

Concertation garantie par



Take Kair



PROJET DE E-CARBURANT
POUR L'AVIATION

DOSSIER DE
LA CONCERTATION
PRÉALABLE

**FICHES
THÉMATIQUES**

Sommaire

Fiche N°1

L'approvisionnement en électricité 3

Le choix des sources d'électricité, une donnée clé pour la valeur des e-carburants produits	3
La stratégie d'approvisionnement de Take Kair	4

Fiche N°2

Le captage du carbone 5

Qu'est-ce que le CCUS ?	5
La place du CCUS dans la stratégie de décarbonation française et régionale	6
Le CCUS, un levier de décarbonation essentiel pour certains secteurs industriels	7
Les différentes étapes du CCUS	8

Fiche N°3

Les briques technologiques et leur niveau de maturité 10

Le procédé industriel mis en oeuvre	10
L'électrolyse de l'eau	11
La chaîne de production de carburant	13
La maturité des différents procédés de la chaîne	16

Fiche N°4

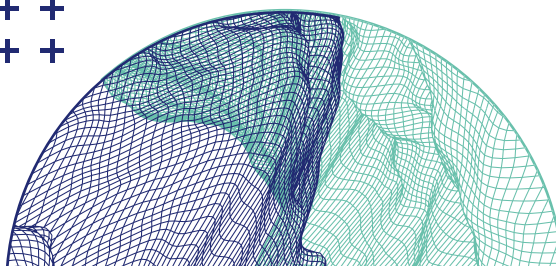
L'analyse de cycle de vie 17

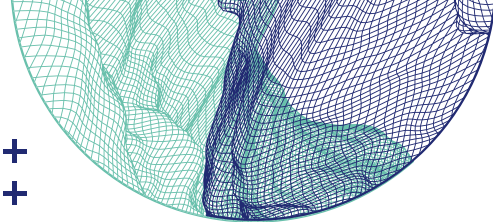
Quels sont les objectifs d'une analyse de cycle de vie ?	17
Quelle est l'empreinte carbone du projet Take Kair ?	18
La réduction des émissions de gaz à effet de serre, un enjeu également réglementaire	20

Fiche N°5

Les enjeux de la décarbonation du secteur aérien en France 22

L'état des lieux : les émissions du secteur aérien	22
Les trajectoires de décarbonation	22
Le marché des e-carburants : niveau de maturité et réglementation	25
Les ressources utilisées pour la production de e-carburants à destination de l'aviation	28
L'impact bénéfique des e-carburants sur les effets non-CO ₂ de l'aviation	31





FICHE N°1

L'approvisionnement en électricité

L'électricité est la seule source d'énergie consommée par l'usine de Take Kair pour la production de e-carburant. Tout au long du procédé, l'électricité est convertie sous différentes formes d'énergie :

- **Chimique** : via la séparation des molécules d'eau en hydrogène et en oxygène.
- **Thermique** : à l'aide de fours électriques ultra-haute température nécessaires à la réaction du Reverse Water Gas Shift et de chaudières électriques pour la production de vapeur.
- **Mécanique** : pour entraîner les compresseurs, pompes et vannes utilisés sur l'usine.

Le CO₂ biogénique et l'eau sont les matières premières utilisées pour la production de e-carburant, mais elles ne constituent pas des sources d'énergie. Ainsi, contrairement aux méthodes conventionnelles de production de carburants pour l'aviation, l'usine de Take Kair ne requiert que de l'électricité et aucune matière première d'origine fossile pour la production de e-carburant, ce qui est avantageux : décarboner l'électricité est techniquement et économiquement faisable.

1. Le choix des sources d'électricité, une donnée clé pour la valeur des e-carburants produits

Le projet Take Kair s'inscrit dans plusieurs réglementations européennes : la directive sur les énergies renouvelables¹ et la directive ReFuel EU Aviation¹. Ces deux directives précisent clairement les contraintes à respecter pour le projet en matière d'approvisionnement électrique, afin de contribuer à l'atteinte de l'objectif de l'UE de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici 2030 (Fit for 55).

Plusieurs technologies n'émettent pas de CO₂ au moment de la production d'électricité car aucune matière fossile n'est brûlée. Pour le projet Take Kair, les technologies privilégiées seront : le nucléaire, l'éolien, le photovoltaïque et l'hydraulique. La biomasse est exclue car le carburant final serait considéré comme un biocarburant, ce qui n'est pas l'objectif visé.

En phase d'exploitation, une attention particulière sera portée à ce que l'usine dispose toujours de l'électricité dont elle a besoin pour fonctionner de manière sûre, et le gestionnaire du réseau RTE réalise déjà une partie des études techniques préliminaires nécessaires au raccordement au réseau électrique.

1 Plus d'informations : <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/70/renewable-energy>

2 https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refue-leu-aviation_en#:~:text=ReFuel-EU%20Aviation%20promotes%20the%20increased,target%20of%2055%25%20by%202030%20.

L'électricité ne sera pas produite directement à proximité du site. Par exemple, l'approvisionnement à partir du parc d'éoliennes en mer de Saint-Nazaire n'est pas retenu, car ce parc bénéficie déjà d'un contrat qui l'engage vis-à-vis de l'État. L'électricité sera donc acheminée par le réseau électrique et produite en France. Ainsi, il revient à l'exploitant de décider de la façon de se fournir en électricité et de démontrer par ses choix de consommateur qu'il remplit bien les critères imposés par la réglementation.

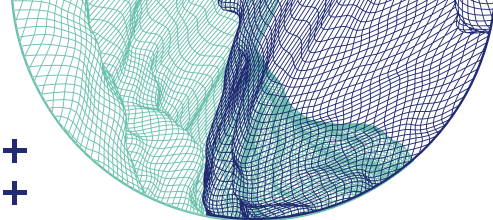
Dans le scénario N°1, le scénario de référence³ RTE prévoit une production en France de 584 000 GWh en 2030, 60 % d'origine nucléaire, 15 % éolien (terrestre et en mer), 7 % photovoltaïque, 11 % hydraulique, 2 % bioénergies et les 5 % restants d'origine thermique. Take Kair représenterait une consommation annuelle d'électricité de 1700 GWh soit moins de 0,3 %.

2. La stratégie d'approvisionnement de Take Kair

Avant tout, il convient de rappeler différents éléments de contexte clés. Depuis la mise en place de la loi NOME en 2010, les rôles de producteur et fournisseur d'électricité sont séparés et mis en concurrence. En France, il est donc courant que le consommateur final ne connaisse ni le lieu ni la technologie de production de l'électricité qu'il consomme. De plus, le mécanisme de l'ARENH (Accès Régulé à l'Électricité Nucléaire Historique) qui propose une tarification basée sur le parc nucléaire historique doit prendre fin au 31 décembre 2025 et n'existera plus sous cette forme au moment du démarrage du projet Take Kair. Enfin, l'achat de garanties d'origine est le seul outil existant lorsque le consommateur souhaite prouver une démarche engagée et volontariste dans son approvisionnement en électricité.

La réglementation européenne reconnaît l'existence des garanties d'origine et va même au-delà de cette exigence, en requérant aux producteurs de e-carburant souhaitant prouver l'origine de tout ou une partie de l'électricité qu'ils achètent, de signer un contrat d'achat directement auprès d'un producteur et de veiller à ce que la consommation d'électricité soit synchronisée avec la production. Ce type de contrat est communément désigné sous l'acronyme PPA pour "Power Purchase Agreement" (en français « contrat long terme d'approvisionnement »). Il existe plusieurs formes de ces contrats, sur des durées plus ou moins longues, mais tous reposent sur le principe qu'un producteur s'engage à vendre son électricité à un consommateur. Cela vise souvent à offrir à ce dernier des conditions d'achat stables et indépendantes des fluctuations du marché, sachant que l'électricité représente environ 40 % des coûts de production des e-carburants.

Dans ce cadre, la stratégie d'approvisionnement en électricité du projet Take Kair repose donc sur le principe de maximiser la part issue de PPA renouvelable (éolien, photovoltaïque, hydraulique) et nucléaire, si la future réglementation le permet. Par cette approche, le projet renforce sa stabilité financière dans le temps en atténuant les risques liés aux fluctuations de prix, tout en faisant un choix ambitieux concernant la part d'électricité provenant des renouvelables. Un complément d'électricité, issue de manière indifférenciée du mix national bas-carbone, sera utilisé dans les moments où l'approvisionnement via le PPA ne sera pas suffisant. La répartition entre PPA et mix national sera optimisée de manière à assurer la sécurisation de l'approvisionnement, le prix et la minimisation de l'intensité carbone. Si le projet se poursuit à l'issue de la concertation, un appel d'offres pour constituer un portefeuille de PPA sera lancé courant 2025.



FICHE N°2

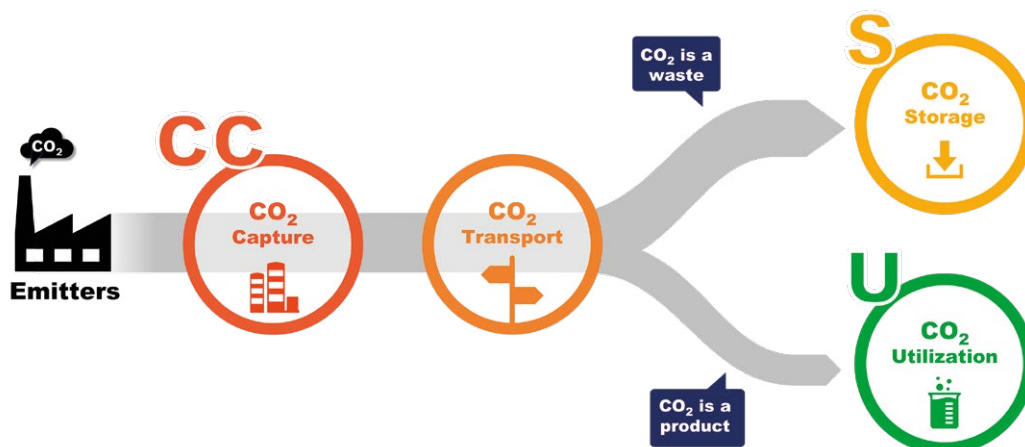
Le captage du Carbone

La réduction des émissions de CO₂ est essentielle pour relever le défi climatique. Bien que des solutions naturelles de captage du carbone existent, telles que la reforestation et la restauration des écosystèmes, celles-ci ne suffisent pas à elles seules. Les organismes internationaux comme le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), s'accordent à dire que ces solutions sont à renforcer en faisant appel à un portefeuille de solutions variées, dont le CCUS (Captage, Utilisation et Stockage du Carbone) fait partie. En effet, le CCUS représente un levier majeur pour la décarbonation de l'industrie, notamment pour les secteurs où les alternatives sont limitées. Cette fiche en détaille les principes.

1. Qu'est-ce que le CCUS ?

Le CCUS se réfère à un ensemble de technologies qui vise à « capter » le CO₂ avant qu'il ne soit émis dans l'atmosphère puis à l'utiliser ou le séquestrer de manière durable pour éviter qu'il ne contribue au changement climatique.

- **Le terme CCS** désigne le Captage du Carbone et sa Séquestration. Le CO₂ capté est comprimé pour qu'il prenne moins de place, puis stocké de manière pérenne dans des formations géologiques adaptées dans le sous-sol terrestre ou les sous-sols des fonds océaniques.
- **Le terme CCU** désigne le Captage Carbone et son Utilisation. L'utilisation du CO₂ capté s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire. Plutôt que de stocker le CO₂, on l'utilise en ressource ce qui permet d'éviter d'extraire des matières premières du sous-sol. Il peut par exemple être utilisé dans le secteur alimentaire, pour la fabrication d'engrais, ou encore pour la fabrication de e-carburant.



2. La place du CCUS dans la stratégie de décarbonation française et régionale

L'ORIENTATION DONNÉE PAR LES ORGANISMES INTERNATIONAUX

Plusieurs organismes internationaux se sont positionnés sur la question du CCUS. Tous s'accordent à dire que le CCUS ne remplace pas les efforts de réduction de CO₂, mais que cette solution fait partie intégrante des scénarios de réduction des émissions.

Pour le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), **le déploiement des technologies CCUS n'est pas assez rapide** pour une limitation du réchauffement sous 2°C.

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE), quant à elle, estime que **le CCUS pourrait contribuer à la réduction des émissions mondiales de GES à hauteur de 10% à horizon 2050.**

LA STRATÉGIE FRANÇAISE

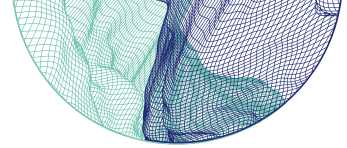
La France a fixé des premières orientations stratégiques sur le CCUS en 2023, puis les a mises à jour en juillet 2024. Selon la stratégie nationale, avec les dispositifs de soutien mis en place, le déploiement du CCUS se déroulerait selon une trajectoire en plusieurs étapes.

- **D'ici 2030 - Emergence de hubs CCUS sur les zones industrialo-portuaires, les plus émettrices, dont Saint-Nazaire fait partie** (Dunkerque, Le Havre, Fos-Sur-Mer et Saint-Nazaire). Le volume total de captage visé est de **4 à 8 MtCO₂ par an**.
- **Entre 2030 et 2040** - Développement de stockages souverains.
- **À horizon 2040-2050** - Atteinte d'un volume total de captage de 30 à 50 Mt/an.

Source : État des lieux et perspectives de déploiement CCUS en France - Juillet 2024

LA STRATÉGIE RÉGIONALE

Dans les Pays de la Loire en 2021, les émissions de GES équivalaient à 27,6 millions de tonnes de CO₂ (MteqCO₂). L'objectif du schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) est de réduire ces émissions à 24,0 MteqCO₂ en 2026, puis 21,0 MteqCO₂ en 2030 pour atteindre 7 MteqCO₂ en 2050. Le Ministère de la Transition Ecologique a mis en place en 2023 des COP régionales (Organisation de Conférences des parties - COP - à l'échelle de chaque région) pour définir les leviers d'actions permettant d'atteindre les objectifs nationaux de réduction de GES et de protection de la biodiversité. En Pays de la Loire, il a été identifié lors de la COP régionale que **l'industrie pouvait représenter 16,5 % de la réduction des émissions de CO₂ nécessaires des Pays de la Loire d'ici 2030, soit environ 1,6 M tonnes de CO₂. Une large partie de cette réduction est obtenue grâce au captage de CO₂ sur la cimenterie d'Holcim à Saint-Pierre-La-Cour (1 million de tonnes, soit 5 % des émissions des Pays de la Loire).**



3. Le CCUS, un levier de décarbonation essentiel pour certains secteurs industriels

Mobilisé en complément d'autres leviers de décarbonation tels que l'usage d'énergies bas-carbone et l'efficacité énergétique, le CCUS est un levier important pour certains secteurs industriels difficiles à décarboner.

C'est le cas du ciment ou de la métallurgie par exemple, indispensables à notre société moderne, notamment pour les projets d'infrastructures, la production des éoliennes, panneaux solaires, etc. Pour ces secteurs, il n'existe pas d'alternative pour réduire significativement les émissions.

L'industrie du ciment en particulier représente 8 % des émissions mondiales. Lors de la production de ciment, environ 1/3 des émissions proviennent de la combustion d'énergies fossiles, les 2/3 restants résultent de la réaction chimique de calcination du calcaire nécessaire à la production du clinker, constituant principal du ciment. L'industrie dispose de plusieurs leviers pour réduire les émissions de CO₂ : remplacer les combustibles fossiles par des combustibles issus de la biomasse ou de ses déchets, éviter partiellement le processus de calcination du calcaire (par la calcination d'argile par exemple), voire réduire la teneur en clinker dans les ciments lorsque cela est possible. Cependant, le processus de calcination reste inévitable pour garantir les bonnes propriétés du ciment. Les émissions associées sont qualifiées de « fatales ».

Pour l'industrie de l'acier, le CCUS est envisagé pour traiter les émissions résiduelles, après la mise en oeuvre des principales solutions de décarbonation, telles que l'électrification et le recours à l'hydrogène. S'agissant de la filière aluminium, des solutions technologiques comme le recours à des anodes inertes sont prometteuses mais pas suffisamment matures, seul le CCUS est actuellement disponible.

À noter que la vocation du CCUS n'est pas de pérenniser les sources de carbone fossile évitables. Il offre une solution de séquestration ou de valorisation des CO₂ biogéniques ou CO₂ non évitables. La réglementation européenne est d'ailleurs vigilante sur la source de CO₂ utilisée pour la production de e-carburant, en encourageant l'utilisation du CO₂ biogénique.

QUELLES SONT LES DIFFÉRENTES CATEGORIES DE CO₂ ?

On distingue les émissions de CO₂ d'origine fossile des émissions de CO₂ d'origine biogénique.

- **Le CO₂ fossile** est généré par la combustion de matières fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, stockés dans le sous-sol depuis plusieurs millions d'années), et fait partie du cycle long du carbone.
- **Le CO₂ biogénique** provient de plantes, de déchets organiques, de la fermentation, de déchets de bois, de restes de végétaux ou de boues d'épuration. Il fait partie du cycle court du carbone et fait intervenir la photosynthèse. Il est considéré par le GIEC comme neutre vis-à-vis de l'effet de serre.



4. Les différentes étapes du CCUS

LE CAPTAGE DU CARBONE

La première étape du CCUS est le captage du CO₂. Celle-ci peut être réalisée par différentes méthodes de maturités variables. Certaines sont déjà disponibles, matures et déjà exploitées. Aujourd'hui, on capte, transporte et stocke 49 Mt de CO₂ par an (41 installations sont en opération) *.

La post-combustion, qui consiste à capter le CO₂ sur les fumées en sortie des cheminées d'évacuation industrielles, est la technique la plus utilisée. Son avantage est qu'elle ne nécessite pas de modifier les procédés industriels, déjà existants. Avec les technologies actuelles, il est possible de capter plus de 90 % du CO₂ contenu dans les fumées industrielles.

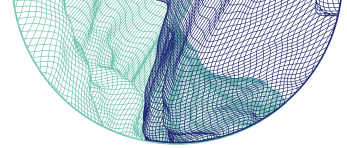
Parmi les différentes technologies de post-combustion, on peut citer :

- **Le captage de CO₂ aux amines**, qui est la plus ancienne et mature. Elle a fait ses preuves dans la chimie et l'extraction pétro-gazière et se déploie progressivement dans de nouveaux secteurs.
- **Le captage de CO₂ par cryogénie**, qui se développe aussi rapidement. Sans produits chimiques, le procédé utilise des basses températures pour compresser, liquéfier et séparer les gaz des fumées industrielles. Comme exemple d'installation de cette technologie, on peut citer l'installation Cryocap™ H2 d'Air Liquide, opérationnelle depuis 2015 sur le site de Port Jérôme, en France, qui permet de capter 100 000 tonnes de CO₂ par an.

* Source : Global CCS Institute, 2023



Pilote de captage de CO₂ par procédé aux amines (1t/h),
sur le site de la centrale charbon d'EDF au Havre, en France, testé en 2014.



LE TRANSPORT

Le CO₂ peut être transporté par pipelines, par trains, camions ou par bateaux. À terme, au regard des volumes de CO₂ à transporter, la logistique par pipelines sera incontournable.

Actuellement, **9 500 km de pipelines sont installés dans le monde**, dont 90 % sont aux USA. Le CO₂ est transporté soit dans un état gazeux, soit dans un état supercritique (haute pression, haute température) en cas de très longues distances.

En France, plusieurs projets de transport de CO₂ par pipelines sont en cours de développement, notamment : le projet GOCO₂ dans l'Estuaire de la Loire auquel sera raccordé le projet Take Kair, le projet d'Artagnan dans la région de Dunkerque, le projet Pycasso dans le Sud-Ouest, ou encore le projet Callisto dans la vallée du Rhône.

LA SEQUESTRATION DU CO₂

Le potentiel de séquestration géologique est important. Il est estimé entre 8 000 à 10 000 milliards de tonnes à l'échelle mondiale, et entre 300 à 500 milliards de tonnes à l'échelle européenne (avec la Norvège et la Grande-Bretagne représentant environ 70 % de ce potentiel).

La méthode historique de séquestration du CO₂ est **la récupération assistée d'hydrocarbures** (en anglais EOR - Enhanced Oil Recovery). Cette méthode utilise l'injection de CO₂ pour améliorer l'extraction du pétrole tout en permettant le stockage du CO₂ dans les réservoirs souterrains.

Le stockage géologique peut également se faire **dans des champs hydrocarbures épuisés** (gaz, pétrole) ou **dans des aquifères salins**, qui sont des formations géologiques contenant de l'eau salée non potable, situées à de grandes profondeurs. Dans tous les cas, ces structures géologiques présentent des propriétés permettant de piéger le CO₂ de façon stable et permanente.

Stocker géologiquement du CO₂ est une technologie relativement ancienne. À titre d'exemple, le projet Norvégien Sleipner est un CCS opérationnel depuis 1996. Le CO₂ est capté sur la plateforme d'exploitation de gaz naturel, puis injecté dans l'aquifère salin d'Utsira, à 800 mètres sous le fond marin.

Sur le territoire français, Total a pu expérimenter avec succès dans les années 2010, l'injection de CO₂ dans l'ancien gisement de gaz naturel de Rousse, dans le bassin de Lacq, situé à 4 500 mètres de profondeur (51 000 tonnes ont été injectées).

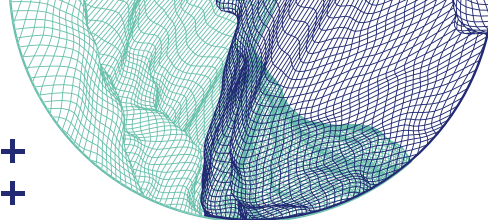
L'UTILISATION DU CO₂

Le CO₂ est déjà utilisé dans certaines industries. La majorité des 230 Mt/an utilisés dans le monde (IEA 2019) l'était pour produire de l'urée, puis pour la production d'hydrocarbures par la récupération assistée d'hydrocarbures (EOR).

En France, le CO₂ est consommé principalement par l'industrie agro-alimentaire (boissons gazeuses, conservation des aliments, etc), et dans une plus faible proportion pour des usages agricoles et des procédés industriels.

De nouvelles voies de valorisation du CO₂ sont aujourd'hui très prometteuses : la production de e-carburant en fait partie, ainsi que la synthèse de produits chimiques, ou encore la séquestration du CO₂ dans des matériaux de construction.





FICHE N°3

Les briques technologiques et leur niveau de maturité

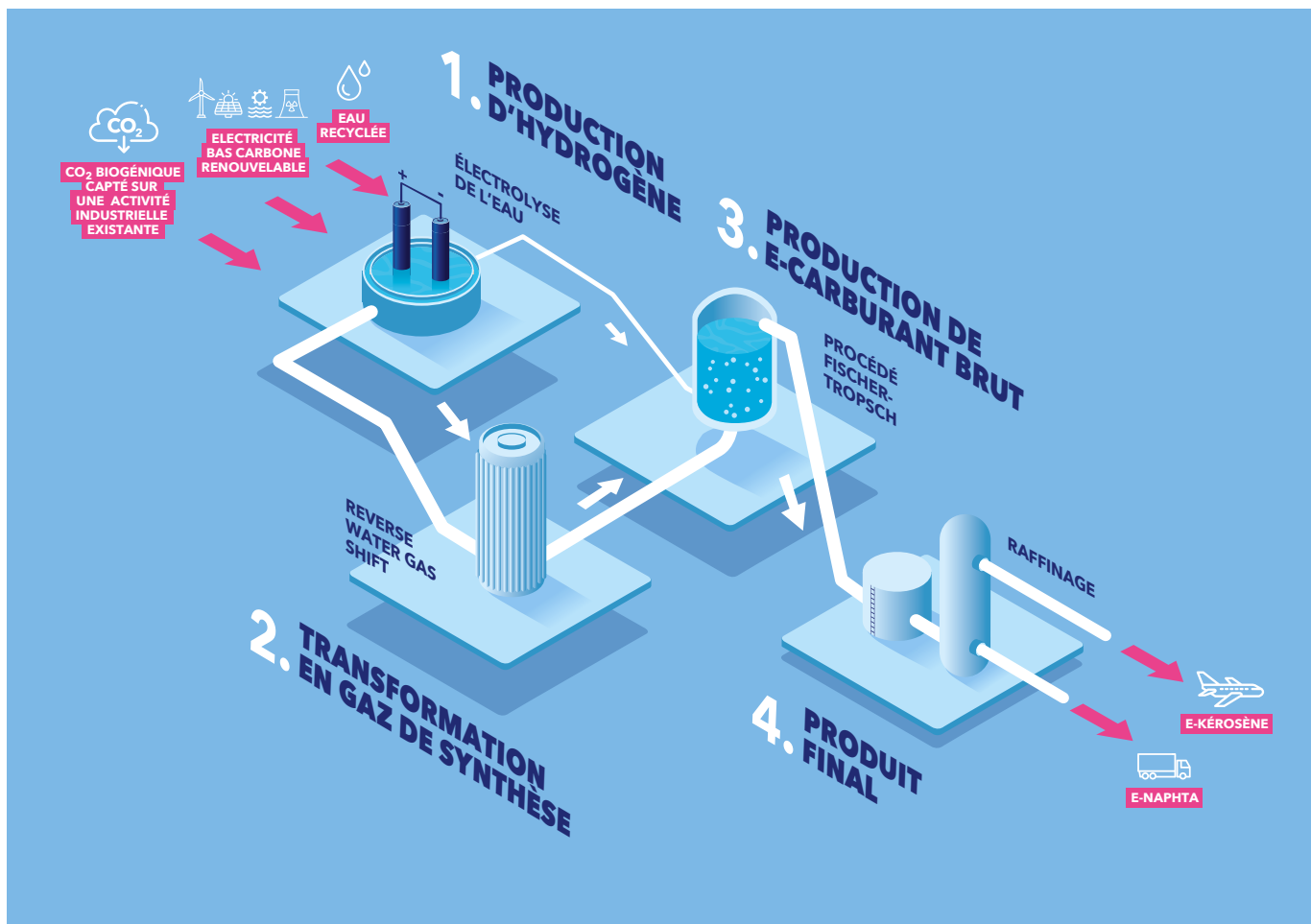
Take Kair est un projet pilote qui vise à faire la démonstration à l'échelle industrielle de la production d'e-carburant en assemblant différentes briques technologiques déjà connues, mais qui n'ont encore jamais été associées ensemble à cette échelle. Cette fiche détaille les caractéristiques et le niveau de maturité de ces différentes briques.

1. Le procédé industriel mis en œuvre

De manière simplifiée, la production de carburants de synthèse durables reposera sur deux briques technologiques principales :

- **L'électrolyse de l'eau** pour obtenir de l'hydrogène bas-carbone ;
- Suivi d'**une chaîne de synthèse du e-carburant durable** utilisé pour l'aviation, pouvant être décomposée en trois étapes :
 - La transformation du CO₂ biogénique et l'H₂ carbone en gaz de synthèse (CO + H₂) selon la réaction inverse de la réaction du gaz à l'eau, en anglais reverse Water Gas Shift (rWGS).
 - La conversion de ce gaz de synthèse en hydrocarbures liquides selon la réaction Fischer Tropsch, dont l'invention date de 1923.
 - La valorisation et la séparation des hydrocarbures produits en cherchant à augmenter le rendement de production de e-kérosène répondant aux spécifications de l'aviation.

À l'exception de l'unité rWGS, brevetée par AXENS et IFPEN et testée aujourd'hui à l'échelle pilote, ces unités sont toutes éprouvées et/ou disponibles à grande échelle, avec un retour d'expérience en conditions réelles.



2. L'électrolyse de l'eau

L'hydrogène est un élément très répandu dans l'univers mais dont les gisements sont à date difficilement exploitables, ce qui nécessite de le produire. Parmi les différents procédés de production, les méthodes utilisant des énergies fossiles (gaz, charbon, hydrocarbures) sont aujourd'hui largement majoritaires dans l'industrie, en particulier pour produire des engrais (ammoniaque) et des dérivés du pétrole (plastique et pétrochimie).

L'électrolyse de l'eau est la méthode de production privilégiée par le projet Take Kair pour son caractère renouvelable et l'absence d'émission de gaz à effet de serre. Elle consiste à décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène grâce à l'électricité.

- **L'hydrogène produit** sera consommé par le procédé de synthèse de carburant.
- **L'oxygène co-produit** sera utilisé pour les besoins internes du procédé en partie seulement (environ 15 %). La valorisation du volume excédentaire est en cours d'étude, avec une possibilité de valorisation pour des usages industriels ou pour répondre à des enjeux environnementaux.

Les électrolyseurs seront installés sur le site du projet, ce qui permettra d'être autonome, d'optimiser les interfaces et les flux de matière au sein de l'usine, et de réduire les besoins de transport, ainsi que les risques associés.



En moyenne, un électrolyseur de 1 MW permet de produire 400 kg d'hydrogène par jour. Dans le projet Take Kair, un peu plus de 3 tonnes par heure d'hydrogène sont nécessaires, ce qui correspond à une consommation électrique d'environ 200 MW. Ces 200 MW seront composés en 10 modules d'environ 20 MW, en cohérence avec les premières unités en production et l'expérience acquise. La modularité permet également d'optimiser l'approvisionnement électrique du projet, car chaque module est alimenté en électricité de manière indépendante.

Aujourd'hui, la technologie PEM (Proton Exchange Membrane - membrane échangeuse de protons en français) est privilégiée pour le projet, mais la décision finale sera prise lors des prochaines phases d'études, une fois que des engagements fermes de fournisseurs auront été reçus.

LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES D'ÉLECTROLYSE

Plusieurs technologies d'électrolyse sont présentes sur le marché : la technologie alcaline (ALK), la technologie à membrane échangeuse de protons (PEM), et la technologie d'électrolyse à haute température (Électrolyseur à Oxyde Solide ou SOEC).

- **L'électrolyse alcaline**, qui représente la majorité des capacités installées actuellement, est la technologie la plus ancienne, et réputée la plus robuste en termes de durée de vie.
- **L'électrolyse PEM**, plus récente, connaît un développement rapide. Elle offre plus de réactivité et de flexibilité pour s'adapter à une alimentation électrique variable. Elle est également plus compacte.
- **L'électrolyse à haute température (ou SOEC)**, très prometteuse, offre une consommation électrique réduite par rapport aux deux premières, notamment grâce à son fonctionnement avec de la vapeur d'eau permettant d'économiser l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau. En revanche, sa maturité industrielle est insuffisante au regard des besoins du projet.

Concernant l'électrolyse PEM, en 2024, trois projets intégrant entre 20 et 25 MW d'électrolyseur ont été mis en exploitation en Amérique du Nord et en Europe¹.



2021, 20 MW, Air Liquide
Becancourt, Canada

2023, 25 MW, Floride



2021, 10 MW, Shell, Wesseling
Allemagne



2023, 24 MW, Yara, Porsgrunn,
Norvège



2020, 6 MW, Voestalpine, Autriche



2024, 20 MW, Air Liquide,
Oberhausen, Allemagne

Exemple d'usine en exploitation PEM

¹ Cavendish NextGen Hydrogen Hub au FPL Okeechobee Clean Energy Center, du fournisseur d'électrolyseur CUMMINS, Yara's Porsgrunn (Herøya) avec 24 MW du fournisseur ITM et 20 MW en Allemagne sur le site d'Oberhausen du fournisseur SIEMENS.



Exemple d'usine en exploitation : Alcalin

3. La chaîne de production de carburant

Plusieurs voies de production de e-carburant à partir de CO₂ existent. La voie de production principale est la voie Fischer-Tropsch. Celle-ci a été retenue pour le projet en raison de sa maturité technique et de son potentiel de répliquabilité et de mise à l'échelle. Elle bénéficie de décennies de développement avec des références mondiales (Afrique du Sud, Qatar, Nigéria, Malaisie, Égypte, etc.) et d'une production existante estimée à environ 10 Mt/an.

Cette voie de production a aussi l'avantage d'être déjà certifiée ASTM D7566, ce qui permet l'incorporation des carburants produits à hauteur de 50 % dans les avions de ligne existants.

Pour le projet Take Kair, la chaîne de procédés e-fuel sera basée sur des technologies brevetées par AXENS et IFPEN.

PRÉSENTATION DE L'IFPEN ET AXENS

IFPEN est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, des transports et de l'environnement, qui a développé une forte expertise dans les technologies et procédés de production de carburants synthétiques. Avec un portefeuille total de plus de 11 000 brevets actifs, IFPEN est le principal déposant de brevets en France. Il compte plus de 180 laboratoires, 120 unités pilotes semi-industrielles pour les tests de catalyseurs et 30 maquettes froides pour les études hydrodynamiques.

Axens, filiale commerciale du groupe IFPEN, développe et fournit des technologies pour le raffinage et la production de carburants synthétiques. Depuis 2023, IFPEN et AXENS participent au développement du projet et sont associés à la réalisation des études techniques.

Le réacteur Fischer-Tropsch constitue l'étape commune de plusieurs voies de production de carburants appelées "X"-to-Liquid. C'est l'étape de production du gaz de synthèse en entrée du Fischer-Tropsch qui permet de distinguer ces différentes voies. On parle de :

- **Gas-to-Liquid**, lorsque la matière première utilisée pour la production du gaz de synthèse est le gaz naturel.
- **Coal-to-Liquid**, lorsqu'il est produit par gazéification du charbon.
- **Biomass-to-Liquid**, lorsqu'il est produit par gazéification de biomasse.
- **Et Power-to-Liquid**, lorsqu'il est produit à partir de dioxyde de carbone (CO_2) et d'hydrogène produit par électrolyse.

LA PRODUCTION DE GAZ DE SYNTHESE

Le procédé reverse Water Gas Shift (rWGS) transforme le mélange H_2 et CO_2 en un gaz de synthèse contenant du CO. La réaction nécessite de l'énergie qui sera apportée grâce à un chauffage électrique à haute température.

Il s'agit de l'étape la plus innovante du projet. Le reverse Water Gas Shift a fait l'objet d'un développement accéléré par l'IFPEN, à partir de procédés connus et d'un catalyseur éprouvé et déjà disponible sur le marché, ce qui a permis sa commercialisation au début de l'année 2024.

Pour électrifier entièrement la technologie, IFPEN s'est associé à Paul Wurth, leader de l'industrie sidérurgique. Plusieurs essais réussis, menés sur le prototype d'essai Paul Wurth et sur le pilote de l'IFPEN ont contribué à affiner la conception du procédé, notamment en ce qui concerne les composants internes du réacteur et la sélection des matériaux.

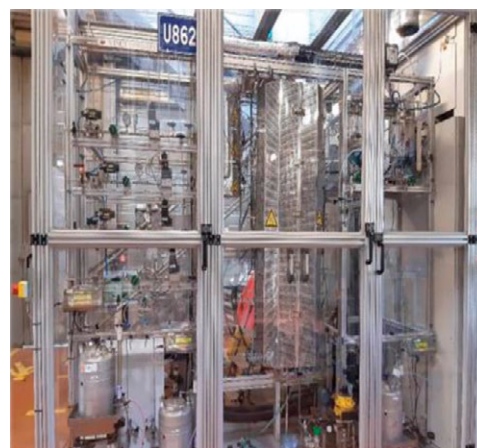


Figure 1 - