



AVIATION DÉCARBONÉE

Projets prometteurs et défis à surmonter
face à la croissance du trafic aérien

AVIATION DÉCARBONÉE

Projets prometteurs et défis à surmonter face à la croissance du trafic aérien

Prévoyant un doublement de la flotte aérienne mondiale d'ici 2040, la filière aéronautique se mobilise pour compenser l'impact environnemental de cette tendance. Elle y est poussée d'une part par les pouvoirs publics, qui légifèrent pour décarboner les transports, et d'autre part par la population sensible à la pollution générée par l'aviation et favorable au développement du ferroviaire.

Les initiatives se multiplient sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Les constructeurs aéronautiques cherchent à concevoir de nouveaux avions moins consommateurs ou dotés d'un mode de propulsion plus vertueux. Les motoristes s'adaptent en proposant des systèmes plus efficaces. Les énergéticiens s'engagent quant à eux à produire des carburants durables, tandis qu'une volonté d'optimisation des pratiques se met en place au niveau des infrastructures ou de la navigation aérienne.

Les grands groupes comme les start-up actionnent le levier de l'innovation technologique pour accompagner la croissance du marché. La compétitivité des solutions et leur rythme de développement représentent toutefois deux écueils, alors que des voix s'élèvent pour contraindre davantage le secteur à réduire ses émissions de gaz à effet de serre.



DANS CE DOSSIER

| | |
|--|-----------|
| POINTS-CLÉS ET ENJEUX | 4 |
| LA NÉCESSAIRE DÉCARBONATION D'UN MARCHÉ AÉRIEN EN PLEINE CROISSANCE | 8 |
| Comment concilier développement de l'aviation et réduction de la pollution ? | 8 |
| Des ambitions et un soutien à long terme | 11 |
| L'écosystème se structure, à l'international comme en France | 14 |
| Des défis à surmonter pour décarboner avec succès le secteur | 17 |
| LA FILIÈRE AÉRONAUTIQUE EN ORDRE DE MARCHÉ | 21 |
| La production de carburants durables amenée à croître fortement | 21 |
| Les équipementiers poussés à innover | 26 |
| Des pistes à creuser en-dehors de la construction aéronautique | 34 |
| Une décarbonation déjà à l'œuvre | 38 |
| L'AÉRONEF DÉCARBONÉ FOCALISE L'ATTENTION DES CONSTRUCTEURS | 40 |
| Des prototypes et des projets de recherche menés par les acteurs | 40 |
| L'avion bas carbone attire les constructeurs historiques comme les start-up | 42 |
| Étendre la décarbonation des usages grâce à d'autres types d'aéronefs | 47 |
| FORCES EN PRÉSENCE | 50 |
| Constructeurs aéronautiques français | 50 |
| Équipements français positionnés dans l'aéronautique bas carbone | 51 |
| Axes et faits notables | 52 |
| LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE | 54 |
| LEXIQUE | 57 |
| SOURCES UTILISÉES | 58 |

POINTS-CLÉS

Ce qu'il faut retenir

CHIFFRES-CLÉS

3+ %

Poids du secteur aérien dans les émissions de CO₂

1 550

milliards de dollars nécessaires pour décarboner le secteur aérien d'ici 2050

x2

L'évolution de la flotte mondiale d'ici 2040

1 300

milliards de dollars nécessaires pour répondre à 20 % de la demande mondiale en SAF d'ici 2050

x2,5

L'évolution du trafic aérien d'ici 2050

Part des SAF dans le transport aérien

3 %

La part des carburants durables dédiés à l'aérien

2 %

2025



70 %

2050

MOTEURS

POLITIQUE ENVIRONNEMENTALE

- Trajectoire de décarbonation des transports engagée par l'État
- Soutien à la filière, notamment pour l'avion à hydrogène
- Objectifs partagés par les compagnies au niveau international

PRESSIONS EXTÉRIEURES

- Concurrence du train et interdiction de certaines lignes aériennes
- Velléités de réduction du trafic dans quelques aéroports
- Critiques venant de la population : *flygskam*

INNOVATION

- Progrès dans les défis techniques au sujet de la propulsion
- Développement d'une filière de carburants durables
- Dynamisme de l'écosystème via des technopôles et les start-up

POINTS-CLÉS

Ce qu'il faut retenir

PAYSAGE CONCURRENTIEL

| AVIONNEURS | ÉQUIPEMENTIERS | START-UP | COMPAGNIES AÉRIENNES |
|--|---|--|---|
| <p>Renouvellent les flottes d'avions par des modèles moins consommateurs</p> <p>Développent des avions bas carbone</p> <p>Nouent des partenariats et mènent des projets communs sur des questions connexes</p> | <p>S'adaptent aux choix des avionneurs pour leur fournir les pièces adéquates</p> <p>Améliorent les performances écologiques de leurs équipements</p> <p>Investissent dans les systèmes de propulsion alternatifs et les pièces liées</p> | <p>Développent de petits avions électriques ou à hydrogène</p> <p>S'adressent au marché de l'aviation de loisir, au transport d'urgence ou encore du fret pour zones isolées</p> <p>Développent d'autres types d'aéronefs pour diversifier les débouchés</p> | <p>S'engagent à décarboner leurs flottes et leur activité</p> <p>Recourent à des avions moins polluants</p> <p>Concluent des contrats d'approvisionnement en SAF auprès des énergéticiens</p> |

FREINS ET DÉFIS

| | |
|--|--|
| COMPLEXITÉ TECHNIQUE | <ul style="list-style-type: none">• Batteries et hydrogène : technologies pas suffisamment matures et performantes pour être utilisées par les avions de grande taille• SAF : génèrent malgré tout une pollution non négligeable• Temps de développement trop longs par rapport à l'urgence climatique |
| CONCURRENCE DES AUTRES SECTEURS | <ul style="list-style-type: none">• Opinions et politiques favorables au transport ferroviaire• Volonté d'autres secteurs industriels de s'approvisionner en SAF |
| PROBLÉMATIQUES FINANCIÈRES | <ul style="list-style-type: none">• Faible soutien accordé aux start-up• Difficultés juridiques et concurrentielles pour taxer le kérosène• Investissements trop faibles dans la production de SAF |

L'hybridation pour concilier court terme et long terme

Du fait de la structure de son tissu entrepreneurial, le secteur fait face à **d'importantes disparités** dans son développement. Les grands groupes aux moyens imposants peuvent lancer d'ambitieux programmes de R&D, tandis que **les start-up peinent à financer leurs innovations**. Les investisseurs et le secteur bancaire se montrent réticents à soutenir le domaine industriel, intense en capital et synonyme de projets à maturité lointaine. Cette situation est en outre **exacerbée par le contexte de restriction monétaire**, qui pénalise l'investissement et détourne l'épargne des placements les plus risqués.

Les acteurs de la filière doivent donc **s'adapter à cet environnement** afin de se positionner judicieusement. Encore lointains et incertains, les projets de propulsion tout électrique ou à l'hydrogène sont de plus en plus complétés par **des étapes intermédiaires dans une logique d'hybridation**. Les moteurs thermiques permettent de développer des solutions à plus court terme, **garantissant la viabilité de l'entreprise**, sans procéder à des changements technologiques trop importants. Il s'agit dans ce cadre de **recourir aux**

carburants durables pour décarboner au plus tôt le transport aérien, même de façon partielle. Les phases de vol les plus consommatrices peuvent alors être gérées par le moteur électrique uniquement. **Une activité solide et rentable** représentera un atout pour obtenir plus facilement le soutien des acteurs financiers pour les projets de plus long terme.

Domaine plus accessible que les long-courriers pour les nouveaux entrants, **l'aviation légère** peut recourir à des systèmes à batteries comme à une motorisation basée sur l'hydrogène. **Le choix du 100 % électrique** peut sembler moins risqué. Tout comme pour les SAF, **l'approvisionnement en hydrogène va rester très limité** par rapport aux besoins, ce qui devrait favoriser les acteurs pouvant **payer un premium et s'engager sur des volumes importants** auprès des fournisseurs. Les infrastructures demeurent également embryonnaires. De son côté, **la filière des batteries est plus mature et structurée**, et l'implantation de gigafactories va assurer un approvisionnement supérieur.

Diversifier les positionnements et les débouchés

Avionneurs, équipementiers, fournisseurs de services de location ou de maintenance d'aéronefs : **les opportunités se révèlent multiples** tout au long de la chaîne de valeur. En misant sur la technologie et **des solutions rapides à implémenter** pour décarboner davantage l'aviation, il est possible pour un nouvel entrant de se positionner sans forcément s'engager dans la construction de nouveaux avions. Outre les équipements, **la science des matériaux** constitue un terrain encore exploitable pour réduire la consommation de carburant, voire diminuer les besoins en maintenance. Combiné à l'enjeu écologique, **l'argument économique reste un élément clé** pour valoriser les solutions et faciliter leur adoption par les acteurs.

Il est également possible de s'éloigner de l'aviation traditionnelle pour **proposer d'autres formes d'aéronefs**. Cette approche permet de cibler d'autres marchés et ainsi **d'éviter une concurrence directe** avec les acteurs déjà présents. De petits appareils à propulsion électrique, hybride ou hydrogène sont proposés dans la mobilité

urbaine, en s'appuyant sur **des décollages et atterrissages à la verticale (VTOL)** à l'aide de rotors. L'approvisionnement de zones reculées, les interventions de services d'urgence ou encore le tourisme constituent autant de débouchés potentiels pour ces innovations. **Les dirigeables font également leur retour**, et peuvent assurer, comme les engins à VTOL, diverses missions de façon efficace et décarbonée, telles que la surveillance de zones ou d'infrastructures.

Les nouveaux entrants disposent d'**une variété de possibilités pour se positionner**. La construction des appareils en constitue l'une des principales, mais les segments des équipements et des services représentent aussi des approches prometteuses. **Divers choix de modèles économiques** peuvent en outre être suivis : vente des appareils à divers opérateurs, sous-traitance et marque blanche, systèmes de location de longue durée ou de façon ponctuelle, solutions intégrées de fourniture de divers appareils et de la maintenance... Le marché reste ouvert à de nombreuses options.

LA NÉCESSAIRE DÉCARBONATION D'UN MARCHÉ AÉRIEN EN PLEINE CROISSANCE

Comment concilier développement de l'aviation et réduction de la pollution ?

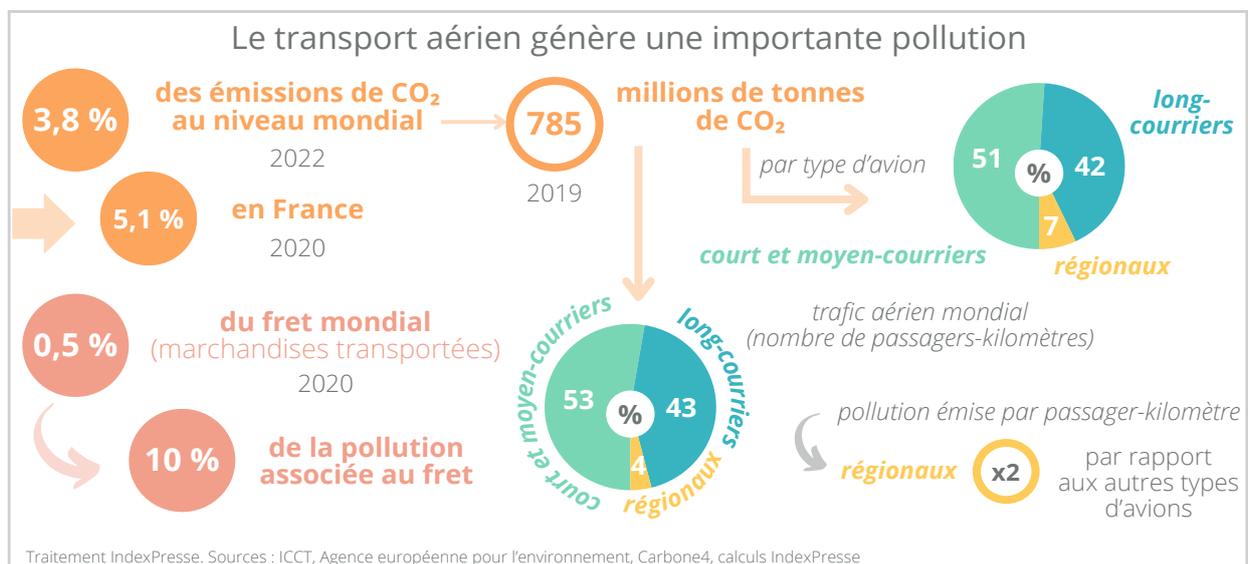
Un secteur polluant et en expansion

Mobilité et transport par les airs : des activités très émettrices

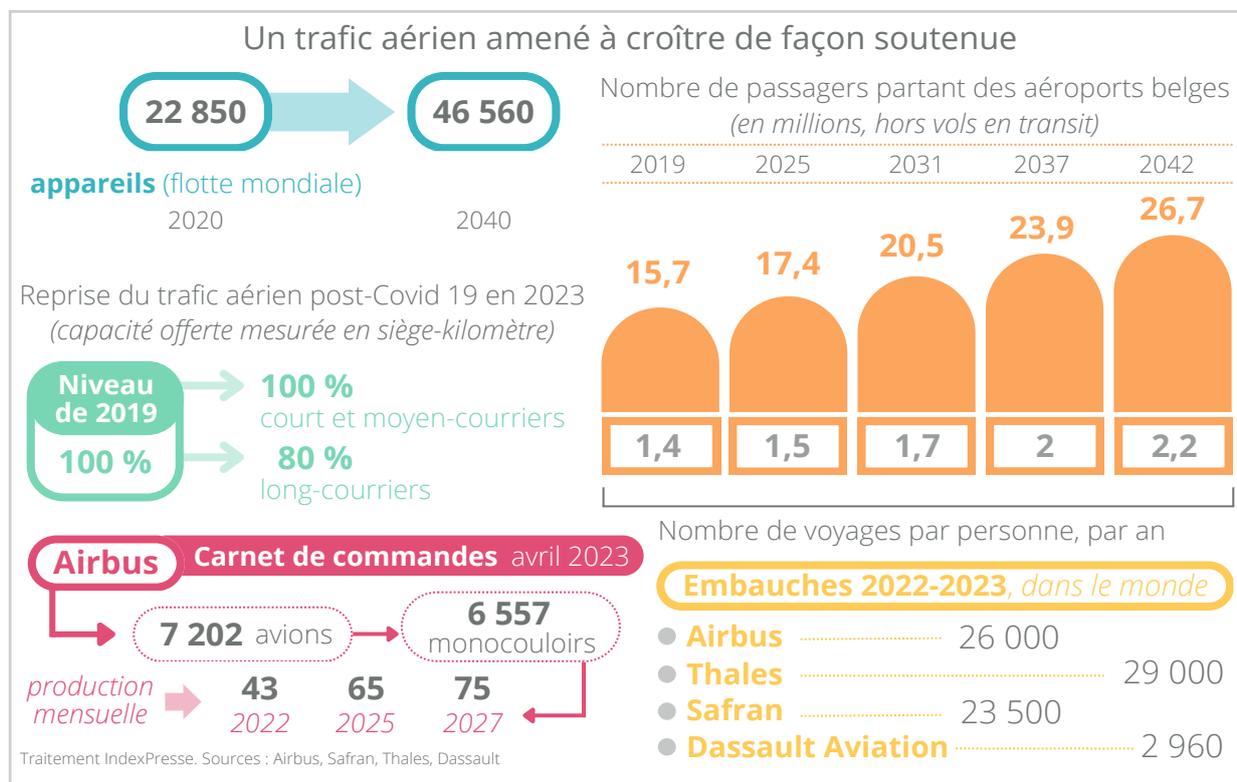
Considéré dans sa globalité, à la fois pour le transport de personnes et de marchandises, le secteur de l'aviation se montre fortement polluant. Ces émissions de gaz à effet de serre représentent **chaque année plus de 3 % des rejets mondiaux de CO₂**. Cette part peut même s'avérer plus importante dans un pays à l'électricité majoritairement décarbonée comme la France. Les principales sources d'émissions de CO₂ dans ce secteur sont liées à **la combustion de kérosène** par les avions en vol. La phase de fabrication ne contri-

bue que marginalement au total de la pollution générée.

Si le transport sur moyenne ou longue distance rassemble la quasi-totalité des passagers, les lignes régionales se révèlent **plus polluantes par passager-kilomètre** (agrégation des distances parcourues par chaque passager). Avions de plus petites tailles, éventuellement moins remplis ou moins performants sur le plan énergétique... : **l'aviation régionale semble moins optimisée**, émettant en 2019 plus de 160 grammes de CO₂ par passager-kilomètre, contre moins de 90 pour les court, moyen et long-courriers.



LA NÉCESSAIRE DÉCARBONATION D'UN MARCHÉ AÉRIEN EN PLEINE CROISSANCE



Le fret aérien constitue également **un moyen de transport de marchandises particulièrement polluant** : selon le cabinet Carbone4, un avion cargo moyen-courrier génère 1,7 kg de CO₂ (ou équivalent) par tonne-kilomètre, contre 71 grammes par camion, 10 grammes en train (en France) et 8 grammes en porte-conteneurs.

Une forte hausse prévue du trafic

Le transport aérien devrait connaître une augmentation continue dans les prochaines années. Le potentiel est considérable : aujourd'hui, **seule une minorité d'individus prend régulièrement l'avion**. Au niveau mondial, 80 % de la population n'a jamais pris l'avion, une part plus faible en France (33 %). En 2018, seuls 11 % de la population étaient montés au bord d'un avion, et **4 % pour un voyage à l'étranger**. Le trafic aérien se concentre par ailleurs sur une clientèle restreinte, **la moitié des émissions de CO₂ de l'aviation commerciale étant le fait de 1 % des voyageurs**. Dans le même temps, entre la moitié et les deux tiers de la population des pays développés ne prend jamais l'avion, ou de façon très sporadique, avec

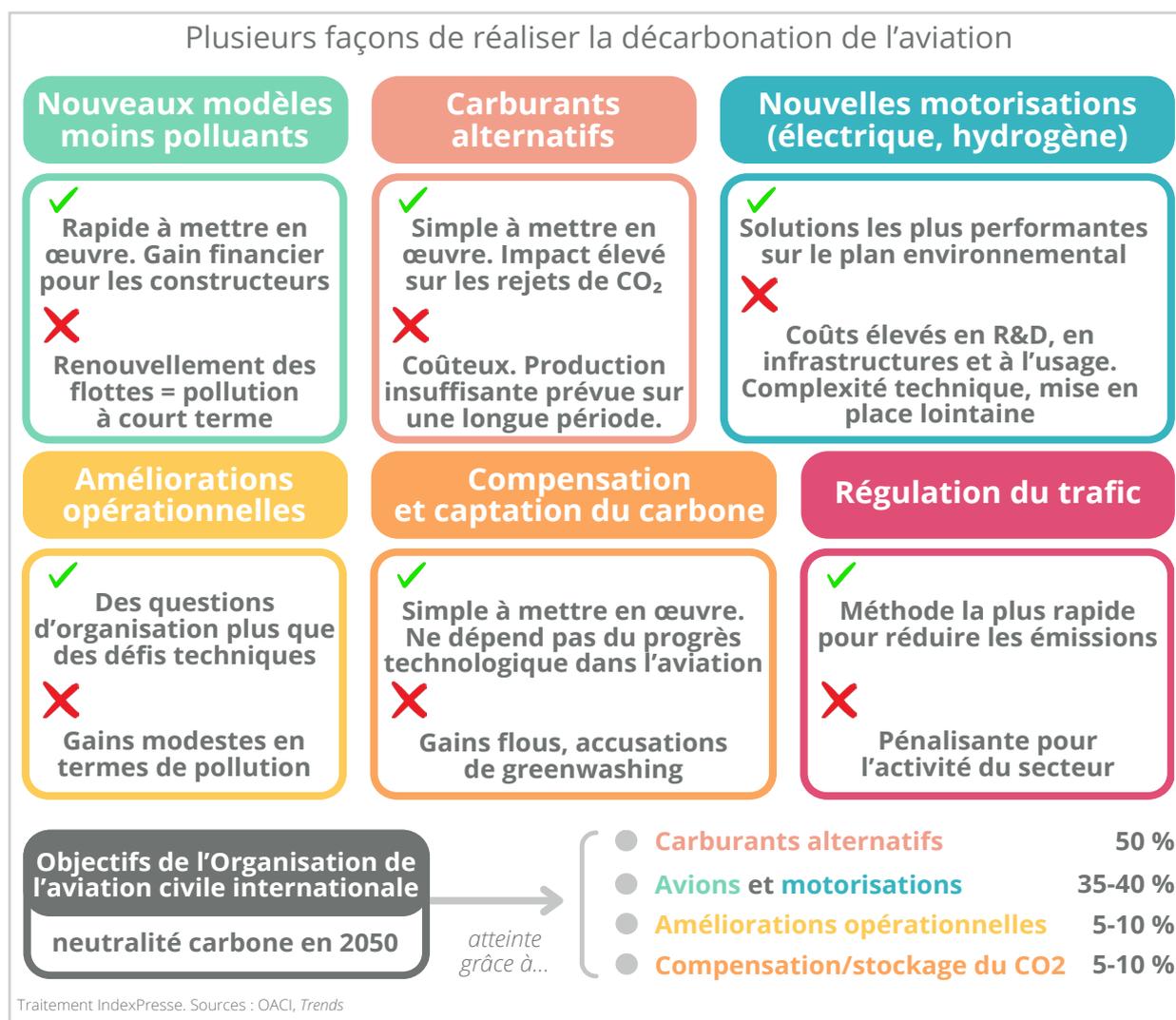
des disparités selon le niveau de revenu. Synonyme de réussite sociale et de développement du pays, **le voyage en avion reste un marqueur fort** dans les pays en développement, que ce soit au niveau des décideurs comme de la population.

Les perspectives pour le trafic aérien semblent donc prometteuses, et les acteurs du secteur prévoient **une forte croissance dans les prochaines années**. Nombre de passagers, fréquences de voyages, flotte mondiale d'avions, recrutements dans l'industrie : quel que soit l'indicateur retenu, le marché se montre dynamique, ce qui devrait **pousser à la hausse ses émissions de CO₂**. L'Air Transport Action Group (ATAG), un groupement d'acteurs du secteur dédié à sa soutenabilité environnementale, estime que le trafic de passagers devrait **croître de 3,1 % à 3,6 % par an**, soit une multiplication par 2,5 d'ici 2050. Les projections du groupe aéronautique Airbus tablent ainsi sur **un doublement de la flotte mondiale d'avions** en vingt ans, notamment du fait de la croissance des pays émergents. Le constructeur a par exemple décroché **un contrat pour 500 avions** en juin 2023 avec la compagnie indienne IndiGo, pour des livraisons entre 2030 et 2035.

Différentes voies pour limiter la hausse des émissions

Diverses méthodes sont envisagées par le secteur pour parvenir à la neutralité carbone à l'horizon 2050. La forte hausse du trafic aérien dans les années à venir **contraint les industriels et les compagnies aériennes** à considérer une variété d'options pour décarboner leur activité, ou du moins pour **limiter les rejets de CO₂**. Les solutions les plus prometteuses s'avèrent aussi celles dont la mise en place serait la plus lointaine, sans compter les défis techniques à relever. Dans l'intervalle, les acteurs misent sur **des approches**

plus conventionnelles d'amélioration incrémentale. Le recours à des carburants moins polluants, les SAF (*sustainable aviation fuels*), en français CAD (carburants d'aviation durables), permettent notamment de **conserver une motorisation thermique**. Les performances accrues des nouveaux avions viennent également contribuer à la réduction des émissions, tandis que la compensation carbone (stockage du CO₂ et plantation d'arbres) apparaît comme **une méthode simple pour stabiliser à court terme** les rejets polluants du secteur.



Des ambitions et un soutien à long terme

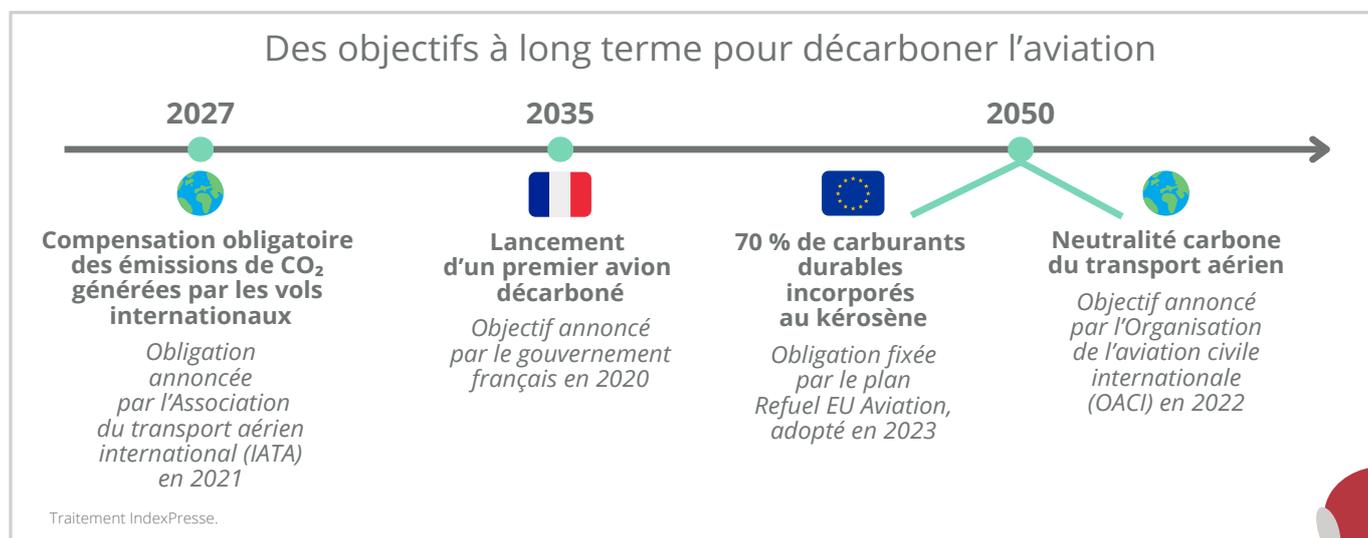
Préparer les prochaines décennies de l'aviation

La décarbonation de l'aviation va constituer la priorité du secteur durant de nombreuses années. En 2019, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), dépendante des Nations Unies et regroupant 193 États membres, s'était engagée à ce que le **transport aérien atteigne la neutralité carbone d'ici 2050**. Elle s'inscrivait ainsi dans la trajectoire de l'Accord de Paris, qui vise à limiter le réchauffement de la Terre à + 1,5°C comparé au niveau préindustriel, précisait *La Tribune*. La promesse a été définitivement adoptée en 2022, lors de l'Assemblée générale de l'OACI, qui appelait alors les États à "faire preuve de beaucoup plus d'ambition et d'investissement afin que l'aviation soit entièrement décarboné d'ici à 2050 ou avant". L'Association internationale du transport aérien international (IATA) a félicité cette décision, tout en **prônant la mise en place de "politiques publiques bien plus solides en faveur de la décarbonation"**.

