans un premier temps jusqu'en 2030, nos revenus sont fondés sur des subventions pour ensuite rapidement se redistribuer sur nos structures de souscription, pay-as-you-go et gestion des débris. A l'horizon 2040, nous estimons une réduction de la part de marché de l'alimentation ponctuelle et la gestion des débris jusqu'à 20%.

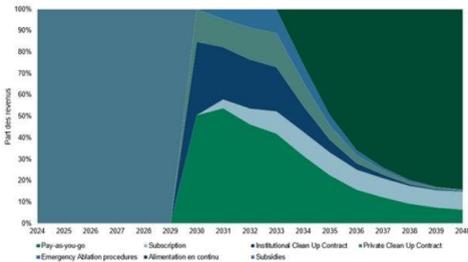


FIGURE 6.1. PART DES REVENUS ATTRIBUÉS AUX MODÈLES DE VENTE, 2024-2040

Le pricing du kWh produit dans l'espace est défini en fonction du service fourni et de l'urgence de la demande. Le détail est visible en Annexe 5.

STRUCTURE DES COÛTS OPÉRATIONNELS

La structure de coûts de l'entreprise est concentrée dans la masse salariale et les coûts récurrents de maintenance sur l'infrastructure installée. En effet, les centrales et les satellites relais nécessitent une maintenance régulière mais coûteuse à cause de leur emplacement en orbite qui demande des missions dédiées. Par ailleurs, lors des premières années de SATCHARGE, la majorité des coûts sont concentrés dans les efforts de recherche et de développement quantifiés par la somme des salaires des chercheurs, techniciens, opérateurs, et spécialistes du nucléaire et du spatial.



FIGURE 6.2. CROISSANCE ANNUELLE DES REVENUS, COGS, ET OPEX, 2024-2040

Pour assurer la viabilité de SATCHARGE, nous nous sommes assurés que la croissance des operating expenses et des cost of goods sold demeuraient inférieurs à la croissance des revenus. Après 2030, nous remarquons que la croissance des revenus est en moyenne de 70% alors que celles des OpEx et des COGS sont en-dessous à 42% et 19% respectivement.

CAPEX ET STRATÉGIE FINANCIÈRE

La nature du business model de SATCHARGE implique des investissements en infrastructure massifs difficiles à financer au travers des simples revenus générés. Notre CAPEX est estimé à plus de 5.2 milliards de dollars d'ici 2040 avec une majorité due au déploiement de 3000 satellites relais (82%), les microréacteurs (13%), et les lancements (5%).

Notre stratégie de financement consiste à cibler les subventions étatiques de la NASA, ESA, et d'autres institutions pour amortir les coûts de R&D entre 2024 et 2030. En parallèle, nous travaillerons avec des investisseurs aux cours des différentes étapes de notre développement à la fois pour nous soutenir financièrement et nous guider stratégiquement.

Financement	Date	Equity Share	Retour sur Investissement
Angel Investors	2025	10%	x700
Série A	2026	25%	x175
Série B	2027	20%	x9.3
Série C	2028	20%	x4
IPO	2030	22.5%	/

FIGURE 6.3. RÉCAPITULATIF DES INVESTISSEURS (TYPES, DATES, EQUITY SHARE, ROI)

7. LÉGISLATIONS ET LOBBYING

CONTRAINTES LÉGALES

Si notre projet est porté par des motivations environnementales et qu'il pourrait aussi bien contribuer à la réduction du nombre de débris en orbite qu'à une minimisation de la masse individuelle des satellites en orbite, il repose sur l'utilisation de centrales nucléaires dans un cadre réglementé.

Bien que l'**UNSOOA** contraigne l'usage de nucléaire en orbite, particulièrement en LEO, nous planifions en fin de vie des centrales (>30 ans) un placement en orbite très haute grâce au restant d'énergie et au propulseur électrique haute puissance (conformément à l'article 2.a.iii, principes) (type MPD - Propulseur magnétoplasmodynamique). Par ailleurs, l'utilisation d'Uranium 235 comme isotope est obligatoire. Il est à noter que les agences incitent à un usage d'uranium 235 non enrichi dans le contexte géopolitique international. Il semble néanmoins complexe de l'appliquer à notre cas d'étude.

Afin de s'assurer que les autorités approuvent le lancement de la centrale, celle-ci devra disposer non seulement d'un système de sûreté mais également de sauvegarde, afin d'éviter toute prise de risque. Par ailleurs, le lanceur Starship devra jouir d'une réputation lui permettant d'envoyer un réacteur chargé d'uranium, sans risque de retour sur Terre.

Quoi qu'il en soit, l'usage de combustibles nucléaires dans l'espace est un préalable aux missions de demain, vers Mars principalement. Nous inscrivons notre projet dans l'ère du spatial de demain, et devons considérer d'importants efforts de lobbying auprès des gouvernements (USA, UE, ...) et institutions non gouvernementales contrôlant l'usage d'armements nucléaires (AIEA).

Par ailleurs, il sera également primordial d'engager de pareilles discussions quant à l'usage de laser dans l'espace, dans le respect des réglementations (un usage commercial et scientifique et non militaire), comme pour la sélection des fréquences d'échange des relais [1].

SOUTIENS INSTITUTIONNELS

Tout au long de l'élaboration de notre projet (conception, industrialisation, recherche de partenaires, ...), nous veillerons à collaborer avec les agences spatiales majeures, telles l'ESA, la NASA, la JASA.

Celles-ci disposent de programme de soutien aux projets visant à nettoyer l'espace, comme *Clean Space* (ESA), lancé en 2012, qui a financé divers programmes futurs de nettoyage en 2019 [2].

L'Union Européenne, par l'intermédiaire de la Commission Européenne, dispose du fonds Horizon Europe dédié aux innovations majeures, que nous pourrions alors cibler pour un soutien financier supplémentaire.

En 2022 et 2023, la NASA a soutenu financièrement divers Start-Up ayant les mêmes visées. Par ailleurs, certaines innovations sur lesquelles repose notre solution (transmission micro-ondes, transmission laser, génération d'électricité >1MW en orbite, radiateurs à l'efficacité augmentée) requerront la recherche de soutien d'instituts technologiques privés comme d'universités publiques, à l'image des partenariats publics-privés.

8. LETTRE AUX INVESTISSEURS

À la suite de l'analyse du marché et du bilan des solutions technologiques existantes et potentielles, il apparaît clairement que **le secteur spatial est à un tournant** et que les prochaines années d'ici à 2040 seront critiques. La multiplication des satellites en LEO, couplée à la croissance exponentielle des débris spatiaux, pose des **défis considérables en termes de gestion et de durabilité**. Dans ce contexte, le projet mené par SatCharge se positionne non seulement comme une réponse à ces défis, mais également comme une opportunité de **transformer la manière dont l'énergie est produite, distribuée et utilisée en orbite**. Ce projet offre une solution complète, qui répond à la fois aux besoins immédiats de gestion des débris et à ceux d'alimentation en énergie des satellites et donc, s'inscrit dans la logique du **développement durable de l'espace**.

Sur le plan économique, SatCharge propose un modèle d'affaires diversifié, capable de répondre aux besoins des acteurs du secteur spatial à travers des modèles de vente catégories de pricing différentes. Le **service d'alimentation ponctuelle**, fondé sur des modèles de pay-as-you-go ou sur souscription, permet de cibler à la fois les grands opérateurs de mégaconstellations et les petits opérateurs de quelques satellites. Le service de **gestion des débris**, répond aux questions de sécurité des satellites en orbite. Finalement, le **service d'alimentation continue** est la forme aboutie du projet SatCharge créant un réseau fonctionnel de distribution d'électricité dans l'espace couvrant la totalité des satellites en LEO.

Finalement, SatCharge se positionne comme un projet **visionnaire**, qui combine innovation technologique, réponse aux défis environnementaux et opportunités commerciales. **Nous sommes convaincus que SatCharge représente l'avenir de d'industrie spatiale** en révolutionnant les capacités d'autonomie et en multipliant les types de missions des futurs satellites grâce à l'accès direct à l'électricité dans l'espace. Sur le long terme, SatCharge transformera notre approche à l'exploration spatiale et peut être même le transport interplanétaire...

LES FONDATEURS,



Powering the future of space

BIBLIOGRAPHIE

1. Solution

- [1] S. Delbecq, J. Fontane, N. Gourdain, H. Mugnier, T. Planès, et F. Simatos, *Référentiel Aviation et Climat* (ISAE SUPAERO), p. 3-4 (2021).
- [2] P. Médevielle et sénateurs, *Rapport d'office parlementaire sur la décarbonation de l'aérien* (Sénat) (mai 2024).
- [3,4,5] ESA. *Point de situation sur les débris spatiaux*.
https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Point_de_situation_sur_les_debris_spatiaux. (accès en juin 2024).
- [6] T.J. Colvin, J. Karcz and G. Wusk, *Cost and Benefit Analysis of Orbital Debris Remediation* (NASA OTPS) (mars 2023).
- [7] D. Curnick, *SmallSats: a new technological frontier in ecology and conservation?* (ZSL) (octobre 2021).
- [8,9] ESA. *What is Electric propulsion?*
https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/What_is_Electric_propulsion. (Accès en juillet 2024).
- [10] S. Mazouffre. *Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches*. (*Plasma Sources Science and Technology*), 25 (3), pp.033002 (2015).
- [11] L. Pieters. *SPACE-BASED LASER ABLATION FOR SPACE DEBRIS REMOVAL* (TUD) (2021).
And : E. Bögel et auteurs. *Feasibility Analysis of Small-Size Space Debris Removal in Low-Earth Orbit by Space-Based Laser Ablation*. (ESA-ESOC Conference 2024).
- [12] Airbus. *Solar power beams: a step towards cleaner energy*.
<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2022-09-solar-power-beams-a-step-towards-cleaner-energy>. 2022. (Consulté en juillet 2024).

3. Faisabilité technologique

- [1] SpaceX et sources croisées (articles de presse, posts X d'Elon Musk).
- [2] R. English. *Technology for Brayton-Cycle Space Powerplants Using Solar and Nuclear Energy*, (NASA) (1986).
- [3] NREL. *Best Research-Cell Efficiency Chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. (Consulté en août 2024).
- [4] A. Peakman. *The challenges of gas-cooled reactor technology for space propulsion and the development of the JANUS space reactor concept*. (*Progress in Nuclear Energy* Volume 125, July 2020).
- [5] N. Iwata et auteurs. *Thermal Performance Evaluation of Space Radiator for Single-Phase Mechanically Pumped Fluid Loop* (ARC) (juillet 2021).
- [6] L. Mason. *A Comparison of Brayton and Stirling Space Nuclear Power Systems for Power Levels from 1 Kilowatt to 10 Megawatts* (NASA GRC) (2001).
- [7] V. Michau et N. Védrenne. *LES LASERS ET L'OPTIQUE ADAPTATIVE* (Photoniques.com/ONERA) (2024).

[8] Y. Zheng et auteurs. *Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges* (Space Solar Power and Wireless Transmission Volume 1, Issue 1, June 2024, Pages 17-26).

[9] ESA. *ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT*, juillet 2024.

[10] Tech Briefs. *Blue Laser Power Beaming for Planetary Exploration*, Janvier 2024.

[11] C. Bonnal. *Des lasers pour modifier la trajectoire des débris spatiaux*, avril 2021.

4. Marché de l'électrique spatial

[1] Euroconsult. *Satellites to be Built and Launched 26th Edition*.

<https://www.euroconsult-ec.com/press-release/four-tons-of-satellites-to-be-launched-daily-by-2032-demand-concentrates-by-a-handful-of-players/> (Consulté en Juillet 2024)

[2] M. Hanif, F. Nadeem, R. Tariq, U. Rashid. Chapter 4 - Solar thermal energy and photovoltaic systems. *Renewable and Alternative Energy Resources*, Academic Press. 2022.

[3] Dawn Aerospace. *A Comparison of Electric and Chemical Propulsion in the Era of Low Launch Costs*. https://www.dawnaerospace.com/latest-news/electricorchemical#:~:text=Electric%20propulsion%20systems%20are%20generally,combination%20is%20cold%2Dgas%20capable.* (Consulté en Aout 2024)

[4] IEA. *Energy System of Brazil*. <https://www.iea.org/countries/brazil> (Consulté en Aout 2024)

[5] ESA. *ESA Space Environment Report 2024*.

https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2024 (Consulté en Aout 2024)

5. Overview du Business Plan

[1] SpaceX. *Starship*. <https://www.spacex.com/vehicles/starship/> (Consulté en Juillet 2024)

7. Législations et lobbying

[1] ESA, *ESA commissions world's first space debris removal*, https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/ESA_commissions_world_s_first_space_debris_removal, 2019

[2] B. Weeden, *OVERVIEW OF THE LEGAL AND POLICY CHALLENGES OF ORBITAL DEBRIS REMOVAL* (IAC 2010).

Autres ressources employées

- P. Jaffe, *Power Beaming and Space Applications*, (USNR) (2022)
- Edmundoptics, *Propagation des faisceaux gaussiens*, <https://www.edmundoptics.fr/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>, consulté en août 2024.
- ONERA, *Première mondiale : l'ONERA établit une liaison optique laser pré-compensée par optique adaptative à plus de 38 000 km (CP)*, juillet 2024.
- NASA, *State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology*, Chapters 3 and 7, juillet 2024.

ANNEXES

1. COMPOSITION DE LA CONSTELLATION

Mise en service	Nombre	Type	Puissance	Transmission	Ablation
2030-2038	10	Centrale Nucléaire	14-20MW	Ondes	Laser
2028-2040	3000	Relais PV	0.2MW	Ondes et Laser	-

2. CALCUL D'AIRES POUR 14MW DE PV EN ORBITE

$$A = \frac{14\,000\,000\text{ W}}{0,30 \times 1\,366\text{ W/m}^2} \approx 34\,127\text{ m}^2 \quad \text{avec 0,3 efficacité des panneaux solaires}$$

3. UTILISATION DE LA CONSTANTE DE STEFAN-BOLTZMANN

$$P = \epsilon\sigma AT^4 \quad \text{avec } \epsilon \text{ émissivité favorable supposée, } T=550\text{K (favorable).}$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2\text{K}^4 \quad \text{constante de SB.}$$

4. ANTENNE SOUPLE

Un récepteur souple et déployable (type rectenna), sur le modèle du télescope Webb et inspiré par un concept présenté par le Pr. Gourinat lors d'un échange préalable à ce travail, nous permettra de minimiser la taille des relais tout en garantissant une antenne de taille suffisante. Un travail portant sur ce sujet met en évidence des contraintes de matériaux en LEO, entre autres. La réception constituerait certainement le point le plus critique du projet.

Source évoquée : K. Carlson, *Design of and Business Case for a Deployable Rectenna for Spacecraft-to-Spacecraft Power Beaming*, (ARC) (2023).

5. PRICING EN FONCTION DU MODÈLE DE VENDE

Service	Prix / kWh
Pay-as-you-go	\$150
Souscription	\$100
Institutional Clean Up	\$75
Private Clean Up	\$100
Emergency Ablation	\$250
Alimentation Continue	\$100



Domitille MALLET

UTC Compiègne

From my years living in the United Kingdom to the classe préparatoire Lakanal and the UTC, aerospace has been a constantly evolving passion.

Now in my fourth year, I am pursuing a degree in Mechanical Engineering with a focus in aerospace at the UTC. While I'm captivated by sustainable innovations across aerospace, railway, and maritime sectors, the limitless potential of aerospace fuels my curiosity the most. I obtained the Aeronautics Initiation Certificate (BIA) and became an active member of UTC's Aeronautical Society, UTCiel. This year, attending The Air Forum in Paris thanks to the ORAJe association was invaluable to my learning experience.

Developing a sustainable and practical product during the USAIRE Student Award was a transformative experience, amplifying my drive for meaningful innovation, and I am honoured to be among the laureates as I would like to contribute to sustainable advancements in aerospace in the future.



Aliénor ROYER

UTC Compiègne

I have always been driven by a desire to understand the world, which has evolved into a passion for making a positive impact. Thus, reflecting on ways to make aviation more sustainable through the USAIRE student award felt like a natural step. Curiosity led me to pursuing an engineering degree in industrial processes at UTC, while exploring humanities, innovation and entrepreneurship. Now completing my fourth year, I have had the opportunity to take part in a number of highly enriching projects such as an innovation class in Berlin, a start-up project with the Student Entrepreneur National Status (SNEE) from Sorbonne Université, or a quality role at UTC's Junior Enterprise. Passionate about combining innovation and sustainability, USAIRE student Award 2024 was a deeply stimulating challenge. It provided the opportunity to learn about the sector as a whole, technologies, geopolitics, economics and much more. This experience has deepened my interest in working for change in the skies, which I am starting with a 6-month-internship at SAFRAN TECH.

RevoluSmog



**WILL DISRUPT
THE AEROSPACE INDUSTRY
BY 2040.**

SOMMAIRE

Résumé.....	2
Introduction.....	2
I. Les trainées de condensation et le noir de carbone.....	4
1. Le noir de carbone, nocif pour l'environnement et la santé.....	4
2. Le noir de carbone, une matière première valorisable.....	5
II. RevoluSmog, un filtre à particules innovant.....	6
1. Choix de la technologie utilisée.....	6
2. Notre produit : RevoluSmog, transforme les émissions en solutions.....	7
III. Mise en œuvre économique de RevoluSmog.....	10
1. La structure économique de RevoluSmog.....	11
2. La logistique RevoluSmog.....	12
3. Prévission Financière.....	13
4. Réflexions complémentaires.....	15
Conclusion.....	16
Bibliographie.....	17

RÉSUMÉ

Qu'est-ce que **REVOLU SMOG** ? C'est la récupération du noir de carbone à l'aide d'un filtre à cyclones innovant, dans le but de rendre l'aviation plus durable. Les émissions de particules fines dans l'atmosphère sont ainsi évitées, tout en valorisant cette matière première dans une optique d'économie circulaire. Notre projet peut se décomposer en 3 thématiques : le filtre, la récupération du noir de carbone et sa vente après transformation. **REVOLU SMOG** permettra au secteur aéronautique de réduire son impact écologique et sanitaire, et de renforcer sa réputation d'acteur engagé dans la transformation durable.

INTRODUCTION

5 milliards. C'est le nombre de passagers attendus pour l'année 2024, un record selon l'association internationale du transport aérien. La baisse du trafic pendant la période du Covid-19 n'est au final qu'une pause dans la croissance du secteur, estimée en moyenne à 5% par an depuis les années 2000, sans compter les besoins en fret aérien pour acheminer les 8,3 milliards de dollars d'échanges commerciaux. Pour le seul trafic de passagers et de fret, la flotte devra compter 46 560 appareils dans les airs en 2042.

Cependant, des contraintes de durabilité et de sécurité s'imposent pour garantir l'avenir de la filière. En effet, l'aéronautique est aujourd'hui responsable de 5% des émissions de gaz

à effet de serre mondiales, et 93% de cette pollution provient de l'utilisation de l'avion, par rapport à leur production.

Il est donc devenu nécessaire de s'adapter aux normes écologiques et d'innover. Ainsi, plus de 300 start-up se sont lancées dans des projets écologiques pour le secteur de l'aviation, afin de répondre d'ici 2050 à l'objectif zéro carbone de l'OACI, filière de l'ONU pour le transport aérien, sachant qu'à défaut, l'aéronautique deviendrait responsable de 22% des émissions de CO₂ mondiales.

Dans cette optique, de nombreuses alternatives sont actuellement étudiées, particulièrement dans l'objectif de remplacer le kérosène par du carburant plus durable. Par ailleurs, depuis 2022, la réglementation française impose aux fournisseurs de carburants d'intégrer

dans leurs ventes de kérosène en France un minimum de 1% de SAF (Sustainable Airplane Fuel ou Carburant durable d'aviation en français), de synthèse ou d'origine végétale. Seulement, ce nouveau carburant est aujourd'hui 2 à 6 fois plus cher que le kérosène dans le monde, et sa production actuelle est insuffisante : 1.5 millions de tonnes sont produites actuellement, ce qui est bien inférieur aux prévisions annuelles de 100 millions de tonnes et aux 300 millions de tonnes de besoins estimés. Face à l'enjeu de décarbonation, d'autres solutions à court terme sont nécessaires, même si le SAF bénéficie d'un soutien financier par exemple de la part des autorités françaises à hauteur de 200 millions d'euros. Des recherches sur l'aviation électrique, hybride et les avions à hydrogène sont en cours. Mais avec une autonomie estimée à 550 km par plusieurs start-ups comme Zunum Aero ou Wright Electric, cette solution n'est pas encore viable, d'autant que les passagers privilégient des alternatives comme le train pour les trajets de courte durée, encouragés par le gouvernement.

Ainsi, l'enjeu est de réduire l'impact de l'aviation actuelle sans attendre des changements conséquents dans la conception des appareils ou du carburant. De plus, même si la production de CO₂ et l'utilisation de

carburant fossile est au centre de l'attention, une autre forme de pollution est également conséquente et consiste en le rejet d'oxydes d'azote (NOX) et de particules fines (noir de carbone). Ces nanoparticules sont en partie responsables des traînées de condensation visibles après le passage de l'avion. Ces traînées de condensation doubleraient le forçage radiatif (impact des émissions à un instant t) de l'aviation, or cela est rarement pris en compte dans l'impact environnemental du secteur. Le noir de carbone est également une matière première créée à partir d'énergie fossile.

Nous avons donc développé une innovation permettant de capter le noir de carbone, tout en prenant en compte le potentiel de cette matière première, dans une optique d'économie circulaire.

Le secteur de l'aviation est vaste et peut être divisé en plusieurs sous-secteurs qui ont différentes priorités écologiques. L'aviation d'affaire est 10 fois plus émettrice de CO₂ par passager que l'aviation commerciale, avec jusqu'à 14% de la pollution du secteur due aux jets privés selon l'ONG Transport & Environnement (2021). L'aviation militaire a pour enjeu la vitesse, mais également la facilité d'utilisation et de maintenance. Une modification des engins militaires

dans une optique écologique ne doit notre innovation ; nous nous sommes donc pas impacter leur efficacité ou leur donc focalisées sur les avions de ligne et maintenance. Ce sous-secteur est donc les jets privés.

mis à l'écart en première intention pour

I. LES TRAINÉES DE CONDENSATION ET LE NOIR DE CARBONE

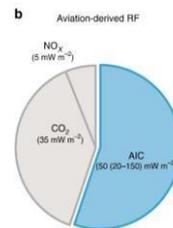
1. LE NOIR DE CARBONE, NOCIF POUR L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTÉ

Les traînées de condensation (ou contrails en anglais) sont des nuages de haute altitude (cirrus) se formant à la sortie des moteurs de l'avion quand celui-ci est en vol. La création de ces nuages est due aux particules fines et en particulier à une nanoparticule nommée le noir de carbone, rejetée par le moteur à l'issue de la combustion. En effet, le noir de carbone est un agent augmentant la température de solidification qui favorise la création de cristaux d'eau dans l'environnement humide qu'est l'altitude des avions, amplifiée par la vapeur d'eau rejetée par la combustion en elle-même.

Ces traînées de condensations ont un impact sur le réchauffement climatique et sur la santé.

Tout d'abord, elles augmentent l'effet de serre, les radiations provenant de la terre sont stoppées par ces nuages et ne peuvent pas rejoindre l'espace. Ces

rayons bloqués contribuent ainsi au réchauffement terrestre. Cette pollution serait responsable de plus de la moitié du forçage radiatif de l'aviation.



Forage radiatif de l'aviation, Carbone 4 (AIC: aircraft-induced cloudiness, RF: radiative forcing)

Le noir de carbone renforce également l'absorption de chaleur. En effet, il se dépose petit à petit sur la surface du sol, le noircissant. Les rayons du soleil sont alors absorbés en plus grande quantité et moins réfléchis, par l'effet Albedo, ce qui augmente en conséquence la température terrestre.

Peu de recherches ont été réalisées sur l'impact du noir de carbone sur la santé, mais il semblerait qu'il augmente le risque de cancers. Il est cependant connu

que l'exposition sur le long terme aux particules fines PM_{2,5} (avec un diamètre plus petit que 2,5 µm), dont le noir de carbone fait partie, soit responsable de 8,7 millions de décès prématurés par an dans le monde. En effet, les particules fines seraient responsables de maladies respiratoires, cardiovasculaires, cérébrovasculaires et de diabète entre autres.



Mortalité par particules fines en Europe (EEA)

2. LE NOIR DE CARBONE, UNE MATIÈRE PREMIÈRE VALORISABLE

Il est à noter que le noir de carbone n'est pas qu'un polluant, mais également une matière première. 5 types de noir de carbone se différenciant par les matières premières utilisées, les conditions de combustion et de décomposition thermique. Cela se traduit par des différences de taille, les diamètres des

particules allant de la dizaine à la centaine de nanomètres (entre 10 et 500 nm en fonction du type de particule). Toutes ces particules se rassemblent en agrégats (de taille variant entre 50 et 600 nm selon les différents types).

On retrouve ainsi le noir de fourneau, obtenu par la combustion incomplète de résidus pétroliers lourds, le noir d'acétylène obtenu par craquage de l'acétylène à une température supérieure à 2000°C, le noir de fumée provenant de la combustion incomplète d'hydrocarbures de goudron, le noir thermique issu de la décomposition thermique de gaz naturel et le noir de tunnel produit par la combustion incomplète de gaz naturel.

Le noir de carbone créé à l'issue de la combustion dans le moteur de l'avion est du noir de fourneau et représente la forme de noir de carbone la plus commercialisée (95% du marché). Cette matière première peut être utilisée pour renforcer les produits en caoutchouc (~90% des débouchés), comme pigment noir (9%) pour des encres, peintures, laques, vernis, plastiques, céramiques..., et également pour des produits très divers (1%) comme dans l'apprêtage du cuir, la fabrication de batteries, de piles sèches, de conducteurs électriques, de blindage contre l'interférence électrique,

de plastiques conductibles et laboratoire (séparation et point de antistatiques, bandes vidéos, agent de solidification), etc.

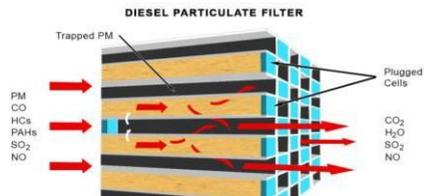
II. REVOLU SMOG, UN FILTRE À PARTICULES INNOVANT

Dans le but de répondre à l'urgence environnementale et de rendre l'aviation plus durable, nous proposons de réduire les émissions de particules fines des moteurs d'avions actuels. **REVOLU SMOG** offre ainsi un dispositif innovant et flexible permettant de filtrer les particules fines à la sortie du moteur des avions. Par cette innovation, nous pourrions éviter le rejet de noir de carbone dans l'atmosphère et ainsi réduire les impacts écologiques et de santé publique. Nous pourrions également valoriser le noir de carbone,

une matière première recherchée par les industriels mais polluante à produire. Cela engendrera une dynamique d'économie circulaire ainsi qu'une création d'emplois. Enfin **REVOLU SMOG** renforcera la réputation du secteur aéronautique, comme acteur de transition et d'innovation durable. Sur du plus long terme, **REVOLU SMOG** contribuera à la pérennité du secteur et à l'adaptation rapide des appareils, concurrencés par des alternatives de rupture.

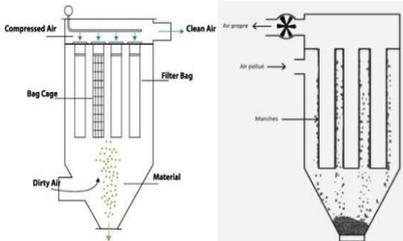
1. CHOIX DE LA TECHNOLOGIE UTILISÉE

Diverses technologies ont pour but de filtrer des particules fines. Dans le secteur de l'automobile, le filtre à particules pour les moteurs thermiques des véhicules diesel permet de les filtrer et ensuite de les brûler par la température du gaz d'échappement. Cependant, les pertes de charges seraient trop importantes si ce système devait être intégré aux avions.



FAP - Filtre à particules (Hillside Mechanical, 2014)
Certes, le filtre à poche et le filtre à manche couramment utilisés en usines pour les particules fines permettent respectivement de garder le débit et la vitesse d'entrée en sortie et d'être résistants. Mais le filtre à poche a l'inconvénient de prendre une place non

négligeable et le filtre à manche robuste est trop lourd.



Filter à poche (gauche) et filtre à manche (droite) (Rieco industries limited, 2023; l'Max, 2015)

Face à l'absence de solution technique adaptée à l'aviation, notre étude s'est finalement portée sur le cyclone, un filtre facile d'utilisation, nécessitant peu de maintenance, dont la vitesse de sortie des particules peut valoir au moins la vitesse d'entrée. Il est également facile et peu coûteux de construction, tout en étant en mesure de fonctionner dans une variété de conditions opératoires (e.g. à haute température et pression). De plus, il ne requiert aucune énergie, a une géométrie adaptable aux conditions d'utilisation et à la variété des modèles de moteurs, il n'a pas besoin d'apport extérieur, et peut être compact et léger. Les cyclones sont actuellement utilisés dans l'industrie mais également par plusieurs marques performantes d'aspirateurs.

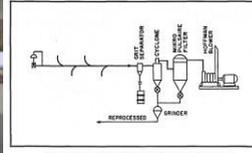
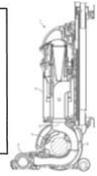
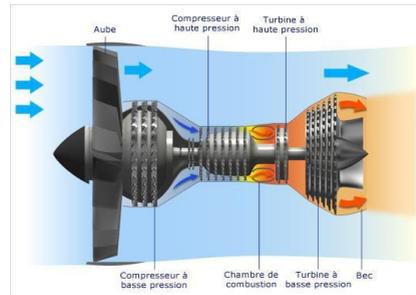


Fig. 11. Vacuum cleanup system in modern furnace black plant.



Cyclones utilisés industriellement et dans un aspirateur (G. Wan et al, 2008; Drogin, 2012; Brevet US10750916B2 Cyclonic separator)

Afin d'obtenir un cyclone adaptable à la majorité des avions, nous nous sommes basées sur le moteur CFM56, livré à plus de 33 000 exemplaires pour les deux grands avionneurs mondiaux, Airbus et Boeing.



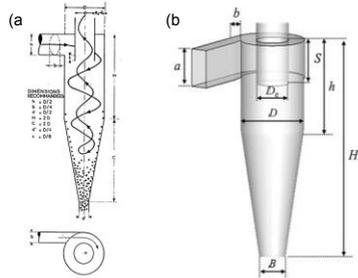
Moteur CFM56 (Olympus)

1. NOTRE PRODUIT : **REVOLU SMOG**, TRANSFORME LES ÉMISSIONS EN SOLUTIONS

REVOLU SMOG consiste en un filtre composé de cyclones, placé à la sortie du moteur de l'avion, - à la suite de la deuxième turbine - pour séparer le noir de carbone de l'air chaud sortant. C'est en effet à cet

emplacement qu'il apporte le moins de modifications au moteur. **REVOLU SMOG** opère après la récupération d'énergie par les turbines pour alimenter les pales des moteurs, source de 90% de la poussée (moteur LEAP). En effet, cette part importante provient de l'air accéléré en périphérie et non du fluide chaud provenant de la combustion. Bien que la perte de charge soit minimale, car les particules sont accélérées dans les cyclones, le filtre sera placé au point le moins impactant, également un endroit facile d'accès pour la récupération des particules et la maintenance. **REVOLU SMOG** est une solution flexible, qui s'adapte aux moteurs existants sans les modifier. En effet, le filtre à cyclones ne change en rien le fonctionnement du moteur, mais s'ajoute simplement au niveau de l'échappement de l'air. **REVOLU SMOG** peut donc se greffer à n'importe quel moteur standard déjà en activité comme neuf (par exemple le CFM56 ou le LEAP).

Un cyclone est un dispositif permettant de séparer mécaniquement les particules par la force centrifuge, la gravité et la friction. Sa forme et sa taille varient en fonction des conditions opératoires.



(a) Schéma de principe du fonctionnement du cyclone et (b) mise en évidence de variables de dimensionnement (lettres)

Les cyclones **REVOLU SMOG** ont d'abord été dimensionnés en fonction de la vitesse d'entrée, soit de la vitesse du fluide (de caractéristiques connues) sortant de la turbine.

$$V_{MEIV} = \frac{0.378\mu}{a_{50}^2 \rho_p e D^{0.5}} K_a^{1.4961} Der^{0.2253} b^{0.5} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{0.183} \times \sqrt{\left|\left(\frac{5}{7} - \frac{2}{7}\beta\right)^2 - e\right|}$$

Formule liant la vitesse d'entrée d'efficacité maximale (MEIV), la structure du cyclone (K_a, Der, b, D), la densité, viscosité, température du gaz, et des caractéristiques des particules (densité, diamètre, module d'élasticité, le ratio de Poisson, limite d'élasticité, coefficient de friction,...)(Q. Wei et al, 2019)

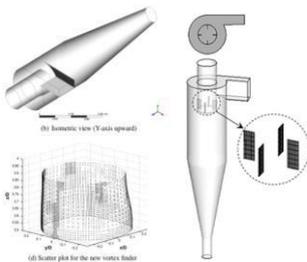
D'autres paramètres ont été intégrés pour garantir un rendement satisfaisant. Ont alors été étudiés la concentration des particules en entrée (forte concentration recherchée), le nombre de cyclones à la suite ou simultanés, le seuil de coupure (c'est à dire la plus petite taille de

particules séparées avec un rendement supérieur à 50%) variant avec la géométrie du cyclone ainsi que des caractéristiques du gaz et des particules.

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu b}{4\pi N v_i (\rho_p - \rho)}}$$

Calcul du seuil de coupure (Hashemi, 2006)

La forme et la taille de parties spécifiques du cyclone ont également un impact sur le rendement et la perte de charge, comme le nombre d'entrées, la proportion cylindre/cône (supérieur à 1 pour diminuer le seuil de coupure ainsi que la baisse de pression et augmenter le rendement), l'orientation de l'entrée du fluide, la forme des collecteurs de tourbillons, soit la sortie du gaz purifié, et les canaux multiples à l'intérieur du cyclone.



Collecteurs de tourbillons optimisés (K. Elsayed, 2015; Pei et al, 2017)



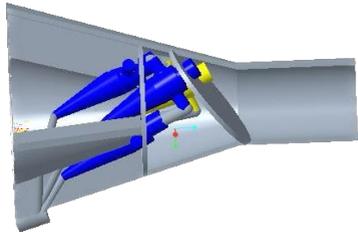
Exemple de canaux multiples (P. Baltrenas et al, 2015)

REVOLUSMOG comprend en conséquence quatre cyclones : deux en simultané et deux à la suite des premiers. Chaque cyclone possède deux entrées et la longueur de son cône sera supérieure à celle de son cylindre. La géométrie globale et la forme des collecteurs de tourbillons sera optimisée pour garantir un rendement maximal avec les conditions d'entrée et les caractéristiques du mélange gaz-particules fines (noir de carbone). La perte de charge ne sera que minimale, le gaz étant accéléré par la force centrifuge dans le cyclone (Stymer technologies), ce qui contre la perte de pression due au changement de direction et renvoie une vitesse de sortie des particules élevée, permettant de rééquilibrer une partie de la masse ajoutée.

Les particules une fois séparées seront stockées localement au niveau du moteur et l'espace de stockage sera vidé une fois l'avion au sol au moment du plein d'essence. Nous avons prévu un volume de stockage permettant une autonomie de 20h de vol, avec un espace de

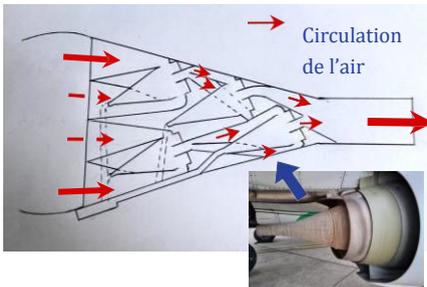
stockage de 1000 cm³ (dimensions prévues : rectangle de 5x10x20cm). Il sera également possible de choisir si l'air sortant de la turbine est filtré, pour prémunir de tout problème dans le cas où le réservoir plein ne pourrait être vidé. serait sans possibilité de vidage. Les employés chargés de récupérer le noir de carbone feront usage d'un tuyau liant l'espace de stockage a un camion chargé du transport et travailleront ainsi en toute sécurité. Ils ne seront pas en contact avec cette matière première et ne pourront donc pas respirer les particules.

Schéma permettant de comprendre le mouvement de l'air dans l'installation



Première modélisation 3D de **REVOLU SMOG**

NB : le clapet permettant de définir la direction de l'air sortant de la turbine (décider s'il sera filtré ou seulement évacué en périphérie du dispositif) n'est pas visible sur les deux figures ci-dessus.



I. MISE EN ŒUVRE ÉCONOMIQUE DE REVOLU SMOG

REVOLUSMOG est bien plus qu'un produit. C'est un service ancré dans un système économique complet, en lien avec tous les acteurs de l'aéronautique : les constructeurs, les propriétaires des avions et les aéroports. **REVOLU SMOG**

intègre en effet, au-delà de l'installation et de la maintenance du filtre, la collecte, la valorisation et la vente du noir de carbone en tant que matière première.

Greffer le filtre **REVOLU SMOG** aux moteurs d'avions permettra de diminuer l'impact

écologique de l'aviation, tout en en circulaire.
faisant un acteur majeur de l'économie

1. LA STRUCTURE ÉCONOMIQUE DE REVOLU SMOG

REVOLUSMOG peut ainsi se séparer en trois parties. Premièrement, l'installation du filtre à l'arrière des moteurs d'avions, comme exposé en deuxième partie. Vient ensuite la collecte des particules fines et donc du noir de carbone produit par la combustion du carburant. Cette étape comprend le transport de cette matière première vers un lieu de stockage. Enfin, il sera nécessaire de contrôler la qualité du produit récupéré pour le séparer des impuretés potentielles, comme les aérosols de sulfates, qui peuvent également être produits lors d'un vol. Le noir de carbone ainsi obtenu sera vendu sous forme de poudre aux acteurs du marché du noir de carbone.

Avant le lancement de l'activité, un brevet sera déposé sur la technologie **REVOLU SMOG**. Nous prévoyons ensuite de réaliser un partenariat avec les constructeurs de moteurs d'avions comme Safran, General Electric ou Rolls Royce et les assembleurs tels Airbus, Boeing pour produire la technologie **REVOLU SMOG** et qu'elle soit installée en standard à la sortie des moteurs.

En contrepartie, ils intégreront notre technologie à leurs avions comme option intégrée et nous partagerons les revenus de la vente du filtre. Cela nous permettra également de réduire le transport entre la production et l'installation à l'arrière des moteurs, ce qui diminue notre empreinte carbone.

Pour les nouveaux propriétaires des avions (compagnies aériennes, propriétaires privés, etc.), **REVOLU SMOG** prendra la forme d'un abonnement auxquels ils souscriront mensuellement, permettant de financer la collecte des particules fines dans les aéroports ainsi que la maintenance occasionnelle. Les propriétaires recevront ensuite un pourcentage des revenus de la vente du noir de carbone récolté par leur avion, la quantité produite étant mesurée par le nombre d'heures de vol et le type de moteur.

Une fois le noir de carbone acheminé dans des ateliers situés à proximité des gros aéroports, et après la transformation et le contrôle qualité, il sera vendu. Nous envisageons de réaliser des partenariats avec les principaux acteurs du marché du noir de carbone. On retrouve entre autres l'entreprise américaine Cabot Productions, qui met

l'accent sur l'innovation et le développement durable, Continental Carbon, qui met en avant une production propre et durable, Orion Engineered Carbons qui possède une filiale française, ou encore l'entreprise China Synthetic Rubber Corporation (CSRC) ou l'indienne Birla Carbons. Des partenariats directs avec des industriels seront également envisagés, comme les fabricants de pneus, qui pourraient apprécier de valoriser l'utilisation de noir de carbone recyclé dans leur stratégie marketing.

Ces entreprises possèdent en effet des filiales dans de nombreux pays, ce qui permettra de rester sur un circuit court, limitant le transport et donc l'impact carbone. Nous nous appuyons également sur leur base client, locaux et déjà fidélisés. La vente de noir de carbone provenant de l'économie circulaire est de plus différenciante et donc attractive pour les clients dans un contexte de recherche de soutenabilité.

REVLUSMOG s'implantera d'abord dans de grands aéroports, ainsi que sur des vols courts et moyen-courriers, avant de s'étendre à l'entièreté du réseau.

2. LA LOGISTIQUE **REVLUSMOG**

Une fois le stockage local plein, il est nécessaire de le vider pour garantir un fonctionnement adéquat du filtre. Pour continuer à rendre ce filtre facile

d'utilisation et ne pas imposer de contraintes aux entreprises, **REVLUSMOG** réalisera un partenariat avec les aéroports, pour que les employés chargés du plein d'essence se chargent de la récolte du noir de carbone. **REVLUSMOG** se chargera de la formation du personnel. Nous prévoyons de vider l'espace de stockage toutes les 20h de vol environ afin de respecter les durées des vols les plus longs, sauf en cas d'impossibilité de vidage ultérieur.

En 1h de vol, 0.1 kg de particules fines de suie, c'est à dire de noir de carbone, sont émises en moyenne pour 2700 kg de kérosène, selon les données du moteur CFM56.



Flux entrants et sortants du moteur CFM56-7b
(Dossier noir du transport aérien, 2015).

Or, le noir de carbone a une masse volumique de 2 g/cm³. En conséquence, nous obtenons un volume de 50 cm³ par heure de vol, qu'il s'agit de stocker. Le vol direct le plus long dans le monde est actuellement le vol New-York - Singapour de 5 330 km qui dure exactement 18

heures et 40 minutes. Le secteur de l'aviation étant en plein essor, les durées de vol ne seront qu'optimisées avec le temps. Nous avons pour volonté d'ajouter le minimum de masse à l'avion tout en garantissant une logistique et maintenance non contraignante, le vidage des filtres s'effectuera donc au bout de 20h de vol. Durant le plein d'essence, généralement effectué après chaque vol pendant au moins 30 minutes, le vidage du noir de carbone pourra alors être effectué. La boîte de stockage se vide très facilement dans une autre par système d'aspiration, permettant aux employés d'effectuer les manœuvres avec aisance, également à l'aide des véhicules utilitaires confiés lors d'une collaboration avec l'aéroport. Le noir de carbone sera ainsi transféré dans un camion-citerne qui, lorsque plein, acheminera la matière première vers les centres dédiés. Les employés auront également accès aux données des vols et pourront anticiper les besoins en maintenance des avions.

L'avantage du filtre de cyclones **REVOLU SMOG** est qu'il nécessite peu de maintenance. Un avion vole en moyenne 8h par jour ce qui demande de faire vider le filtre tous les 3 jours. Un camion-citerne de faible volume, déchargeant par aspiration toutes les deux semaines, suffira aux aéroports pour faire les transits des pulvérulents avec le lieu de

transformation. Dans l'aéroport de Dubaï International (DXB) qui est principalement un hub pour les vols internationaux, par exemple.

approximativement 7500 vols sont effectués par semaine. Or, environ 92% des vols sont internationaux et durent 7h en moyenne. Ceci permet d'estimer $(0,92 \times 7 + 0,08 \times 1) \times 7500 \times 0,1g = 4890 \text{ kg}$ c'est-à-dire 2,445 m³ de particules fines récupérés par semaine. Tout aéroport partenaire **REVOLU SMOG** sera en mesure de récupérer le noir de carbone. Le pilote sera également formé pour désactiver le filtre au cas où le stockage serait plein et la récupération impossible, ou bien qu'un problème survienne au niveau du filtre, qui opère dans des conditions extrêmes de température et pression. Le lien entre le cockpit et le filtre est effectué par un système composé d'un actionneur électromécanique robuste combiné avec un système de surveillance des niveaux de remplissage et une interface utilisateur intuitive dans le cockpit.

La maintenance du filtre en tant que tel n'est pas nécessaire sur de courtes périodes et nous effectuerons un test technique au moment de la visite de maintenance (A-check), soit tous les 1-2 mois ou les 500 heures de vol environ.

3. PRÉVISION FINANCIÈRE

La pérennité financière de **REVOLU SMOG** sera assurée par le montant d'abonnement à la charge des propriétaires d'avion couvrant les frais de collecte et de valorisation du noir de carbone, net de la rétribution de la vente du noir de carbone.

Le business case de **REVOLU SMOG** prévoit des frais de formation du personnel d'aéroport pour le protocole de collecte des particules, des frais de transport et de stockage, le contrôle qualité et la mise aux spécifications du noir de carbone, ainsi que des frais administratifs et commerciaux pour la mise en œuvre des partenariats et la rétrocession d'une partie du produit des ventes de noir de carbone aux propriétaires d'avion, en fonction de leur contribution aux volumes vendus. L'évaluation des montants d'abonnement reste à effectuer, mais nous veillerons à maintenir dans la start-up des coûts inférieurs aux recettes.

Le nombre d'avions en activité s'élevait en 2020 à 22 880 appareils et prévoit d'augmenter jusqu'à 46 560 avions d'ici 2042 (Airbus). Grâce à ces données, une croissance de vols journaliers d'environ 3,2% par an a pu être estimée. Le nombre d'avions équipés dépend de beaucoup de facteurs, notamment de nos

capacités de production, de la fluidité de la récupération du noir de carbone et sa purification, ainsi que l'achat de notre filtre par les acquéreurs d'avions. Nous prévoyons cependant une croissance relativement importante de la demande, car le contexte écologique, social et le marché du noir de carbone sont porteurs.

Le marché du noir de carbone est en effet en pleine croissance, et prévoit d'augmenter de 5,75% pendant les 5 prochaines années(2024-2029).

Un moteur d'avion produit 100g de noir de carbone par heure. Si nous équipons tous les avions en activité, cela permettrait de récupérer 27 191 tonnes de noir de carbone sur l'année 2042 (0,1 kg x 2 moteurs x 46 560 avions en activité x 8h par jour x 365 jours). Le prix en 2015 du noir de carbone s'élevait en moyenne de 1,96\$/kg. Pour nos estimations, nous prendrons ainsi un prix fixe de 2 \$/kg. Si tous les avions étaient équipés en **REVOLU SMOG**, 54,4 millions de \$/an de chiffre d'affaires issu de la vente du noir de carbone serait atteignable. Quelques données prévisionnelles sont récapitulées dans le tableau suivant. Il est important de noter que les estimations devront être ajustées avec le rendement exact du filtre ainsi que le prix réel du noir de carbone, qui pourrait fluctuer au cours des années à venir.

	2026	2027	2030	2035	2040
Vols journaliers	27 800	28 700	31 600	37 200	43 700
Avions équipés	500	1 400	4 000	12 000	22 000
% flotte	2	5	13	32	50
Noir de carbone récupéré (kg)	292 000	817 600	2 336 000	7 008 000	12 848 000
Chiffre d'affaire (€)	584 000	1 635 200	4 672 000	14 016 000	25 696 000
Profit Brut (30%) (€)	175 200	490 560	1 401 600	4 204 800	7 708 800
Profit Net (10%) (€)	58 400	163 520	467 200	1 401 600	2 569 600

Tableau prévisionnel financier de RevoluSmog

Les coûts comprendront tout d'abord la rétrocession d'un pourcentage du produit des ventes aux propriétaires des avions ainsi que les frais fixes de **REVOLU SMOG**, notamment les coûts de Recherche et Développement. L'abonnement versé par les propriétaires des avions couvrira les frais variables de collecte dont la rémunération du personnel d'aéroport et le contrôle qualité. Nous affinerons notre modèle avec par exemple les hypothèses suivantes : des coûts de production du filtre, en acier inoxydable 316 d'un coût de 4€/ kg, les ingénieurs et techniciens compétents dans la production et la maintenance de notre filtre ainsi que la purification du noir de carbone, payés aux environs de 45000€/an en moyenne. Les employés de terrain et les conducteurs de camion-citerne, payés aux alentours de 25 000€/an également, ajustable en fonction des zones géographiques ou du coût des prestataires. Seront également compris le matériel et les appareils nécessaires au contrôle et purification du noir de carbone ainsi que les locaux associés.

Nous gardons une enveloppe pour la Recherche et Développement, la comptabilité et les frais annexes comme les frais généraux ou l'hébergement d'un site web (serveur, nom de domaine...).

4. RÉFLEXIONS COMPLÉMENTAIRES

La réussite de **REVOLU SMOG** sera mesurée par la quantité de particules fines récupérées, signe de l'impact réel sur la soutenabilité de l'aviation. La satisfaction des différents partenaires et clients sera un indicateur clé. La part du chiffre d'affaires allouée à la Recherche et Développement, indispensable pour par exemple poursuivre les optimisations de

REVOLU SMOG en termes de géométrie du filtre, de légèreté, et d'adaptabilité notamment aux moteurs en développement, sera également gage de réussite.

Des tests complémentaires sur la perte de charge pour veiller au maintien de la performance des appareils devront également être réalisés. Ces tests et recherches s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue en lien avec les transformations du secteur aéronautique, comme par exemple les SAF.

L'arrivée des SAF sur le marché du carburant aéronautique ne sera pas une menace pour **REVOLU SMOG**. En effet, les SAF rejettent également des particules fines

et cette vocation de réduire leurs émissions sera toujours d'actualité. Nous devons cependant adapter la transformation ultérieurement, car la composition de la matière première peut avoir quelque peu changée (en concentration de sulfate par exemple).

Le futur de **REVOLU SMOG** s'annonce prometteur, porté par la demande d'une aéronautique propre et d'un marché du noir de carbone important et en croissance. Les normes de plus en plus restrictives sur la pollution aérienne

renforcent l'intérêt de la solution. La limite d'émission annuelle de particules fines est aujourd'hui fixée à $15 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ selon l'organisation mondiale de la santé (OMS), mais ce seuil est prévu de baisser dans le futur. La perte de matière première qui pourrait survenir par l'incorporation des SAF ou d'avions électriques et à hydrogène sera donc contrée par une augmentation du nombre d'avions équipés, ainsi que des unités de traitement postérieur plus efficaces.

CONCLUSION

REVOLU SMOG se positionne comme un accélérateur vertueux de la décarbonation de l'aérien. Les traînées de condensation causées par le noir de carbone ne seront plus sources de pollution mais de valeur au travers d'un objectif commun de récupération et de valorisation des particules de carbone.

Au sein d'une économie circulaire, **REVOLU SMOG** transforme le noir de carbone en une matière première revendable, en le récupérant sans maintenance complexe ou danger d'inhalation. Il permet ainsi à l'aviation de limiter son impact écologique et sanitaire, en offrant un produit adaptable sur des moteurs neufs comme usagés, compatible avec les carburants SAF, ainsi qu'un service

efficace pour ses clients et partenaires (fabricants, aéroports, compagnies aériennes,...).

Le secteur de la défense, bien que n'étant pas un client ciblé en priorité, pourrait être intéressé par **REVOLU SMOG**. En effet, les traînées de condensation sont un désavantage conséquent dans les missions de furtivité et la filtration du noir de carbone permettrait de moins se faire remarquer.

L'ensemble des traînées de condensation ne seront cependant pas supprimées, certains nuages provenant de la différence de température entre l'air chaud sortant du moteur et l'air froid de l'atmosphère.

BIBLIOGRAPHI

E

- 10 Crucial Factors in Selecting Filter Bags for Your Air Dust Separation - Rieco, n.d. URL <https://www.rieco.com/blog/10-crucial-factors-in-selecting-filter-bags-for-your-air-dust-separation.php>
- Aérodynamisme : contrôler l'air pour voler plus sobre, n.d. . Polytechnique Insights. URL <https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/planete/aviation-decarbonee/controler-lair-pour-voler-plus-efficacement/>
- Aernewstw, 2022. Au-delà de cette vitesse, un avion doit décoller quoi qu'il arrive. Capital.fr. URL <https://www.capital.fr/economie-politique/au-dela-de-cette-vitesse-un-avion-doit-decoller-quoi-quil-arrive-1444771>
- Airbus Global Market Forecast 2023. Analyse de la taille et de la part du marché du noir de carbone – Tendances de croissance et prévisions (2024-2029), <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/carbon-black-market>
- Astrosurf, n.d. Météorologie élémentaire - Les traînées de condensation.
- Azadi, Mehdi, Azadi, Mohsen, Mohebbi, A., 2010. A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters. Journal of Hazardous Materials 182, 835–841, <https://doi.org/10.1016/j.ihazmat.2010.06.115>
- Azadi, Mohsen, Azadi, Mehdi, 2012a. An analytical study of the effect of inlet velocity on the cyclone performance using mathematical models. Powder Technology 217, 121–127, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.017>
- Baltėrnas, P., Vaitiekūnas, P., Jakštonienė, I., Konoverskytė, S., 2012. Study of Gas–Solid Flow in a Multichannel Cyclone. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management 20, 129–137. <https://doi.org/10.3846/16486897.2011.645825>
- BM catalysts, 2023. How does exhaust diesel particules filter (DFP) work?
- Carbon Black, Imerys. <https://www.imerys.com/fr/mineraux/carbon-black>
- Cardona, N., Campuzano, F., Betancur, M., Jaramillo, L., Martínez, J.D., 2018. Possibilities of carbon black recovery from waste tyre pyrolysis to be used as additive in rubber goods -a review-. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 437, 012012, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/437/1/012012>
- CFD Cyclone Simulation, 2014. CFD-DEM simulation of gas cyclone separator (effect of solid flow rate).wmv, 2010.
- CFM International CFM56, n.d. URL <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/ffans/cfm56.html>.
- CFM56-7 Détail du fonctionnement, n.d. https://avia.superforum.fr/t2169-cfm56-7-detail-du-fonctionnement#google_vignette .
- Chen, Jihe, Jiang, Z., Chen, Jushi, 2018. Effect of Inlet Air Volumetric Flow Rate on the Performance of a Two-Stage Cyclone Separator. ACS Omega 3, 13219–13226, <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02043>
- Chiambaretto, 2019. Trafic aérien mondial, une croissance fulgurante pas prête de s'arrêter, the Conversation..
- Cortés, C., Gil, A., 2007. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. Progress in Energy and Combustion Science 33, 409–452, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
- Drogin, I., 1968. Carbon Black. Journal of the Air Pollution Control Association 18, 216–228, <https://doi.org/10.1080/00022470.1968.10469118>
- Dyson, J., Crouch, J.W., Robertson, J.S., Gammack, P.D., Ireland, S.E., 2020. Cyclonic separator. US10750916B2.
- Elsayed, K., 2015. Design of a novel gas cyclone vortex finder using the adjoint method. Separation and Purification Technology 142, 274–286, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.010>
- Feng, J., Chen, W., Wang, L., Peng, X., 2020. Separation performance of new type of multi-stage axial cyclone used as demister in power plant emission system. Journal of Dispersion Science and Technology 41, 1643–1656, <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1634584>
- Garric, A., 2013. Tout comprendre à la pollution de l'air aux particules fines, Lemonde.
- Hashemi, S. b., 2006. A Mathematical Model to Compare the Efficiency of Cyclones. Chemical Engineering & Technology 29, 1444–1454, <https://doi.org/10.1002/ceat.200600217>
- Hendricks, J., Kärcher, B., Lohmann, U., Ponater, M., 2005. Do aircraft black carbon emissions affect cirrus clouds on the

- global scale? *Geophysical Research Letters* 32.
<https://doi.org/10.1029/2005GL022740>
- Hsiao, T.-C., Huang, S.-H., Hsu, C.-W., Chen, C.-C., Chang, P.-K., 2015. Effects of the geometric configuration on cyclone performance. *Journal of Aerosol Science* 86, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.03.005>
- Humans, I.W.G. on the E. of C.R. to, 1996. Carbon Black, in: *Printing Processes and Printing Inks, Carbon Black and Some Nitro Compounds*. International Agency for Research on Cancer.
- Johnson, P.H., 1981. Waste heat recovery.
- Khoudja et Ziadi-Chibane, 2017. Etude des performances d'un turboréacteur double Elux CFM56-7b. *La propulsion* 10, n.d. URL
<https://accrodavion.be/Accrodavions/lapropulsion10.html>.
- Lapple, C.E., 1950. Gravity and Centrifugal Separation. *American Industrial Hygiene Association Quarterly*,
<https://doi.org/10.1080/00968205009344283>
- Le black carbon, qu'est ce que c'est ?, 2022.
- Marinuc, M., Rus, F., 2011. Effect of Particle Size and Input Velocity on Cyclone Separation Process. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering* 117–122.
- Maugendre, M., n.d. Etude des particules de suie dans les flammes de kérosène et de diester.
- Nassaj, O.R., Toghraie, D., Afrand, M., 2019. Effects of multi inlet guide channels on the performance of a cyclone separator. *Powder Technology* 356, 353–372.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.038>
- NOIR CARBONE, n.d. . Ataman Kimya. URL
https://www.atamanchemicals.com/carbon-black_u26262/?lang=FR.
- Pandey, S., Brar, L.S., 2022. On the performance of cyclone separators with different shapes of the conical section using CFD. *Powder Technology* 407, 117629.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117629>
- Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X., Wang, B., 2017. The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator. *Powder Technology* 313, 135–144.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.066>
- Peut-on aspirer le CO2 pour sauver le climat ?, 2023.
- Planetoscope, n.d. Statistiques vols d'avions dans le monde.
- Sakin, A., Karagoz, I., Avci, A., 2019. Performance analysis of axial and reverse flow cyclone separators. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 144, 107630, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107630>
- Service Public, 2023. *Trafic aérien - Certains vols intérieurs de courte durée supprimés*
- Shopin, V.M., 2014. Separation of the desired product from aerosol flows in the manufacture of carbon black (a review). *Solid Fuel Chem.* 48, 180–197.
<https://doi.org/10.3103/S0361521914030094>
- Specifications of the axial-flow low-pressure turbine (LPT)., n.d. URL https://www.researchgate.net/figure/Specifications-of-the-axial-flow-low-pressure-turbine-LPT_tbl2_336438949
- statista Daily Data; Infographie: Transport aérien : vers un record de passagers en 2024 ?
- Stymer technologies, 2020. *CFD of Cyclone separator- Animation | Computational Fluid Dynamics #cfd*.
- Vaitiekūnas, P., Petraitis, E., Venslovas, A., Chlebnikovas, A., 2014. AIR STREAM VELOCITY MODELLING IN MULTICHANNEL SPIRAL CYCLONE SEPARATOR. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND LANDSCAPE MANAGEMENT* 22, 183–193.
<https://doi.org/10.3846/16486897.2014.931283>
- Wan, G., Sun, G., Xue, X., Shi, M., 2008. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology, Selected papers from the UK-China Particle Technology Forum; Leeds UK, 1-3 April 2007* 183, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.019>
- Wang, C., Ma, Y., Sui, W., 2023. The Secondary Flows in a Cyclone Separator: A Review. *Processes* 11, 2935.
<https://doi.org/10.3390/pr11102935>
- Wei, Q., Sun, G., Yang, J., 2019. A model for prediction of maximum-efficiency inlet velocity in a gas-solid cyclone separator. *Chemical Engineering Science* 204, 287–297.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.03.054>
- Zhang, P., Chen, G., Duan, J., Wang, W., 2019. Experimental evaluation of separation performance of fine particles of circulatory circumfluent cyclone separator system. *Separation and Purification Technology* 210, 231–235.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.008>
- Zhao, B., Wang, D., Su, Y., 2019. Performance improvement of cyclone separator by integrated compact bends. *Powder Technology* 353, 64–71.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.004>



Akinori FURUKAWA

Institute of Science Tokyo

Born in Tokyo, Japan, I am currently a second-year master's student in Mechanical Engineering at the Institute of Science Tokyo, formerly known as Tokyo Institute of Technology. I completed a one-year exchange program at ETH Zurich in Switzerland, where I learned about the USAIRE Student Award in my Basics of Air Transport class. Since childhood, I have been interested in airplanes, which inspired me to study mechanical engineering in university. In my laboratory research, I am working on non-destructive testing for CFRP, a material widely used in modern aircraft. Participating in the USAIRE Student Award was a truly rewarding experience, and I am grateful to everyone who helped us achieve this honor.



Yi LI

Purdue University

I am a passionate and resilient lifelong learner with a deep curiosity that drives me to explore diverse fields. Throughout my life, I have embraced various roles—from performing in piano recitals to competing as a varsity tennis player, and creating content on soccer tactics. In each pursuit, I strive for excellence, seeking to understand the core of each discipline and uncover connections across fields. This multidisciplinary mindset enables me to bring creative insights to the team. Currently, I am a senior undergraduate in Electrical and Computer Engineering at Purdue University Honors College. Alongside my studies, I trained as a private pilot at Purdue Aviation, accumulating hundreds of flight hours. Last year, I completed an exchange program at ETH Zurich, where I focused on advanced topics in Computer Science, with an emphasis on Artificial Intelligence. In the USAIRE project, I combined my experiences as a pilot, engineer, and researcher to develop AVENIR, a proposed framework for future Air Traffic Management.



AVENIR
- SMART SKIES, SEAMLESS FLIGHTS. -



USAIRE
ACADÉMIE BUSINESS 2024

ARTIFICIAL-INTELLIGENCE-ASSISTED

AIR TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM

USAIRE STUDENT AWARDS 2024

A Vision of AVENIR

On an early morning in 2040, American airliner N42TT had just crossed the Atlantic Ocean and was now approaching its destination, Paris Charles de Gaulle Airport.

200 nautical miles from the French coastline, AVENIR, the Artificial-Intelligence-Assisted Air Traffic Management system, detected the aircraft through radar. After verifying its identity, an individualized landing sequence was initialized automatically.

In the cockpit of N42TT, Captain Kirk and First Officer Spoke heard a clear, machine-generated voice: "N42TT, this is your personal approach assistance program. You are about to enter French airspace. Please set the radio communication language on the ACARS."

First Officer Spoke entered "ENG" on the ACARS Control Display Unit. A few seconds later, a standard, calm English voice broadcasted again: "N42TT, CRNA, flight level 350, expect entry into French airspace at 1532Z, expect landing on runway 26R, descend to flight level 240, report upon reaching."

Captain Kirk repeated, "CRNA, N42TT, descending to flight level 240, runway 26R, N42TT."

"Readback correct."

Everything returned to silence. Looking at the dense data points on the TCAS radar, Captain Kirk, with decades of flying experience, couldn't help but recall the busy times in the past when everyone's nerves were highly strung and pilots competed for tower instructions on the same frequency. Now, AVENIR allows each pilot to receive only the relative information they need. Interference and misunderstandings have been greatly reduced. Flying has never been such an enjoyable experience.

N42TT descended smoothly as Captain Kirk scrupulously followed the instructions from the personal landing assistance program. The globally deployed AVENIR network, like a surgical knife, dynamically carved out the most optimized flight route for each aircraft.

The airplane entered the final approach phase without any delay. It smoothly approached the runway, pierced lightly through the fog, and gradually descended until the wheels touched down gently with a low rumble.

As N42TT landed, the sun slowly appeared from the horizon. Ahead, the future awaited.

The story above envisions the interaction between pilots and the Artificial-Intelligence-Assisted Air Traffic Management (AI-ATM) system AVENIR in 2040. The system utilizes state-of-the-art technologies and innovative work procedures to refine airport and airspace operational safety and efficiency, reduce staff workload, and promote environmental sustainability.

Background and Related Work

The foundational elements of ATM systems were established in the mid-20th century, a period marked by the rapid expansion of commercial aviation. The essential components of ATM systems are Air Traffic Control (ATC), Airspace Management, and Flow Control (See Fig.1). ATC is responsible for the safe and orderly movement of aircraft throughout all phases of flight. Airspace Management optimizes the allocation and usage of airspace resources for various traffic types. Flow Control regulates the volume of air traffic to ensure efficient operations without congestion.

Challenges Faced by the Air Industry

Today, the air traffic volume is further increasing. Projections indicate that passenger and cargo traffic will more than double in the next 20 years, with an annual growth rate of approximately 3.6% in developed markets like the USA and Europe. This growth is expected to be even more pronounced in developing regions, such as Asia Pacific and the Middle East [1].

A study, which reviewed 20,174 incident reports from 2000 to 2022, identified human factors, including lapses in attention and memory, as primary causes of ATC-related incidents [2]. Research suggests that the human brain can effectively track only 3-4 items at a time [3], while an individual air traffic controller may need to manage up to 20 aircraft during peak times simultaneously [4]. This cognitive overload is expected to worsen by 2040 as air traffic volume continues to grow.

Unlike ATC, airspace management and flow control may not directly cause severe incidents. However, inefficiencies within these subsystems indirectly affect flight safety, often leading to increased operational costs and higher carbon emissions for airlines and airports. For instance, airspace congestion frequently necessitates holding patterns, where aircraft fly racetrack-shaped loops at non-optimal speeds and altitudes, consuming up to 25% more fuel than during optimal flight operations [5]. The additional time spent in holding patterns also contributes to subsequent flight delays, leading

to passenger dissatisfaction and potential airline revenue loss.

Challenges of Current Intelligent ATM Systems

Countries and enterprises have been exploring the modernization of ATM systems over the past two decades. For example, SESAR aims to define, develop, and deploy what is needed to increase ATM performance and build Europe's intelligent air transport system [6]. NASA's eXploration (ATM-X) Project focuses on integrating emerging air vehicles, such as VTOL (vertical take-off and landing) and UAV (unmanned aerial vehicles), into the air traffic ecosystem [7]. Additionally, Aimee, an Artificial Intelligence (AI) platform used at airports like London Heathrow, employs neural networks to detect and manage aircraft and airfield objects, showcasing AI's practical applications in modern ATM systems [8].

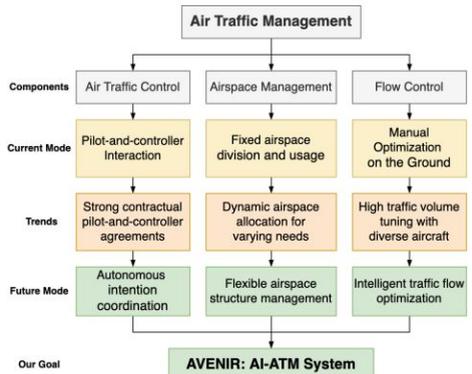


Fig. 1: ATM Function Structure and Trends

Hindrances to ATM modernization include various limitations. Firstly, the inherent complexity of ATM systems, composed of vast heterogeneous data types from multiple ends, complicates the integration of new technologies. Secondly, the available optimization algorithms and mechanisms for intelligent ATM systems always come with drawbacks and tradeoffs. Moreover, rigorous testing and validation of new technologies to ensure safety and reliability is a

time-consuming and resource-intensive process. Last but not least, modernization requires substantial funding and aligning interests among various stakeholders. In other words, in most cases, adopting new technology will prompt investment and change only if it demonstrates substantial advantages and urgencies.

Since 2017, AI has experienced another significant technological breakthrough [9]. It paves the way for the development of new-generation AI-ATM systems that can potentially address the aforementioned challenges in the aviation industry.

Project Overview - What Is AVENIR?

AVENIR is an artificial-intelligence-assisted air traffic management system characterized by its **A**daptive, **V**isionary, **E**co-friendly, **N**etworked, **I**ntelligent, and **R**esilient features. The system utilizes the Decision Transformer neural network

with a creative workflow to continuously generate and optimize ATM decisions. The system architecture and workflow of AVENIR are shown in Fig.2.

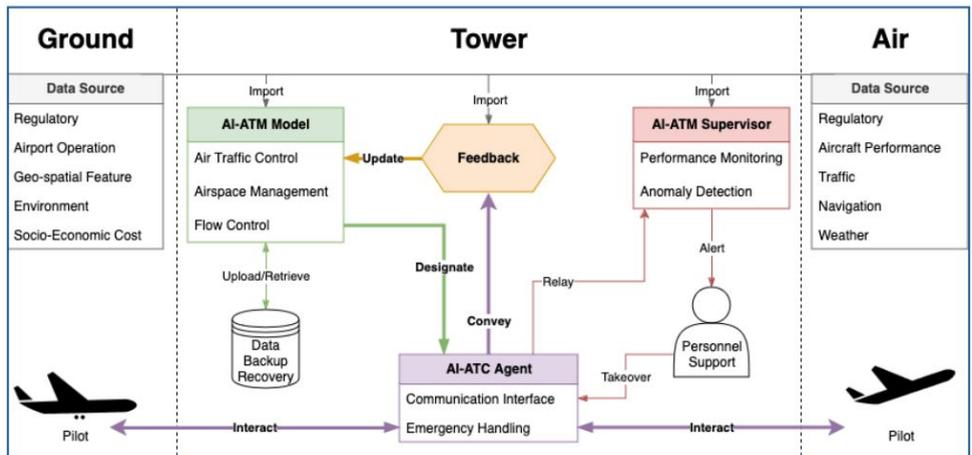


Fig. 2 System Architecture and Workflow of AVENIR

AI-ATM Model and Feedback Mechanism

The AI-ATM model functions as the central brain of the system, employing a pre-trained Decision Transformer neural network model. In practice, it gathers data from ground and air sources, such as flight paths and wind directions, to dynamically generate and optimize decisions and plans for ATC, airspace management, and flow control.

All instructions issued by the AI-ATM model are conveyed to the Feedback Mechanism, where they are assessed against more broadly defined criteria and benchmarks, identifying any

discrepancies and areas for improvement. This analysis feeds back into the AI-ATM module, allowing for ongoing refinement of its algorithms and decision-making processes.

AI-ATC Agents

AI-ATC agents, incorporated with a fine-tuned Natural Language (NLP) Model, serve as a communication bridge between pilots and the AI-ATM model. A dedicated AI-ATC agent with selectable natural language options instructs each aircraft within the airspace dynamically. Upon receiving distress or warning signals, the Emergency Handling function within the AI-ATC

Agent module promptly notifies the human ATC personnel to collaborate and determine the best solutions.

AI-ATM Supervisor

Decisions made by the AI-ATM model are first passed on to the AI-ATC agents. Then, the AI-ATM supervisor monitors and evaluates all the decisions based on established regulations and rules before they are transmitted to the pilots. Once abnormal decisions have been detected, human controllers will take over the AI-ATM system without delay.

System Architecture - How AVENIR Works?

While many people today believe that Artificial Intelligence (AI) can solve nearly any problem, it is crucial to understand its capabilities and limitations. This section will provide detailed technical insights into AVENIR.

AI-ATM Model and Feedback Mechanism

Air traffic data are inherently sequential, including time series information such as flight paths, airspeed, altitude, and other changing metrics. Identifying temporal dependencies and patterns within data in real-time and updating predictions and decisions accordingly is crucial for optimizing air traffic management.

We utilized the Transformer model, a neural network architecture introduced in 2017, which preserves the sequential data processing capabilities of traditional RNNs (Recurrent Neural Network) and their variants, such as LSTMs (Long-Short-Term Memory), that were commonly used in earlier ATM implementations.

Unlike RNNs, which process data sequentially and face challenges with vanishing gradients in long sequences, the Transformer model leverages a Self-Attention mechanism that allows parallel data processing. This approach allows the model to weigh the importance of different inputs simultaneously, enhancing learning efficiency and providing a deeper understanding of complex relationships within the data.

Safety Mechanism

Regardless of how rapidly technology advances, safety is always the first priority. In addition to the emergency handling and anomaly detection functions, we have also designed a real-time backup mechanism. If the supervisor module detects a biased decision that deviates from the standard and preset guidelines, the data backup and recovery module swiftly reverts the system to a previous stable version. Concurrently, human intervention is immediately applied as the AI-ATM system undergoes diagnosis and re-evaluation.

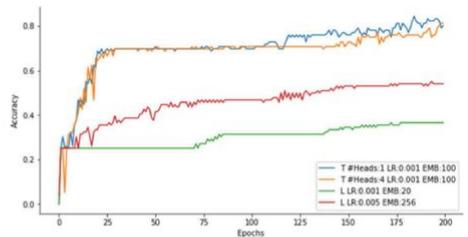


Fig. 3: Transformer-based vs. LSTM-based models performance comparison [10]

Fig. 3 compares the Transformer-based (blue and orange curves) model performance with LSTM-based (green and red curves). The accuracies of transformer-based models are significantly better than LSTM-based models.

We introduce the reinforcement Learning (RL) process to boost the Transformer's effectiveness further. RL is a technique where the model learns to make decisions by interacting with an environment, receiving feedback in the form of rewards or penalties, and adjusting its actions to maximize cumulative rewards. The model's actions are based on the environment's current state, representing all relevant information needed to make an informed decision.

Such an integrated architecture embedded in AVENIR is called a Decision Transformer [11]. The core innovation of the Decision Transformer lies in using the Transformer's attention

mechanism to model the sequence of past states, actions, and rewards. This allows the system to learn the dependencies and relationships across these sequences, thereby predicting future actions more effectively.

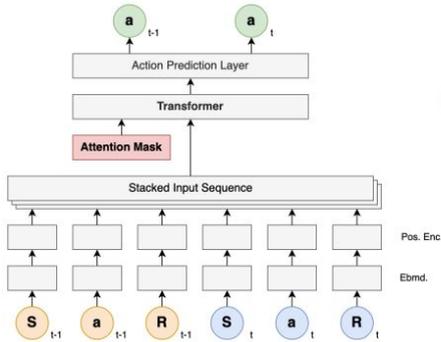


Fig. 4a Decision Transformer Flow Diagram

Fig. 4a depicts the Decision Transformer architecture and illustrates the data flow and processing at each time step during the training of the AI-ATM model. "Action (a)" refers to decisions like route adjustments and delay advisories, while "State (S)" represents ground and air data such as flight positions and weather conditions. The "Expected Reward (R)" is a function designed to optimize safety and efficiency, taking into account metrics like aircraft spacing and fuel consumption.

At each timestep, the model integrates the previous timestep's AI-ATM decisions, simulation airport environment data, and reward function value with the current timestep's decisions, environmental data, and corresponding reward value. These inputs are converted into modality-specific embeddings and enhanced with positional encodings. The transformer model then processes these embeddings, using autoregressive modeling and Self-Attention mechanisms, to predict the optimal decision the AI-ATM model should make for the current timestep. The predicted optimal decision, along with the current environment data and reward value, are then fed into the next timestep as the previous timestep's action. As time progresses, the AI-ATM gradually optimizes its decisions in

air traffic management, which may even surpass human expert experience.

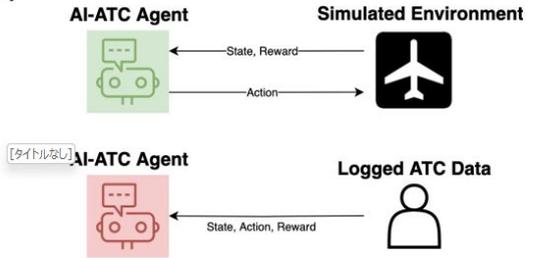


Fig. 4b Online (top) and Offline (bottom) Reinforcement Learning

Fig. 4b outlines two training methodologies for the Decision Transformer model. The top diagram illustrates online RL, where the AI-ATM model makes decisions (action) based on the air and ground data (state) in the current timestep and receives feedback (reward) in the form of rewards or penalties based on its decisions. The feedback helps the agent understand which actions lead to positive outcomes. Over time, the AI-ATM model adjusts its strategy to maximize cumulative rewards, refining its decision-making policy through repeated trials and updating its learning parameters.

The bottom diagram depicts offline RL, which trains the AI-ATM model using a pre-collected dataset of human ATC decisions and associated data without direct environment interaction. The latter is useful when direct simulation is impractical or costly. However, offline RL faces the challenge of the counterfactual query problem, where the model encounters situations not covered in the dataset, limiting its ability to learn practical actions.

The offline RL helps the AI establish a baseline understanding of decision-making processes and refine reward functions. Following this, the system transitions to online RL within a simulation environment, where the model interacts with a simulated air traffic setting that replicates real-world conditions. Consequently, the AI-ATM model integrates data from various air and ground sources to efficiently generate

optimal decisions for managing traffic and airspace.

AI-ATC Agents

The primary role of AI-ATC agents is to facilitate smooth communication between pilots and the AI-ATM model. AI-ATC agents translate the AI-ATM's instructions from machine language to human language and convey pilots' responses back to the AI-ATM model in machine language. We will use existing NLP models as a foundation and fine-tune them with labeled data from actual tower-pilot communication recordings. This method will enhance AI-ATC agents' recognition accuracy and contextual understanding while assisting pilots. The fine-tuning process will involve training the models on a variety of communication scenarios, including jargon, different accents, speech patterns, and dialects, to ensure robustness and adaptability in various operational environments.

AI-ATM Supervisor

Our AI-ATM module is designed to offer innovative and adaptive solutions for managing ambiguous and complex air traffic scenarios. Complementing this flexible capability is the AI-ATM Supervisor module, which provides a rule-based, deterministic layer of oversight. The supervisor module ensures that all proposed actions by the AI-ATM adhere to established safety protocols and regulatory standards, preventing any actions that could compromise safety or violate regulations.

As air traffic regulations and safety standards evolve, it is essential to continually update the supervisor module's rule set. This ongoing maintenance requires an efficient process to incorporate regulatory changes and keep the rule set relevant and comprehensive.

Infrastructure Requirements

During the model training phase, we propose to apply for high-performance computing resources such as CSCS: Swiss National Supercomputing Centre, which is highly specialized and renowned for its capabilities in parallel computing.

To develop a suitable simulation environment for online RL, we can deploy AVENIR in existing

simulators currently used in human ATC training, such as ATCoach [12] (FAA recommended) or ESCAPE [13] (EUROCONTROL recommended). While these simulators provide a solid foundation, modifications may be necessary to tailor the training scenarios to our specific requirements, ensuring that the AI-ATM system can handle a wide range of real-world situations.

During the technical validation process stage, cloud-based solutions can be utilized for data storage and real-time computing. However, as the system transits to larger-scale deployment, we highly recommend establishing dedicated computing centers at major airports. This setup will reduce latency and enhance cybersecurity measures, providing a more secure and responsive system for real-time data processing.

For voice communication interaction between AI-ATC agents and pilots, our system will primarily use existing VHF (Very High Frequency) radio and ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System). The reliability of machine-generated broadcasts via VHF has been well-established through systems like ATIS (Automatic Terminal Information Service), which has been effectively used for decades. We plan to extend the existing VHF and ACARS frameworks to incorporate AVENIR's advanced functionalities, ensuring seamless communication and data exchange between AI-ATC agents and pilots.

Technical Challenges

Over the years, Transformer-based architecture has become the gold standard in numerous fields of Computer Science, including NLP and Computer Vision. However, their application in the aviation industry requires further exploration and validation. The rest of the section will outline the potential challenges and limitations of implementing these advanced machine-learning techniques in our ATM system.

One of the key challenges in developing an AI model for an ATM system, perhaps a universal challenge for machine learning, is identifying the most relevant data inputs. It is essential to evaluate the accessibility of each data category and balance the model's performance with the available computational resources. This requires careful consideration of various data sources,

such as regulatory, operational, environmental, and socio-economic information, ensuring the model can process various data within computational constraints. Additionally, the lack of comprehensive historical data for specific scenarios, such as rare but significant emergencies, poses a challenge. This scarcity can limit the model's ability to learn and predict outcomes accurately in real-world applications.

Designing an impactful reward function for balancing the different objectives, such as safety, efficiency, cost reduction, passenger satisfaction, and environmental impact, is also challenging. These objectives can sometimes be at odds with one another; for instance, optimizing for the fastest routes may conflict with fuel efficiency or noise abatement procedures. Moreover, accurately quantifying these objectives into a numerical reward that the system can optimize is difficult. Safety metrics, for example, are critical

but difficult to represent adequately due to the rarity of incidents and the necessity for robust safety standards.

Ensuring the system's resilience across diverse scenarios presents another challenge, requiring extensive testing in simulated environments that closely replicate real-world complexities. This process involves not only assessing the system's performance during standard operations but also subjecting it to stress testing under extreme conditions to verify its reliability. In addition, the validation process must address the potential for unintended biases in the system's decision-making, which can result from skewed training data or incomplete representation of certain air traffic situations. Thorough benchmarking and validation are essential, requiring rigorous testing and a comprehensive approach to confirm that the AI-ATM system complies with all operational and safety standards before deployment.

Market Advantage - Why AVENIR?

Market Demand

The demand for AI-assisted ATM systems is closely linked to the number of airports in a country. In 2024, the United States, with its established aviation network, has more than 5,082 airports [14]. This extensive network highlights the maturity and scale of the U.S. aviation market, offering a vast landscape for implementing advanced ATM systems.

In comparison, developing nations like China present significant market potential for our AI-assisted ATM system. As of 2022, China has 254 [15] certified civil airports. While this number may not be as large as that of other major aviation markets, the Chinese government is actively planning to increase the number significantly. This expansion is part of a broader strategy to enhance transportation capabilities and support a rapidly growing aviation market. The Chinese government's proactive stance towards adopting new technologies, as evidenced by the recent deployment of AI-Taxi services in various cities, further underscores the nation's openness to integrating advanced Artificial Intelligence solutions.

Beyond China, other regions, such as India and the Middle East, are also making strides in incorporating the latest AI technologies into their urban development projects. These countries are actively expanding their airport networks, upgrading infrastructure to accommodate increasing air traffic, and leveraging AI technologies. This global trend towards modernization and technological advancement creates a favorable environment for the deployment of our AI-ATM system.



Fig. 5 Globally Networked Flight Coordinations

Strengths of AVENIR

Technically, our system offers superior handling of complex, dynamic air traffic data by leveraging the latest advancements in neural networks, particularly Transformer models. These models excel at processing large datasets and identifying intricate patterns, making them highly effective in optimizing air traffic flow, predicting potential disruptions, and providing real-time decision support.

From a user experience perspective, our system offers several enhancements designed to improve the pilot's experience. One of the key features is the implementation of multi-language support for tower-pilot communications, which helps eliminate language barriers and prevent misunderstandings, especially on international flights. The system also focuses on broadcasting only relevant information to targeted pilots, enabling them to concentrate on their primary tasks without the need to filter unnecessary data. This feature is particularly advantageous for Visual Flight Rules (VFR) pilots, who are more often involved in ATC-related accidents than IFR pilots [16]. Lastly, our system is designed to integrate uniformly with existing protocols, minimizing the need for additional training. Certified pilots can continue operating within a familiar framework, ensuring a smooth transition to the new system without requiring extensive retraining.

Phased Rollout Plan

Another key differentiator of our project is the extremely low initial investment required before demonstrating its capabilities. This is achieved through a phased rollout strategy that begins with offline RL using logged ATC data and then online RL in simulation environments. This cost-effective approach allows stakeholders to assess the system's effectiveness in a controlled setting before committing to the full-scale deployment.

During the actual testing phase, the system is initially operated in a "Shadow Mode," which runs parallel to existing systems without directly impacting ATM operations. This iterative testing approach is crucial for continuously verifying and ensuring the system's safety and reliability, ultimately laying the groundwork for investment

success prior to full-scale deployment. Fig. 6 shows the phased rollout plan.

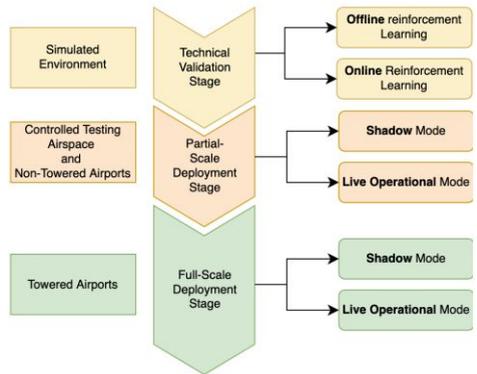


Fig. 6 Phased Rollout Plan

Economic Benefits

As we progress through the deployment stages, we establish clear, incremental, and quantitative goals for the system's performance. During the initial stage, our conservative estimates suggest that the system will achieve a 10% optimization in airport space and airspace allocation, alongside a 5% reduction in fuel consumption during flights. Additionally, based on the calculation of the SESAR program [17], we anticipate a 50% decrease in labor costs driven by the system's efficiency improvements.

As AVENIR transitions to full-scale deployment by 2040, with a linked AI-ATM network among domestic airports, these benchmarks are expected to improve significantly. Our target is to ultimately enhance airport management and airspace allocation efficiency by 20% and to achieve a remarkable reduction in labor costs by 80%. These ambitious goals reflect our commitment to maximizing operational efficiency and delivering substantial cost savings.

Beyond operational enhancements, our system addresses one of the aviation industry's long-standing challenges - language barriers. By eliminating these barriers, we open up a wider pool of qualified pilots for airline companies, regardless of their native language.

Broader Impact and Societal Challenges

Data Security

Quantum computing poses a significant threat to cryptographic algorithms essential for data security [18]. The implications are severe in the context of an intelligent ATM system, which involves the continuous exchange and processing of vast amounts of sensitive data. AI-ATM systems require access to vast amounts of sensitive data, including flight paths, passenger information, and real-time operational data. Ensuring this data is protected against breaches and unauthorized access is crucial. Therefore, it is imperative to adopt proactive measures to secure the data utilized by the AI-ATM system. The aviation industry must prioritize these measures to ensure ATMs' continued safety and security in the quantum computing era.

Manual Proficiency and Backup Plans

As AI systems increasingly take over the roles of human controllers, there is a growing concern about the human crew's ability to manage emergencies manually. The interconnectivity of future technologies means that a failure in one part can significantly impact the entire system, as evidenced by incidents where computer system outages led to global flight cancellations. Power grid, computer system, or data collection malfunctions can all potentially lead to AI-ATM system failure. There is a need to redesign the staffing allocation for airport control towers to ensure enough personnel to maintain hardware and software functionality and handle air traffic control and coordination during emergencies. Neighboring airports can also establish closer cooperation to respond more effectively to similar system failures and emergencies.

Smart City Infrastructure

As cities continue to develop, emerging technologies such as air VTOL taxis and delivery UAVs add a new layer of complexity to urban airspace management [19]. This evolution makes integrating ATM with urban planning and public transportation systems increasingly critical. VTOLs and UAVs operate under different navigation and separation standards. The

communication and coordination mechanisms for VTOLs and UAVs also differ from the traditional pilot-tower interactions in general aviation. Moreover, the infrastructure required for these aircraft, such as vertiports, differs from conventional airport environments, demanding unique design and operational protocols. These factors highlight the need for a versatile AI-assisted ATM system with robust scalability to adapt to future technological advancements in urban air mobility.



Fig. 7 Future Urban Airspace Illustration [20]

Legal and Ethical Considerations

Integrating AI into ATM systems raises significant legal and ethical challenges, particularly around liability when an AI agent makes a mistake. Current legal frameworks primarily hold human operators accountable, but introducing AI requires reevaluating these rules. For instance, if an AI system follows established protocols and a failure occurs, it raises questions about whether the fault lies with the AI developers, the operators, or the regulatory bodies that set the standards. Conversely, if the AI agent deviates from the rules, it must be determined whether the circumstances justified this deviation or if it indicates a flaw in the AI's programming or decision-making processes. This legal ambiguity urges modifying existing laws to define responsibility in cases involving AI agents clearly.

Conclusion

Given the challenges currently confronting the aviation industry and the rapid advancements in machine learning technologies, the integration of artificial intelligence with air traffic management is poised to reshape the future of aviation.

- I. The AI-ATM system AVENIR has the potential to significantly enhance operational safety and efficiency in both airports and airspace, reduce staff workload, and promote environmental sustainability by 2040.
- II. The natural language processing (NLP) model embedded within AVENIR offers personalized natural language instructions for flights, effectively minimizing interference and overcoming language barriers faced by pilots. Additionally, it will broaden the range of options and opportunities available to pilots and airlines globally.
- III. The primary challenge in the practical application of AI-ATM system technology lies in ensuring safety. AVENIR addresses this by incorporating multiple safety mechanisms, thereby safeguarding data security and enabling intelligent decision-making.
- IV. While the development and deployment of AI technology within the aviation industry represent a promising future, it is inherently a long-term investment. It is crucial that the deployment process be rapid yet phased, with strategic planning to mitigate risks effectively.
- V. As we move towards increasingly complex application scenarios, AI-ATM systems like AVENIR will encounter challenges in terms of safety and technology as well as social and ethical domains. Addressing these challenges will require concerted efforts and collaboration from all stakeholders to realize the envisioned future of aviation.

As Jules Verne wrote in *Twenty Thousand Leagues Under the Sea*: "On ne peut connaître qu'en allant voir" — one can only know by going to see. This sentiment underscores our inspiration and determination to make AVENIR come true; the future awaits.



Bibliography

- [1] Airbus, Airbus Foresees Demand for 39,000 New Passenger & Freighter Aircraft by 2040, Nov. 2021, <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-11-airbus-foresees-demand-for-39000-new-passenger-freighter-aircraft>
- [2] Risk Topics Discovery and Trend Analysis in Air Traffic Control Operations—Air Traffic Control Incident Reports from 2000 to 2022, <https://doi.org/10.3390/su151512065>
- [3] Sabbi Lall, MIT McGovern Institute, How Does the Brain Focus? March 2019, <https://mcgovern.mit.edu/2019/03/14/ask-the-brain-how-does-the-brain-focus/>
- [4] Business Insider, What It Takes To Be An Air Traffic Controller At The World's Busiest Airport, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=tQ-cDwQupj8&list=LL&index=17>
- [5] Singh, V., Sharma, S.K. Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. *Eur. Transp. Res. Rev.* 7, 12 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0160-x>
- [6] The Single European Sky ATM Research (SESAR) project, <https://www.sesarju.eu/discover-sesar/history>
- [7] The Air Traffic Management - eXploration (ATM-X) project, <https://www.nasa.gov/directorates/armd/aosp/atm-x/>
- [8] Searidge Technologies, Initiating Change in Aviation Digital Towers & Advanced Airport Solutions, <https://www.searidgetech.com/>
- [9] Tianyang Lin, A Survey of Transformers, June 2021, <https://arxiv.org/abs/2106.04554>
- [10] Gad Gad, Deep Learning-Based Context-Aware Video Content Analysis on IoT Devices, June 2022, <https://www.researchgate.net/publication/361098572>
- [11] Lili Chen, Decision Transformer: Reinforcement Learning via Sequence Modeling, June 2021, <https://arxiv.org/abs/2106.01345>
- [12] UFA's ATCoach Radar simulator, <https://www.ufainc.com/atcoach>
- [13] EUROCONTROL ATM real-time simulation platform, <https://www.eurocontrol.int/simulator/escape>
- [14] Federal Aviation, Air Traffic By The Numbers, June 2024, https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers
- [15] Wenyi Zhang, Number of civil airports in mainland China from 2000 to 2022, Feb. 2024, <https://www.statista.com/statistics/258207/number-of-civil-airports-in-china>
- [16] Nikšić, L., & Öztürk, E. A. Analysis of ATC-Related Aviation Accidents and Incidents. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(6), 2023, <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2022-0078>
- [17] European Commission. (2008). *SESAR: Delivering the Future of Aviation*. European Commission. https://transport.ec.europa.eu/system/files/2016-09/2008_sesar_brochure_en.pdf
- [18] Analytics Emerging India. (2023, February 10). *Quantum computing and cybersecurity: Implications for encryption and data protection*. Medium. <https://medium.com/@analyticsemergingindia/quantum-computing-and-cybersecurity-implications-for-encryption-and-data-protection-03f8cd4d959a>
- [19] DRONELIFE, *EASA's U-Space: What it means for European drone operations [DRONELIFE exclusive]*. DRONELIFE, April 2023. <https://dronelife.com/2023/04/17/easas-u-space-what-it-means-for-european-drone-operations-dronelife-exclusive/>
- [20] *Concept of Urban Air Mobility Environment*. (2019). NASA and Uber Test System for Future Urban Air Transport. Photograph. Retrieved from <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/ames/nasa-and-uber-test-system-for-future-urban-air-transport/>.



Maxence CARDONA

ENAC

On a 2005 Sunday, a spark kindled in my mind when I went to my very first air show (La Ferté-Alais). Smitten with the sound, the velocity and this indescribable something about flying machines. The spark became an inexhaustible source of energy and enthusiasm to create a career in aviation. I wanted to see what was being conducted behind the scenes. With this in mind, I first had the chance to be a trainee at this same Aerodrome to work on B-17 Flying Fortress. Then, I joined ENAC and became a crew member for Air France during summer, discovering the unbeknownst work for the passengers' comfort and safety. The work, the one never under the spotlight, I wanted to know more about it : I therefore became an apprentice engineer for Air France Ground Handling operation a year ago at the heart of CDG airport (working with the operators on the ground). Where I had the chance to take part to the Paris 2024 Olympics handling management of the welcoming of the athletes.

ENAC, FL360, CDG airport and now USAIRE Student Awards, this spark became a flame that I will keep burning.



Adrien PICOUET POMBO

ENAC

Since I was little kid in Spain, I've always been with my head in the clouds. My fascination with aviation took off early, and it's still cruising at altitude today. To pursue my goal of working in aviation, I joined ENAC three years ago, where I dove head-first into the intricacies of air transport. I then decided to broaden my horizon at TU Delft, where I picked up some skills in finance and economic affairs that I put into practice by doing an internship in the strategy department of Safran Electrical & Power.

Just a month ago, I officially became an engineer and joined the DGAC, specifically the DTA (Air Transport Directorate). Now, I get to keep an eye on French airlines and ensure they stay on the right path. This job allows me to merge my three passions : aviation, financial analysis and talking to people. If only I could add music in this mix and have some more sun in Paris, my life would be complete.

For now, I will keep on dreaming.

Propose a specific and concrete project with an associated business case that you hope will disrupt the aerospace industry by 2040



Sky Clear 2040

Reducing half of aviation's impact on the environment

Introduction

The history of aviation has always been subject to complex **global challenges**. The most recent of them is a united effort to combat its impact on **climate change**, with an ambitious target of achieving **net zero carbon emissions by 2050** [1]. This goal, initially set by the industry, has also been endorsed by governments during the 41st Assembly of the International Civil Aviation Organization (ICAO) in 2022 [2]. Achieving this target will require the development of new energy sources, technological advancements, and improvements in fuel efficiency to **reduce carbon dioxide** (CO₂) emissions from aircraft operations. While this is a great challenge, it is one that is well understood, with ongoing progress being made. With the right policies, commitment, and determination, the path to decarbonizing civil aviation will have us transition from fossil fuels to sustainable aviation fuels (SAF) and finally alternative energy sources like hydrogen [3][4].

However, in addition to CO₂ emissions, the aviation industry is also addressing another climate impact that is less understood and has fewer developed solutions: the effects of other aviation-related emissions on the atmosphere. Among these non-CO₂ emissions, **condensation trails**, or contrails (the visible white streaks in the sky that are essentially artificial clouds) are believed to have the most significant warming effect [5]. This potential of warming comes from the **persistence** of this condensation trails in the upper parts of the atmosphere: this is the *Cirrus Homogenitus* (literally the cirrus generated by human).

This paper will examine the current state of scientific knowledge regarding the climate impact of contrails before presenting what we believe is a **startup idea** that will disrupt the aerospace industry by 2040. This paper's purpose is informative but can also serve as an **investment recommendation** document that studies the value proposition of our idea and incites investment for the first stages of research and development.

Therefore, we will present in this document **Sky Clear 2040**, a deep-technology startup with the ambitious goal of cutting down half of aviation's impact by tackling contrails.

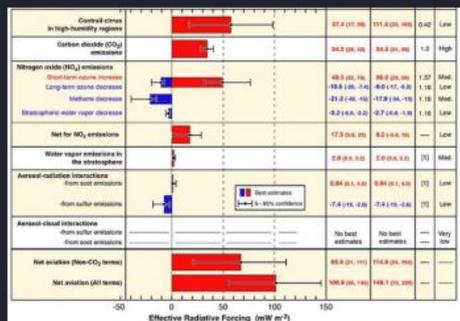
The contrail climate challenge

In addition to CO₂ emissions, aviation, like many other sectors, contributes to various "non-CO₂ effects" that impact the climate. These effects arise from complex interactions between aircraft emissions and the **atmosphere**, primarily involving soot particles, nitrogen oxides (NO_x), and sulphur oxides (SO_x). **Soot particles** result from the composition of carbon-based aviation fuel and the combustion technology used; **NO_x** emissions are generated by high-temperature combustion; and **SO_x** emissions stem from the sulphur content in the fuel. The aviation industry has long been committed to developing innovative combustion technologies to reduce soot particulates and NO_x emissions, both of which are known to have significant climate impacts [5].

Water vapor, another byproduct of fuel combustion, can lead to the formation of condensation trails, or 'contrails,' which consist of ice crystals. Contrails form during flight when ambient conditions and atmospheric water vapor levels are conducive to the **condensation of water vapor** from the engine exhaust. As small carbon particles are released from the aircraft's exhaust, water vapor can condense on these particles, along with naturally occurring aerosols, leading to the formation of **high-altitude ice clouds**. While some of these clouds dissipate within seconds, others can persist for hours and spread across large areas if the air is sufficiently humid and cold [6]. Efforts today to prevent the formation of persistent contrails and their significant climate impacts include: the use of alternative fuels, advanced combustion technology, and especially trajectory modifications.

A dual phenomenon

The complexity in measuring accurately the impact on contrails arises from the fact that not all contrails contribute to warming. Some dissipate within minutes, while others may have a cooling effect or balance both cooling and warming impacts. However, a small percentage of contrails are responsible for a significant warming effect. The established scientific consensus indicates that, overall, **contrails tend to have a net warming impact** when considered collectively [8].



Global aviation effective radiative forcing [5]

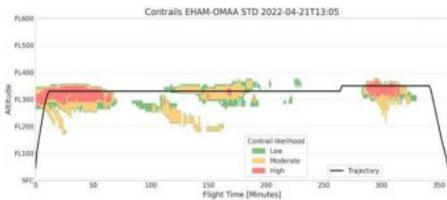
As it is proven by this study, contrail cirrus takes a great role in contributing to global warming. The effective **radiative forcing** due to contrails is up to 86% of the non-CO₂ impact and up to 57% of the net aviation impact [5].

Today's contrail avoidance strategies

One rapidly developing method involves **adjusting flight paths** to avoid atmospheric conditions conducive to contrail formation [2]. Airlines and air traffic controllers use advanced weather forecasting and atmospheric data to identify and navigate around regions with high humidity and low temperatures where contrails are likely to form. This strategy involves dynamic route planning to detect and avoid **ice super-saturated regions (ISSR)** and altitude/trajectory adjustments [7]. This solution is today considered as the best short-term contrail mitigation technique thanks to two major improvements in the past years [7]:

Improved detection of ISSR

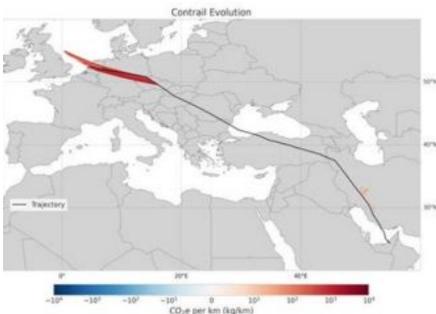
The hardest part of the contrail avoidance solution is the identification of ice super-saturated regions. Advanced computer models are being developed to forecast where and when ISSRs are likely to form [7]. Further progress will be made thanks to new sensors on board the aircraft for humidity and better atmospheric measurements.



Vertical profile of likelihood of contrail formation along a sample flight [8]

New CO2 equivalent for contrails

Airlines have started working with startups specialised in contrail avoidance software, including the conversion into **CO2 equivalent** that can be monetised and bring economical value to those airlines who monitor and reduce the climate impact of their contrails [4].

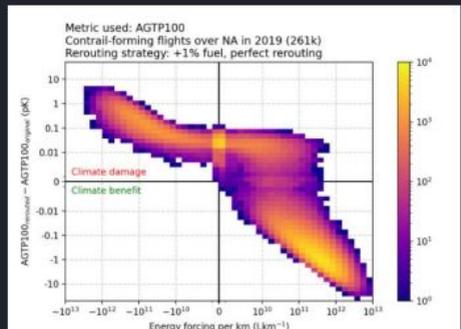


Climate impact of contrails displayed as CO2 equivalent per km [8]

A solution with problematic side-effects

Additional Fuel Consumption

To avoid ISSRs, the aircraft must be re-routed above or below those regions. These changes in flight routing **increase fuel use** by 1-2% [9]. The overall climate benefit of deviating a flight will then be very variable, as shown in the figure below, with a significant amount of deviations that cause **more damage than good** to the climate.



Impact on the climate (benefit or damage) of trajectory modifications [17]

Operational Constraints

Another important constraint that limits the **scalability of this solution**, is that this would not be possible today in crowded airspace systems (for example over Central Europe, the North Atlantic or the US) in a safe viable way.

We could make the parallel with Continuous Climb (CCO) and descent operation (CDO). The practical application of these two procedures was, on paper, supposed to be easily implemented. However, after almost two decades since they were implemented, they still struggle to be followed by every airport and air traffic control operators. A good example is CDG airport where it was less than 3% in 2022 [10].

Furthermore, in the case of rerouting to avoid the formation of persistent contrails, this might be way more complex and induce new training for pilots and ATC. Today, this issue is of little importance because of the very small number of flights that apply contrail avoidance strategies. However, we decided to come up with a different approach that is not based around the detection and avoidance of ISSR but rather on the destruction of the ice-particles that could become condensation trails.

Our proposed solution for 2040

We propose a **ground-breaking product** inspired by research conducted by Cranfield University. This solution aims to mitigate the formation of contrails by leveraging advanced ultrasound technology [13].

Our project is to develop an advanced **ultrasound generator**, equipped with an ultrasonic actuator and a waveguide, designed to target, and disrupt contrail formation directly at the exhaust plume of an aircraft engine. This state-of-the-art technology employs ultrasound waves to **prevent the condensation of water vapor** and the formation of ice particles thanks to the fragmentation of ice into smaller particles within the exhaust [11]. This innovative approach not only provides a direct mechanism for combating contrail formation at the source but also represents a shift in how we address aviation-induced non-CO2 emissions: by integrating our ultrasound generator into the structure of the aircraft, we move beyond merely avoiding condensation zones to actively preventing the creation of contrails and induced cirrus clouds, offering a significant advancement in sustainable aviation technology.

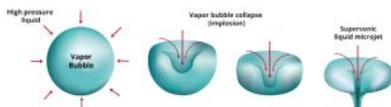
How Does it Work?

The ultrasound waves function in two primary ways to combat contrail formation:

Cavitation and Vaporization: Ultrasound-induced cavitation within the liquid water layer of nascent contrail particles facilitates their disintegration [7]. Depending on the atmospheric conditions and exhaust composition, the waves may also vaporize water condensate, thereby preventing the condensation of water and the coagulation of particles into larger ice crystals.

Particle Disintegration: The ultrasound waves directly break down small particles in the exhaust, such as soot and aerosols. This prevents these particles from serving as nuclei for ice formation [8].

With power outputs ranging from 100W to 10kW, the ultrasound generator induces vibrations that effectively **evaporate ice particles**. By ensuring that condensation does not occur—since the liquid phase of water is crucial for ice particle formation—our device represents a radical departure from existing solutions that merely attempt to avoid condensation zones [8].



Step-by-step ultra-sound induced cavitation within a liquid [12]

Power modulator: Transports the electrical input to the ultrasonic transducer/modulator that produces ultrasonic waves.

Control unit: Manage the activation and deactivation of the device given various atmospheric parameters.

Ultrasonic actuator: To generate ultrasonic waves

Humidity/Temperature sensor: Necessary to detect condensation trail formation zones.

Waveguide: Focuses the ultrasonic waves into a suitable ultrasonic wave beam for the plume and contrail characteristics.

On board camera (optional): Could facilitate and/or confirm the presence of contrails. Atmospheric analysis will still be necessary to know if these condensation trails will be persistent.

Theoretical main components of the contrail mitigation system

Addressing main concerns

Power consumption: Electrical power for the device is supplied by the engines or auxiliary power unit (APU) to the power amplifier/modulator in the form of alternating or direct current and is transformed to a high voltage. The ultrasonic generator will require power in the range of some hundred Watt to some kW (our estimation from the components energy requirements) which is an **insignificant** fraction of the aircraft's power supply, especially considering that the device will be used with engines running in cruise conditions [11].

Additional Weight: Weight characteristics of the device still must be detailed. Current weight of the above presented parts in addition to a protective structure allow us to estimate the device somewhere between 20 kg and 100 kg. This additional weight should be compensated by the major prospect of completely removing contrail formation (or at least significantly reducing it).

System integration: The control unit of this contrail avoidance device communicates with other avionics and sensors onboard.

Synergy with previous solution

On board sensors measure the ambient temperature, pressure, and humidity. Other sensors measure engine performance and are a common aspect of modern gas turbine engines and aircraft.

Depending on the contrail avoidance software calculations, it is decided whether contrail formation is possible, as shown in figure. In addition, a camera could observe the engine plume for contrail formation and serve as a concrete proof of the prediction (see section above).

However, the aircraft would still need humidity measurements to decide over whether the contrail is persistent or not. If the conditions for persistent contrail formation are satisfied, the contrail avoidance device is switched on until measurements indicate that the formation of persistent contrails is no longer possible.

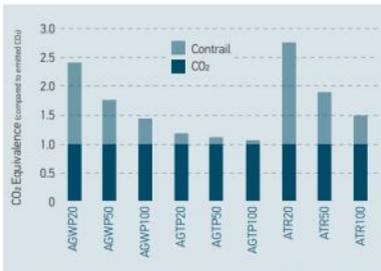
Why is there a worthwhile business case?

While the long-term climate impact of CO₂ is well understood, contrails have a much **shorter-lived effect**, lasting only minutes to hours [6]. As a result, their total **impact on the climate varies** depending on the time frame considered. Commonly used metrics such as Global Warming Potential (GWP), Average Temperature Response (ATR), and Global Temperature Potential (GTP) can be calculated over different intervals (often 20, 50, or 100 years) each offering a different perspective on the impact of CO₂ and non-CO₂ emissions over that period. For instance, the climate impact of contrails can vary significantly, ranging from 2.3 times that of CO₂ to less than half that of CO₂ [14], depending on the selected metric and time frame, as shown in the figure below.

To evaluate an order of magnitude of the projected market some landmarks, hypothesis and background were necessary to look on: the evolution of the market, the emissions induced, the non-CO₂ effect, and finally the price imposed by the policy makers.

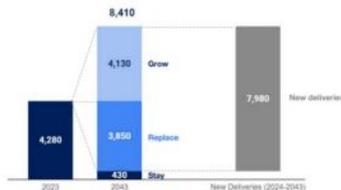
Measured Global Impact:

From a global view, contrails account for **652 million tons of carbon dioxide equivalent** each year. Conservative estimates calculate today that this is 35% of aviation's climate footprint [15].



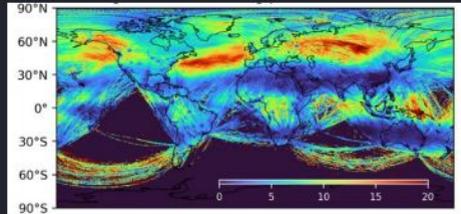
CO₂ equivalence for contrails compared to CO₂ [17]

Evolution of the market: The market is about to double according to Airbus and Boeing forecast [10]. Going from about **24000 aircraft to 42000**. Moreover, this duplication is homogenous: the wide body aircraft will double overall as well.



Global Market Forecast for the 2024-2040 period

This fleet renewal and growth of **wide body aircrafts** is the most important in the case of contrails, because of their trajectory, tend to emit more contrails than singles aisle aircraft [6].



Different flight distances forming persistent contrails (as a percentage) [6]

However, these conclusions must be tempered, and that is where and why investment is needed: data.

The EFcontrail per contrail length also tends to be large over The Atlantic and Indian Ocean, Sahara, central Europe, and Greenland [6]. Consequently, a focus on single aisle going over these lands is also necessary.

Emissions

652 million tons of CO₂e are effectively due to contrails [17]. This number is less or more what was the CO₂ emissions for 2019.

Indeed, 3 scenarios will then be possible: from half to the double of the 652 million tons of CO₂e due to contrails. Lacking data, we will fix our forecast to this number. Taking into consideration the growth of the market and the uncertainties about the renewal of the fleet and the according impact on contrails emissions

For CO₂, thus, **this remains an order of magnitude**, that can be divided or multiplied by two and so will for our forecast.

Policy makers

The effect of condensation trails is **just starting to be considered by regulators and institutions**. ICAO brought back the issue to debate on the 2019 Environmental Report. Raising the **uncertainties about the development of persistent Contrail Cirrus** and therefore the need to delve into it.

However, even if regulation is advancing in a way that favours research and development of ways to mitigate contrails, this uncertainty about how this can be measured lead to two strategies:

IATA wants policy makers to wait for research, understanding and creating policies consequently. Overall, the Report on the Air Transport Industry at the 80th IATA AGM shows reluctance to already set deadlines [18].

While **European** policy makers see it in another way, announcing a legislation in coming so that research Poles put in the work to understand non Co2 effects and to tackle them with the **Non Co2 MRV** [19].

The contractor must collect, store, include on appropriate interfaces for **collecting large amounts of data**. Moreover, these data must be associated with models for MRV nonCO2 effects to allow the calculation of non-CO2 equivalents per flight.

This model of MRV is also already, more and more followed on a global scale with CORSIA. [14] We wonder if this model will be used as well for non Co2 MRV. This will be at stake during the 2024 ICAO Symposium on Non-CO₂ Aviation Emissions, taking place mid-September. Examining the formation and the **impact of contrails is already on the agenda** [20]. This will lead to discussions about ways of mitigating them and partnerships required to succeed.

Steps which airlines are about to undergo in the ETS system (that might be a similar with the Corsia system in the following years) [19]:

- **By 31 August 2024** – Implementing act including non-CO2 effects in MRV framework
- enabling CO2e per flight to be produced.
- **From 1 January 2025** – MS shall ensure that each aircraft operator monitors and reports the non-CO2 effects from each aircraft.
- **From 2026** – EC will publish the results from the MRV framework once a year.
- **By 31 December 2027** – based on the results of the MRV of non-CO2 aviation effects,

the EC will submit a report and, if appropriate, a legislative proposal after having

carried out an impact assessment to mitigate such effects by expanding the scope of

the EU ETS to include non-CO2 aviation effects.

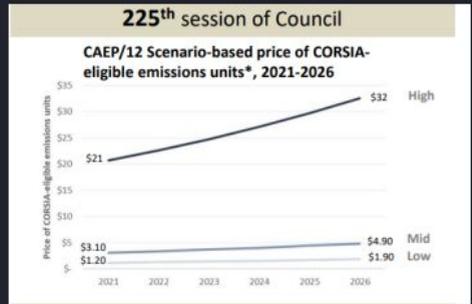
By 1 January 2028, building on the results of that framework, **the Commission will propose, where appropriate, mitigation measures for non-CO2 aviation effects.**

Regardless of the strategy, this falls within the scope of the 2040 deadline, if not earlier.

The price of emitting contrails:

If the equivalence is effective, the non Co2 bill will also have to be paid. 3 scenarios are at stake: low, mid and high and so is our forecast. We followed two hypotheses:

-the prices will keep rising at the same pace for each scenario:



Corsia unit Price evolution forecast for the 2021-2026 period [21]

-the unit pricing for eCo2 will be the same as Co2 (the following chart is the product of 652 million tons of Eco2 by each price taking the evolution of it into account):



Global Corsia market for non-Co2 credits (contrails only) in USD

Which means, all hypotheses considered: the market will represent at the very least 4,2 billion in 2041 and up to more than 50 billion (about 88) in 2041. Consequently, there is also a great economic incentive to work hard on this matter, in addition to all the reasons above.

Who is going to foster research?

Airlines:

Airlines are the ones that are going to be hit very hard with the bill of contrails emissions. Consequently, rather than just see it coming, they should and are already investing in research for non Co2 effects of their aircrafts.

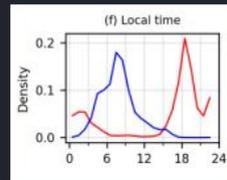
In Europe, they tend to unite their forces in research Infrastructure such as **IAGOS** [22] (In-service Aircraft for a Global Observing System), powered by the French National Centre for Scientific Research (CNRS). Some airlines have already showed their interest by equipping at least one aircraft of **sensors** focus on atmosphere humidity which helps to **determine the ISSR**. For information, these sensors were proven to be non-significant for the operational cost of these flights (impact on drag is negligible). Some European majors like Air France, Lufthansa, and Iberia are in the research group. **Air France** goes even further with the **COOP** (Contrail Observation Program) to collect data and observations on contrails and share them with *Météo France* and *Google research*. They designed tests where they integrated dispatcher and pilots in the process. In the **US**, Similar tests were conducted as well by **American airlines with Google** and Breakthrough Energy [7].

Tech Pole:

As it is revealed by the previous paragraph, research is a team effort. While airlines create the impulsion because they are to undergo costly policies. Tech companies boost it with investment, deep tech, and AI, and above all play the role of an orchestra conductor. The biggest tech actor investing in research about contrails mitigation is Google, as mentioned in the previous paragraph. The project is called **Project Contrails: A cost-effective and scalable way AI is helping to mitigate aviation's climate impact**. They invest massive time and money to detect ISSR, and train AI to identify persistent contrails and reroute consequently.

How can we use these breakthroughs it in our project?

As it is revealed by this paper [6], "around 14 % of all flights in 2019 formed a contrail with a net warming effect, yet only 2 % of all flights caused 80 % of the annual contrail energy forcing". The following graphic illustrates the link with precise parameters, such as the **strong dependency on the local time** of the effect induce by contrails (red: warming effect, blue: cooling effect). Focusing on such parameters will **avoid being counterproductive**.



Dependence on the effect of contrails with the local time [6]

If the device is **disposable** :

Even if technically, this is very unlikely to happen, if the device is disposable, **we put it when and where it is needed**. If, thanks to data, persistent contrails are to be emitted on a flight, the device is put on the aircraft.

If the device is **not disposable** :

It is not a real obstacle to its efficacy. Indeed, to optimise their operations, a particular **airplane of an airline is often dedicated to go to some places repeatedly**. Even if this is optimised so that the plane fly as much as possible, we should use this operational segmentation to implement our device. Thanks to data, the airplanes taking most routes which are known to create persistent contrails should be the ones equipped with the device. Exactly like the A332 of Air France in the IAGOS which is mainly going to African countries and chosen on purpose for the research.

Therefore, even if the mass of the device is non-significant compared to the benefits permitted by it, it should not be forgotten. As well as the drag induced, wherever the device is put on. This needs to be taken into consideration in all the optimisation process (to maximise the profit).

Market overview synthesis: PESTEL Analysis

Political Factors

-The regulatory environment is always an important factor for any deep-tech venture. Aviation regulations worldwide (FAA, EASA, CAAC) provide the necessary certification to prove that our device respects strict safety standards.

-Government Support: They provide grants and credibility to the project.

-International Agreements: ETS and Corsia particularly will fundamentally encourage airlines to invest in solutions that reduce CO2 and non-CO2 emissions.

Potential positive impact

+Supportive regulatory and political environment enhances the possibility of access to grants.

+International regulation in aviation will encourage airlines to tackle condensation trails.

Potential negative impact

-Certification can be a long and tedious project for an innovative device.

-Non-CO2 emissions calculation in CO2 equivalent is still a big unknown for ETS and Corsia.

Economic Factors

-Fuel Costs: Rising fuel costs encourage airlines to adopt technologies that can reduce operational inefficiencies and environmental impacts.

-Macro-economic context: Economic downturns can lead to reduced air travel and budget cuts within airlines, potentially delaying investments in new technologies.

-Investment in climate: Growing interest in sustainable investments can provide access to capital and favorable funding conditions for deep-tech startups.

Potential positive impact:

High fuel costs and favorable investment climate can drive demand for cost-saving and eco-friendly technologies.

Potential negative impact:

Future economic recessions may reduce immediate investment capacity.

Social Factors

-Public Awareness: Increasing public awareness and concern about aviation impact on climate that can go as far as to avoid using air transportation (air bashing).

-Corporate Social Responsibility (CSR): Airlines and aircraft manufacturers are under pressure to demonstrate to the public their commitment to sustainability and corporate social responsibility.

Potential positive impact:

Visible solution to airlines impact on the climate that can be easily marketed and publicized

Potential positive impact:

Failure to meet public expectations could lead to reputational risks.

Technological Factors

-Innovating propulsion: Rapid technological advancements in the aviation industry, including hydrogen powered aircraft.

-Research and Development (R&D) in contrail formation: Important R&D efforts are currently being made to quantify more precisely what is the impact of condensation trail and induced cirrus.

-Integration with existing systems: Compatibility and integration with existing aircraft systems and operations are critical for adoption.

Potential positive impact:

+Condensation trail research is a leading force in innovation nowadays, especially those generated by the exhaust of hydrogen engines [4]

Potential negative impact:

-New competitors with new technologies could appear in the following years.

Environmental Factors

-Sustainability Goals: Airlines and manufacturers are setting ambitious sustainability goals, including reducing contrail formation and overall emissions.

Potential positive impact

+Strong alignment with global environmental priorities enhances the value proposition of Sky Clear 2040.

Potential negative impact:

-High environmental standards necessitate continuous improvement and innovation in contrail technology.

Legal Factors

-Intellectual Property: Protection of patents and intellectual property rights is crucial for maintaining competitive advantage.

-Compliance: Adherence to international aviation standards and regulations for new technologies is necessary for market acceptance.

Potential positive impact

Robust intellectual property protection and compliance with legal standards build trust and competitive advantage.

Potential negative impact

Legal challenges and liability risks may arise, especially concerning patent protection.

Timeline and value of this investment



2024-2030: R&D -> Investment: 200k/year

This first phase will allow us to invest all our time and resources into research and development to justify that our product is technologically feasible but most importantly to determine if our startup has sufficient product-market fit. This first phase will therefore consist of multiple market analysis as well as continuous research in two main areas:

-Contrail formation: This area of research is more established today but will be necessary if we want to have an accurate and efficient usage of the device.

-Ultrasonic mitigation: This will be our differentiating factor from other mitigation techniques that exist today (route alteration) or will exist in the future (new engines that reduce the amount of water vapor).



2030-2035: Prototyping -> Investment: 500k/year

This is where our research work comes to fruition with the development of the first prototype of the SkyClear 2040 ultrasonics device. The several prototypes developed during these 5 years will have to undergo several test campaigns in special facilities and aboard aircraft.

This phase will be more expensive than the first one and will need to have strong support from commercial partners (airlines and constructors) that will invest in the idea with a prospect of implementing it in their aircraft when the product will be certified.

-2030: First Prototype

-2035: Final iteration of the prototype and first version of the final product



2035-2040: Certification/Scalation -> Investment: 1M/year

The final phase is crucial. It will need to undergo the strict safety test imposed by regulation authorities and will end with the official certification of the product and the beginning of the mass adoption of it as either:

-Retrofit of existing aircraft (for airline customers)

-Integrate into new aircraft designs (for manufacturers customers)

This phase will be the first one where our startup will finally be profitable. More details about the financial projection below.

Our startup, Sky Clear 2040, is a deep-technology startup which necessarily includes a long initial development cycle with high financial capital requirements. To finance this high financial capital investment the startup will necessarily have to attract various types of investors that participate in the project via research grants and seed funds.

The first investors of our early-stage startup will need to project de value of our idea (and of their investment) over time. For that purpose, we propose here what our business strategy will be and how we can project our financials for the 2024-2040 period.

Monetization Strategy

-Device Pricing: Estimated price range (calculated from above cited components and a 30% margin): \$500,000 - \$1,000,000 per unit.

-Licensing Fees: Negotiated based on volume and exclusivity agreements.

Revenue Streams

-Direct Sales: One-time sales of the ultrasound generator systems to airlines and aircraft manufacturers.

-Service Contracts: Maintenance, updates, and calibration services to ensure optimal performance.

-Licensing: Licensing our technology to aircraft manufacturers for integration into new aircraft models.

-Data Analytics: Providing data services related to contrail formation and environmental impact assessments.

Net Present Value

These different assumptions and projections allow us to calculate the Net Present Value of the idea in 2024.

Even with the conservative hypothesis of no revenue until 2036, this Net Present Value stands at 10.18 million, which will give credibility and financial incentives to the early investors that help Sky Clear 2040 go through the first 2 phases where revenue will be minimal.



Cash Flow for the 2024-2040 period used to calculate de NPV

Conclusion

Overall, tackling contrails is seen as the best hanging fruit for disrupting aviation impact on global warming. Yet a lot of uncertainties are to be solved by 2040 on where, how, and why contrails have such an impact. A team effort is therefore required to collect data and push forward the research. This will be driven by how important the market of Non Co2 Carbon Credit will be in twenty years and the potential very lucrative return on investment for every stakeholder.

In our Particular project, the key part is believing into such a technical disruption. Yes, uncertainties remain on the technical feasibility of the project and to implement it on a global scale. However, as some areas are already known to be unavoidable operationally with rerouting: The need to explore other solutions such as ours will never be that high.

While doing the most important part, namely, search and development in our project, data collection and understanding will make a leap forward. Consequently, when the device is going to be integrable, it will be exclusively implemented on aircrafts that emit the most contrails of the airlines, according to their most taken routes.

Ultimately, disruption is a risk, and the higher is the risk, the higher is the reward: let us clear the skies of contrails.

Let us tackle a significant impact of aviation on the environment.

Let us make it together, now has never been a better time.

Sky Clear 2040

Reducing half of aviation's impact on the environment



Bibliography

1. United Nations, *For a livable climate: Net-zero commitments must be backed by credible action*, 2024 <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>.
2. ICAO, 41st Session of the ICAO Assembly – Environment, 2022, <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/A41-ENV.aspx>
3. Airbus, ZEROe, Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft, 2024, <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe>
4. Sustainable aviation fuels : A new generation of reduced emissions fuel, Airbus, 2024, <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/sustainable-aviation-fuels>
5. *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, Faculty of Science and Engineering, Manchester Metropolitan University and Several other stakeholders, 2020, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689#sec3>
6. Global aviation contrail climate effects from 2019 to 2021 Roger Teoh¹, Zebediah Engberg², Ulrich Schumann³, Christiane Voigt^{3,4}, Marc Shapiro², Susanne Rohs⁵, and Marc E. J. Stettler¹ <https://acp.copernicus.org/articles/24/6071/2024/acp-24-6071-2024.pdf>
7. Google, Project Contrails: A cost-effective and scalable way AI is helping to mitigate aviation's climate impact, 2024, <https://sites.research.google/contrails/>
8. Satavia, Contrail prevention through flight plan modification, 2024, https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/4_2_satavia_decisionx_nz_2022_euspa.pdf
9. Reviat by breakthrough energy, website of the company, 2024, <https://contrails.org/science>
10. EUROCONTROL, Data Snapshot #32 focusing on continuous descent operations at the top 25 airports in Europe, 2022, <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-data-snapshot-32-focusing-continuous-descent-operations-top-25-airports>
11. Cranfield University, F G NOPPEL, PHD : CONTRAIL AND CIRRUS CLOUD AVOIDANCE TECHNOLOGY, 2007, <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/server/api/core/bitstreams/b4588ce3-f40b-42e6-bc0c-464403d2eabf/content>
12. TSD surface drive, Cavitation Phenomenon and Surface Drive Systems, 2024, <https://www.surfacedrive.net/Cavitation-Phenomenon-And-Surface-Drive-Systems-id45629676.html>
13. Rolls Royce PLC, METHOD, AND APPARATUS FOR SUPPRESSING AEROENGINE CONTRAILS, 2008, <https://patents.justia.com/patent/20100043443>
14. German Environment Agency, Integration of Non-CO₂ Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA, 2020, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-28_climatechange_20-2020_integrationsnonco2effects_finalreport_.pdf
15. IPCC, 2022 report : Transport, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter10.pdf
16. Airbus, Global Market Forecast 2024, https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2024-07/GMF%202024-2043%20Presentation_4DTS.pdf
17. Satavia, Contrail management process and analysis, 2023, <https://satavia.com/wp-content/uploads/2023/11/Airline-Contrail-Management-briefer.pdf>
18. IATA, Willie Walsh's Report on the Air Transport Industry at the 80th IATA AGM, 2024, <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-speeches/2024-06-03-01/>
19. European Commission, Non-CO₂ MRV Consultation Meeting, 2024, https://climate.ec.europa.eu/document/download/b895f58d-0bdf-4ecb-b97a-d478c5b70b80_en?filename=event_202311201_presentation_en.pdf
20. ICAO, 2024 ICAO Symposium on Non-CO₂ Aviation Emissions, <https://www.icao.int/Meetings/SymposiumNonCO2AviationEmissions2024/Pages/default.aspx>
21. ICAO, Analyses in Support of the 2022 CORSIA Periodic Review, [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/2_CAEP_CORSIA%20Periodic%20Review%20\(C225\)_Focus%20on%20Costs.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/2_CAEP_CORSIA%20Periodic%20Review%20(C225)_Focus%20on%20Costs.pdf)
22. IAGOS, website of the association, 2024, <https://www.iagos.org/>
23. Air France and Météo France, Prediction of contrails formation & Observation process, 2023, <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2023-11/2023-11-07-contrails-conference-session-004-curat-pechaut-prediction-contrail-formation-observation-process.pdf>

Comme annoncé par
Emmanuel Chiva
Délégué Général pour l'Armement
(DGA),

le sujet des USAIRE Student
Awards 2025 s'intitule :

**“What turning point(s) should the
aeronautics industry take to
maintain - or even increase - its
attractiveness to future talents and
investors?”**

Avec le généreux soutien de nos sponsors

Sponsors du gala



Sponsors des USAIRE Student Awards



Sponsors de la tombola



Brochure imprimée avec le généreux soutien de

