



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

SOMMAIRE

Résumé.....	2
Introduction.....	2
I. Les traînées de condensation et le noir de carbone.....	3
1. Le noir de carbone, nocif pour l'environnement et la santé.....	3
2. Le noir de carbone, une matière première valorisable.....	4
II. RevoluSmog, un filtre à particules innovant.....	4
1. Choix de la technologie utilisée.....	5
2. Notre produit : RevoluSmog, transformez les émissions en solutions.....	5
III. Mise en œuvre économique de RevoluSmog.....	7
1. La structure économique de RevoluSmog.....	7
2. La logistique RevoluSmog.....	8
3. Prévision Financière.....	9
4. Reflections complémentaires.....	10
Conclusion.....	11
Bibliographie.....	12

RÉSUMÉ

Qu'est ce que **REVOLUSMOG** ? 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. **REVOLUSMOG** 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 mondial.

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), réalisé 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 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 pour 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

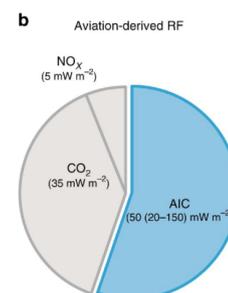
différentes priorités écologiques. L'aviation d'affaire est 10 fois plus émettrice de CO₂ par passager que l'aviation commerciale, avec jusqu'à 14% de la pollution du secteur due aux jets privés selon L'ONG Transport & Environnement (2021). L'aviation militaire a pour enjeu la vitesse, mais également la facilité d'utilisation et de maintenance. Une modification des engins militaires dans une optique écologique ne doit donc pas impacter leur efficacité ou leur maintenance. Ce sous-secteur est donc mis à l'écart en première intention pour notre innovation ; nous nous sommes donc focalisées sur les avions de ligne et les jets privés.

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.

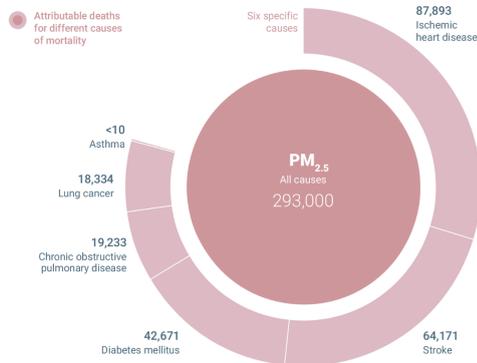


Forage radiatif de l'aviation, Carbone 4 (AIC: aircraft-induced cloudiness, RF: radiative forcing)

Le noir de carbone renforce également l'absorption de la 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 Albédo, 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 et cérébrovasculaires et de diabète entre autres.



Mortalité par particules fines en Europe (EEA)

2. LE NOIR DE CARBONNE, UNE MATIÈRE PREMIÈRE VALORISABLE

Il est à noter que le noir de carbone n'est pas qu'un polluant, mais également une matière première.

Il existe en effet 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 entre 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 crée 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, plastique, céramique..., et également pour des produits très divers (1%) comme dans l'appâtage du cuir, la fabrication de batteries de piles sèches, conducteurs électriques, blindage contre l'interférence électrique, plastiques conductibles et antistatiques, bandes vidéos, agent de laboratoire (séparation et point de solidification), etc.

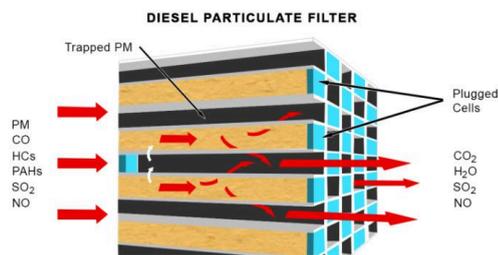
II. REVOLUSMOG, UN FILTRE À PARTICULES INNOVANT

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. **REVOLUSMOG** 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 ainsi réduire les impacts écologique 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, **REVOLUSMOG**, renforcera la réputation du secteur aéronautique, vu comme acteur de transition et d'innovation durable. Sur du plus long terme, **REVOLUSMOG** contribuera à la pérennité du secteur et à l'adaptation rapide des appareils, concurrencés par des alternatives de rupture.

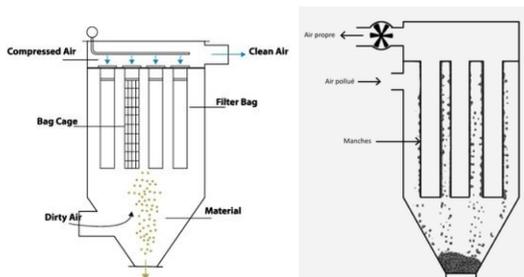
1. CHOIX DE LA TECHNOLOGIE UTILISÉE

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)

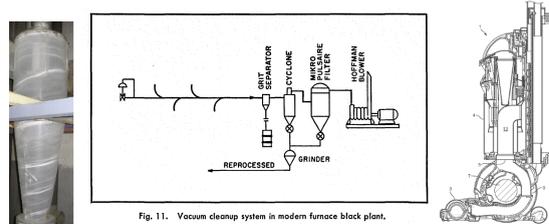
Certes, le filtre à poche et le filtre à manche couramment utilisés en usines pour les particules fines permettent respectivement de garder le débit et la vitesse d'entrée en sortie et d'être résistants. Mais le filtre à poche a l'inconvénient de prendre une place non négligeable et le filtre à manche robuste est trop lourd.



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

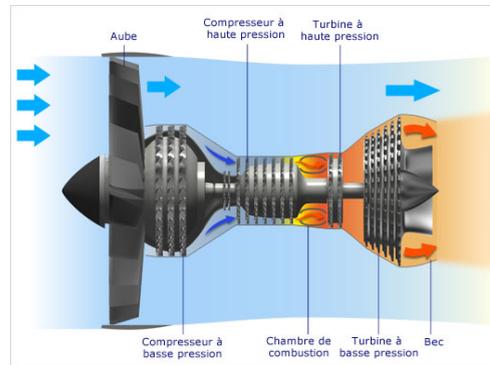
Face à l'absence de solution technique adaptée à l'aviation, notre étude s'est finalement portée sur le cyclone, un filtre facile d'utilisation, nécessitant peu de maintenance, dont la vitesse de sortie des particules peut valoir au moins la vitesse d'entrée. Il est également facile et peu coûteux de 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.



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.



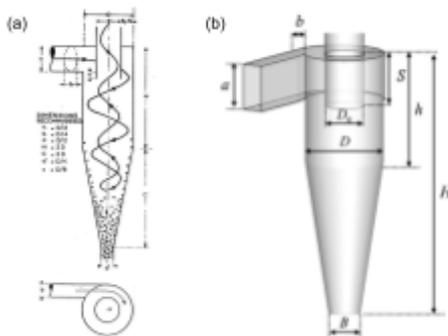
Moteur CFM56 (Olympus)

2. NOTRE PRODUIT : **REVOLUSMOG, TRANSFORMEZ LES ÉMISSIONS EN SOLUTIONS**

REVOLUSMOG 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. **REVOLUSMOG** 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 minime, 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. **REVOLUSMOG** 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. **REVOLUSMOG** 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 **REVOLUSMOG** 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.

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

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

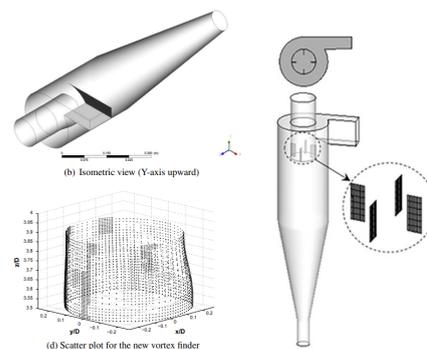
particules (densité, diamètre, module d'élasticité, le ratio de Poisson, limite d'élasticité, coefficient de friction,...)(Q.Wei et a, 2019)

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 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 simultanés 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 caractéristique du mélange gaz-particules fines (noir de carbone). La perte de charge ne sera que minime, 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 sera filtré, pour prémunir de tout problème dans le cas où le réservoir plein sera sans possibilité de vidage. Les employés de notre service 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.

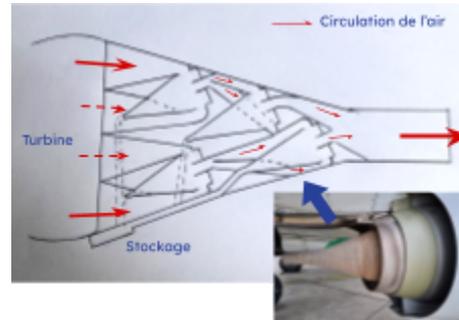
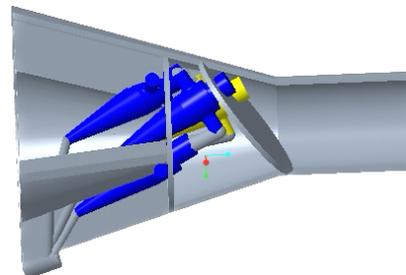


Schéma de notre innovation, permettant de comprendre le mouvement de l'air dans l'installation



Première modélisation 3D de notre innovation

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.

III. MISE EN ŒUVRE ÉCONOMIQUE DE REVOLUSMOG

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. **REVOLUSMOG** 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 **REVOLUSMOG** aux moteurs d'avions permettra de diminuer l'impact écologique de l'aviation, tout en en faisant un acteur majeur de l'économie circulaire.

1. LA STRUCTURE ÉCONOMIQUE DE REVOLUSMOG

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 **REVOLUSMOG**. 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 **REVOLUSMOG** 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.), **REVOLUSMOG** 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 situées 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.

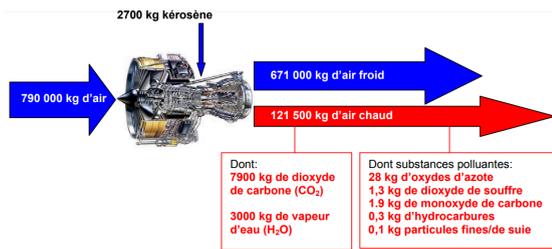
Ces entreprises possèdent en effet des filiales dans de nombreux pays, ce qui permettra de rester sur un circuit court, limitant le transport et donc l'impact carbone. Nous nous appuyerons également sur leur base client, locaux et déjà fidélisés. La vente de noir de carbone provenant de l'économie circulaire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

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

2. LA LOGISTIQUE REVOLUSMOG

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, **REVOLUSMOG** réalisera un partenariat avec les aéroports, pour que les employés chargés du plein d'essence se chargent de la récolte du noir de carbone. **REVOLUSMOG** se chargera de la formation du personnel. Nous prévoyons de vider l'espace de stockage toutes les 18h de vol environ 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 de 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 **REVOLUSMOG** 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 à déchargement 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 $(0,92 \times 7 + 0,08 \times 1) \times 7500 \times 0,1g = 4890 kg$ c'est-à-dire 2,445 m³ de particules fines récupérés par semaine.

Tout aéroport partenaire **REVOLUSMOG** sera en mesure de récupérer le noir de carbone. Le pilote sera donc formé pour désactiver le filtre au cas où le stockage serait plein et la récupération impossible, ou bien qu'un problème survient 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 **REVOLUSMOG** 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 **REVOLUSMOG** 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 oeuvre 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 est porteur.

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 27191 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 **REVOLUSMOG**, 54,4 millions de \$/an de chiffre d'affaire 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 comprennent tout d'abord la rétrocession d'un pourcentage du produit des ventes aux propriétaires des avions ainsi que les frais fixes de **REVOLUSMOG**, 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 couts 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 appareils nécessaires au contrôle et purification du noir de carbone et les locaux associés.. Enfin, nous gardons une enveloppe pour la recherche et développement, le marketing, la comptabilité et les frais annexes comme les frais généraux ou l'hébergement d'un site web (serveur, nom de domaine...).

4. REFLECTIONS COMPLÉMENTAIRES

La réussite de **REVOLUSMOG** 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 **REVOLUSMOG** 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 **REVOLUSMOG**. 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 **REVOLUSMOG** 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

REVOLUSMOG 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, **REVOLUSMOG** transforme le noir de carbone en une matière première revendable, en le récupérant sans maintenance complexe ou danger d'innalation. Il permet ainsi à l'aviation de limiter son impact écologique et sanitaire, en offrant un produit adaptable sur des moteurs neufs comme usagés et aux 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 **REVOLUSMOG**. En effet, les traînées de condensations 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.

BIBLIOGRAPHIE

- 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/pla-nete/aviation-decarbonee/controler-lair-pour-voler-plus-efficacement/>
- Aeronevstv, 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.jhazmat.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 particles 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/fets/tfans/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.
- Comprendre la combustion du carbone et des hydrocarbures, n.d. . digiSchool. URL <https://www.digischool.fr/cours/comprendre-la-combustion-du-carbone-et-des-hydrocarbures>.
- 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>