Les critiques émises par plusieurs ONG remettent en question la légitimité d'un tel engagement. Malgré cela, l'objectif de parvenir à la neutralité carbone d'ici 2050 crée une dynamique et **suscite un élan d'émulation au sein du secteur aérien**. Le gouvernement français avait par exemple exprimé sa volonté, en 2020, qu'un **avion décarboné soit mis au point par la filière nationale**



dès 2035 afin de "devancer les concurrents américains et chinois" et de "moderniser en profondeur les quelque 1 300 entreprises françaises du secteur en les fédérant autour d'un projet 'totem', apte à devenir le symbole de l'excellence de l'ingénierie française et européenne", note le journal *Les Échos*. Ainsi, même si l'objectif de 2035 est jugé "extrêmement ambitieux", il doit permettre à la filière de **préparer son avenir et d'aborder une nouvelle ère**, la pandémie de Covid-19 ayant fait office de point de bascule. "La crise offre une opportunité unique de rassembler les forces sur une nouvelle avancée aéronautique", estimait Patrick Daher, président de l'industriel Daher.



La réglementation se durcit mais ne convainc pas entièrement

Afin de respecter les objectifs pris par l'aviation à différentes échelles, la réglementation doit imposer de nouvelles obligations aux acteurs du secteur. Si la volonté d'atteindre la neutralité carbone à horizon 2050 demeure encore peu encadrée légalement, **plusieurs textes et règlements apparaissent ou évoluent pour tendre vers ce but**, malgré les critiques entourant la faible ou la discutabile portée de certaines mesures.

- **Refuel EU Aviation accélère sur les carburants d'aviation durable (SAF)**

Voté par le Parlement européen en septembre 2023, le plan Refuel EU Aviation **fixe des seuils de carburants durables (SAF) à intégrer au kérosène** pour les compagnies aériennes œuvrant sur le territoire européen. "À compter de 2025, le kérosène devra comporter au début 2 % de carburants d'aviation durable, puis 6 % en 2030, 20 % en 2035, 34 % en 2040, 42 % en 2045 et jusqu'à 70 % en 2050", liste *Les Échos*. Une partie de ces SAF, jusqu'à 35 % en 2050, devront être des carburants de synthèse, n'incluant pas de biomasse. Les compagnies ne respectant pas ces seuils s'exposent à des amendes.

Selon *Les Échos*, ce plan a été accueilli favorablement par le secteur ainsi que plusieurs ONG. "Les

investisseurs et les industriels ont désormais reçu **un signal clair les invitant à réaliser les investissements nécessaires**", indique A4E, l'association des compagnies aériennes européennes.

Refuel EU Aviation ouvre également la voie à **la création d'un écolabel européen**, permettant aux passagers de distinguer les compagnies aériennes les plus vertueuses en matière environnementale selon l'empreinte carbone émise par chaque vol.

- **Le système de compensation carbone Corsia se généralise**

Depuis 2021, l'OACI a déployé Corsia (*Carbon offsetting and reduction scheme in international aviation*), un système qui **oblige les compagnies aériennes à compenser les émissions carbonées de leurs vols internationaux** dans un cas précis : si le niveau de celles-ci dépasse 85 % de leurs émissions carbone totales de 2019, année choisie comme référence. Jusqu'en 2026, seuls les États volontaires seront soumis à ce système, qui deviendra cependant global en 2027.

Corsia demeure cependant décrié, tant pour **les doutes entourant le bien-fondé de la compensation carbone que pour son faible impact**. Selon l'ONG Transport & Environnement, qui militait pour durcir les seuils d'application, le système actuel ne permettra de compenser que 22 % des émissions du transport aérien mondial en 2030.

L'OACI IMPOSE UN PREMIER JALON EN 2030 POUR LES SAF

Lors de la troisième conférence sur les carburants d'aviation alternatifs (CAAF/3), organisée en novembre 2023, les membres de l'OACI ont décidé d'adopter une nouvelle résolution "imposant que les carburants d'aviation soient 5 % moins intenses en carbone que les carburants fossiles à l'horizon 2030", rapporte *Air & Cosmos*. Cette "étape intermédiaire" doit permettre au secteur de suivre la voie qui le mènera à la décarbonation à l'horizon 2050. Les principales organisations européennes de l'aérien ont félicité cette décision.

La conférence a également débouché sur la reconnaissance de plusieurs grands principes concernant cette transition, dont le fait qu'il est nécessaire de mettre en place un marché et un cadre comptable mondial pour les SAF, que tous les États membres doivent pouvoir y participer, ou que ces États n'ont pas tous la capacité de progresser au même rythme sur la décarbonation.

- **La loi Climat et résilience se concentre surtout sur les vols intérieurs**

Promulguée en 2021 en France, la loi Climat et résilience **limite les vols intérieurs en France** lorsqu'il existe une alternative ferroviaire de moins de 2h30. Ainsi, au printemps 2023, trois lignes ont été supprimées, toutes partant de Paris-Orly et à destination de Nantes, Bordeaux et Lyon. Cinq autres lignes auraient dû être concernées, mais le gouvernement les a conservées en raison d'une offre ferroviaire jugée insuffisante ou d'un temps de trajet finalement supérieur lorsque l'aéroport est situé hors de la ville. **Ces exceptions vont réduire l'impact des vols supprimés** : d'après la Direction générale de l'aviation civile, l'émission annuelle de 55 000 tonnes de CO₂ va être évitée, soit seulement 2,6 % des émissions totales liées aux vols intérieurs français.

La loi Climat résilience contraint également les compagnies aériennes à **compenser 50 % de leurs émissions générées par les vols intérieurs** depuis 2022. Ce taux est ensuite passé à 70 % en 2023, puis atteindra les 100 % en 2024. Tous les exploitants d'aéronefs générant plus de 1 000 tonnes de CO₂ annuelles sur le territoire sont concernés, rappelle *Actu Environnement*.

Enfin, un aéroport du territoire ne pourra plus être créé ou étendu par le biais d'une expropriation pour cause d'utilité publique, si un tel projet "entraîne une augmentation nette, après compensation, des émissions de gaz à effet de serre". Une mesure dénoncée par le RAC, Réseau Action Climat, qui indique que **de tels procédés d'expropriation ne sont quasiment plus utilisés par les aéroports**, déjà détenteurs de domaines très vastes leur permettant d'étendre librement leurs infrastructures. "Selon le RAC, qui a passé en revue chaque projet, les extensions des aéroports de Nice, Marseille, Rennes, Montpellier, Bordeaux, Lille et Caen ne nécessitent pas d'expropriation", listait *Le Monde* en 2021.

Un soutien public conséquent en France

Depuis la crise de Covid-19 et la prise de conscience d'un nécessaire changement de paradigme dans l'aviation, **l'État français multiplie**

"Nous, Français, on doit être les champions de l'avion ultrasobre. [...] On a les moyens de l'être et de le produire."

Emmanuel Macron, juin 2023.

les aides apportées au secteur afin d'accélérer sa décarbonation. Selon *Le Monde*, les différents plans et vagues d'investissement représentent 8,5 milliards d'euros de soutien public d'ici 2027.

- **Plan de relance de l'aéronautique post-Covid**

En plus de soutenir financièrement la filière qui connaissait une brutale chute d'activité à l'occasion de la pandémie, le plan de relance post-Covid a permis de débloquer 1,5 milliard d'euros pour **booster la recherche technologique sur l'avion décarboné** au cours de la période 2020-2022. "C'est un effort essentiel. On passe d'un budget de R&D public de 135 millions par an à 300 millions cette année, puis 600 millions en 2021 et 2022", détaillait Antoine Bouvier, directeur de la stratégie chez Airbus, lors des annonces du gouvernement. 400 millions d'euros supplémentaires ont également été apportés par des fonds européens.

- **France 2030**

Le plan de relance France 2030 a intégré, en 2022, 1,2 milliard d'euros de nouveaux crédits pour l'aviation, afin de **soutenir les investissements déjà réalisés et de poursuivre dans cette voie.** 800 millions d'euros seront dédiés à la feuille de route technologique portée par le Conseil pour la recherche aéronautique civile (Corac), tandis que 400 millions seront consacrés aux acteurs émer-

gents de l'industrie aéronautique et à leurs nouvelles solutions : motorisation électrique légère, carburants durables, etc.

• Nouvelle salve d'investissements annoncée en juin 2023

À l'occasion d'une visite effectuée chez le motoriste Safran, le président de la République Emmanuel Macron a dévoilé **de nouvelles aides pour que les premiers avions sobres puissent voir le jour dès la fin de la décennie** :

- le financement annuel du Corac sera triplé à partir de 2024 pour atteindre 300 millions d'euros ;
- la filière des carburants durables bénéficiera de 200 millions d'euros, afin notamment de "soutenir la souveraineté énergétique du pays" ;
- le segment des petits avions et jets privés va être doté de 50 millions d'euros afin de développer des appareils alternatifs, fonctionnant à l'électricité ou l'hydrogène.

LES ÉTATS-UNIS SE MOBILISENT

Les États-Unis restent le seul pays, avec la France, "à maîtriser toute la chaîne de production d'un aéronef", indique un rapport sénatorial paru en 2022, même si la Chine accentue ses efforts pour devenir un acteur de poids dans le secteur aéronautique. Dans ce contexte, les États-Unis tendent également à accélérer sur l'aviation décarbonée. En 2020, le gouvernement annonçait un soutien de 12 milliards de dollars aux projets de R&D stratégiques de la filière. L'année suivante, de nouvelles aides dédiées aux infrastructures étaient dévoilées : 300 millions de dollars pour favoriser l'électrification des aéroports et 100 millions afin de réduire leurs émissions polluantes. L'État américain accompagne aussi le développement des carburants durables (SAF) via son *Inflation Reduction Act* qui subventionne la filière.

L'écosystème se structure, à l'international comme en France

Une coordination internationale

Les grandes organisations régissant le transport aérien international sont engagées dans la décarbonation du secteur, **en définissant les objectifs à atteindre et en relayant les différentes initiatives de la filière**. La volonté d'être neutre en carbone en 2050 a ainsi été fixée par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), qui regroupe 193 États membres. L'Association du transport aérien international (IATA), première organisation professionnelle de la filière avec près de 320 compagnies aériennes membres, partage ce même objectif.

L'émulation entourant l'aviation décarbonée et la nécessité d'accélérer sur cette thématique ont débouché sur **la création de nouvelles entités**, notamment à l'échelle européenne :

• Alliance pour l'aviation zéro émission (AZEZA)

Lancée en juin 2022, cette alliance "a pour objectif de rassembler l'ensemble des acteurs du futur écosystème de l'avion propre", indique *Le Parisien*, afin de **promouvoir plus rapidement les technologies de l'avion de demain et lever plus facilement les obstacles** auxquels le secteur pourrait être confronté. Un an et demi après sa création, l'AZEZA regroupait plus de 160 acteurs privés et publics, provenant d'horizons variés : constructeurs et équipementiers aéronautiques, énergéticiens, centres de recherche, start-up, organismes publics, etc.

• Renewable and Low-Carbon Fuels Alliance (RLCF Alliance)

Créée sous l'impulsion de la Commission européenne, la RLCF Alliance est "un instrument de

mise en œuvre des politiques industrielles de l'Union européenne" à propos des carburants durables, explique *Air & Cosmos*. Elle doit permettre de **respecter les objectifs fixés vis-à-vis de ce type de carburant**, que ce soit dans l'aérien ou le maritime, de "résoudre les blocages administratifs ou réglementaires et de stimuler l'investissement financier", poursuit la revue spécialisée. À l'été 2023, 230 membres avaient rejoint l'alliance, qu'ils soient spécialistes de l'énergie, du transport aérien, de l'innovation ou de la finance. Des acteurs extra-européens ont également rejoint le projet, à l'image de Boeing, GE Aerospace ou du pétrochimiste sud-africain Sasol. "C'est très important parce qu'on voit qu'aux États-Unis, dans la région Australie - Nouvelle-Zélande, il y a des initiatives similaires et donc qu'il est important que l'Union européenne ne soit pas isolée", précise Julien Rossi, chef du bureau de représentation auprès de l'UE de Safran, l'un des partenaires majeurs du programme.

• Clean Aviation Joint Undertaking

Ce partenariat public-privé émane d'Horizon Europe, le programme-cadre de recherche et d'innovation de l'Union européenne. Il succède à Clean Sky 2, partenariat du même type amorcé dès 2008. Clean Aviation vise à accélérer l'innovation en matière d'aviation décarbonée, en **facilitant la mise en relation entre industriels et acteurs de la recherche**. Le programme possède un budget de plus de 4 milliards d'euros entre 2021 et 2027, dont 1,7 milliard amené par l'Union européenne et 2,4 milliards portés par les entreprises parties prenantes.

La filière française s'organise

Partenariats, renforcement des budgets, création de nouvelles entités : l'écosystème hexagonal s'articule afin de hâter la recherche et la mise en place de projets concrets autour de l'aviation décarbonée. Acteurs publics comme privés s'engagent dans des initiatives variées.

• Les organisations nationales montrent la voie

En février 2023, les trois principales organisations françaises du secteur – en lien avec la Di-

rection générale de l'aviation civile (DGAC) – ont remis au gouvernement **la feuille de route de la filière concernant sa stratégie de décarbonation** (mise au point de nouveaux avions bas carbone, déploiement d'une production de carburants durables, adaptation des infrastructures aéroportuaires, etc.) :

- la Fédération nationale de l'aviation et de ses métiers (FNAM)
- le Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (GIFAS)
- l'Union des aéroports français (UAF)

En parallèle, le gouvernement s'appuie sur le Conseil pour la recherche aéronautique civile (Corac), organisme créé en 2008 pour "optimiser les efforts des acteurs du transport aérien dans le domaine de la recherche et de l'innovation", reprend *L'Usine Nouvelle*. À l'heure de la décarbonation, **le Corac a vu son budget augmenter et a été désigné comme l'un des principaux bénéficiaires des subventions publiques** liées à la décarbonation, pour les redistribuer ensuite aux entreprises concernées. Certaines sont d'ailleurs membres du Conseil, comme Airbus, Air France, Safran ou Thales.

Enfin, de nouvelles institutions apparaissent. C'est par exemple le cas du Bureau français des e-fuels, fondé à l'été 2023. "Il a vocation à **réunir différents acteurs privés actifs dans l'écosystème des carburants durables et vise à amorcer une réflexion collective**, réunissant experts, professeurs, chercheurs, universitaires, industriels, techniciens et financiers, autour du rôle des e-fuels dans la transition énergétique et du développement d'une filière française", détaille le magazine *Air & Cosmos*.

• Les technopôles et leurs territoires s'impliquent

Premier pôle de compétitivité européen de la filière aérospatiale avec plus de 830 acteurs en son sein, Aerospace Valley, basé en Occitanie et Nouvelle-Aquitaine, veut participer à l'émulation nationale et internationale en accompagnant les entreprises dans leurs travaux, **en aidant au financement de projets et en soutenant les innovations de rupture**. "Nous travaillons à la transposition de la feuille de route Corac et avons

LA NÉCESSAIRE DÉCARBONATION D'UN MARCHÉ AÉRIEN EN PLEINE CROISSANCE

accompagné le lancement de l'appel à projets dédié à la production d'aéronefs bas carbone. Nous avons bon espoir que des projets obtiennent des financements élevés", expliquait en juin 2023 Bruno Darboux, président d'Aerospace Valley, pour *Air & Cosmos*. Le pôle de compétitivité **s'appuie également sur les aides apportées par la région Occitanie**, qui a dévoilé à l'été 2022 son plan "Avion vert" doté de 100 millions d'euros et renforcé de 50 millions d'euros supplémentaires un an plus tard.

D'autres pôles pourraient amorcer une dynamique similaire, à l'image du Technocampus Hydrogène de Toulouse-Francazal, dont l'inauguration est prévue pour 2025. Centré sur les technologies hydrogène, **il participera notamment aux travaux entourant l'application de cette nouvelle motorisation dans l'aviation**. "Nous n'oublions pas que l'avion hydrogène est un défi fort, et même un pari, au sens de rupture technologique très forte", rappelait Christophe Turpin, directeur de recherche au CNRS et coordinateur du projet Technocampus, auprès d'*Air & Cosmos*.

En Normandie et dans les Hauts-de-France, les clusters aéronautiques NAE et ALTYTUD et leurs adhérents mettent aussi en place des programmes dédiés à la décarbonation.

• Les entreprises avancent ensemble

Des collaborations importantes voient le jour, en dehors des programmes amorcés par l'État ou l'Union européenne, afin de **défricher le terrain**

autour de l'aviation décarbonée. Les entreprises forment des groupes de travail et collaborent sur des problématiques diverses. Depuis fin 2020, plusieurs grands groupes tels Airbus, ADP, Vinci Airports, Air Liquide ou Titan Aero Group mènent par exemple **un travail commun sur l'hydrogène et les modifications réglementaires** que l'adoption d'une telle motorisation pourrait entraîner.

En juin 2023, le Groupe ADP annonçait son alliance avec six groupes d'aviation régionale, "pour accélérer l'arrivée avant 2030 d'aéronefs de 2 à 100 places à propulsion électrique ou hydrogène sur ses aérodromes et sur les aéroports de Paris-Le Bourget, Paris-Orly et Paris-Charles de Gaulle". Le partenariat porte notamment sur **la mise en place de chaînes d'approvisionnement adéquates**, les aménagements nécessaires au sein des aéroports, la collaboration avec les autorités réglementaires, etc.

• Des financements spécifiques émergent

Derrière les acteurs et dispositifs traditionnels de financement (Bpifrance, fonds d'investissement, etc.), quelques initiatives propres à l'aviation décarbonée surgissent. En avril 2022, la société de capital-investissement Audacia et l'accélérateur spécialisé dans l'aéronautique Starburst ont ainsi dévoilé leur nouveau fonds Expansion, dédié à l'aérospatiale et la défense. **Il soutient les start-up évoluant dans plusieurs domaines de ces secteurs, dont l'aviation décarbonée**.

Le Challenge MAELE 2023, un exemple d'initiative au sein d'Aerospace Valley

MAELE : Mobilité aérienne légère et environnementalement responsable

Programme lancé en 2020 par l'Aerospace Valley afin de fédérer et favoriser les échanges entre les acteurs régionaux innovants de la mobilité aérienne légère et décarbonée

Challenge 2023 : faire émerger de nouveaux projets d'innovation collaboratifs ou mono-partenaires

Thématiques prioritaires

- Nouvelles technologies des systèmes propulsifs
- Matériaux et aérostructure
- Nouvelles technologies des systèmes avion
- Jumeaux numériques
- Hélice silencieuse
- Gestion de l'hybridation
- MRO (maintenance et réparation)
- Intelligence artificielle

Aide financière apportée aux projets retenus

Traitement IndexPresse.

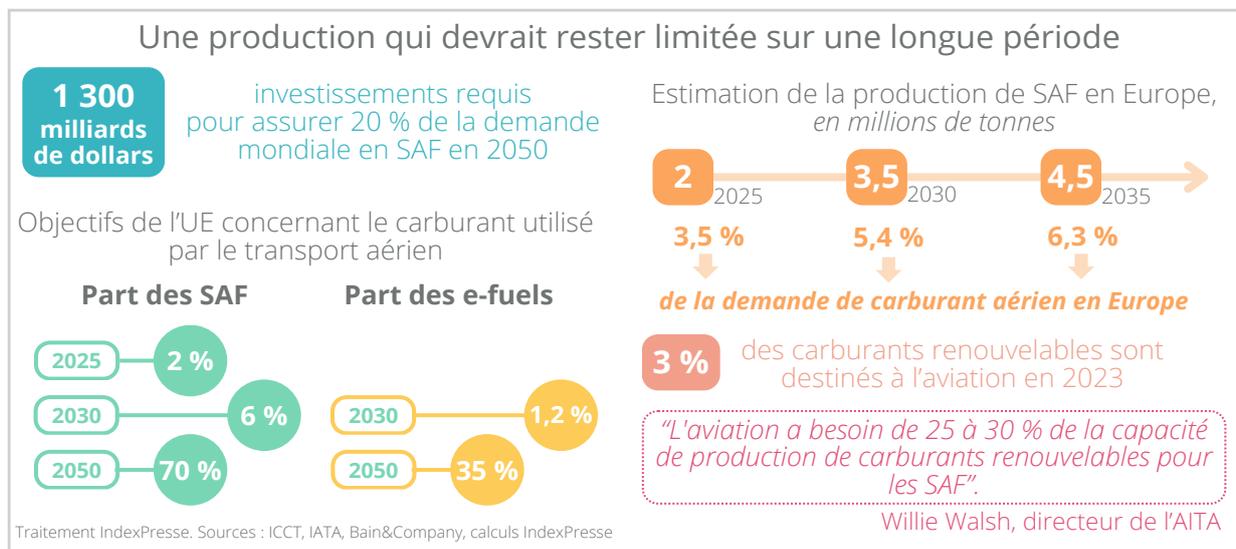
Des défis à surmonter pour décarboner avec succès le secteur

Que ce soit pour des raisons économiques, technologiques ou politiques, **les freins à la décarbonation de l'aviation sont nombreux**. Ils illustrent par ailleurs la nécessité de **recourir à différents leviers** pour parvenir à réduire les émissions de CO₂ du secteur, **aucune solution idéale** n'émergeant face aux multiples inconvénients de chaque méthode envisagée.

SAF : une production insuffisante et des prix élevés

“Les carburants alternatifs, et tout particulièrement les carburants de synthèse, constituent une solution à court-moyen terme, car **compatibles avec les moteurs actuels**”, expliquent dans *Investir* des analystes du Boston Consulting Group (BCG). Selon les procédés et les matières premières utilisés, les SAF peuvent généralement réduire les émissions de gaz à effet de serre **de 30 % à plus de 80 %**, par rapport à un combustible fossile. Ces carburants plus durables s'avèrent toutefois très coûteux, avec **des prix cinq fois supérieurs** au kérosène fossile. Des investissements conséquents se montrent nécessaires pour déployer

la production à grande échelle et diminuer les coûts, mais **les prévisions tablent sur une lente augmentation**, insuffisante pour combler les besoins du secteur. Cette situation est en outre le fruit d'une incitation trop faible de la part des pouvoirs publics, avec par exemple **des objectifs d'utilisation des SAF au niveau européen qui restent timorés**. Au sujet du seuil de 6 % de SAF fixé pour 2030, le président d'Airbus, Guillaume Faury, estime ainsi dans *Challenges* qu'un “objectif de 10 % en 2030 était raisonnablement atteignable”. **La faiblesse des mécanismes de soutien à l'achat**, tels que des subventions, n'encourage pas les compagnies aériennes à se fournir en carburants durables, ce qui freine les décisions d'investissement des producteurs. En outre, **d'autres secteurs que l'aviation peuvent vouloir recourir à des SAF** (transport routier, industrie...), limitant l'offre pour les acteurs de l'aérien. Si les carburants de synthèse se révèlent les plus intéressants sur le plan environnemental, il est également possible d'employer des biocarburants. Plus polluants, ces derniers risquent également d'**entraîner des conflits d'usage des terres agricoles**, notamment avec l'alimentation humaine.



LA NÉCESSAIRE DÉCARBONATION D'UN MARCHÉ AÉRIEN EN PLEINE CROISSANCE

Pour l'heure, **il existe un décalage** entre la volonté affichée de la filière d'utiliser des carburants durables et les capacités de déploiement. Les moteurs de l'équipementier Safran peuvent ainsi être alimentés en SAF à hauteur de 50 %. Les compagnies Air France et Lufthansa souhaitent utiliser 10 % de SAF en 2030, tandis que RyanAir a indiqué cibler un objectif de 12,5 % à cette date. Mais **l'Europe prend du retard**, alors que le gouvernement américain soutient à la fois l'offre et la demande dans le cadre de son Inflation Reduction Act (IRA). Les experts du BCG soulignent ainsi dans *Investir* : "Les efforts doivent se concentrer sur les carburants de synthèse (...) Les États-Unis l'ont bien compris avec l'IRA qui subventionne à la fois l'achat de SAF et la création de sites industriels de carburants durables".

L'électrique et l'hydrogène, des paris à long terme

Certaines problématiques des SAF rejoignent celles du domaine de l'hydrogène. Ce gaz peut être utilisé en complément du CO₂ pour produire des carburants utilisables par les moteurs actuels, moyennant quelques ajustements. **Le prix élevé de l'hydrogène et l'approvisionnement insuffisant** constituent là encore des freins majeurs à une adoption à grande échelle. D'autres

contraintes viennent de surcroît ralentir la mise en place de solutions axées sur l'hydrogène. Plus il est utilisé pur, plus l'impact environnemental est favorable, mais au prix **de transformations plus radicales des équipements**. Hautement inflammable, corrosive du fait de la petite taille de la molécule, volumineux et nécessitant des appareils de cryogénéisation pour le conserver sous forme liquide : **les caractéristiques de l'hydrogène multiplient les difficultés** pour un usage en tant que carburant. Des évolutions importantes au niveau des infrastructures seront également nécessaires, ce qui complexifie encore la démarche. **"Une coordination logistique internationale** devra même être mise en place pour qu'une flotte importante d'avions puisse voler d'un pays à l'autre à partir de 2035", confirme dans *Les Échos* Olivier Del Bucchia, membre de Supaero-Decarbo (collectif d'ingénieurs mobilisés en faveur de l'environnement). Ces contraintes font de l'hydrogène **une éventuelle solution à long terme**, mais ne permet pas d'agir pour limiter le réchauffement climatique dans les vingt à trente prochaines années.

La propulsion des avions basée sur un moteur alimenté par des batteries électriques présente d'autres contraintes. La problématique principale concerne **la densité énergétique offerte par les batteries actuelles**, insuffisante pour permettre à

LA DIFFICULTÉ DE TAXER LE KÉROSÈNE, UN ÉLÉMENT DÉSINCITATIF AU CHOIX D'UNE ALTERNATIVE MOINS CARBONÉE

Augmenter la taxation des carburants fossiles peut constituer un outil pour inciter les compagnies aériennes à recourir à des solutions plus vertueuses sur le plan environnemental. La mise en place d'une telle mesure s'avère toutefois complexe. Signée en 1944 et toujours en vigueur sous une forme révisée, la Convention de Chicago interdit la taxation du kérosène pour les vols internationaux. Il faudrait ainsi l'accord des 193 membres de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) pour lever cette interdiction. En Europe, la situation est similaire, l'unanimité des États membres étant requise pour imposer une telle taxation sur les vols en Europe. Des pays comme l'Italie, l'Irlande, la Grèce ou encore Malte s'opposent à cette mesure. En France, le secteur est par ailleurs exonéré de taxe sur la valeur ajoutée (TVA) pour les vols internationaux, tandis que les vols domestiques sont soumis à un taux réduit (10 % au lieu de 20 %). Les compagnies aériennes estiment en outre qu'une imposition à l'échelle de l'Hexagone ne ferait que réduire leur compétitivité par rapport à leurs concurrents étrangers. D'autres pays ont pourtant fait ce choix, comme les États-Unis, le Brésil, les Pays-Bas et la Norvège.

des avions de grande taille de réaliser des vols sur longue distance. Les batteries nécessaires pour effectuer de tels trajets seraient **trop lourdes et volumineuses** pour les rendre viables. Pour l'instant, la propulsion électrique se concentre donc sur des aéronefs de petite taille.

La concurrence du train en tant qu'alternative écologique

Utilisés tous deux pour des trajets longue distance, le train et l'avion sont comparés sur le plan environnemental. D'après *Challenges*, un voyage entre Paris et Toulouse génère environ **70 fois plus de CO₂ en avion** qu'en train. Cette opinion favorable accordée au train par rapport à l'avion a des conséquences pour le secteur. En 2021, **les vols domestiques ont ainsi été interdits** en France lorsqu'un trajet alternatif de moins de deux heures trente est possible par le train. Cette mesure a eu un impact modéré mais réel : "Sur les axes entre Paris et Strasbourg ou Paris et Bruxelles, **l'avion a cédé la place au TGV**", reconnaît dans *Challenges* le président de l'union des aéroports français (UAF), Thomas Juin. La SNCF a également axé sa communication sur le comparatif avion-train en matière d'écologie. Son dirigeant, Jean-Pierre Farandou, a même appelé à **taxer l'aviation pour financer le chemin de fer**. Les représentants du secteur aérien contestent cette vision en pointant le coût écologique des infrastructures ferroviaires : "Ça abîme la faune, la flore, les sous-sols, les eaux, et ça génère 8 000 tonnes de carbone par kilomètre de ligne construite", argumente Guillaume Faury d'Airbus. Le train se révèle en outre **pénalisé par des prix élevés**, l'affaiblissement du maillage régional en France et le manque d'infrastructures ferroviaires dans d'autres pays. Il est en outre souvent utilisé pour des trajets plus courts que l'avion.

Des critiques de la société civile

L'opinion publique n'est pas favorable aux compagnies aériennes, et plus largement au monde de l'aviation, du fait des pollutions générées par son activité. En 2021, un sondage de YouGov concernant l'image des entreprises en termes de RSE plaçait **les compagnies aériennes en bas du clas-**

sement. En 2018, le terme de *flygskam* a fait son apparition. Venant de Suède, il désigne la **"honte de prendre l'avion"**, un phénomène alors ressenti par une part croissante de la population face au réchauffement climatique. Fin 2023, un sondage Odoxa indiquait que 20 % des Français prenant l'avion au moins une fois par an étaient **prêts à réduire de façon significative ce type de transport** pour limiter la consommation de carburant de la France. La part de ceux souhaitant privilégier davantage le train atteignait quant à elle 39 %. **Ce phénomène reste toutefois "marginal"** pour Guillaume Faury, et semble en perte de vitesse. Le dirigeant relativise : "Le *flygskam* a un côté positif : c'est quelque chose qui nous pousse, qui nous challenge, qui nous oblige à nous remettre en cause." La clientèle européenne demeure fidèle et le désir de voyage, associé à des moyens financiers plus importants, grimpe dans les pays émergents. **Le trafic aérien devrait ainsi être multiplié par huit en Asie et dix en Afrique** entre 2020 et 2050 selon l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique).

Une difficulté pourrait toutefois émerger **du côté des recrutements** dans les entreprises du secteur. Si Airbus affirme rester très attractive pour les ingénieurs, certaines sociétés s'inquiètent d'une **potentielle dégradation de leur image** à cause des questions environnementales. "Le secteur se considérait tellement comme le fleuron de l'industrie française qu'il ne s'est pas du tout préparé", explique dans *Challenges* le directeur de l'école d'aéronautique ENAC, Olivier Chansou. Tribune de 700 ingénieurs dans le journal *Le Monde* pour réclamer plus d'efforts aux compagnies, évolution des questionnements des candidats chez Air France... **les signaux se multiplient pour attester d'une évolution** au sein des futurs collaborateurs de l'industrie aéronautique. Un mouvement s'opère d'ores et déjà au niveau de l'école Isae-Supaero, comme le souligne son directeur, Olivier Lesbre : "Nos étudiants ne sont **plus que 50 % à opter pour un grand groupe**, contre 75 % il y a dix ans." Pourvoyeur d'emplois attractifs, le secteur aéronautique doit ainsi parvenir à communiquer sur ses efforts en matière d'environnement afin d'**éviter une désaffection des candidats** au profit d'activités jugées plus vertueuses.

Les limites de la technologie et de la compensation carbone

Les craintes du secteur en termes de dégradation de son image fait également écho à **l'accusation de greenwashing**. Les actions entreprises doivent dépasser la communication pour avoir un véritable impact écologique. Divers phénomènes viennent toutefois apporter des arguments aux détracteurs du secteur.

Fortement sollicitée pour parvenir à la neutralité carbone, **le système de la compensation** – en général effectuée via l'achat de crédits carbone – est critiqué pour **son opacité et ses effets ambigus** sur le plan environnemental. Il s'agit souvent de financer, par le biais d'acteurs spécialisés, **des projets de plantations d'arbres ou de séquestration du carbone** auprès d'acteurs industriels. De nombreuses dérives ont été soulignées en lien avec cette activité (crédits "fantômes" ou vendus plusieurs fois, surévaluation des gains environnementaux...). **Les monocultures d'arbres à croissance rapide** comme l'acacia ou l'eucalyptus peuvent se montrer néfastes pour la biodiversité ou l'équilibre hydrique d'un territoire. Acteur du secteur de la compensation et fondateur de Pur Projet, Tristan Lecomte le concède auprès de *France Culture* : **"Neutralité ou compensation, c'est vrai que le terme est mal trouvé** puisqu'il peut donner l'impression, en tout cas en français, que c'est un jeu à somme nulle, alors que non".

Le secteur aérien rejette par ailleurs **de plus en plus de gaz à effet de serre**. Connu des spécialistes de l'environnement, l'effet rebond décrit un phénomène où **l'amélioration des performances environnementales conduit à une hausse des usages**. Le cabinet Carbone4 a ainsi calculé que l'aviation a **divisé par plus de deux** ses émissions de CO₂ par passager (on parle d'intensité carbone) entre 1990 et 2018. En parallèle, ses émissions totales de CO₂ ont **plus que doublé** sur la période, signe que l'augmentation du trafic a plus que compensé les économies réalisées. Ce phénomène peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Les meilleures performances permettent de **réduire les coûts, et donc les prix**, favorisant une multiplication des voyages. Dans le même temps, les limites écologiques sont repoussées par ces gains de productivité, atténuant l'incitation à

agir de façon plus marquée. Les efforts en matière écologique ne viennent ainsi que **limiter la hausse des émissions** du secteur, et permettent un accroissement du trafic préjudiciable pour la planète. Chercheur spécialisé dans la décarbonation des transports, Aurélien Bigo alerte dans *Challenges*, à propos de l'effet rebond : **"Cela montre qu'à moyen terme les innovations technologiques ne suffiront pas à faire diminuer suffisamment les émissions"**.

Réduire le trafic, une approche qui commence à être envisagée

Face à la hausse continue des émissions polluantes du secteur aérien malgré les progrès techniques, certains gouvernements s'intéressent de plus en plus à des méthodes plus restrictives. **Le recours à des taxes, voire l'imposition d'une limitation du nombre de vols**, représentent ainsi des voies envisagées pour réduire rapidement le bilan carbone du transport aérien. Les Pays-Bas souhaitent par exemple **diminuer de 12 % le nombre de vols** à l'aéroport Schiphol d'Amsterdam. Son projet d'agrandissement a également été annulé, et **les vols de nuit et de jets privés ont en outre été interdits**. Le ministre belge Georges Gilkinet a de son côté proposé en 2023 d'interdire les vols de nuit à l'aéroport de Bruxelles, mais la suggestion a été critiquée. Une réflexion a par ailleurs vu le jour à Nantes sur cette question, les élus de la Métropole ayant abordé **l'idée d'un plafonnement annuel du nombre de vols** (à 56 000). Ce type de mesures aurait un impact négatif direct sur l'activité du secteur aérien, d'où des réactions sans ambiguïté de la part de ses dirigeants : **"Réduire les vols au moyen de taxes rétrogrades et punitives entraverait les investissements et limiterait les voyages en avion aux seules personnes nantaises"**, explique le directeur général de l'International Air Transport Association (IATA), Willie Walsh. De son côté, le président exécutif d'Airbus, Guillaume Faury, évoque dans *Challenges* **les risques de conflits** au niveau régional, voire mondial, en cas de réduction volontaire de l'activité économique : **"Certains suggèrent la décroissance, de couper la lumière. Mon analyse, c'est que ce serait le chaos complet"**.

LA FILIÈRE AÉRONAUTIQUE EN ORDRE DE MARCHÉ

La production de carburants durables amenée à croître fortement

Une nécessaire complémentarité entre les différents types de SAF

Les carburants durables, ou SAF (*sustainable aviation fuel*), sont présentés comme l'une des solutions majeures pour dépolluer le transport aérien. "Pour réduire réellement les émissions de CO₂, il faut un 'game changer' et ce 'game changer', c'est le carburant durable", indiquait Anne Rigail, directrice générale d'Air France, lors du Congrès 2023 de la Fédération nationale de l'aviation et ses métiers (FNAM). Il figure au cœur de toutes les feuilles de route visant à décarboner le secteur. L'Union européenne a ainsi fixé à **70 % la proportion de SAF qui devra être intégrée au kérosène d'ici 2050, dont 35 % d'e-fuels**. Cet objectif s'avère très ambitieux puisque ce type de carburant ne représente en 2023 que 0,1 % de la consommation totale de carburant du transport aérien, rappelle *L'Usine Nouvelle*. Mais il doit permettre au secteur de sortir de sa dépendance

aux énergies fossiles, aussi bien écologiquement que politiquement. "La transition écologique de l'aérien constitue en Europe **une occasion géopolitique de rebattre les cartes en matière de dépendance énergétique**", confirme Julien Manhes, responsable du projet SAF d'Airbus.

Deux grands types de SAF coexistent :

- les **biocarburants**, conçus à partir de ressources émanant de la biomasse : déchets forestiers, agricoles ou alimentaires, huiles usagées, graisses animales, etc.
- les **carburants de synthèse, aussi appelés électro-carburants ou e-fuels**, élaborés grâce à de l'hydrogène et du carbone, récupéré dans le CO₂.

Si chacun possède des avantages et des limites, il semble indispensable de **développer les deux catégories et de ne pas les mettre en concurrence frontale**. "Chaque filière de SAF va se heurter à des contraintes de disponibilité. D'où l'importance

Deux principaux types de SAF

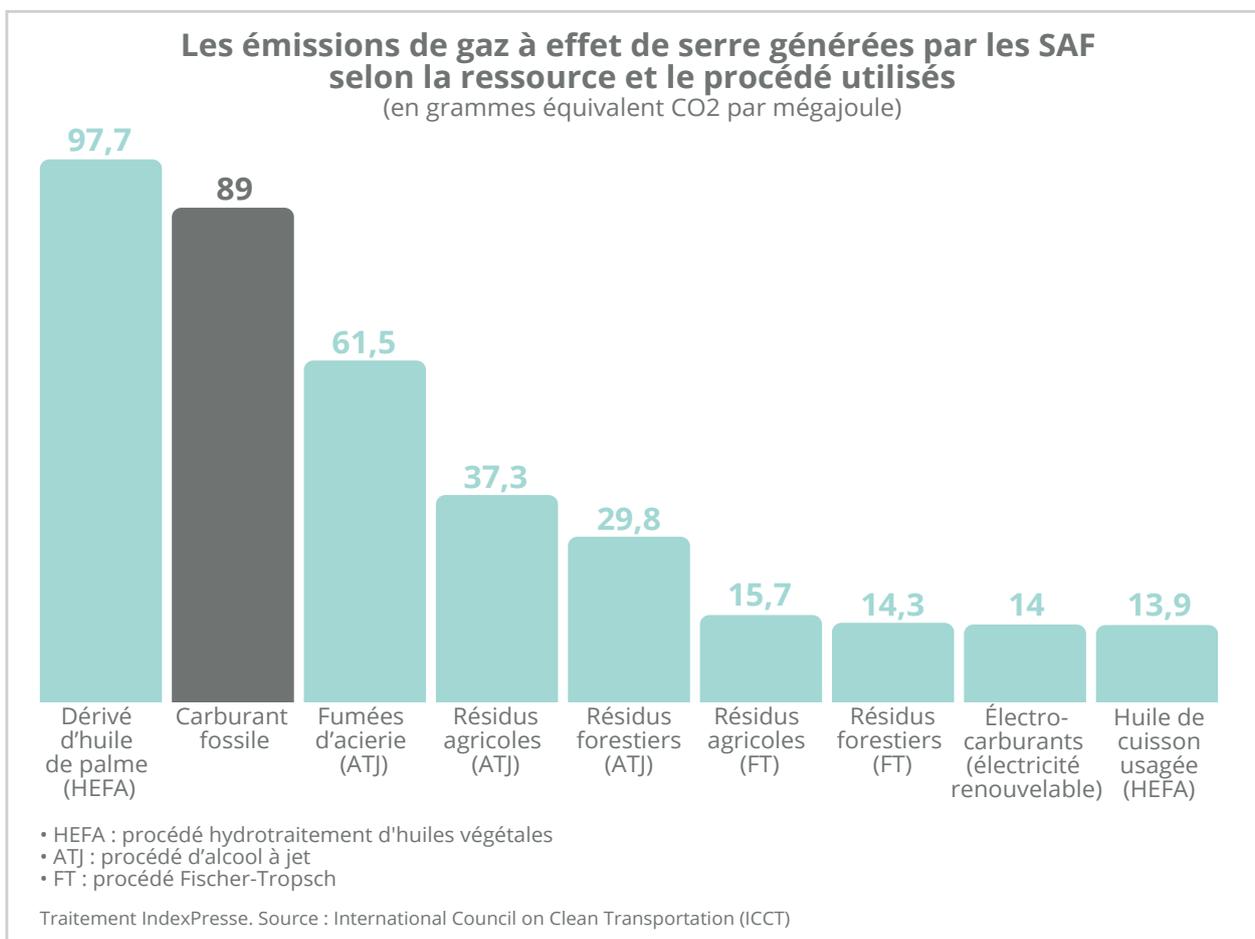
Biocarburants

- ✓ Disponibles et directement utilisables dans les avions actuels
- ✓ Procédés de production matures
- ✗ Production beaucoup trop faible par rapport aux besoins de la filière
- ✗ Ressources en biomasse limitées et concurrence avec d'autres secteurs d'activité pour les utiliser
- ✗ Risque d'externalités environnementales négatives (déforestation, etc.)

Carburants de synthèse

- ✓ Réduisent encore davantage les émissions polluantes
- ✗ Production encore embryonnaire
- ✗ Nécessité d'utiliser de l'hydrogène décarboné, dont la production reste mineure
- ✗ Concurrence avec d'autres secteurs concernant l'utilisation d'électricité décarbonée permettant la production d'hydrogène par électrolyse

Traitement IndexPresse. Sources : Air & Cosmos, L'Usine Nouvelle



de ne pas dépendre seulement d'une filière", insiste Vincent Etchebehere, directeur du développement durable et des nouvelles mobilités chez Air France, dans *Air & Cosmos*. La différence de maturité entre les deux segments ne doit pas non plus constituer un obstacle : **les biocarburants, déjà prêts, peuvent être utilisés à plus court terme tandis que les e-fuels, plus efficaces mais moins mûrs, seront privilégiés à plus long terme.** "Il faut développer les biocarburants tant que l'on peut, dans un cadre contraint en termes de durabilité. Utilisons au mieux cette biomasse et, après, venons en complément avec des e-fuels pour faire le reste, sachant qu'un e-fuel restera probablement à long terme beaucoup plus cher qu'un biocarburant. [...] Ce n'est donc pas biocarburants ou e-fuels ou hydrogène ou avion électrique. C'est SAF et hydrogène et e-fuels, le tout avec une optimisation de l'utilisation", détaille Nicolas Jeuland, expert en carburants alternatifs.

Pour répondre à une demande amenée à prendre de l'ampleur, **il est indispensable que la production de SAF se massifie.** Selon *L'Usine Nouvelle*, il faudrait être en capacité de fabriquer, à l'échelle mondiale, **400 millions de tonnes à l'horizon 2050**, contre 250 000 en 2022.

Enfin, il est nécessaire d'amplifier la production de SAF pour réduire leur coût. Paul Chiambaretto, directeur de la Chaire Pégase, spécialisée dans l'économie de l'aérien, estimait dans *Challenges* en novembre 2023 qu'une tonne de carburant durable coûtait alors 5 000 dollars, contre 1 000 pour du kérosène. "Ce n'est pas un problème technique mais de mise à l'échelle car, aujourd'hui, **les SAF coûtent quatre à cinq fois plus cher**", confirme Olivier Andriès, directeur général de Safran. Pour que les compagnies aériennes puissent se fournir à des coûts acceptables, il est donc clé de **diminuer les prix en massifiant**

la production. En attendant, Air France anticipe 100 millions d'euros de dépenses supplémentaires pour intégrer 1 % de SAF dans ses avions en 2023, puis plus d'un milliard d'euros à horizon 2030 pour atteindre les 10 %.

Des projets naissants en France

En France, le besoin de carburants durables est évalué à 500 000 tonnes en 2030, puis 6 millions en 2050. Des projets industriels doivent donc voir le jour dans l'Hexagone pour respecter ces ambitions. **Le pays semble posséder les ressources nécessaires pour y parvenir.** "Son couvert végétal, notamment forestier, permettrait de répondre aux besoins du transport aérien et d'autres modes de transport pour ce qui concerne les biocarburants, souligne. La prédominance d'électricité bas carbone d'origine nucléaire ouvre la voie, quant à elle, à la production de carburants synthétiques, indispensables pour tenir les objectifs d'incorporation à long terme", détaille Mathilde Tannous, chargée de mission à la sous-direction du développement durable de la Direction du transport aérien (DTA). **La filière bénéficie également du soutien public**, au travers des différents plans d'investissement dédiés à l'aviation et d'une feuille de route spécifique adoptée en 2020.

Plusieurs types d'acteurs se positionnent sur ce secteur : énergéticiens, start-up, spécialistes des carburants nouvelle génération... Des groupes étrangers lancent également des initiatives en France, en partenariat avec des entreprises locales ou via leurs filiales.

• TotalEnergies multiplie les investissements

L'énergéticien TotalEnergies fabrique des SAF sur le sol français depuis 2022, à partir d'huiles usagées et de graisses animales. Mais pour atteindre une production de 500 000 tonnes annuelles en 2028, l'objectif qu'il s'est fixé, le groupe doit nettement accélérer. Il compte donc **investir plus de 400 millions d'euros sur son site de Grandpuits (Seine-et-Marne)** afin d'y produire au moins 285 000 tonnes de SAF par an d'ici 2027. En parallèle, l'entreprise va **moderniser sa bioraffinerie de La Mède (Bouches-du-Rhône)** en y consacrant **70 millions d'euros** en 2024, pour pouvoir

"L'enjeu majeur, si l'on veut efficacement décarboner le transport aérien, c'est de disposer de carburants durables dans des volumes et à des prix qui ne remettent pas en cause les business models des compagnies aériennes et ne les mettent pas à genoux financièrement."

Anne Rigail, directrice générale d'Air France, mai 2023.

fabriquer des biocarburants de deuxième génération à partir de déchets issus de l'économie circulaire. Enfin, *L'Usine Nouvelle* souligne les travaux menés sur le "coprocessing d'huiles de cuisson" au sein de la raffinerie de Gonfreville (Seine-Maritime), qui doivent également déboucher sur de nouveaux procédés de production de SAF.

Au niveau international, **TotalEnergies vise une part de marché mondiale de 10 % dans les carburants durables d'ici 2030**, soit 1,5 million de tonnes produites chaque année. La société s'appuie, en plus de ses usines françaises, sur des unités basées aux États-Unis, au Japon, en Corée du Sud ou en Arabie Saoudite.

• Global Bioenergies veut se faire une place

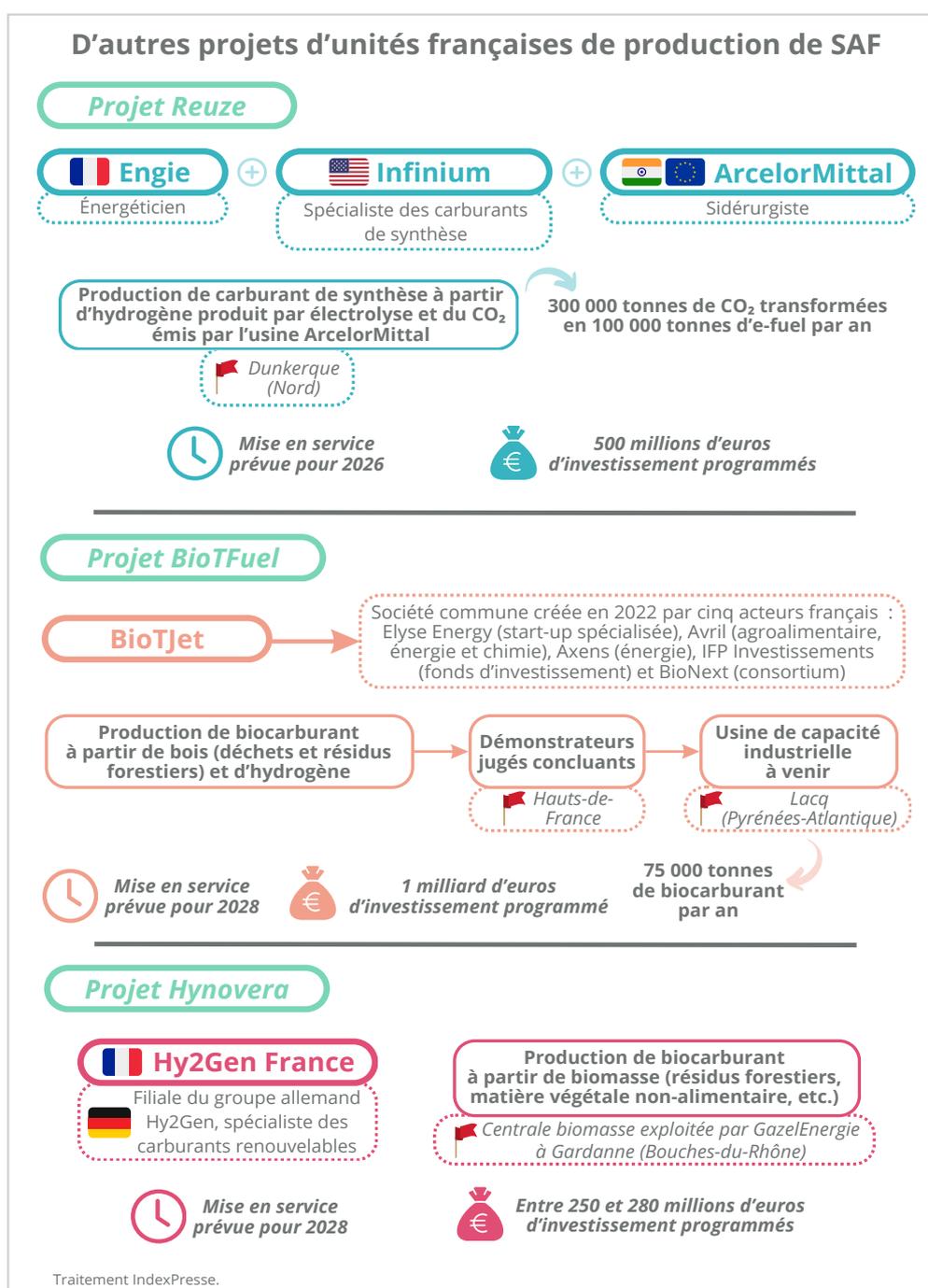
Créée en 2008, la biotech Global Bioenergies est spécialisée dans la "production d'isobutène biosourcé par voie biotechnologique", indique *Infchimie magazine*. L'entreprise a trouvé des débouchés dans l'industrie cosmétique ou pétrochimique, et **affiche ses ambitions sur le segment des SAF**. Depuis 2018, elle a entamé un processus de certification auprès de l'organisme de normalisation ASTM International, afin que sa molécule soit reconnue comme un biocarburant viable. Elle a passé la première phase de vote en 2023 espère obtenir l'approbation finale dans la continuité. "Une fois cette deuxième cession de vote finalisée, notre technologie sera certifiée dans le monde entier et notre carburant pourra être incorporé jusqu'à 50 % dans les réservoirs d'avion de ligne à l'échelle internationale",

LA FILIÈRE AÉRONAUTIQUE EN ORDRE DE MARCHÉ

expose Marc Delcourt, directeur général de Global Bioenergies. Au cours de ses travaux, la société a collaboré avec Airbus, Boeing ou la *Federal Aviation Administration* américaine.

Global Bioenergies, qui a levé 140 millions d'euros depuis sa création pour soutenir son développement, souhaite **industrialiser sa production de SAF à partir de 2030**. Celle-ci reposera sur

diverses matières premières compatibles comme les sucres de bois ou la mélasse de betterave. "Dans le domaine des SAF, la **certification ASTM est un point de départ et non une fin en soi** : nous devons encore améliorer notre technologie et construire une unité de production de grande taille permettant un coût de production compatible avec le marché", concluait Marc Delcourt en juin 2023 dans *Air & Cosmos*.



Union européenne - États-Unis, deux stratégies de développement différentes

“Pendant que les États-Unis déversent des milliards de dollars, l’Europe publie des centaines de pages de réglementation d’une complexité inouïe !”, dénonce dans *L’Usine Nouvelle* Daniel Iracane, pilote du rapport de l’Académie des technologies sur la décarbonation de l’aviation. **Les États-Unis soutiennent en effet massivement la filière des carburants durables** via l’IRA (*Inflation Reduction Act*). Chaque gallon de SAF bénéficie d’une subvention de 1,75 dollar s’il réduit les gaz à effet de serre émis plus d’au moins 50 % par rapport au kérosène.

Ils se montrent également plus souples en matière de réglementation. Ainsi, si l’Europe limite ou interdit l’exploitation de certaines cultures alimentaires, les Américains autorisent la fabrication de biocarburant à partir d’huile de colza, de maïs ou de soja. Les pouvoirs publics comptent notamment **rediriger une partie de la production agricole actuellement utilisée pour fabriquer de l’éthanol, ensuite mélangée à l’essence automobile, vers les SAF**, puisque l’essor des véhicules électriques va réduire la demande de carburant pour voitures. “La loi américaine suscite l’agacement des Européens, soumis par Bruxelles à des conditions bien plus restrictives, en particulier sur la nature des ressources exploitables”, indique *L’Usine Nouvelle*. La durabilité du carburant durable fabriqué outre-Atlantique tend ainsi à interroger. “Les SAF qui se développent actuellement aux États-Unis ont **des critères de durabilité beaucoup moins sévères que ceux que l’on essaie de développer en Europe**”, confirme Nicolas Jeuland, expert en carburants alternatifs chez Safran.

Ces différences **permettent aux États-Unis de développer plus rapidement leur production**. En 2030, ils comptent atteindre 12 milliards de litres fabriqués annuellement, contre 20 millions en 2023. Le coût de leurs SAF baisse ainsi plus vite, et se révèle déjà deux fois plus bas qu’en Europe. Cette situation inquiète les acteurs européens, **qui réclament un soutien plus appuyé des institutions**. Pour Nicolas Jeuland, un équilibre réglementaire devrait cependant apparaître au fil du temps : “Il y a toujours une vision américaine qui est, pour développer une filière, de voir ce qu’on a, de valoriser au mieux et **après, petit à petit, on va sévérer les réglementations pour éliminer les moins vertueuses**”, détaille-t-il en juin 2023 dans *Air & Cosmos*.

Les États-Unis surreprésentés au sein de la liste des principaux producteurs mondiaux de SAF (par volume d’achat garanti)

| <i>États-Unis</i> | <i>Reste du monde</i> |
|--|--|
|  Gevo |   Shell |
|  Fulcrum BioEnergy |  Neste |
|  Alder Fuels |  OMV |
|  Raven SR | |
|  DG Fuels | |
|  Aemetis | |
|  Dimensional Energy | |

Traitement IndexPresse. Source : Organisation de l’aviation civile internationale, février 2023

Compagnies, constructeurs et équipementiers prennent position

En plus d'augmenter peu à peu leur taux d'utilisation de SAF, les compagnies aériennes soutiennent la montée en puissance de la filière **en donnant aux producteurs des engagements d'approvisionnement**. Air-France KLM a par exemple signé des contrats auprès de Neste, garantissant la livraison de 1 million de tonnes de SAF entre 2023 et 2030, de TotalEnergies, pour 800 000 tonnes entre d'ici 2033, ou encore de DG Fuels (groupe américain), pour 600 000 tonnes entre 2027 et 2036. La compagnie franco-néerlandaise a renforcé cette dernière collaboration à l'automne 2023 **en entrant au capital de DG Fuels, via un investissement de 4,7 millions de dollars**. Celui-ci doit notamment aider l'entreprise américaine à obtenir la décision finale d'investissement menant à la construction de sa première usine, basée en Louisiane.

D'autres partenariats impliquant des engagements d'approvisionnement ont été signés à travers le monde. United Airlines s'est engagée avec le finlandais Neste et l'américain Fulcrum BioEnergy. Lufthansa s'est associée au suisse Synhelion et à l'allemand HCS Group. Quant à British Airways, son engagement s'effectue aux côtés de LanzaJet, la filiale dédiée aux SAF de la société néo-zélandaise LanzaTech.

Du côté des constructeurs, les travaux accélèrent afin d'**accroître la part de carburant durable que peuvent supporter les avions**. Depuis 2020, Airbus mène des essais sur des appareils 100 % SAF, pour analyser leur compatibilité avec les équipements existants ainsi que la nature des émissions générées lors de leur combustion, indique *L'Usine Nouvelle*. Le constructeur franco-italien ATR vise également, à terme, **la certification 100 % SAF sur ses appareils**. En 2021, il a signé une lettre d'intérêt avec la compagnie suédoise Braathens et le fournisseur Neste pour avancer vers cet objectif. Dassault Aviation suit la même voie, en voulant rendre ses avions compatibles à l'utilisation exclusive de SAF à partir du modèle Falcon 10X, programmé pour 2025. "Avec un avantage sur l'aviation commerciale : les surcoûts ne font pas peur aux clients du groupe, à 80 % des entreprises", note *Investir*.

Pour les équipementiers, il s'agit également d'**adapter les pièces à une proportion de plus en plus élevée de SAF**. Safran expérimente ainsi la tenue de ses moteurs lorsqu'ils sont confrontés à ces nouveaux carburants. Un partenariat avec TotalEnergies a été conclu en 2021. "Nos essais visent à s'assurer qu'ils conservent les spécificités du kérosène et qu'ils sont bien compatibles avec les moteurs", explique Jean-François Locufier, directeur des essais au sol et en vol du motoriste.

Les équipementiers poussés à innover

Les moteurs de demain stimulent l'innovation

Pour répondre aux besoins d'électrification, d'hybridation et d'économie d'énergie des constructeurs aéronautiques, de nouveaux moteurs doivent être mis au point. Portés par le leader Safran, **les motoristes français paraissent bien placés pour s'octroyer une place de choix sur ces équipements**. Selon *Les Échos*, l'Hexagone pourrait notamment devenir l'un des piliers de l'aviation électrique, "avec plusieurs centaines d'appareils et de moteurs produits chaque année", indiquait le quotidien économique à l'issue du Salon du Bourget 2023.

Pour profiter de cette opportunité, la filière française va cependant devoir **se montrer à la hauteur en matière de R&D (recherche et développement) et R&T (recherche et technologie)**. La concurrence anglo-saxonne (Pratt & Whitney aux États-Unis, Rolls-Royce au Royaume-Uni) et désormais chinoise (Aero Engine Corporation of China) s'avère bien présente. "Cela leur prendra dix ans, peut-être vingt ans, mais les acteurs chinois finiront par s'imposer sur le marché. C'est pour cette raison que **nous nous focalisons sur des technologies de rupture**. S'il y a une disruption sur le marché, nous voulons qu'elle vienne de chez nous", anticipait Olivier Andriès, directeur général de Safran, en juin 2021 dans *Challenges*.

• Safran au cœur des avions du futur

“C’est notre premier pilier pour attaquer la décarbonation : **augmenter l’efficacité propulsive**”, indique Éric Dalbiès, directeur de la stratégie, de l’innovation et de la R&T de Safran, en février 2023 dans *Industrie et technologies*. En atteignant des températures plus élevées dans la chambre de combustion et en augmentant le diamètre de ses moteurs (technologie “open rotor”), le groupe estime pouvoir réduire la consommation d’énergie des avions de 10 %.

S’adapter aux carburants durables représente un autre axe clé pour Safran. Ses moteurs peuvent déjà supporter jusqu’à 50 % de biocarburant ou carburant de synthèse. “**L’enjeu est de passer à 100 % et cela nécessitera plutôt des innovations incrémentales**”, explique Éric Dalbiès, qui évoque des avancées en matière de combustion, de viscosité ou encore d’étanchéité, les joints élastomères se comportant différemment selon le type de carburant utilisé. À plus long terme, Safran envisage également de se positionner sur l’hydrogène, **un segment sur lequel ses équipements ne sont pas encore matures**. “Si nos technologies pour fonctionner à 100 % de biocarburant sont aujourd’hui presque à un TRL 6 [niveau de maturité technologique permettant d’engager un développement de produit], elles ne sont qu’à un TRL 2 ou 3 [concepts et premiers travaux sur les composants] pour l’hydrogène. [...] Pour l’hydrogène, rien que le développement technologique

prendra dix ans. Cela ne nous empêche pas de chercher à progresser dans le domaine. Nous travaillons d’ailleurs avec Airbus sur la démonstration en vol d’un moteur à hydrogène en 2026”, détaille Éric Dalbiès.

La troisième piste phare dans laquelle Safran s’engage concerne **la motorisation électrique**, via sa filiale Safran Electrical & Power. En septembre 2022, la société a inauguré, à Créteil (Val-de-Marne), un nouveau centre de recherche consacré aux technologies électriques de pointe. “Des technologies déjà très présentes dans les avions de dernière génération, et qui devraient déboucher, dans les années à venir, sur les premiers appareils propulsés par des moteurs électriques Safran”, expose *Les Échos*. Le groupe s’appuie notamment sur sa gamme de moteurs électriques ENGINeUS, dont la version 100 devrait devenir **le premier modèle à obtenir une certification européenne**. L’entreprise prévoit d’ouvrir quatre lignes de production pour produire ses moteurs ENGINeUS, dont deux à Niort (Deux-Sèvres) et deux à Pitstone (Grande-Bretagne). “Nous pourrions produire plus de 1 000 moteurs par an”, estime Bruno Bellanger, directeur de la division Power de Safran Electrical & Power.

En octobre 2023, Safran Electrical & Power concluait aussi l’acquisition de l’activité de systèmes électriques aéronautiques de Thales, qui comprend Thales Avionics Electrical Systems et Thales Avionics Electrical Motors. “Ce rachat va **renforcer la position occupée par Safran dans le domaine de l’électrique**, cela sera utile à la stratégie [du groupe] basée sur la décarbonation de l’aérien”, annonçait Bruno Bellanger.

Cette dynamique permet à Safran de **multiplier les commandes**. De nombreux constructeurs d’avions électriques et hybrides ont pris position sur son moteur ENGINeUS 100, dont les français VoltAero et Aura Aero, l’américain Bye Aerospace ou l’autrichien Diamond Aircraft, liste *Les Échos*. “Nous sommes **les seuls à proposer une solution complète intégrant l’électrique de puissance et des moteurs électriques**, avec refroidissement par air jusqu’à 100 kW, ce qui constitue un avantage important sur nos concurrents”, estimait en 2022 Hervé Blanc, alors directeur de la division Power de Safran Electrical & Power.

800 millions
d’euros

L’investissement annuel
de Safran en R&T sur la période
2023-2027, soit 70 %
de plus que par le passé.

Source: Éric Dalbiès, directeur
de la R&T de Safran, février 2023.

Rise, symbole des ambitions de Safran

Amorcé en 2021, le programme Rise (*Revolutionary innovation for sustainable engines*, innovation révolutionnaire pour moteurs durables) est porté par CFM, coentreprise historique de Safran et du groupe américain GE Aviation. Celle-ci a déjà mis au point certains des moteurs d'avion les plus utilisés au monde, dont le CFM56 ou le Leap.

Avec Rise, les deux partenaires veulent **développer un moteur "vert", hybride, capable de réduire de 20 % son besoin en énergie, de fonctionner avec 100 % de carburants durables ou à l'hydrogène liquide**, sans rogner sur les performances actuelles des turboréacteurs équipant les avions monocouloirs. "Nouveau design, nouveaux matériaux, hybridation... Nous voulons que ce moteur soit une révolution", insistait John Slattery, PDG de GE Aviation lors de son interview par *Challenges* en juin 2021. Le projet Rise doit aboutir en 2035, avec un premier démonstrateur prévu pour 2025. "C'est un voyage de quinze ans que nous entamons. Nous savons qu'il faudra investir des milliards, mais il est de notre responsabilité d'être à l'avant-garde sur cette bataille", indiquait Olivier Andriès, directeur général de Safran.

Le groupe tricolore embarque d'autres partenaires dans ce projet, comme Dessia Technologies, une start-up française d'ingénierie chargée de travailler sur de nouvelles architectures pour la transmission et le boîtier accessoires du futur moteur, afin de générer des gains énergétiques et de performance. Pour y parvenir, **Dessia se repose notamment sur l'intelligence artificielle**. "Sur la trentaine de composants qui équipent le boîtier accessoires, la question est de savoir comment ranger, comment disposer les engrenages les uns par rapport aux autres, comment placer les accessoires. Il en existe en réalité une infinité. [...] Par analogie, c'est exactement comme si nous avions eu la mission d'aller examiner chaque grain de sable sur terre. Il s'agit donc de nombres énormes, il est impossible de les ausculter un par un. Nous faisons la même chose sur les transmissions de puissance, nous aidons l'ingénieur à générer les combinatoires qui sont énormes et à naviguer dedans, **en l'orientant vers tel ou tel cluster avec telle ou telle famille de solutions intéressantes**", explique Pierre-Emmanuel Dumouchel, cocréateur de Dessia, dans *Air & Cosmos*.

• Les moteurs électriques attirent équipementiers historiques et start-up

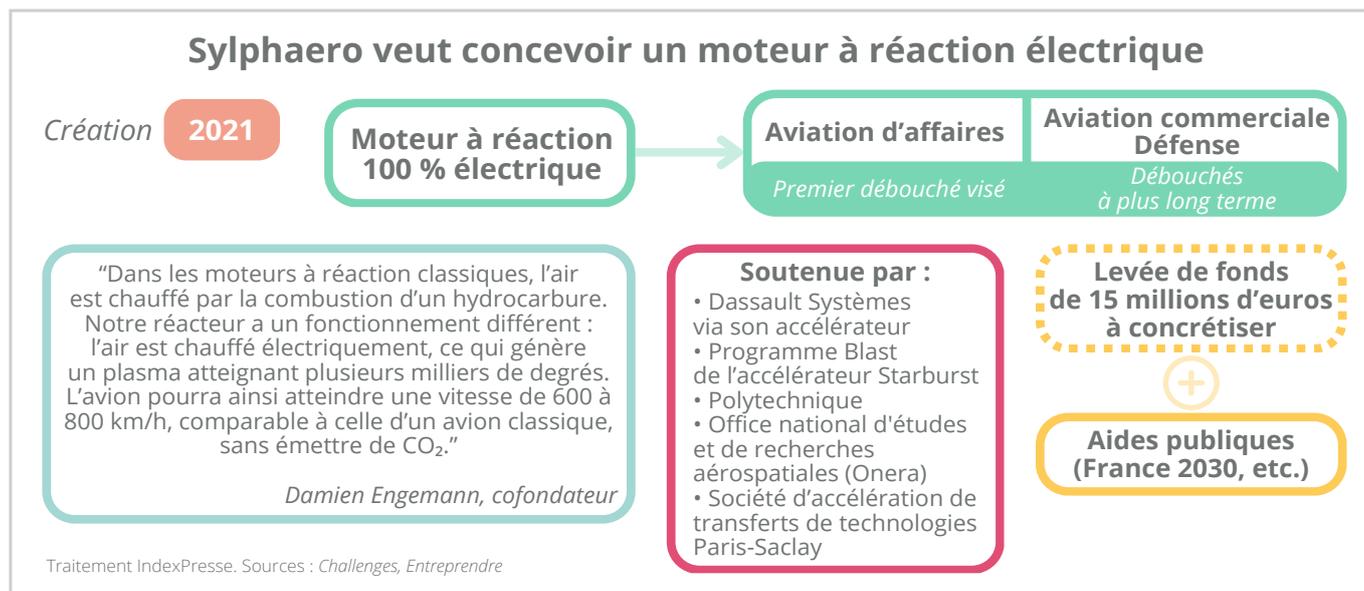
L'émulation autour de l'aviation électrique, tant technologiquement qu'en matière de demande des constructeurs, incite plusieurs acteurs à se positionner sur le segment des moteurs électriques. La PME d'ingénierie Akira Technologies, qui travaille depuis plusieurs années sur l'hybridation des chaînes de propulsion, a déjà collaboré avec Safran et **développe en parallèle son propre turbopropulseur hybridé**, dont les essais ont débuté en 2023. "Cela nous permettra, par la suite, de participer à la R&T de motoristes dans le cadre du développement de futurs turbopropulseurs hybrides", explique Sylvain Loumé, président d'Akira Technologies.

Pour Whylot, initialement centré sur l'automobile, l'émergence de l'électrique dans l'aviation offre

un nouveau débouché majeur à son moteur électrique à flux axial, mis au point avec Renault, entré à son capital fin 2021. "Notre moteur peut trouver des applications un peu partout dans l'avion, y compris sur les futurs programmes. Il peut s'agir de la propulsion, bien entendu, mais aussi des équipements de cockpit, des ailes, des systèmes de refroidissement... Dans tous les cas, **le fait d'utiliser la technologie axiale peut permettre de gagner en masse et en rendement**", détaille Romain Ravaud, président de la société, auprès de *Air & Cosmos*. En juin 2023, la société indiquait entretenir des discussions avec des constructeurs et équipementiers aéronautiques dans le cadre de futurs partenariats. "Cette dynamique s'est accentuée depuis un an", affirmait Romain Ravaud. Ce type de coopération pourrait aboutir à des applications concrètes à horizon 2030.

L'innovation provient aussi des start-up françaises, à l'image de Novpower, fondée en 2018 et qui développe **des systèmes de motorisation électrique pour l'aviation légère**, ou de Sylphaero, créée en 2021 dans le but de mettre au

point **un moteur à réaction 100 % électrique**, qui permettrait d'atteindre des vitesses supérieures à celles des moteurs électriques à fonctionnement électromagnétique traditionnel.



La filière se prépare pour l'arrivée de l'hydrogène

À plus long terme, l'arrivée de l'hydrogène dans l'aéronautique oblige à **repenser les équipements pour les adapter à ce nouveau gaz aux propriétés spécifiques**. “L'étanchéité ? On n'aura pas droit au plastique, faudra-t-il des joints métalliques à restitution comme dans le spatial ? Les éventuelles fuites devront être collectées et orientées, l'injection et la combustion devront être reprises entièrement, tout comme le pompage. L'hydrogène fragilise les métaux, il faudra changer de matériaux...” récapitule Éric Dalbiès, directeur de la stratégie, de la R&T et de l'innovation chez Safran, auprès d'*Industrie et technologies*.

Équipementiers et autres start-up se mobilisent donc afin d'élaborer de nouvelles pièces et de **se positionner au plus tôt auprès de leurs clients sur un segment amené à prendre de l'ampleur**.

• Liebherr-Aerospace Toulouse

Pour anticiper l'utilisation de piles à combustible dans le cadre de l'avion à hydrogène, l'équipementier développe des compresseurs de forte puissance spécifiques. Il collabore aussi avec General Motors, depuis 2021, pour **mettre au point des systèmes de génération de puissance électrique compatibles avec la pile à hydrogène de l'industriel américain**. “Le standard de demain n'est pas encore défini. Mais nous croyons à l'hydrogène”, indiquait en 2022 Nathalie Duquesne, dirigeante de l'entreprise.

• SAB Industries

Le groupe, centré sur les canalisations et transferts de fluides, travaille sur le transfert de l'hydrogène gazeux ou liquide au sein des futurs avions décarbonés, en tentant de trouver **les matériaux et solutions d'étanchéité les plus pertinentes**.

- **Spécitubes**

Fabricant de tubes métalliques de précision pour l'aéronautique, **l'entreprise accompagne Airbus dans la recherche sur les tubes qui seront situés entre les réservoirs d'hydrogène** et l'unité de puissance des avions, afin qu'ils puissent résister à des variations de températures importantes.

- **Hycco**

Née en 2019, cette jeune pousse fabrique des plaques bipolaires pour les piles à combustible, utilisées entre autres par les futurs avions à hydrogène. Elle innove en **les rendant plus légères et plus durables grâce à des matériaux composites**. Hycco veut rapidement industrialiser sa production pour la massifier et réduire les prix de ses plaques. "Une technologie n'a d'avenir que si elle est suffisamment compétitive pour en supplanter une autre. La filière hydrogène doit être capable de rivaliser en performance et en prix", analyse Romain Di Costanzo, PDG de la start-up.

- **CMP Composites**

Accompagné de plusieurs partenaires au sein du projet Regiona'1H2, ce spécialiste des pièces et outillages en matériaux composites travaille

sur un réservoir cryogénique capable de stocker de l'hydrogène liquide à très basse température. Selon Jean-Marie Lédan, directeur général de la société, la conception d'**un tel réservoir entièrement en composite représente une "rupture technologique"**.

- **Sogeclair Aerospace**

Ce groupe d'ingénierie aéronautique se concentre également sur **un réservoir pouvant contenir de l'hydrogène liquide**. Il souhaite notamment mettre au point un "super isolant structurel" pour "obtenir une isolation avec une résistance thermique très forte tout en restant dans la masse la plus optimale possible", dicit Jean-Luc Buetas, responsable du bureau d'études de Sogeclair Aerospace Nantes.

- **AREELIS Technologies**

Historiquement positionné dans le spatial, ce spécialiste des essais en environnement sévère s'est ensuite **diversifié dans les applications civiles**. Il mène des tests fluidiques et cryogéniques sur les organes mécaniques (pompes, vannes, etc.) utilisés pour des applications hydrogène.

H2Pulse veut passer au stade supérieur

Depuis sa création en 2019, H2Pulse réalise **80 % de son activité auprès de clients de l'aéronautique** tels qu'Airbus, Safran Power Units ou Liebherr-Aerospace. La start-up française s'est spécialisée dans l'accompagnement des industriels dans leurs projets hydrogène, en **facilitant notamment les liens entre les mondes de la recherche et de l'industrie**. Mais sa taille réduite l'empêchait d'assouvir toutes ses ambitions, comme l'expliquait son fondateur Cyril Gagnepain : "Notre activité fonctionne très bien, mais l'an dernier, nous sommes passés à côté de quelques belles affaires à cause de notre taille".

Pour changer de dimension, H2Pulse a donc **accepté, en octobre 2023, l'offre de reprise de Serma Energy**, une société proposant une gamme de services et d'essais aux acteurs développant des concepts de chaîne de traction innovants, qu'ils soient électriques, hydrides ou hydrogène. "En reprenant la société H2Pulse, nous entendons la faire passer dans le monde industriel. Ce rapprochement permettra de **développer l'entreprise le plus rapidement possible**", indique Peter Hersens, directeur général de Serma Energy.

D'ici 2027, H2Pulse compte quadrupler ses effectifs pour atteindre la centaine de salariés. La start-up vise également 10 millions d'euros de chiffre d'affaires, contre 1,2 million en 2022. *Air & Cosmos* précise aussi que suite à l'acquisition, **son projet "est désormais résolument international"**.

• FEV

La société d'ingénierie travaille sur **l'adaptation de moteurs d'aviation légère afin qu'ils puissent tourner avec de l'hydrogène gazeux**. Elle a ainsi investi 2 millions d'euros dans de nouveaux bancs d'essai moteur à combustion hydrogène et pile à combustible, relève *Air & Cosmos*.

• Equip'Aero Industrie

Équipementier et prestataire de maintenance, le groupe a accéléré sa R&D depuis la crise de Covid-19. Dans ce contexte, il s'intéresse notamment à l'hydrogène, en évaluant son impact sur turbines et en développant des électro-vannes adaptées à cette motorisation.

• MF Tech

Cette PME veut devenir **"l'un des leaders mondiaux de la technologie de l'enroulement filamentaire pour les réservoirs à hydrogène"**, souligne *Air & Cosmos*. Elle compte pour cela sur son expérience, elle qui a livré ses premiers robots de production de réservoirs à hydrogène dès 2009, et sur de nouvelles machines présentées en 2022. Face à une demande en hausse, MF Tech vise une multiplication par deux ou trois de son chiffre d'affaires (4,3 millions d'euros en 2021), au cours des prochaines années.

Alléger les avions, un enjeu majeur

Réduire l'énergie consommée par les avions passe aussi par un allègement des appareils afin de recourir à moins de carburant. **"Alléger l'avion est une des pistes les plus probantes actuellement pour décarboner**. Chaque kilo compte dans un avion. L'aéronautique est le secteur où le kilo gagné se paie le plus cher, environ cent fois plus que dans l'automobile", explique dans *L'Usine Nouvelle* Patricia Krawczak, professeure de l'Institut Mines-Télécom.

Il s'agit donc de remplacer les matériaux métalliques les plus lourds par des équivalents plus légers, comme les composites, d'augmenter la tension électrique pour éviter un alourdissement du

câblage, d'optimiser la taille et les performances des équipements existants, de privilégier les composants multifonctionnels afin de multiplier les fonctionnalités sans ajouter de nouvelles pièces, etc.

• Le potentiel des composites

"Apparues dès les années 1970, les pièces en composites thermoplastiques n'ont cessé de se multiplier depuis, à bord des avions civils et militaires. Outre un gain de poids comparé aux pièces métalliques, **le plastique offre le gros avantage d'être insensible à l'oxydation, ce qui prolonge la durée de vie des appareils, et est plus facilement recyclable**, ce qui devient une préoccupation majeure des avionneurs", relate *Les Échos*. Si les composites, notamment thermoplastiques, sont amenés à occuper une place croissante dans l'aéronautique, **la chaîne de production optimale reste encore à définir, tant techniquement qu'économiquement**. "La question que les constructeurs se posent n'est pas tant 'quel matériau utiliser pour alléger ?' que 'comment fabriquer des pièces avec ce matériau de manière compétitive ?' Si le recours aux composites est indéniable pour alléger, la problématique, en parallèle, est de **produire à la fois plus léger, plus vite et à moindre coût**. Le véritable défi est là", rappelle Patricia Krawczak.

Plusieurs équipementiers français semblent justement prêts à relever ce défi. En 2023, Latécoère a inauguré un nouveau centre de recherche et de fabrication à Toulouse (Haute-

4 tonnes

Le poids du câblage d'un A320 standard.

Source : Éric Dalbiès, directeur de la R&T de Safran, février 2023.

Chez Daher, une priorité de longue date

Les composites thermoplastiques figurent **au cœur de la stratégie de Daher depuis plusieurs années**. En 2012, le groupe français investissait 25 millions d'euros dans une usine près de Nantes (Loire-Atlantique), dédiée à la fabrication de pièces aéronautiques thermoplastiques et composites. "C'est grâce à notre investissement à Nantes que nous avons pu gagner la clientèle de Boeing. Nous estimons que **le marché du thermoplastique va encore tripler de taille dans les quinze ans à venir**", indiquait en 2019 Didier Kayat, directeur général du groupe. En 2022, Daher implantait, proche de son usine nantaise, un nouveau centre d'innovation spécialisé dans les aérostructures en composites avancés, baptisé Shap'In.

Partenaire d'Airbus ou Dassault Aviation sur des projets portant sur les composites, Daher a aussi racheté, en 2019, la PME néerlandaise KVE Composites, fabricante de pièces en composites thermoplastiques ayant mis au point une méthode innovante de soudure par induction. Le groupe compte ainsi **se positionner au mieux pour participer à la conception des avions de prochaine génération et booster sa croissance**. Il vise 2 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2027, contre 1,3 milliard en 2022.

Garonne), suivant un investissement de 5 millions d'euros. Y seront mis au point **des solutions pour rendre les matériaux composites plus robustes et fiables**. Fin 2021, l'équipementier a également mis la main sur l'entreprise mexicaine Shimtech de Mexico (SDM), qui fournit des assemblages et composants en composites pour l'industrie aérospatiale. "La chasse aux kilos est un sport continu. Il n'y a donc pas besoin d'initier une révolution comportementale de la filière aéronautique. En revanche, **pour développer un avion notablement plus léger, nous allons devoir initier des ruptures technologiques**", expliquait Serge Bérenger, directeur innovation et R&T de Latécoère, dans *Air & Cosmos* en 2022.

Spécialisée dans les composites thermoplastiques depuis 2008, avec plus de 20 000 pièces fabriquées chaque année pour l'industrie aéronautique, AviaComp compte aussi **valoriser son expertise pour profiter de l'engouement entourant ce matériau**. "Les pièces peuvent se travailler à façon, donc cela nous permet de réduire drastiquement la quantité de matière engagée. Ainsi, **nous pouvons compenser - et même davantage - le surcoût du composite thermoplastique par rapport au composite classique**. Nous avons développé plusieurs innovations de process, comme l'estampage, mais aussi la soudure par induction qui permet d'éviter l'ajout de matière", expose Stéphane Zirilli, directeur adjoint d'AviaComp. L'entreprise poursuit ses travaux pour **explorer les possibilités**

concernant l'intégration de matière recyclée. D'ici 2030, ses ambitions sont élevées : réaliser 35 à 40 millions d'euros de chiffre d'affaires contre 19 millions en 2022, passer de 90 à 150 salariés et ouvrir un second site.

Pour Cobratex, l'innovation prend la forme du bambou, que la start-up veut imposer comme **une alternative à la fibre de verre dans les renforts de composites**. Créée en 2013 par Édouard Sherwood, un ancien d'Airbus et Liebherr-Aerospace, l'entreprise considère le secteur aéronautique comme un marché d'ampleur à conquérir. En remplaçant la moitié de la fibre de verre actuellement utilisée par du bambou, le poids d'un avion pourrait diminuer de 5%. "**La demande est là et nos produits répondent clairement à l'ambition d'une aviation décarbonée**. Mais nous savons que tout cela prendra du temps car, sur ce marché, les cycles de développement sont très longs", prévient Édouard Sherwood. Cobratex a levé 2 millions d'euros depuis sa création et a reçu le soutien d'Airbus, "qui a mis un petit ticket lors de la création de l'entreprise", révèle Édouard Sherwood à *L'Usine Nouvelle*. **Le soutien des grands groupes du secteur paraît indispensable** pour que la start-up parvienne à y déployer ses produits puis à s'industrialiser. "D'autres industriels pourraient se joindre à notre aventure et nous aider à concrétiser notre ambition. Tout seuls, nous n'y arriverons pas", estime le fondateur.

COLLINS AEROSPACE INVESTIT MASSIVEMENT EN FRANCE

Fort de ses neuf usines et 3 300 employés dans l'Hexagone, l'équipementier américain Collins Aerospace prévoit d'investir 400 millions d'euros en France d'ici 2027. En R&D, les dépenses seront principalement "dédiée[s] aux technologies pour l'aviation décarbonée", a indiqué Étienne Gomez, directeur du développement Europe, dans *La Tribune*. Cela inclut notamment des travaux sur les aérostructures thermoplastiques, le groupe pouvant s'appuyer sur le rachat, fin 2021, de la société néerlandaise Dutch Thermoplastic Components (DTC), qui lui a permis de "bénéficier de nouvelles expertises dans le domaine des pièces composites thermoplastiques structurelles, permettant de rendre les avions plus légers et plus économes en carburant", décrit *Air & Cosmos*. Le reste des investissements concernera des technologies autour de l'hydrogène, de propulsion hybride-électrique, ou encore de composants intelligents pour réduire la consommation de carburant.

- Réduire le poids d'équipements divers

Batteries, câbles, panneaux de cabines... De nombreux équipements peuvent être retravaillés afin de peser moins lourd. Plusieurs spécialistes fran-

çais s'y attellent, tous voulant participer à l'amélioration de l'impact environnemental du secteur et être force de proposition auprès de leurs clients constructeurs.

Des équipements allégés pour réduire le poids des avions

| | | | |
|--|---------------------|---|------------------------|
|  Batteries | Limotech | Remplacement des batteries traditionnelles par des batteries au lithium | 3x plus léger |
|  Câbles spéciaux | Draka Fileca | Remplacement des câbles en cuivre par des câbles en aluminium ou en fibre optique | -10 % de masse |
|  Liaisons filaires | DEMGY | Remplacement des fils électriques par des éléments de plastronique (électronique intégrée au plastique) | jusqu'à -30 % de masse |
|  Panneaux de cabines | Satys Cabin | Remplacement des panneaux traditionnels par des panneaux biosourcés légers en liège et résidus de canne à sucre | -20 % de masse |

Traitement IndexPresse.

Des pistes à creuser en dehors de la construction aéronautique

Optimiser la navigation aérienne

Mise en place de trajectoires aériennes plus directes, meilleure gestion du trafic à l'approche des aéroports, réduction des temps de roulage : en optimisant sa navigation, le secteur aérien peut diminuer l'énergie consommée par les avions et réduire son impact environnemental. Une telle avancée nécessite **une synchronisation adéquate de l'ensemble de la filière** : compagnies aériennes, contrôleurs au sol, aéroports, organismes réglementaires, etc. **Des règles communes doivent être établies** afin de mettre en place des pratiques plus vertueuses. Des projets sont menés en ce sens par l'Union européenne et la France.

• Le Ciel unique européen se fait attendre

Amorcé à la fin des années 1990, le Ciel unique européen a pour but de moderniser la gestion de l'espace aérien européen en optant pour **une approche plus collective et une meilleure coopération entre les centres de contrôle aérien des différents pays**. Cela permettrait d'optimiser les routes et de fluidifier le trafic, entraînant ainsi des gains de temps pour les passagers et des avantages environnementaux.

Si plusieurs paquets législatifs ont été adoptés en ce sens au cours des deux décennies passées, **le Ciel unique européen n'est pas encore pleinement concrétisé**. En 2019, la Commission européenne estimait que le coût des détours et retards liés à la mauvaise gestion du trafic et à la volonté des compagnies d'éviter certaines redevances nationales **s'élevait à 6 milliards d'euros et aurait engendré l'émission de 11,6 millions de tonnes de CO₂**. L'institution avait alors proposé de nouvelles réformes "privilégia[n]t une coopération régionale plus souple entre opérateurs de trafic aérien, via des alliances davantage fondées sur les besoins (infrastructures, capacités) et l'échange de données", relayait *Air Journal*.

- 6 à 7 %

La réduction possible des émissions de gaz à effet de serre du transport aérien grâce aux évolutions technologiques et opérationnelles de la navigation aérienne.

Source : Aviation civile, avril 2022.

Début 2023, l'Airlines for Europe (A4E), principale organisation continentale de compagnies aériennes, a incité les États membres à **accélérer sur cette problématique** et à adopter les dernières propositions de la Commission européenne. "Les États membres ont l'occasion de réaliser un espace aérien transparent et numérisé en Europe en soutenant la proposition de la Commission européenne de réformer la législation sur le ciel unique européen (SES2+). Nos pilotes ont un message pour les ministres aujourd'hui : nous attendons depuis trop longtemps cette importante réforme et il est temps d'agir maintenant sur l'espace aérien afin d'**obtenir des résultats pour les passagers, l'Europe et l'environnement**", exposait Laurent Donceel, directeur général de l'A4E.

Le Ciel unique européen a cependant déjà permis de mettre en place plusieurs initiatives concrètes grâce au programme SESAR, le volet technique du projet. *Aviation civile* cite par exemple le *Free Route*, qui permet aux compagnies de mieux gérer la planification de leurs vols, ou les *Extended Arrival Management (AMAN)*, qui servent à anticiper les séquences d'arrivée des avions. "Le programme

SESAR s'est fixé dès le départ **des objectifs ambitieux de réduction de l'impact environnemental de la navigation aérienne**. Un axe prioritaire ré-affirmé dans l'actuelle phase de développement et qui sera poursuivi dans les futurs projets de SESAR 3 (2021-2031)", note *Aviation civile*.

- **La DSNA s'appuie sur sa feuille de route environnementale**

En 2021, la Direction des services de la navigation aérienne (DSNA) a dévoilé sa stratégie environnementale à horizon 2025, en accord avec les objectifs internationaux fixés par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). **La réduction des impacts, aussi bien environnementaux que sonores**, fait partie des priorités de l'organisme. Pour *Aviation civile*, cette publication "dresse les enjeux et les perspectives des actions et projets visant à préparer l'aviation verte de demain", via plusieurs axes concrets : "Déploiement des descentes continues sur les principaux aéroports français, diminution des contraintes sur le réseau de routes, systèmes innovants d'aide à la gestion des vols, mise en œuvre de procédures satellitaires, développement d'outils de mesure et de visualisation de la performance environnementale, projets européens de recherche..."

FELLO'FLY, LE VOL EN PATROUILLE D'AIRBUS

En novembre 2021, Airbus a mené un vol d'essai pour son projet Fello'Fly : deux A350 ont parcouru le trajet Toulouse - Montréal en se suivant, afin que le second bénéficie de l'aspiration du premier et puisse réduire son utilisation d'énergie. "À l'arrivée, la différence de consommation est au-delà de toutes les attentes : 6 tonnes de carburant ont été économisées", indique *Air & Cosmos*. Airbus prévoit d'accélérer sur la mise en place de telles manœuvres à partir de 2025, même si elles resteront limitées aux avions équipés de systèmes de positionnement dernière génération, reliés à un contrôle aérien expérimenté susceptible de gérer ces situations particulières.

La DSNA participe également à plusieurs projets incluant les industriels et compagnies du secteur, tout en **sensibilisant les professionnels à l'importance des thématiques écologiques**. "Notre performance environnementale ne peut être que collective", souligne Alain Bourgin, chef de la mission environnement de la DSNA.

- **Octavie, un projet d'optimisation des mouvements aériens**

Réunissant huit acteurs français dont la DSNA, l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), Thales et Air France, le projet Octavie vise à expérimenter le concept de *Green Flag*. Ce dernier prend la forme **d'espaces aériens dédiés où les pilotes favorisent les pratiques d'éco-pilotage** pour limiter leur consommation de carburant, grâce notamment à une communication facilitée avec les contrôleurs au sol.

De premiers tests concluants ont été réalisés au printemps 2022 et ont mené à l'extension du projet durant l'été suivant. "Les résultats de cette première expérimentation en vol sont prometteurs. Ils nécessitent d'être consolidés afin d'intégrer *Green Flag* de manière pérenne et à grande échelle dans les procédures des contrôleurs aériens, y compris dans un contexte de trafic dense", indique *Air Journal*. La région Occitanie soutient financièrement cette initiative à hauteur de plus de 700 000 euros.

- **SINAPS, l'intelligence artificielle au service du trafic aérien**

Dans le cadre du programme européen SESAR, l'ONERA et la DSNA ont développé SINAPS, un moteur algorithmique basé sur l'intelligence artificielle, servant **d'outil d'aide à la décision dans la gestion du trafic aérien**. "Les chefs de salle des centres de contrôle régionaux vont disposer d'un ensemble de services intégrés jusqu'à la configuration optimale des secteurs à déployer en tactique, en regard du trafic et des critères d'optimisation", expliquent les deux organismes.

Début décembre 2023, la DSNA et la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) ont officialisé le futur déploiement opérationnel de SINAPS au sein des centres de navigation aérienne. Avant cela, la solution avait été expérimentée dans cinq centres, dont celui de Bordeaux (Gironde).

- **4-Flight, le nouveau système français de gestion du contrôle aérien**

S'appuyant sur un système de gestion du trafic datant des années 1970, le contrôle aérien français va finalement **moderniser ses outils**. Développé par Thales, 4-Flight doit s'imposer comme le nouveau système utilisé par les aéroports français. Son déploiement a débuté en 2023 et va s'étendre peu à peu. Les infrastructures de la région parisienne effectueront leur transition début 2024.

L'investissement total d'un tel projet s'élève à plus d'un milliard d'euros, révèle *BFMTV*. "La mise en œuvre de 4-Flight promet non seulement **une gestion plus fluide du trafic mais également des bénéfices pour l'environnement** grâce à l'optimisation des trajectoires des vols et à la réduction de la consommation de carburant", affirme de son côté le *Journal de l'économie*.

Les aéroports doivent participer à la transition

Les infrastructures aéroportuaires portent une responsabilité dans la transition menée par le secteur aérien. Elles doivent **accompagner les compagnies aériennes dans la réduction de leurs émissions**. Deux grands axes de travail apparaissent.

- **Réduire l'impact environnemental des avions au sol**

Le premier consiste à mettre en place **des équipements plus vertueux au sol**, comme des tracteurs électriques permettant d'éviter aux avions d'avoir à consommer du carburant pour se déplacer sur les pistes. La compagnie EasyJet, qui a expérimenté un tel système, estime que le roulage électrique lui permettait d'économiser vingt minutes de fonctionnement des moteurs avant chaque vol, soit **une économie globale de 4 % de sa consommation de carburant annuelle**.

Les aéroports peuvent également adapter leurs réseaux électriques pour que les avions en attente se branchent dessus, ce qui évite aux appareils d'avoir à brûler du kérosène avant ou après le vol simplement pour maintenir en route leurs



équipements électriques, via leurs générateurs internes (APU, *Auxiliary power unit*). "Le bilan est alors d'autant moins carboné que les aéroports se sont très largement engagés dans la voie des énergies renouvelables pour leurs approvisionnements", ajoute *Air & Cosmos*. Selon l'Association du transport aérien international (IATA), **les émissions générées par les APU représentent jusqu'à 2,5 % des émissions globales de l'aviation**.

Enfin, l'amélioration de la connectivité des aéroports ouvre la voie à **l'optimisation de la navigation aérienne, dans le ciel et au sol**. Mieux équipés, les contrôleurs bénéficient de plus de données pour gérer plus efficacement les vols. Des sociétés spécialisées proposent leurs services sur ce créneau, à l'instar d'Amadeus, coentreprise fondée par plusieurs compagnies aériennes dont Air France. "À partir de l'exploitation des mégadonnées et de l'intelligence artificielle, [elle] peu[t] optimiser le séquençage d'allumage des avions, réduisant l'utilisation de l'APU, mais aussi le temps d'attente au roulage", indique *Air & Cosmos*.

- **S'ajuster aux besoins en nouveaux carburants**

"Les aéroports, futurs hubs énergétiques", avance *L'Usine Nouvelle*. Alors que les avions de demain auront massivement recours aux carburants durables (SAF) ou à de nouvelles motorisations (électrique, hydrogène), les aéroports pourraient jouer un rôle clé dans cette transformation, ce qui

nécessitera **des ajustements fonciers et de nouvelles installations**.

Le recours aux biocarburants risque d'augmenter le nombre de cuves de stockage "afin de répondre aux besoins différenciés des compagnies aériennes, chacune pouvant contenir des mix SAF-kérosène différents", note Joffrey Maï, directeur environnement et développement durable de Vinci Concessions. Les futurs carburants de synthèse pourront également entraîner la nécessaire **édification d'unités de production à proximité des aéroports**, afin de réduire le temps de transport et de faciliter la logistique. "La proximité avec la source d'eau nécessaire pour extraire l'hydrogène entrera en compte", précise Yannaël Billard, responsable de l'environnement et de l'énergie pour le Groupe ADP. La production d'hydrogène vert s'avérera également utile pour la motorisation à hydrogène, qu'elle concerne les futurs avions ou les véhicules de manutention au sol fonctionnant avec des piles à combustible. **L'électricité verte constitue une autre source d'énergie à déployer massivement dans les aéroports**, pour répondre à des besoins en hausse. Selon Yannaël Billard, "les besoins de CDG, Orly et du Bourget vont atteindre 900 GWh/an, contre 470 GWh/an avant le Covid". Fin 2022, la DGAC a **assoupli les règles concernant**

l'installation de panneaux photovoltaïques dans les aéroports, remarque *L'Usine Nouvelle*, pour favoriser la production locale d'électricité décarbonée.

• De premières initiatives, malgré un contexte économique délicat

Certains groupes ont déjà entamé leur transition. Vinci Airport, Airbus et Air Liquide se sont associés en 2021 pour développer l'usage de l'hydrogène. Cette collaboration doit permettre **d'équiper le réseau européen de Vinci Airport en infrastructures de production, de stockage et de distribution d'hydrogène**, en se projetant au-delà de 2030. La même année, Brussel Airport a amorcé son projet "Stargate", réunissant un consortium de 21 partenaires. Il vise à déployer des engins électriques ou à hydrogène pour les activités au sol ou à bâtir une usine de mélange de biocarburants sur place. Le projet est soutenu par l'Union européenne, dans le cadre du *EU Green Deal*, à hauteur de 24,8 millions d'euros. En France, le Groupe ADP travaille aussi à adapter ses aéroports à l'aviation de demain.

La crise de Covid-19 a toutefois **lourdement pesé sur la santé financière des aéroports**. De plus, les investissements déjà réalisés pour répondre aux impératifs de sûreté aéroportuaire ont générale-

Les projets du Groupe ADP pour le futur de ses aéroports

Programme "2025 Pioneers"

Lancé en 2022, il vise à "imaginer l'aéroport durable de demain" et à tendre vers la décarbonation de l'aviation en 2050, via divers leviers : réduction des émissions des aéroports, utilisation accrue des énergies bas carbone, renforcement des correspondances avion-train, etc.

Hydrogen Airport

Coentreprise fondée en 2023 pour accompagner les aéroports dans leurs projets d'intégration de l'hydrogène au sein de leurs infrastructures.

avec Air Liquide

Partenariat avec 6 acteurs de l'aviation régionale décarbonée

Identifier les aménagements aéroportuaire nécessaires aux nouvelles énergies, définir des chaînes d'approvisionnement et de logistique appropriées, etc.

- Beyond Aero
- Daher
- Pipistrel
- Universal Hydrogen
- VoltAero
- ZeroAvia

Traitement IndexPresse.

ment pris le pas sur les préoccupations environnementales. Les aéroports ne sont pas non plus toujours soutenus par les compagnies, qui ne sont par exemple pas toutes "enthousiastes à l'idée de payer un branchement aux réseaux de l'aéroport, une procédure qui peut s'avérer plus onéreuse que de gaspiller du carburant dans l'APU", analyse *Air & Cosmos*. Pour la revue spécialisée, **une intervention de la puissance publique paraît indispensable pour assurer la transition des aéroports**, aussi bien pour les soutenir financièrement dans leurs investissements que pour régler

les pratiques et pousser l'ensemble des parties prenantes à améliorer leur performance environnementale. À terme, **les bénéfices d'une telle transformation pourraient dépasser le cadre du transport aérien**, estime Thomas Juin, président de l'Union des aéroports français (UAF) : "Les aéroports peuvent entrer dans une nouvelle phase de leur développement en devenant des acteurs de l'énergie décarbonée pour l'aérien mais aussi pour des secteurs comme le transport terrestre et toute activité nécessitant de l'énergie."

Une décarbonation déjà à l'œuvre

• Les compagnies aériennes s'engagent

Si les ambitieux projets des constructeurs concernant des avions électriques, hybrides ou fonctionnant à l'hydrogène ne se concrétiseront pas avant de longues années, la transition du secteur se matérialise déjà chez les compagnies aériennes. L'Association du transport aérien international (IATA) souligne que fin 2023, **43 d'entre elles ont déjà signé des engagements garantissant l'intégration de carburant durable (SAF) dans leur consommation**, généralement à hauteur de 10 %. Pour Anne Rigail, directrice générale d'Air France, il est crucial que les compagnies montrent la voie afin de développer plus rapidement la production de SAF, en se fixant des ambitions supérieures aux seuils réglementaires. "Si l'on vise uniquement le niveau prévu par les mandats sans donner des signaux très forts aux marchés, on risque de passer à côté de la cible", prévient-elle dans *L'Usine Nouvelle*. Elle estime également que **les attentes des consommateurs incite nécessairement à s'engager au plus vite** : "Je suis convaincue qu'il y a une vraie attente des clients, notamment de la part des entreprises depuis la crise liée au Covid, car elles cherchent à limiter l'empreinte carbone. Au niveau des passagers, la sensibilité varie en fonction des nationalités."

Sur le segment des avions régionaux, la compagnie française Amelia veut devenir la première à **exploiter des avions fonctionnant à l'hydrogène vert dès 2026**. En février 2022, elle a passé commande de kits de conversion auprès de la société

De grandes compagnies aériennes parmi les principaux acheteurs de SAF (par volume d'achat garanti)



Traitement IndexPresse. Source : Organisation de l'aviation civile internationale, février 2023

américaine Universal Hydrogen, qui doivent lui permettre d'équiper des appareils de 56 passagers au rayon d'action de 740 km. Pour assurer le retour sur investissement, Adrien Chabot, directeur de l'innovation et du développement durable d'Amelia, se repose sur deux axes, comme expliqué dans *Air & Cosmos* en juin 2023 : "Il y a tout d'abord l'augmentation du prix des billets. La tendance est à la hausse actuellement. Il y a, par ailleurs, une augmentation forte des taxes CO₂. **Ce sont des éléments qui vont dans le bon sens pour une solution H2.**" La feuille de route de l'IATA s'inscrit dans une perspective similaire, en considérant que des vols régionaux ayant recours à l'hydrogène devraient apparaître avant 2030.

• La dynamique électrique est lancée dans les aéroclubs

Seul avion 100 % électrique ayant reçu la certification de l'Agence européenne de sécurité aérienne, le Velis Electro du constructeur slovène Pipistrel rencontre le succès dans l'Hexagone. "La France est le pays qui compte le plus d'exemplaires en service à ce jour", affirmait *Les Échos* en septembre 2023, avec **une trentaine d'appareils actifs, soit un tiers de la flotte mondiale de Velis Electro**. "Le patron américain de Textron [propriétaire de Pipistrel], que nous avons rencontrés, nous a même demandé comment nous avons fait pour convaincre les aéroclubs, malgré les réticences culturelles", sourit Jean-Luc Charon, président de la Fédération française aéronautique (FFA).

Cet avion électrique biplace présente plusieurs atouts, en plus de son avantage environnemental : **il est moins bruyant, plus simple à entretenir et coûte moins cher aux clients** (130 euros pour une heure de vol, contre 160 euros pour les modèles thermiques les plus économiques). En

parallèle, plusieurs sociétés françaises suivent la dynamique et font la promotion de l'avion électrique, comme le loueur Green Aerolease ou l'entreprise 3AS, qui se positionne sur la formation au pilotage d'ULM électriques. "Au-delà de la formation de pilotes, l'objectif de 3AS est **d'être un pionnier dans le développement de services aux aéroclubs, l'entretien et la maintenance des avions électriques**", indique *Les Échos*.

Le déploiement à venir de nouvelles versions du Velis Electro possédant plus d'autonomie grâce à une nouvelle génération de batteries, à horizon 2025, ainsi que **l'amélioration du système de recharge pour faciliter cette dernière**, devraient pérenniser le développement de l'aviation électrique dans les aéroclubs et convaincre davantage d'établissements d'investir dans de tels appareils. L'arrivée de modèles concurrents pourrait également **offrir de nouvelles opportunités et élargir le marché**. "Un souhait d'autant plus fort que le Velis Electro sera très bientôt certifié aux États-Unis, ce qui devrait créer un appel d'air, au détriment du marché européen", avertissait *Les Échos*.

Green Aerolease bâtit sa flotte électrique

Après sa création en 2020, la start-up française Green Aerolease a acheté 50 Velis Electro, pour ensuite les louer aux aéroclubs. Trois ans plus tard, Charles Cabillic, fondateur de l'entreprise, tire un premier bilan positif auprès des *Échos* : "Nous avons 35 appareils déployés en France, aux Pays-Bas, en Espagne, au Danemark et bientôt en Allemagne. Nous avons déjà accumulé plus de 5 000 heures et **plus de la moitié de nos clients sont des écoles de formation professionnelle, ce qui illustre la crédibilité acquise par l'appareil**."

En mai 2023, le montant du loyer pour un exemplaire s'élevait à 2 570 euros hors taxe. Green Aerolease prend en charge la maintenance et l'assurance des avions, et **accompagne également les aéroclubs pour faciliter leur investissement**. Elle a par exemple **conclu des contrats de sponsoring** avec certaines marques, comme BMW à Brest, redirige les structures vers les subventions publiques accessibles lors de la location d'un avion électrique, et a créé une association ponctionnant une partie du prix d'une heure de vol sur un avion thermique pour financer la location de modèles électriques.

Pour supporter la demande en hausse, Green Aerolease a **réalisé une levée de fonds de 12 millions d'euros au printemps 2023**. Charles Cabillic souhaite que la société double de taille et renforce sa présence dans les pays où elle s'avère déjà active. La France compte par exemple **800 aéroclubs, soit autant de clients potentiels**. "De quoi envisager une poursuite de sa croissance", note *Les Échos*. À plus long terme, l'entreprise affiche des ambitions dans la mise en exploitation d'appareils régionaux électriques ou à hydrogène capables de transporter une vingtaine de passagers.

L'AÉRONEF DÉCARBONÉ FOCALISE L'ATTENTION DES CONSTRUCTEURS

Des prototypes et des projets de recherche menés par les acteurs

L'Onera, un centre de recherche incontournable

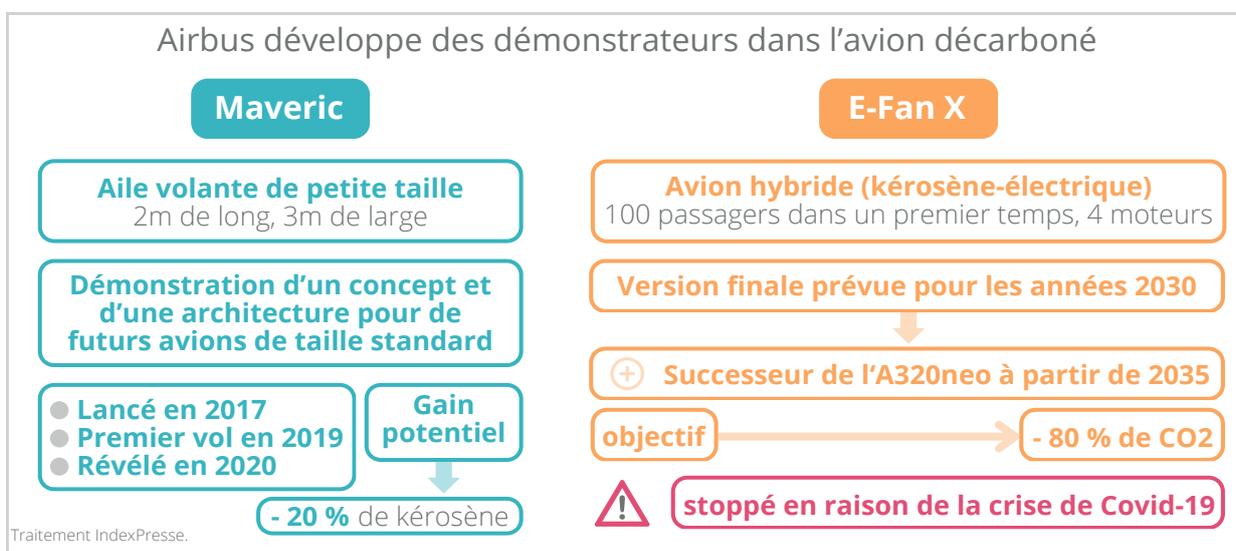
L'Office national d'études et de recherche aérospatiales (Onera) apparaît comme **un acteur pivot dans le développement de démonstrateurs** pour l'aviation bas carbone. Il mène ses propres projets et s'inscrit dans des démarches de partenariats avec le reste de la filière.

En 2017, l'Onera a lancé **le projet Ampere**, qui visait à présenter un démonstrateur d'avion régional à propulsion électrique alimentée au kérosène. Affichant une capacité de quatre à six passagers, il s'appuyait sur **le concept de propulsion électrique distribuée**. Cette technologie cherche à répartir la force de poussée grâce à **un grand nombre de fans carénés électriques situés sous les ailes de l'avion**. Elle permettrait de réduire de plus d'un quart la consommation de kérosène

pour un vol de 1 400 km, tandis que la propulsion électrique apporterait quant à elle un gain additionnel de 5 % à 10 %. Il a notamment été **financé par le projet européen Clean Sky 2**, au sein duquel il poursuit diverses recherches en tant que "core partner" (partenaire de premier plan).

Dans la continuité du projet Ampere, l'Onera a présenté en 2019 **un nouveau concept baptisé Dragon**. Il utilise la technologie de la propulsion électrique distribuée pour **l'appliquer à un avion de ligne** (150 passagers) dans le but de voir ce type de configuration être installée sur un aéronef à l'horizon 2035.

Le centre a également travaillé en 2021 sur **le projet Volcan** (Vol avec Carburants Alternatifs Nouveaux) avec Airbus, Safran et Dassault. Il s'agissait de **faire voler un A320neo en utilisant uniquement du biocarburant**, et donc de procéder aux ajustements techniques nécessaires.



Le planeur électrique Euroglider

Lancé en 2014, le partenariat entre Dassault, l'Association européenne pour le développement du vol à voile (AEDEVV) et l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (Isae) vise à mettre au point **un planeur biplace à propulsion électrique**. La nécessité d'un tractage réduit l'utilisation des planeurs traditionnels à 20 % du temps, à cause du manque de courants ascendants. Les moteurs électriques ont ainsi pour but de **permettre une utilisation plus fréquente et plus simple**. Il s'agirait d'un avion dédié à la formation des pilotes. Président de l'AEDEVV, Joël Denis explique dans *Les Échos* : "Il existe déjà des motoplaneurs à gros moteur thermique, mais leur pilotage est trop éloigné du planeur. Et **les planeurs à moteur rétractable ne sont pas adaptés** à l'usage intensif d'une école de pilotage." L'Euroglider pourrait enchaîner jusqu'à trois sessions de formation d'une durée de 40 minutes, et ses batteries afficheraient un temps de recharge de deux heures. L'engin est **basé sur un modèle de l'Armée**, converti en aéronef électrique grâce à l'installation de **deux moteurs sur ses ailes**. Les batteries ont été placées à l'arrière de l'avion, mais devraient prendre place également au niveau des ailes dans la version finale. **Le prototype a réalisé plus de 20 vols** sur la base aérienne de Salon-de-Provence (Bouches-du-Rhône). Les partenaires du projet souhaitent pouvoir commercialiser l'engin à partir de 2024.

L'avion hybride EcoPulse

Également issu d'un partenariat, ce projet a pour but de mettre au point **un avion hybride léger** (thermique-électrique) basé sur le modèle TBM 910 (6 sièges passagers). Développé par Daher, Airbus et Safran, il est équipé de **six moteurs électriques situés le long des ailes** ainsi qu'un moteur thermique classique. Les industriels expliquent que "le démonstrateur vise à évaluer les avantages opérationnels de **l'intégration d'une propulsion hybride-électrique distribuée**, avec un accent particulier sur les émissions de CO₂ et la réduction du niveau sonore." La structure de l'avion est fournie par Daher, tandis que Safran s'est concentré sur la motorisation (propulseurs et turbogénérateur) et le groupe Airbus sur la batterie électrique. Le moteur thermique est alimenté par **un carburant moins polluant** que le kérosène classique. L'avion a effectué différents tests au sol et une dizaine d'heures de vol, sans le système électrique, avant **une démonstration de 100 minutes** fin 2023 dans le cadre des Green Aero Days (événement dédié à la décarbonation de l'aviation légère). Sa propulsion électrique était alors complètement opérationnelle. Directeur de la stratégie, R&T et innovation chez Safran, Eric Dalbiès se réjouissait alors du succès de l'expérimentation : "Nous avons confirmé aujourd'hui que **ce système de propulsion disruptif fonctionne en vol**, ouvrant la voie à une aviation plus durable".

UN SOUTIEN SPÉCIFIQUE DE L'ÉTAT AUX PROJETS DE R&D

Cette émulation au niveau des expérimentations et des projets de recherche est notamment facilitée par l'appui de la puissance publique. En 2020, l'État a validé une enveloppe de 376 millions d'euros venant financer 62 projets de R&D dans la décarbonation de l'aviation. Ces derniers se répartissent en trois axes : la minimisation des besoins en énergie, notamment grâce à l'architecture des avions et à la science des matériaux ; le développement de nouveaux carburants plus durables ; et l'optimisation de la trajectoire des appareils et de la gestion du trafic aérien. Les projets sélectionnés concernent 117 sites industriels et s'inscrivent dans une logique de filière, regroupant les grands groupes, les PME et ETI et les centres de recherche.

L'avion bas carbone attire les constructeurs historiques comme les start-up

Une implication des groupes aéronautiques

Un futur avion à hydrogène développé par Airbus

L'avionneur franco-allemand a lancé un vaste programme de développement d'un avion à hydrogène prévu pour l'année 2035. Après avoir fait des recherches sur les différents types de carburants possibles à partir de 2018, le groupe aéronautique a opté pour l'hydrogène et **doit choisir la technologie** (moteur à combustion ou pile à hydrogène) en 2027 ou 2028. **Cette décision aura des impacts majeurs** sur la chaîne de production et les relations avec les partenaires, notamment dans **la mise en place d'un écosystème pour la motorisation électrique** de l'avion si le choix se porte sur la pile à hydrogène. Airbus travaille ainsi avec des énergéticiens comme Engie et Air Liquide ainsi que des aéroports pour les questions de stockage, d'approvisionnement et de distribution. Le constructeur aimerait à terme constituer **une famille d'appareils propulsés à l'hydrogène**, mais la création du premier modèle représente déjà un défi technique considérable. Les problématiques liées au stockage ou encore à la sécurité ont conduit Airbus à **se tourner vers des partenaires spécialistes** des différentes technologies à intégrer. CFM International, **coentreprise entre Airbus, Safran et General Electric**, se concentre sur les questions de motorisation. **Une collaboration nouée avec ArianeGroup** permet d'avancer sur le stockage et l'utilisation de l'hydrogène, l'industriel y recourant fréquemment pour la propulsion des fusées. Au sujet des piles à combustible, **une autre coentreprise a été créée**, cette fois-ci avec l'équipementier automobile allemande ElringKlinger. **Quatre centres de R&D ZEROE** (zéro émission) ont été par ailleurs implantés à Nantes, Brême (Allemagne), Madrid (Espagne) et Filton (Royaume-Uni). Des avancées majeures ont été réalisées et l'avionneur procédera à des

tests entre 2026 et 2028 grâce à son "laboratoire volant", l'A380 MSN1. Le coût total du programme devrait s'établir **entre 15 et 20 milliards d'euros**.

Daher mise sur l'hybride

Le groupe, spécialisé dans la construction et les services aéronautiques, a annoncé en 2023, lors du salon du Bourget, **quadrupler ses dépenses de R&D** pour la décarbonation de l'aviation légère sur les cinq prochaines années. Il prévoit par ailleurs **le lancement d'un premier modèle d'avion bas carbone** en 2027. Celui-ci s'appuierait sur une propulsion hybride thermique-électrique et sur l'utilisation de carburants durables (SAF). Il s'agira d'un appareil de sa gamme d'avions d'affaires TBM. Le groupe souhaite se décarboner en actionnant plusieurs leviers. Il s'est ainsi doté de **trois centres d'innovations**, chacun spécialisé sur une thématique :

- Fly'In se focalise sur l'aviation décarbonée ;
- Shap'In est axé sur les structures aéronautiques, de la conception au recyclage ;
- Log'In se concentre sur la logistique des opérations.

La conduite de ses activités logistiques bénéficie également de solutions digitales (intelligence artificielle, jumeaux numériques) réduisant son impact environnemental. **Le déploiement accru du numérique aux niveaux des commandes** des avions contribue aussi à cette dynamique, en optimisant le pilotage et donc la consommation de carburant. Daher a en outre procédé en 2019 à **l'acquisition du néerlandais KVE composites**, spécialiste des pièces en thermoplastiques. De plus en plus utilisées dans l'aéronautique, celles-ci allègent le poids des avions, rallongent leur durée de vie et facilitent le recyclage. Le groupe dispose d'un site dédié au thermoplastique à Nantes.

ATR et ses nouveaux avions régionaux décarbonés

Coentreprise entre Airbus et le constructeur italien Leonardo, ATR est spécialisée dans les avions à hélices. Il souhaite lancer deux nouveaux modèles qui constitueront **le démarrage d'une gamme d'avions bas carbone**, basés sur l'hybridation électrique. Peu de modifications seront opérées par rapport aux modèles existants en termes de capacité ou d'architecture afin de **rester au plus près des besoins** des clients actuels (les compagnies régionales). "Il s'agit de lancer une nouvelle famille d'appareils, qui offrira les mêmes caractéristiques que les modèles actuels mais avec **de nouveaux moteurs consommant 20 % moins de carburant**, 100 % compatibles avec les nouveaux carburants alternatifs et **la possibilité d'une hybridation électrique**", confirme dans *Les Échos* le directeur général d'ATR, Stefano Bortoli. Ces différentes innovations devraient permettre de réduire considérablement les émissions de CO₂ des nouveaux avions. **Les coûts devraient par ailleurs être maîtrisés** grâce aux économies réalisées sur la consommation de carburant et sur une maintenance moins lourde,

malgré le prix supérieur des carburants durables. **Un appel d'offres** pour le développement de la nouvelle gamme, baptisée ATR Evo, a débuté en 2023 auprès des motoristes européens et américains. La définition précise du projet doit être effectuée en parallèle avec les compagnies aériennes, **les premières livraisons** étant attendues pour 2030. L'avionneur travaille en outre avec la compagnie Air New Zealand au sein de l'initiative "Mission Next Gen Aircraft" pour accroître le déploiement d'aéronefs décarbonés en Nouvelle-Zélande.

D'autres projets sont mis en place par les constructeurs, sans forcément développer d'avions bas carbone. ATR cherche à **convertir ses avions existants à l'utilisation de carburants durables** en partenariat avec le motoriste canadien Pratt & Whitney. Airbus a sorti l'A321XLR, un avion standard affichant **une moindre consommation de carburant** et pouvant utiliser jusqu'à 50 % de SAF. Dassault a adopté une approche similaire avec ses Falcon (avions d'affaires) 6X et 10X, qui seront **compatibles avec les SAF** respectivement à hauteur de 50 % et 100 %.

Les start-up se joignent au mouvement

De multiples projets lancés par les Avions Mauboussin

Fondée en 2020 et reprenant une marque d'aéronautique des années 1920, cette société souhaite développer **une variété de modèles d'aéronefs décarbonés**. Il s'agira de l'Alérion, un biplace, et de l'Alcyon, affichant une capacité de six passagers. Les deux avions débiteront par **une propulsion hybride thermique-électrique** avant de passer progressivement, entre 2025 et 2027, à **une motorisation électrique alimentée par une pile à hydrogène**. Les phases de certification et de commercialisation doivent démarrer entre 2025 et 2026 pour les modèles hybrides. En parallèle, l'entreprise a développé **le Zéphyr, un système de propulsion à l'hydrogène**, et l'Ygrasil, un matériau composite. Mauboussin est par ailleurs impliquée

dans **le projet Mousquetaire Gypaète**, visant à adapter cet avion (modèle Jodel D140G) en **une version silencieuse et plus écologique**. L'aéronef pourrait ainsi voler dans des zones naturelles sans déranger la faune. Le projet est porté par les Fédérations des pilotes de montagne et des collectionneurs d'avions ainsi que l'association Ailes Sud-Ouest.

La start-up a conclu **un accord avec le Comité représentatif des Français d'Outre-mer (Crefom)**, les avions légers se montrant adaptés pour une liaison inter-îles. Soutenue par la région Bourgogne-Franche-Comté, l'Ademe (agence publique de l'énergie) et Bpifrance, **elle a obtenu 800 000 euros** dans le cadre de France Relance. Les fondateurs ont investi plus d'un million d'euros dans les prototypes et finalisaient **une levée de fonds fin 2023**, d'après *Entreprendre*.

Une gamme d'avions hybrides mise au point par Voltaero

Cette société, créée en 2017, cherche à concevoir plusieurs modèles d'avions fonctionnant grâce à **des batteries alimentées par du carburant fossile** dans un premier temps, **puis de l'hydrogène** par la suite. Le décollage se fait uniquement sur les batteries électriques, qui peuvent être **rechargées au sol**. Voltaero a présenté son premier modèle, le Cassio 330, lors du salon du Bourget en 2023. Il s'agit d'un **appareil à cinq places**, dont la commercialisation doit débuter en 2025. Des tests en vol et la démarche de certification au niveau européen sont donc prévus pour 2024. Le second modèle inventé par Voltaero, le Cassio 480, doit pouvoir accueillir **jusqu'à six passagers**, tandis que le Cassio 600 affichera **une capacité de 12 personnes**. Ces différents avions pourront servir de navettes entre aéroports, de moyens de transport pour des évacuations ou encore d'aéronefs d'affaires. La société a prévu d'installer, grâce au soutien de l'État et des collectivités locales, **son usine de production** près de l'aéroport de Rochefort (Charente-Maritime). Cette dernière devrait atteindre une capacité de **150 avions par an**. Voltaero a en outre réalisé une opération de financement en 2022, **rassemblant 32 millions d'euros** auprès de l'industriel italien Tesi et de Kawasaki Motors. **Ces derniers s'avèrent également être ses partenaires industriels**, au niveau du fuselage et de la motorisation, le groupe Safran fournissant de son côté les moteurs électriques. La société a également reçu **une subvention de 5,6 millions d'euros** de Bpifrance. Début 2022, elle disposait d'un carnet de commandes d'une valeur de 70 millions d'euros, pour des clients en France, au Royaume-Uni et aux États-Unis.

Beyond Aero développe un avion à hydrogène

Cette start-up implantée au sein de l'écosystème aéronautique, à Toulouse, a pour objectif de développer un avion à hydrogène d'ici 2030. Lancée en 2020, elle cherche à se démarquer par l'ampleur de ses ambitions. "Nous visons un rayon d'action de plus de 1 000 miles nautiques

(1 850 km), soit **trois à quatre fois plus que la plupart des projets concurrents**", explique la cofondatrice Eloa Guillotin au magazine *Challenges*. Il s'agirait d'aéronefs de petite taille, pour six à dix passagers. Beyond Aero a choisi de créer un nouvel avion plutôt que de convertir un modèle standard afin d'**optimiser ses caractéristiques pour la propulsion hydrogène**. La société a obtenu rapidement le soutien de la région Occitanie, de *business angels* et de Bpifrance, rassemblant ainsi **3 millions d'euros**. Ce financement lui a permis de développer un **démonstrateur en 2022**, basé sur un modèle d'ULM (aéronef ultraléger motorisé). Beyond Aero est par ailleurs **soutenue par l'Onera**. Elle a en outre intégré le **programme d'accélération Blast**, créé par l'Onera ainsi que plusieurs organisations de l'écosystème aérospatial (l'incubateur Starburst, l'école Polytechnique et la Société d'accélération des transferts de technologies de Paris-Saclay). Pour son projet d'avion à pile à hydrogène, la start-up bénéficie aussi de l'appui du plan France Relance. En 2023, elle a effectué **une levée de fonds de 24 millions d'euros** lui permettant d'avancer dans le développement d'un plus grand modèle d'avion. Elle aurait déjà reçu **360 millions de dollars de lettres d'intention** de clients potentiels pour ce futur aéronef.

Aura Aero, autre acteur de la mobilité aérienne décarbonée

Créée en 2018, Aura Aero prévoit la construction d'une usine de production d'avions sur l'ancien aéroport militaire de Franczal, à Toulouse. Celle-ci permettra de fabriquer **l'Integral, un avion biplace** de voltige, à partir de 2024 en versions thermique et **100 % électrique**. Le constructeur prépare également, pour 2027, **un avion régional électrique (ERA) de 19 places** à motorisation hybride, en partenariat avec Safran et Thales. L'usine, d'une superficie de 40 000 m², nécessitera **un investissement de 150 millions d'euros** et est prévue pour ouvrir en 2026.

Aura Aero vise à produire environ **50 avions Integral et 100 ERA par an**, et emploiera 1 600 salariés, contre environ 200 actuellement. Malgré des ambitions élevées, le jeune constructeur doit encore **obtenir la certification** des avions et parvenir à finaliser une levée de fonds à hauteur

de 50 millions d'euros. La société a déjà réussi à rassembler 30 millions d'euros depuis sa création, mais doit à présent rassurer les investisseurs sur la fiabilité de ses avions. En avril 2022, un accident impliquant un avion Intégral a en effet coûté la vie aux deux pilotes. Aura Aero espère que le rapport d'expertise du Bureau d'enquêtes et d'analyses (BEA) ne remettra pas en cause la conception de l'appareil, facilitant ainsi la levée de fonds. La société déplore néanmoins la frilosité du monde financier vis-à-vis des start-up industrielles.

Lors de son premier événement "Aura day" (en mai 2023), l'entreprise a confirmé le passage du programme Integral E en phase de fabrication et a présenté la version définitive de l'avion régional ERA. Affichant une réduction de 80 % de la consommation de carburant et de 50 % des coûts de maintenance par rapport aux avions actuels, l'ERA dispose d'un potentiel considérable. Aura Aero évalue le marché à plus de 5 000 appareils, tant du fait du remplacement des avions en service que de l'ouverture de nouveaux marchés (fret et nouvelles liaisons).

Soutenue par le fonds Innovacom, Bpifrance et la région Occitanie, Aura Aero peut aussi compter sur des partenaires industriels et commerciaux de poids : Safran pour la propulsion, Thales pour l'avionique et le loueur d'avions Amedeo au niveau de la commercialisation. Ce dernier s'est engagé à acquérir 200 appareils, et Aura Aero dispose de plus de 300 commandes supplémentaires auprès d'une dizaine de compagnies aériennes, dont un accord pour jusqu'à 150 avions avec la compagnie américaine JSX conclu fin 2023.

Un avion-hélicoptère conçu par Ascendance Flight Technologie

Cette société a conçu un appareil pouvant au choix décoller comme un avion ou à la verticale, comme un hélicoptère (on parle de VTOL, pour *vertical take-off and landing*). Fondée en 2018 par d'anciens ingénieurs d'Airbus, Ascendance Flight Technologie (AFT) cherche à mettre au point un avion régional à propulsion hybride, capable de transporter jusqu'à cinq passagers. Baptisé l'Atéa, l'appareil pourra également servir pour des interventions sanitaires ou logistiques. Les huit

hélices placées dans les ailes assurent le décollage et l'atterrissage en s'appuyant sur une propulsion uniquement électrique, le moteur hybride se déclenchant en phase de vol. "L'ascension et la descente sont les moments où les avions consomment le plus de carburant. En vol, ils en consomment peu", explique aux Échos le cofondateur Jean-Christophe Lambert. Le dispositif permettrait à la fois une forte réduction des émissions de CO₂ et du bruit causé par la propulsion.

Un prototype doit être finalisé fin 2024 afin de procéder aux tests en situation réelle. L'entreprise souhaitait au départ démarrer la production en 2025, mais l'obtention de la certification pourrait repousser cette échéance à 2027. AFT souhaite produire plusieurs dizaines d'avions par an. Incubée au Village by CA, elle est pour l'instant installée dans un atelier de 1 100 m² et emploie environ 70 personnes. Comptant plus de 550 commandes, la société revendique une clientèle internationale d'opérateurs d'hélicoptères, d'affréteurs d'avions ou encore de transporteurs aériens : Helifirst et Jets Systems Hélicoptères Services en France, Evfly et Yugo à Singapour, FlyShare aux Etats-Unis ou encore PhilJets Group aux Philippines.

L'entreprise a également développé une technologie de motorisation amenée à être commercialisée de façon séparée. "Nous ne sommes pas qu'un avionneur, nous fournirons aussi des technologies", confirme Jean-Christophe Lambert. Baptisée Sterna, elle permettrait à des avionneurs d'intégrer plus facilement une propulsion hybride à leurs modèles existants.

En 2021 puis en 2023, AFT a réalisé des opérations de financement, obtenant des fonds auprès de Dassault Finance, M Capital, IRDI et Bpifrance.

44 millions d'euros

Les fonds levés par Ascendance Flight Technologie depuis sa création.

Source: Les Échos, 2023.

Des acteurs étrangers innovants et bien positionnés

ZeroAvia, pionnier du rétrofit à hydrogène

Entreprise anglo-américaine fondée en 2018, ZeroAvia est **la première société au monde à avoir effectué un vol avec un avion régional à hydrogène**. Réalisée début 2023, l'expérimentation a porté sur un avion d'une capacité de 19 passagers, doté d'une **propulsion électrique alimentée par un système thermique-hydrogène rétrofité**. ZeroAvia se positionne en effet à la fois dans l'équipement de nouveaux avions et dans **la conversion des avions thermiques** avec un dispositif couplant des moteurs électriques et des piles à hydrogène. Début 2023, elle disposait de **plus de 1 500 précommandes** du système, et souhaitait une homologation en 2024 pour des premiers vols commerciaux l'année suivante. **Un accord avec l'aéroport de Rotterdam et Shell** a d'ailleurs été signé dans ce sens. La société pourrait commencer par un déploiement dans le secteur du fret. Comparé à un moteur thermique, **la solution de ZeroAvia n'émet pas de gaz à effet de serre** et pourrait même permettre une réduction des frais de maintenance. Elle mène en parallèle **un autre projet, portant sur un avion de plus grande taille** (70 à 90 passagers). Le système propulsif devrait être prêt pour assurer des vols à partir de 2027. L'entreprise peut en outre **compter sur d'éminents soutiens**, tels que les entrepreneurs et milliardaires Bill Gates et Jeff Bezos, la compagnie American Airlines, le groupe Airbus ou encore le gouvernement britannique. Elle a reçu environ **150 millions de dollars** depuis sa création.

Les réservoirs amovibles d'Universal Hydrogen

Cette société américaine se montre également bien financée, avec **plus de 100 millions de dollars** de fonds levés. Créée en 2020 aux États-Unis, elle s'est installée à Toulouse dans un atelier de 3 000 m² pour profiter de l'écosystème aéronautique français. Soutenue notamment par Airbus et Toyota, Universal Hydrogen cherche à mettre au point **des réservoirs amovibles à hydrogène**, en particulier pour l'aviation. Ces systèmes per-

mettraient de bénéficier des avantages de l'hydrogène sans en subir les inconvénients. "L'hydrogène apporte **une performance équivalente au kérosène, alors que les batteries seraient trop lourdes** pour alimenter un avion électrique de 60 passagers", indique aux *Échos* Pierre Farjounel, directeur de la filiale Europe. Le remplacement de réservoirs préremplis devrait en outre permettre **une simplification des opérations** des compagnies aériennes. La société se positionne dans **la fourniture des équipements**, notamment pour la conversion des avions thermiques à l'hydrogène, ainsi que **l'approvisionnement en carburant vert** (hydrogène issu de sources d'électricité renouvelables). Un test a été réalisé sur un avion de 40 places en 2023, et la commercialisation devrait débuter aux alentours de 2025. L'entreprise disposerait d'**un carnet de commandes d'un montant supérieur à un milliard de dollars**, avec des clients comme Amelia, Air Nostrum et Connect Airlines. Universal Hydrogen compte atteindre 150 salariés à Toulouse d'ici 2025 et y investir plusieurs dizaines de millions d'euros à l'horizon 2027.

Le Velis Electro de Pipistrel

Un autre acteur notable est le slovène Pipistrel, **qui a développé un petit avion 100 % électrique** destiné à des activités de loisir ou de formation. Certifié par l'agence européenne en 2020, l'appareil a été déployé dans plus de 90 pays, dont plusieurs centaines en France. Baptisé Velis Electro, il s'avère **moins bruyant, mais aussi moins coûteux** à l'usage que les équivalents thermiques. "Le coût à l'heure de vol, assurance et électricité incluse, est d'environ **130 euros, contre 160 euros pour les avions thermiques** les plus économiques", précise dans *Les Échos* Jean-Luc Charon, président de la Fédération française d'aéronautique (FFA). "Mais nous travaillons à différents moyens de faire baisser ce coût." Fin 2023, Pipistrel développait de nouvelles batteries pour **allonger la durée des vols**, et ainsi élargir à la fois les usages et les clients potentiels parmi les aéroclubs. La société attendait également **la certification du Velis Electro aux États-Unis**.

Étendre la décarbonation des usages grâce à d'autres types d'aéronefs

HyLight, un ballon dirigeable à hydrogène

Cette société fondée en 2022 développe des ballons propulsés à l'hydrogène, offrant **une solution complémentaire pour la surveillance de zones** et d'infrastructures (pipelines, chemins de fer, espaces naturels, parcelles agricoles, cartographie...). "Les drones électriques manquent d'autonomie en vol, les hélicoptères sont polluants et onéreux, et les satellites ne permettent pas un degré de précision suffisante pour nos applications", explique aux *Échos* le fondateur, Théo Hoenen. Le principal modèle, de 10 m de long, peut **voler une vingtaine d'heures et embarquer 10 kg d'équipements**, comme des caméras et des capteurs. Six prototypes ont été réalisés (dont deux commercialisables), et une démonstration a permis à la société de **décrocher deux clients** : Enedis et l'énergéticien italien Snam. HyLight a été lauréate en 2023 du programme Propulse de l'Agence de l'innovation pour le transport. La start-up a également été **accompagnée au sein de l'incubateur de l'université de Berkeley**, en Californie (États-Unis). Les dirigeants de HyLight y ont notamment rencontré le cofondateur de Tesla, Marc Tarpenning, et Abhishek Tripathi, ancien directeur des lancements chez SpaceX. Ces derniers accompagnent toujours la société au sein d'un conseil consultatif. HyLight a reçu **140 000 euros de Bpifrance** et souhaite procéder à une levée de fonds afin d'accélérer son développement, mais elle se concentre pour l'instant sur les aspects techniques. À terme, elle pourrait **diversifier les usages de son dirigeable à hydrogène**, par exemple dans le transport de marchandises, dans le tourisme ou dans le domaine humanitaire.

Lelio, un ballon pour la formation

Fruit de la collaboration entre les entreprises Koesio (services numériques) et Airstar (ballons lumineux), le dirigeable électrique Lelio a réussi son premier vol en 2023. Long de 32 mètres et

gonflé à l'hélium, le ballon est doté de **quatre moteurs électriques et de batteries amovibles**. Conçu en tissus techniques et de forme aérodynamique, il a été créé pour **battre le record du monde de vitesse** dans un tel engin. L'objectif est de **réhabiliter ce mode de transport**, présenté comme silencieux, décarboné et relativement peu coûteux. Le dirigeable pourra ensuite servir pour l'entraînement des pilotes. "Il est **trop petit pour avoir un intérêt commercial** dans le transport de marchandises ou de passagers. En revanche, il va servir à former les futurs pilotes de dirigeables", explique aux *Échos* le patron de Koesio, Pieric Brenier. Féru d'aviation, ce dernier a rejoint le projet en 2017, alors que Pierre Chabert, le président d'Airstar, avait traversé la Manche en dirigeable électrique trois ans plus tôt. Outre les performances en termes de vitesse, le ballon doit par ailleurs réaliser une tournée promotionnelle en Europe. Financé principalement par Koesio pour **un investissement total de 1,5 million d'euros**, le ballon Lelio a été également soutenu au niveau industriel par **des partenaires locaux** (régions lyonnaise et grenobloise). Porcher Industries, Diatex, ESI, Digigram Digital ou encore Bladetips Energy ont ainsi contribué à sa réalisation. L'intérêt du dirigeable tient dans sa capacité à **diversifier les activités aériennes décarbonées**, selon Pieric Brenier : "Les dirigeables ne vont **pas remplacer les avions**. En revanche, sur certains secteurs, ils peuvent notamment **remplacer les hélicoptères**, par exemple pour des survols de lieux touristiques ou encore pour la surveillance des lignes électriques ou de la vie sauvage".

Du fret en dirigeable avec Flying Whales

Lancé en 2012, ce projet a pour but de développer le transport de marchandises par **un dirigeable propulsé par une motorisation thermique-électrique**. L'objectif de l'entreprise Flying Whales est de **recourir à une pile à hydrogène** pour l'alimentation électrique à l'horizon 2028.

L'AÉRONEF DÉCARBONÉ FOCALISE L'ATTENTION DES CONSTRUCTEURS

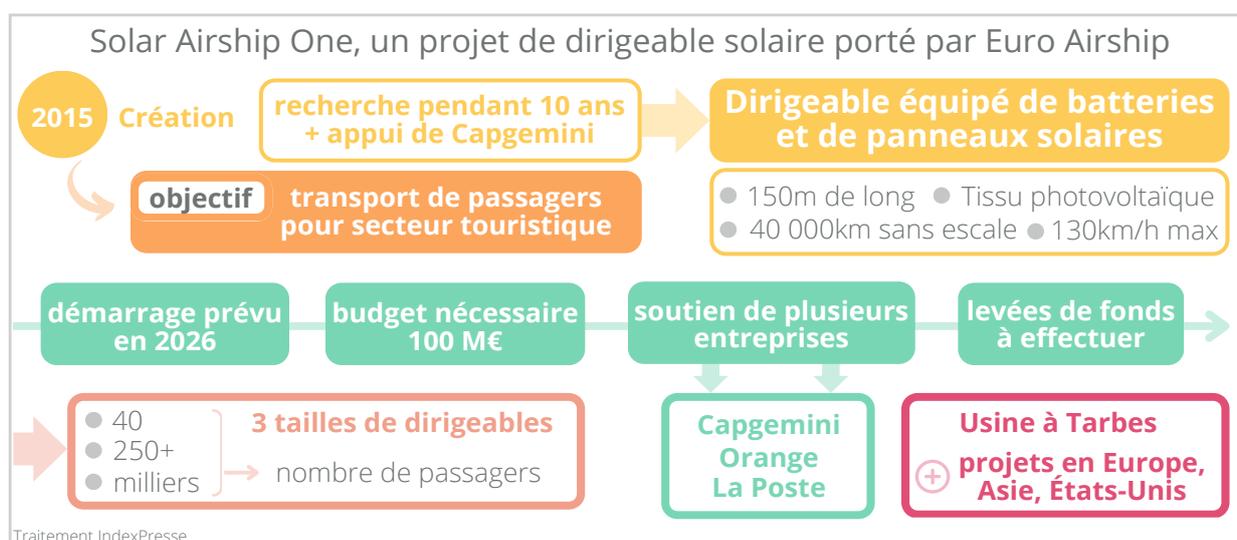
“L'idée n'est pas de concurrencer les modes de transport traditionnels, mais de **se positionner sur les zones isolées** qui ont des problématiques d'infrastructures”, souligne dans *Les Échos* Sébastien Bougon, fondateur et PDG de Flying Whales. “Alors qu'un avion doit se poser pour décharger, le dirigeable n'aura qu'à **se mettre en vol stationnaire et donc se passer d'empreinte au sol.**” Le projet se montre ambitieux, l'aéronef devant afficher une longueur de 200 mètres, et pouvant transporter jusqu'à 60 tonnes, grâce à des soutes ou des câbles reliés à l'engin. Il peut ainsi servir à installer des infrastructures, comme des pylônes ou des pales d'éoliennes. Sa capacité à se passer des voies de transport terrestres attire l'attention : **un accord a ainsi été signé en 2022 avec la Guyane** pour relier Maripasoula et le futur Cayenne. Le trajet prend trois heures par ballon, contre trois jours en recourant au camion et à la pirogue. **Le modèle économique de la société** devrait s'appuyer sur la construction et la vente des dirigeables d'une part, et les services de transport d'autre part. **Une première usine** en Gironde doit voir le jour durant l'année 2024, tandis qu'une seconde devrait être implantée l'année suivante au Québec (Canada), afin de **desservir les marchés nord-américains**. Flying Whales évalue le marché actuel à 800 appareils, et prévoit de **fabriquer 150 dirigeables** dans les dix prochaines années. La Corée du Sud, l'Indonésie et l'Australie vont en outre être mises en concurrence en 2024 pour

déterminer le lieu d'implantation de **la troisième usine, destinée à fournir le marché asiatique**. La complexité du projet a nécessité la mise en place d'un consortium, qui rassemble à présent **une quarantaine d'industriels**. Y figurent notamment Thales, Safran, Boeing, le groupe Reel, ADF, Air Liquide ou encore Epsilon Composite. Le coût global du projet est estimé à **450 millions d'euros**, dont 100 millions pour la conception et le développement de l'aéronef. Lors de trois tours de table, la société est parvenue à **rassembler 160 millions d'euros**, notamment 122 millions durant l'été 2022. Elle compte parmi ses financeurs Air Liquide, ADP, Société Générale, le Québec, la Principauté de Monaco, Bpifrance ou encore la région Nouvelle-Aquitaine.

800 appareils

Le marché mondial du transport de charges lourdes par dirigeable selon Flying Whales.

Source: Les Échos, 2022.



Fleasy, une cabine pilotable à ailes et rotors

Démarré en 2016, le développement de cet aéronef prévoit le recours à **une pile à hydrogène** pour alimenter le système de propulsion. Se présentant sous la forme d'**une cabine verticale** équipée d'ailes et de petites hélices, l'appareil est censé **faciliter le transport urbain** ou interurbain de courte distance. "En ville, rien n'est plus efficace que le métro. Sorti de ce cadre, c'est l'avion si on ne compte pas les temps de chargement et débarquement entre autres", explique le cofondateur, Jérôme Persiani, au site H2 Mobile. "Le Fleasy One serait zéro émission, comme le métro." **Les performances visées sont toutefois ambitieuses**, avec une autonomie de 1 000 km à une vitesse de 300 km/h. Le dirigeant souhaite que son appareil soit homologué comme un avion à décollage vertical et non comme un hélicoptère. "Notre appareil est vraiment un avion. **Il vole comme un avion** car il est porté par ses ailes, et non par les rotors", précise-t-il. "D'où un gain en efficacité. Cette architecture permet de consommer 30 % d'énergie en moins pour la sustentation et de la consacrer à la propulsion." Le Fleasy One pourrait **servir à une multitude d'usages**, du tou-

risme aux évacuations d'urgence en passant par la logistique industrielle ou médicale. L'approvisionnement de zones reculées, notamment en montagne, est ainsi envisagé. La société aimerait concevoir **un modèle biplace**, mais se focalise pour l'instant sur **un appareil avec une capacité de quatre passagers**, plus un pilote. Un tel modèle serait dans un premier temps plus attractif pour la clientèle ciblée par l'entreprise. **Un prototype a déjà été réalisé**, mais une difficulté réside dans le passage à la propulsion hydrogène. Les premiers tests véritables devraient ainsi se dérouler en 2027, pour **un début des livraisons au plus tard en 2029**. Fleasy a rejoint la communauté Les Deeptech de Bpifrance ainsi que l'accélérateur BeeMyDesk, ce qui lui a apporté un accompagnement et des financements pour le premier prototype. Elle a en outre réalisé **une levée de fonds d'un million d'euros** en 2019. La société a également été soutenue par Pulsalys (société de transfert de technologies) et le programme Big-Booster de la Métropole de Lyon et la Fondation pour l'université de Lyon. Elle envisageait alors de **procéder à une nouvelle opération de financement**, cette fois-ci à hauteur de 15 millions d'euros.

Les VTOL suscitent de l'intérêt

Existant dans l'aviation militaire, le système du VTOL (*vertical take-off and landing*, soit le décollage et l'atterrissage d'un avion à la verticale, comme un hélicoptère) se déploie pour des usages civils au niveau d'aéronefs de plus petite taille. Ils permettent notamment de combiner les avantages des avions (vitesse) et des hélicoptères (atterrissage facilité dans des zones difficiles telles que le milieu urbain, la montagne ou un navire). D'autres petits appareils s'apparentant à des hélicoptères décarbonés se développent également dans le secteur.

Via sa filiale Airbus Helicopters, le groupe aéronautique a conçu le CityAirbus Next Gen, un appareil à huit moteurs électriques et six rotors, capable de transporter jusqu'à quatre personnes (pilote inclus). Son autonomie lui permettrait de voler à 120 km/h sur 80 km. Les premiers tests sont attendus pour 2024.

De son côté, la start-up Tidav, fondée en 2021, a fait le choix de développer un drone VTOL 100 % électrique afin d'effectuer de la surveillance de zone, notamment les sites offshore (éoliennes...) de façon décarbonée. "Une mécanique de vol hybride spécifique permet de s'affranchir du modèle de vol des voilures tournantes [propre aux hélicoptères]", indique à *L'Usine nouvelle* le président de Tidav, Cédric Lefort. "Cette combinaison unique et brevetée des technologies de l'hélicoptère et de l'avion permet une grande robustesse au vent et des performances élevées."

D'autres acteurs se positionnent dans le domaine, notamment la société allemande Volocopter, qui souhaite disposer de ses petits taxis-hélicoptères électriques pour les Jeux Olympiques de Paris en 2024.

FORCES EN PRÉSENCE

Cette partie est consacrée à la présentation et à l'analyse transversale des sociétés spécialisées du secteur évoquées dans l'étude.

Elle vise d'une part à dresser une liste des acteurs positionnés sur le marché, focalisée en général sur les start-up. Le cas échéant, ce panorama est complété par l'ajout de sociétés non mentionnées dans l'étude.

La liste est scindée en plusieurs parties, selon une segmentation pouvant être basée sur les solutions développées ou les modèles d'affaires adoptés. Cette dernière est adaptée à la structure du tissu d'entreprises étudié.

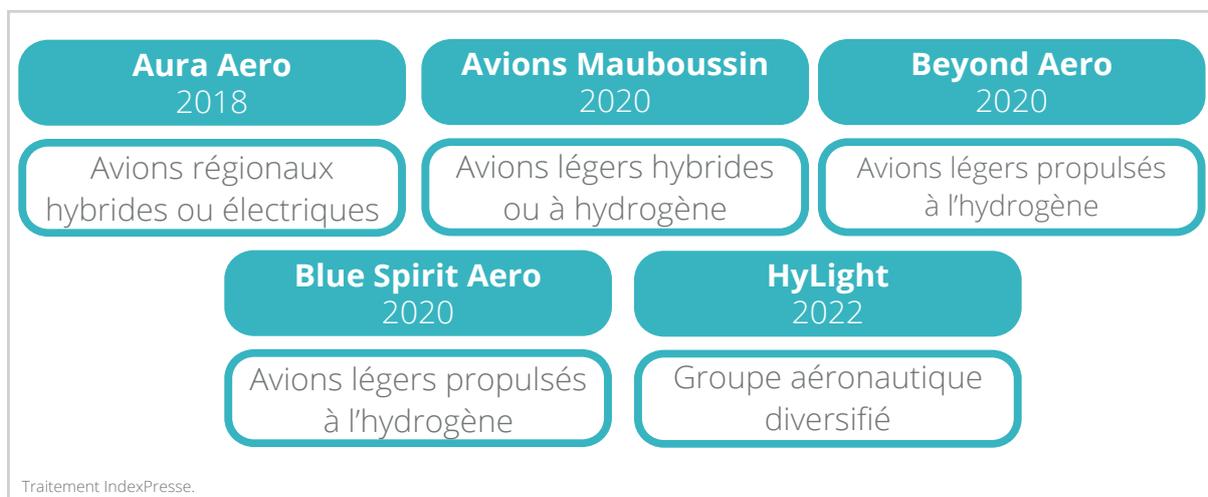
Sans chercher à être exhaustive, cette liste offre une vision représentative des acteurs émergents du secteur, en couvrant l'essentiel des profils présents : diversités des positionnements, tailles d'entreprise et maturités variables, fonds levés...

D'autre part, cette partie met en évidence des axes marquants et des caractéristiques communes chez plusieurs sociétés du secteur. Elle offre ainsi un autre regard en présentant des phénomènes évoqués de façon différente dans le corps de l'étude.

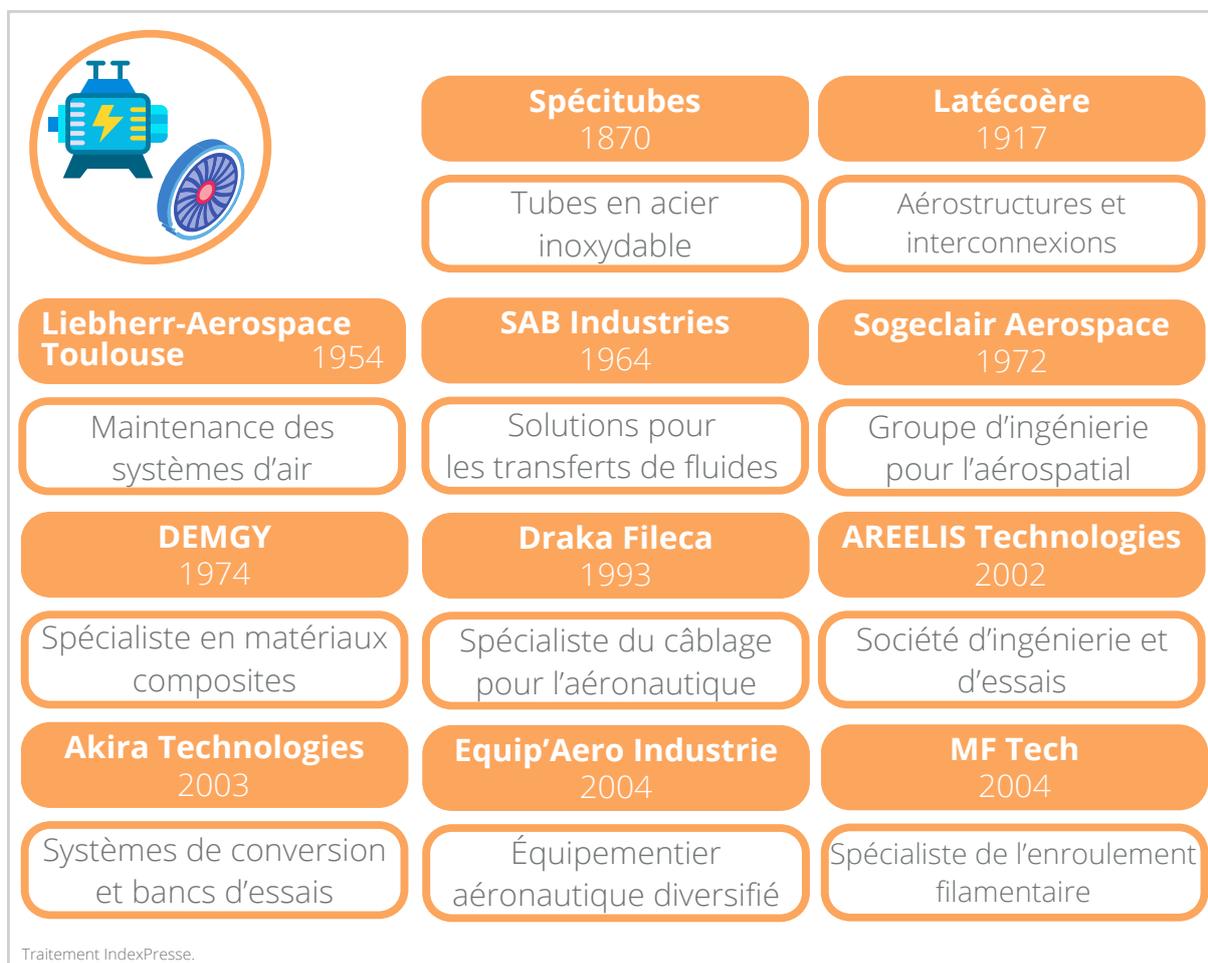
Constructeurs français d'aéronefs

| | | |
|---|---|--|
|  | Daher 1863 | Dassault 1929 |
| | Solutions industrielles globales et intégrées | Construction aéronautique et services numériques |
| ATR 1981 | Airstar 1994 | Airbus 2001 |
| Spécialiste des avions régionaux | Fabricant de ballons lumineux | Groupe aéronautique diversifié |
| Flying Whales 2012 | Euro Airship 2015 | Elixir Aircraft 2015 |
| Fabricant de dirigeables de grande dimension | Fabricant de dirigeables de grande dimension | Avions légers à propulsion électrique |
| Fleasy 2016 | Voltaero 2017 | Ascendance Flight Technologie 2018 |
| Constructeur d'aéronefs verticaux à hydrogène | Avions légers à propulsion électrique | Avion hybride à décollage vertical |

Traitement IndexPresse.



Équipementiers français positionnés dans l'aéronautique bas carbone



| | | |
|---------------------------------------|--|---|
| Satys Cabin 2004 | Safran 2005 | AviaComp 2008 |
| Aménagement de cabines et maintenance | Groupe spécialisé dans la motorisation | Matériaux composites thermoplastiques |
| Whylot 2011 | Cobratex 2013 | CMP Composites 2016 |
| Fabricant de moteurs électriques | Bambou pour les matériaux composites | Spécialiste des matériaux composites |
| Limatech 2016 | Novpower 2018 | H2Pulse 2019 |
| Batteries lithium pour l'aéronautique | Motorisation électrique pour l'aviation légère | Outils et bancs de tests pour l'hydrogène |
| Hycco 2019 | Sylphaero 2021 | Efficient Hydrogen Motors 2022 |
| Fabricant de piles à hydrogène | Moteurs électriques alimentés par plasma | Moteurs à hydrogène pour divers véhicules |

Traitement IndexPresse.

Axes et faits notables

Deux principales tendances peuvent être identifiées. Sur le plan du financement tout d'abord, le secteur semble dans **une situation mitigée** : si les start-up parviennent malgré tout à lever des fonds, ils apparaissent **encore modestes par rapport aux besoins d'investissement**. À l'étranger, les leaders émergents dans l'aviation décarbonée réalisent **des tours de table bien plus conséquents**, un écart potentiellement préjudiciable à terme pour les jeunes pousses du domaine. De leur côté, les grands groupes détiennent les fonds nécessaires pour mener leurs programmes, qui portent en outre sur des avions de taille plus importante.

Les grands groupes, et les partenariats noués entre eux, apparaissent comme **les pivots de l'aviation décarbonée**. Disposant de la taille suffisante pour entraîner le reste de la filière, ils donnent l'impulsion et mettent en place **des coopérations s'établissant sur l'ensemble de la chaîne de valeur**. L'engagement de ces derniers sur des volumes (nombre d'avions, quantités de carburant...) permet de **débloquer les investissements des énergéticiens et des équipementiers** pour accélérer la décarbonation du secteur. Ils sont également associés dans **une variété de travaux de recherche**, que ce soit avec des institutions publiques ou des groupes étrangers.



LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

| Société | Nature de l'entreprise | Pays d'origine |
|----------------------------------|--|-------------------|
| 3AS | Équipementier et fournisseur de services pour l'industrie aéronautique | France |
| ADF | Groupe d'ingénierie | France |
| Aemetis | Producteur de carburants durables | États-Unis |
| Aero Engine Corporation of China | Motoriste aéronautique | Chine |
| Air France | Compagnie aérienne | France |
| Air Liquide | Spécialiste des gaz industriels | France |
| Airbus | Constructeur aéronautique | France/Allemagne |
| Air-France-KLM | Holding de compagnies aériennes | France/Pays-Bas |
| Airstar | Fabricant de ballons lumineux | France |
| Akira Technologies | Société d'ingénierie spécialisée dans les systèmes de conversion d'énergie | France |
| Alder Fuels | Producteur de carburants durables | États-Unis |
| Amedeo | Spécialiste de la location d'avions | France |
| Amelia | Compagnie aérienne | France |
| American Airlines | Compagnie aérienne | États-Unis |
| ArcelorMittal | Sidérurgiste | Inde/Europe |
| AREELIS Technologies | Spécialiste des essais en environnement sévère | France |
| Ascendance Flight Technologie | Constructeur d'aéronefs à décollage vertical | France |
| ATR | Constructeur aéronautique | France/Italie |
| ATR | Constructeur aéronautique | France |
| Audacia | Société de capital-investissement | France |
| Aura Aero | Constructeur aéronautique | France |
| AviaComp | Fabricant de pièces en composites thermoplastiques | France |
| Avions Mauboussin | Constructeur aéronautique | France |
| Avril | Agroindustriel | France |
| Axens | Chimiste | France |
| Beyond Aero | Constructeur aéronautique | France |
| Bladetips Energy | Drone producteur d'énergie éolienne | France |
| Blue Spirit Aero | Constructeur aéronautique | France |
| Boeing | Constructeur aéronautique | États-Unis |
| Boston Consulting Group | Cabinet de conseil | États-Unis |
| Braathens Regional Airlines | Compagnie aérienne | Suède |
| British Airways | Compagnie aérienne | Royaume-Uni |
| Bye Aerospace | Constructeur aéronautique | États-Unis |
| Capgemini | Groupe d'ingénierie et de services numériques | France |
| Carbone4 | Cabinet d'audit environnemental | France |
| Cathay Pacific | Compagnie aérienne | Hong Kong |
| CFM International | Spécialiste de la motorisation | France/États-Unis |
| CMP Composites | Concepteur et fabricant de pièces en matériaux composites | France |
| Cobratex | Start-up produisant des renforts en bambou pour les matériaux composites | France |
| Collins Aerospace | Équipementier aéronautique | États-Unis |
| Daher | Constructeur et équipementier aéronautique | France |
| Dassault Aviation | Constructeur aéronautique | France |
| Dassault Systèmes | Éditeur de logiciels | France |
| Delta Air Lines | Compagnie aérienne | États-Unis |
| DEMGY | Fabricant de pièces et composants plastiques | France |
| Dessia Technologies | Start-up française d'ingénierie et d'intelligence artificielle | France |
| DG Fuels | Producteur de carburants durables | États-Unis |
| Diamond Aircraft | Constructeur aéronautique | Autriche |
| Diatex | Producteur de matériaux industriels | France |
| Digigram | Fabricant de matériel audio professionnel | France |
| Dimensional Energy | Producteur de carburants durables | États-Unis |
| Draka Fileca | Équipementier aéronautique | France |
| EasyJet | Compagnie aérienne | Royaume-Uni |
| Efficient Hydrogen Motors | Équipementier pour la mobilité hydrogène | France |

LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

| Société | Nature de l'entreprise | Pays d'origine |
|------------------------------------|---|------------------|
| Elixir Aircraft | Constructeur aéronautique | France |
| ElringKlinger | Équipementier aéronautique | Allemagne |
| Elyse Energy | Start-up spécialisée dans la production de molécules bas carbone | France |
| Engie | Énergéticien | France |
| Epsilon Composite | Spécialiste en matériaux composites | France |
| Equip'Aero Industrie | Équipementier aéronautique | France |
| ESI | Spécialiste des pompes et autres équipements industriels | France |
| Euro Airship | Constructeur de dirigeables | France |
| Evfly | Transporteur aérien | Sigapour |
| FEV | Société d'ingénierie | France |
| Fleasy | Constructeur d'aéronefs à décollage vertical | France |
| Flying Whales | Constructeur de dirigeables | France |
| FlyShare | Transporteur aérien | États-Unis |
| Fulcrum Bioenergy | Producteur de carburants durables | États-Unis |
| GE Aerospace | Motoriste et équipementier aéronautique | États-Unis |
| General Electric | Groupe de services et d'équipements pour l'énergie | États-Unis |
| General Motors | Constructeur automobile | États-Unis |
| Gevo | Producteur de carburants durables | États-Unis |
| Global Bioenergies | Producteur d'hydrocarbures légers par voie biotechnologique | France |
| Green Aerolease | Start-up spécialisée dans la location d'avions électriques | France |
| Groupe ADP | Concepteur, constructeur et exploitant d'aéroports | France |
| H2Pulse | Start-up spécialisée dans l'accompagnement des projets hydrogène | France |
| HCS Group | Fournisseur de solutions pour hydrocarbures et produits spéciaux | Allemagne |
| Hélifirst | Transporteur aérien | France |
| Hy2Gen | Producteur de carburants renouvelables | Allemagne |
| Hycco | Start-up spécialisée dans les plaques bipolaires pour piles à combustible | France |
| HyLight | Constructeur de dirigeables | France |
| IFP Investissements | Fonds d'investissement | France |
| IndiGo | Compagnie aérienne | Inde |
| Infinium | Producteur de carburants de synthèse | États-Unis |
| Innovacom | Fonds d'investissement | France |
| IRDI | Fonds d'investissement | France |
| Japan Airlines | Compagnie aérienne | Japon |
| Jets Systems Hélicoptères Services | Transporteur aérien | France |
| JSX | Compagnie aérienne | États-Unis |
| Kawasaki Motors | Équipementier aéronautique | Japon |
| KLM | Compagnie aérienne | Pays-Bas |
| Koesio | Entreprise de services numériques | France |
| KVE Composites | Fabricant de pièces en composites thermoplastiques | Pays-Bas |
| La Poste | Groupe publique axé sur les services postaux | France |
| LanzaJet | Producteur de carburants durables | Nouvelle-Zélande |
| LanzaTech | Groupe spécialisé dans le recyclage du carbone par voie biotechnologique | Nouvelle-Zélande |
| Latécoère | Équipementier aéronautique | France |
| Leonardo | Groupe d'aéronautique et de défense | Italie |
| Liebherr-Aerospace Toulouse | Équipementier aéronautique | France |
| Limotech | Équipementier aéronautique | France |
| Lufthansa Group | Compagnie aérienne | Allemagne |
| M Capital | Fonds d'investissement | France |
| MF Tech | Spécialiste de l'enroulement filamentaire | France |
| Neste | Raffineur et distributeur de produits pétroliers | Finlande |
| Novpower | Start-up développant des moteurs électriques pour l'aéronautique | France |
| OMV | Compagnie pétrolière | Autriche |
| Orange | Opérateur télécom | France |
| PhilJets Group | Transporteur aérien | Philippines |
| Pipistrel | Constructeur aéronautique | Slovénie |
| Porcher Industries | Producteur de matériaux industriels | France |
| Pratt & Whitney | Motoriste aéronautique | États-Unis |
| Pur Projet | Société spécialisée dans les projets de compensation carbone | France |
| Raven SR | Producteur de carburants durables | États-Unis |
| Reel | Spécialiste en manutention industriel | France |

LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

| Société | Nature de l'entreprise | Pays d'origine |
|--------------------|--|--------------------------|
| Renault | Constructeur automobile | France |
| Rolls-Royce | Motoriste | Royaume-Uni |
| RyanAir | Compagnie aérienne | Irlande |
| SAB Industries | Spécialiste des canalisations et transfert de fluides | France |
| Safran | Motoriste et équipementier aéronautique | France |
| Sasol | Pétrochimiste | Afrique du Sud |
| Satys Cabin | Équipementier aéronautique | France |
| Serma Energy | Fournisseur de services pour des concepts de chaîne de traction innovants | France |
| Shell | Compagnie pétrolière et pétrochimiste | Royaume-Uni/ Pays-Bas |
| Shimtech de Mexico | Fournisseur d'assemblages et de composants en composites pour l'aérospatiale | Mexique |
| Snam | Énergéticien | Italie |
| SNCF | Entreprise publique de transport ferroviaire | France |
| Société générale | Groupe bancaire | France |
| Sogclair Aerospace | Spécialiste de l'ingénierie aéronautique | France |
| Spécitubes | Équipementier aéronautique | France |
| Starburst | Accélérateur dédié à l'aéronautique, au spatial et à la défense | France |
| Sylphaero | Start-up développant des moteurs électriques pour l'aéronautique | France |
| Synhelion | Producteur de carburants durables | Suisse |
| Tesi | Équipementier aéronautique | Italie |
| Tesla | Constructeur automobile | États-Unis |
| Textron | Constructeur et équipementier aéronautique | États-Unis |
| Thales | Groupe d'électronique présent dans l'aérospatiale, le transport, la défense et la sécurité | France |
| Tidav | Fabricant de drones | France |
| Titan Aero Group | Spécialiste des équipements d'avitaillement | France |
| TotalEnergies | Énergéticien et pétrochimiste | France |
| United Airlines | Compagnie aérienne | États-Unis |
| Universal Hydrogen | Start-up spécialisée dans la conversion de l'aéronautique à l'hydrogène | États-Unis |
| Vinci Airports | Concepteur, constructeur et exploitant d'aéroports | France |
| Volocopter | Fabricant de drones | Allemagne |
| VoltAero | Constructeur aéronautique | France |
| Voltaero | Constructeur aéronautique | France |
| Whylot | Concepteur et fabricant de moteurs électriques | France |
| Yugo | Transporteur aérien | Sigapour |
| ZeroAvia | Spécialiste du retrofit aéronautique | États-Unis/Royaume-Uni |

Traitement IndexPresse.

LEXIQUE

- **Biocarburant**

Carburant alternatif constituant un type de SAF, conçu à partir de ressources émanant de la biomasse.

- **CAD**

Carburant d'aviation durable. Cette appellation regroupe des carburants divers, issus de ressources naturelles (biocarburants) ou de synthèse (e-fuels) émettant moins de CO₂ que du kérosène conventionnel.

- **Carburant de synthèse**

Carburant alternatif, aussi appelé électro-carburant ou e-fuel, constituant un type de SAF, élaboré à partir d'hydrogène et de carbone (ou d'azote), généralement récupéré dans le CO₂.

- **Compensation carbone**

Méthode comptable permettant d'annuler une pollution émise du fait de l'activité de l'entreprise par la mise en place de projets de séquestration de carbone ou, indirectement, par l'achats de crédits carbone.

- **Intensité carbone**

Mesure de la performance en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Pour le secteur aérien, il peut s'agir, selon les cas, de la pollution par passager, par avion, par kilomètre parcouru... Cet indicateur permet de mieux évaluer les efforts de décarbonation en gommant l'effet volume.

- **Rétrofit**

Pratique consistant à convertir un véhicule thermique en engin électrique ou hydrogène grâce au remplacement de son système de propulsion.

- **SAF**

Sustainable Aviation Fuel. Il s'agit de l'appellation anglo-saxonne, la plus utilisée, pour désigner les carburants d'aviation durables (CAD).

- **VTOL**

Vertical take-off and landing. Se dit d'un engin capable d'effectuer un décollage et un atterrissage à la verticale. Outre les appareils de type hélicoptères, certains avions peuvent être dotés de telles capacités.

SOURCES UTILISÉES

- Amant Stéphane et al., "Les idées reçues sur l'aviation et le climat", *carbone4.com*, 11 octobre 2022
- Angel Marina, "À Toulouse, Tidav développe un drone résistant aux vents forts pour le marché offshore", *usinenouvelle.com*, 18 janvier 2023
- Angrand Antony, "L'intelligence artificielle vient en aide à la décarbonation des moteurs", *Air & Cosmos*, 19 janvier 2023, p.14-16
- Attali Alexia, "Carburants aéronautiques durables : où en est-on ?", *Aviation civile*, janvier 2023, p.12-21
- Barbaux Aurélie, "BioTJet dope le SAF de bois à l'hydrogène", *usinenouvelle.com*, 1^{er} octobre 2023
- Barbaux Aurélie, "Le plan de TotalEnergies pour produire 500 000 tonnes de SAF par an en France", *usinenouvelle.com*, 19 juin 2023
- Barla Jean-Christophe, "Hy2Gen révisé son projet Hynovera de production de carburants renouvelables à Meyreuil", *usinenouvelle.com*, 1^{er} mars 2023
- Barnier Léo, "Les compagnies aériennes déplorent le manque de carburant durable mis à leur disposition (lata)", *latribune.fr*, 7 décembre 2023
- Bauer Anne Trévidic Bruno, "La France veut lancer un avion 'zéro émission de CO2' dès 2035", *lesechos.fr*, 9 juin 2020
- Blanmont Thierry, "Pilotes à l'Europe : réformez enfin le Ciel unique !", *air-journal.fr*, 28 février 2023
- Bouleau Claire, "Avion. Stop ou encore ?", *Challenges*, 9 novembre 2023, p.78-89
- Capo-Canellas Vincent, "Soutien public à la filière aéronautique : des aides d'urgence efficaces, une transformation à accélérer", *senat.fr*, 23 février 2023
- Chodorge Simon, "Qu'est-ce que le Corac, en première ligne dans le plan de relance de la filière aéronautique ?", *usinenouvelle.com*, 9 juin 2020
- Constant Olivier, "L'Onera, partenaire incontournable de l'aviation du futur", *Aviation civile*, octobre 2021, p.10-11
- Cormier Henri, "Le nouveau cap environnemental de la navigation aérienne", *Aviation civile*, avril 2022, p.12-21
- Coste Philippe, "Les États-Unis mettent le turbo dans les carburants aériens durables", *usinenouvelle.com*, 26 juin 2023
- Crépin Benoît, "Cobratex fait entrer le bambou sur le marché des composites", *usinenouvelle.com*, 4 janvier 2023
- De Lestapis Henri, "Ascendance Flight Technologie fait s'envoler les promesses d'achat", *lesechos.fr*, 10 octobre 2023
- Desaunay Dominique, "Solar Airship One, un tour du monde en dirigeable solaire", *rfi.fr*, 17 juin 2023
- Du Guerny Stanislas, "Green Aerolease veut doubler sa flotte d'avions électriques", *lesechos.fr*, 12 mai 2023
- Ducuing Olivier, "Engie va générer du carburant de synthèse à partir du CO2 d'ArcelorMittal à Dunkerque", *lesechos.fr*, 7 février 2022
- Dutheil Guy, "Le plan d'Emmanuel Macron pour tenter de développer un avion moins polluant", *lemonde.fr*, 16 juin 2023
- Fortin Pierre, "Comment Airbus prépare l'avion à hydrogène", *lesechos.fr*, 9 novembre 2023
- Garric Audrey, "Climat : le gouvernement encadre-t-il vraiment l'extension des aéroports ?", *lemonde.fr*, 18 février 2021
- Gouty Félix, "L'aviation civile internationale s'engage à atteindre la neutralité carbone en 2050", *actu-environnement.com*, 11 octobre 2022

SOURCES UTILISÉES

- Guimard Emmanuel, "Daher inaugure une usine de 20 000 m² à Nantes", *usinenouvelle.com*, 16 février 2012
- Heguy Jean-Baptiste, "Avion décarboné : Brussels Airport lance le projet Stargate", *nae.fr*, 25 novembre 2021
- Heguy Jean-Baptiste, "Avion décarboné. 'Chacun doit faire sa part'", *Air & Cosmos*, 16 juillet 2021, p.24-25
- Heguy Jean-Baptiste, "Air France-KLM franchit une nouvelle étape en investissant dans DG Fuels", *Air & Cosmos*, 23 novembre 2023
- Heguy Jean-Baptiste, "Le biocarburant de Global Bioenergies en phase finale de certification", *Air & Cosmos*, 8 juin 2023, p.28
- Heguy Jean-Baptiste, "Congrès de la FNAM. Le défi de la décarbonation au cœur des débats", *Air & Cosmos*, 8 juin 2023, p.24-25
- Heguy Jean-Baptiste, "Biocarburant. ATR et Braathens visent les 100 %", *Air & Cosmos*, 24 septembre 2021, p.16-17
- Heguy Jean-Baptiste, "Coup d'envoi au Bureau français des 'e-fuels'", *Air & Cosmos*, 13 juillet 2023, p.25
- Heguy Jean-Baptiste, "La RLCF Alliance entre dans le concret", *Air & Cosmos*, 6 juillet 2023, p.22-24
- Heguy Jean-Baptiste, "Aviation décarbonée. L'OACI fixe un nouvel objectif intermédiaire à 2030", *Air & Cosmos*, 14 décembre 2023, p.24-25
- Ivanoff Boris, "Solar Airship, un tour du monde dans les airs sans escale et sans carburant", *lalsace.fr*, 16 juin 2023
- James Olivier, "Comment le groupe ADP prépare ses aéroports aux avions électriques et à hydrogène", *usinenouvelle.com*, 22 juin 2023
- James Olivier, "L'Occitanie dégage de nouveaux fonds pour muscler son plan 'avion vert'", *usinenouvelle.com*, 1^{er} juin 2023
- James Olivier Meddah Hassan, "Au Bourget, de nouveaux venus dans le ciel", *L'Usine Nouvelle*, juillet-août 2023, p.24
- Karsenty Alain, "Il ne suffit pas de planter des arbres pour prendre l'avion", *Alternatives économiques*, janvier 2022, p.62-65
- Lairy Christine, "Compensation carbone des vols nationaux : le ministère consulte sur les critères à respecter", *actu-environnement.com*, 28 décembre 2022
- Lamigeon Vincent, "Safran et GE font décoller le moteur 'vert'", *Challenges*, 17 juin 2021, p.56-57
- Lamigeon Vincent, "Sylphaero : décarboner l'aviation grâce à des moteurs 100 % électriques", *challenges.fr*, 22 mars 2023
- Latieule Sylvie, "Global Bioenergies entame son déploiement industriel", *Infochimie magazine*, mars 2023, p.66-67
- Marcaillou Laurent, "Aura Aero va construire une usine d'avions hybrides", *lesechos.fr*, 10 mars 2022
- Marcaillou Laurent, "À Toulouse, l'Atea mixe l'avion et l'hélicoptère", *lesechos.fr*, 4 août 2022
- Marcaillou Laurent, "À Toulouse, Universal Hydrogen convertit les avions ATR à l'hydrogène", *lesechos.fr*, 17 août 2022
- Marcaillou Laurent, "Euroglider, le planeur électrique qui facilite le vol à voile", *lesechos.fr*, 10 juin 2021
- Marchand Leïla, "Dans l'aérien, 1 % de la population mondiale cause la moitié des émissions de CO₂", *lesechos.fr*, 18 novembre 2020
- Meijers Isabelle, "Avion à hydrogène : de nombreux défis technologiques à relever", *lesechos.fr*, 17 novembre 2020

SOURCES UTILISÉES

- Monflier Frédéric Moragues Manuel, "Éric Dalbiès, directeur de la R&T de Safran : 'Il nous faut mettre la priorité absolue sur la recherche'", *Industrie et technologies*, février 2023, p.6-9
- Moraes Ricardo, "Avion décarboné : la France finance 62 projets de recherche et développement", *air-journal.fr*, 14 février 2021
- Niedercorn Frank, "Le projet de dirigeable géant Flying Whales est financé", *lesechos.fr*, 1^{er} juillet 2022
- Paschal Camille, "Hydrogène : partenariat entre Airbus, Air Liquide et Vinci Airport", *usinenouvelle.com*, 22 septembre 2021
- Perreau Charlie, "Eloa Guillotin, l'entrepreneuse qui veut rendre l'aviation électrique", *lesechos.fr*, 11 octobre 2023
- Prost Marlène, "Le secteur aérien, premier secteur à remettre officiellement au gouvernement sa feuille de route de décarbonation au titre de l'article 301 de la loi Climat & Résilience", *fnam.fr*, 14 février 2023
- Romain Manon, Sénécat Adrien Vaudano Maxime, "L'interdiction des vols intérieurs courts en France, une mesure vidée de sa substance", *lemonde.fr*, 24 mai 2023
- Roussange Guillaume, "Côte d'Or : 3AS forme les premiers pilotes d'ULM électriques", *lesechos.fr*, 7 septembre 2022
- Schwœrer Philippe, "Fleasy veut faire décoller ses drones hydrogène sur les aires d'autoroutes", *h2-mobile.fr*, 9 septembre 2023
- Tillaux Delphine, "L'aéronautique-défense face aux défis des cadences et de la décarbonation", *Investir, le Journal des Finances*, 10 juin 2023, p.4-5
- Touzani Samir, "Expo universelle de Dubaï : des 'baleines volantes' au pavillon France", *lesechos.fr*, 1^{er} octobre 2021
- Trévidic Bruno, "Aura Aero endeuillée par le crash de son prototype d'avion de voltige", *lesechos.fr*, 12 avril 2022
- Trévidic Bruno, "ATR prépare une nouvelle génération d'avions régionaux décarbonés", *lesechos.fr*, 18 mai 2022
- Trévidic Bruno, "Aura Aero dévoile la version définitive de son futur avion régional décarboné", *lesechos.fr*, 13 mai 2023
- Trévidic Bruno, "ZeroAvia, la start-up qui promet un vol commercial en avion zéro émission dès 2025", *lesechos.fr*, 11 février 2023
- Trévidic Bruno, "Voltaero espère lancer le premier avion d'affaires décarboné", *lesechos.fr*, 22 mai 2023
- Trévidic Bruno, "Comment Daher veut poursuivre une saga industrielle entamée sous Napoléon III", *lesechos.fr*, 7 février 2023
- Trévidic Bruno, "Daher poursuit sa montée en gamme en s'offrant une pépite des composites", *lesechos.fr*, 4 juin 2019
- Trévidic Bruno, "L'avion électrique hybride, grand gagnant du salon du Bourget", *lesechos.fr*, 25 juin 2023
- Trévidic Bruno, "Avion électrique : ambitieux, Safran veut certifier un moteur dès 2023", *lesechos.fr*, 26 septembre 2022
- Trévidic Bruno, "Safran avance ses pions dans les moteurs d'avion électrique", *lesechos.fr*, 12 avril 2022
- Trévidic Bruno, "Avion vert' : l'État débloque des centaines de millions supplémentaires pour la filière française", *lesechos.fr*, 15 juin 2023
- Trévidic Bruno, "Aviation : le parlement européen donne son feu vert aux kérosènes verts", *lesechos.fr*, 13 septembre 2023
- Trévidic Bruno, "La France est déjà entrée dans l'ère de l'avion électrique", *lesechos.fr*, 9 septembre 2023

SOURCES UTILISÉES

- Trévidic Bruno, Bauer Anne, "L'Europe ne va pas aussi vite que les États-Unis sur les carburants d'aviation durable", s'alarme le patron d'Airbus", *lesechos.fr*, 17 octobre 2023
- Tytelman Xavier, "Infrastructures. La nécessité d'avoir un environnement adapté", *Air & Cosmos*, 3 décembre 2021, p.30-31
- Van Apeldoorn Robert, "L'avion décarboné est mal parti", *Trends*, 27 juillet 2023, p.30-32
- "Air Liquide et Groupe ADP annoncent la création de 'Hydrogen Airport', première coentreprise pour accompagner le développement des infrastructures hydrogène dans les aéroports", *airliquide.com*, 16 juin 2023
- "Airbus dévoile Maveric, son avion du futur moins gourmand en carburant", *lesechos.fr*, 11 février 2020
- "Alléger l'avion est une des pistes les plus probantes pour décarboner", *usinouvelle.com*, 9 juin 2023
- "Audacia et Starburst lancent un fonds d'investissement dédié à l'aérospatiale", *lefigaro.fr*, 13 avril 2022
- "Aviation décarbonée : la start-up française Voltaero présente son premier appareil hybride", *bfmtv.com*, 18 juin 2023
- "Avion décarboné et équipementiers. L'engagement des régions", *Air & Cosmos*, 23 novembre 2023, p.20-31
- "Collins Aerospace accélère dans la bataille européenne pour l'avion décarboné", *latribune.fr*, 14 novembre 2023
- "Contrôle aérien : plus de 16 000 vols seront supprimés en début d'année", *journaldeconomie.fr*, 7 novembre 2023
- "Création d'une 'Alliance pour l'aviation zéro émission' en Europe pour une neutralité carbone en 2050", *leparisien.fr*, 21 juin 2021
- "Dossier spécial avion décarboné", *Air & Cosmos*, 18 avril 2022, p.10-66
- "Emmanuel Macron annonce 2,1 milliards d'euros d'investissements pour décarboner la filière aéronautique", *latribune.fr*, 16 juin 2023
- "Feuille de route de décarbonation de l'aérien", *DGAC et GIFAS*, mars 2023
- "France 2030, Le gouvernement détaille le volet aéronautique du plan", *gouvernement.fr*, 17 mars 2022
- "La Direction des services de la navigation aérienne française (DSNA) adopte SINAPS, un outil IA d'optimisation de l'espace au profit du trafic aérien, fruit d'une collaboration entre l'ONERA et la DSNA", *onera.fr*, 7 décembre 2023
- "Lancement du Challenge MAELE 2023 - Nouvelle-Aquitaine & Occitanie", *aerospace-valley.com*, 24 janvier 2023
- "L'aviation en quête de nouveaux carburants", *L'Usine Nouvelle*, juin 2023, p.76-86, 88, 90-107
- "L'avion à hydrogène bientôt en piste", *airliquide.com*, 19 octobre 2023
- "Le Groupe ADP s'allie avec les leaders de l'aviation régionale décarbonée pour accélérer la transition environnementale du secteur", *groupeadp.fr*, 21 juin 2023
- "Le partenariat Clean Aviation", *horizon-europe.gouv.fr*, 4 août 2022
- "Les États-Unis vantent leur plan d'action dans l'aérien à la COP 26", *teamfrance-export.fr*, 25 novembre 2021
- "Octavie : un projet de l'aérien français pour optimiser les mouvements d'avion et réduire les émissions CO2", *air-journal.fr*, 23 juillet 2022
- "Premier vol réussi pour l'avion hybride-électrique EcoPulse dans le ciel des Hautes-Pyrénées", *ladepeche.fr*, 6 décembre 2023
- "Sylphaero : un moteur d'avion 100 % électrique", *Entreprendre*, juin 2023, p.50-51
- "Vers l'avion vert en 2050", *Air & Cosmos*, 15 juin 2023, p.22-85
- "Zéro émission nette en 2050 : l'objectif très ambitieux de l'OACI (ONU) pour le transport aérien", *latribune.fr*, 9 octobre 2022

La collection IndexPresse *Business Etude*

Comment accéder à des données fiables, pertinentes et surtout synthétisées, alors que l'information n'a jamais été aussi accessible en apparence ?

Voilà une question à laquelle sont confrontés quotidiennement les décideurs dans les entreprises lorsqu'il s'agit de prendre les bonnes décisions.

C'est pourquoi nous avons créé la collection **IndexPresse Business Etude**, des études sectorielles complètes, réalisées à partir des plus grands titres de la presse

économique et professionnelle. En s'appuyant sur des informations fiables et de qualité, les études d'IndexPresse offrent des synthèses analytiques et éclairées sur les secteurs d'activité émergents ou en mutation.

Vous aurez ainsi toutes les clés en main pour accompagner votre réflexion stratégique, en vous appuyant sur l'examen des enjeux de votre marché, afin d'anticiper ses évolutions et valider, ou modifier, votre positionnement dans le jeu concurrentiel.

IndexPresse *Business Etude*

Date de parution - décembre 2023.



Renaud HAMMAMY

renaud.hammany@indexpresse.fr

Auteur

Étude rédigée en collaboration avec **Samuel ARNAUD**

Subissant des critiques du fait de son bilan carbone, le secteur aéronautique amorce progressivement sa transition énergétique. Nouveaux avions et systèmes de propulsion, et carburants plus durables viennent réduire l'impact environnemental de la filière de l'aviation, alors qu'une hausse phénoménale du trafic aérien est attendue dans les vingt prochaines années.

Combien pèse le secteur aérien dans les émissions de CO₂ ? Pourquoi ces dernières augmentent-elles malgré la baisse de l'intensité carbone ? Dans quelle mesure les SAF sont-ils une réponse pertinente ? En quoi les propulsion électrique et hydrogène présentent-elles un potentiel ? De quels avantages disposent les VTOL pour la mobilité urbaine ? Les ballons dirigeables ont-ils réellement un avenir commercial ?

Cette étude apporte des éléments de réponse et de réflexion pour comprendre les enjeux et les perspectives du secteur, décrypter les modèles de développement à potentiel et identifier les orientations stratégiques pour se positionner dans le jeu concurrentiel.

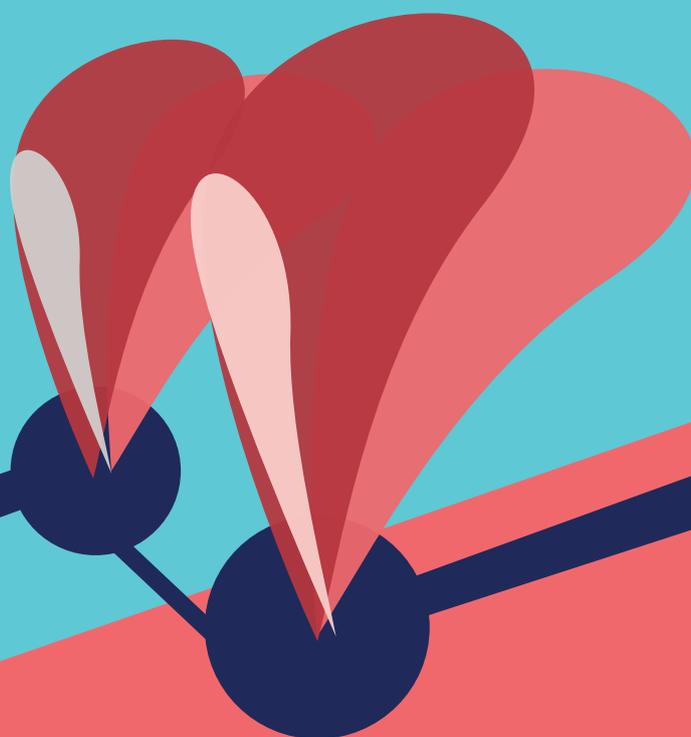


Photo de couverture : ©leo_nik



IndexPresse

IndexPresse
19 rue René Thomas
38000 Grenoble
Tél. 04 76 92 05 25

indexpresse@indexpresse.fr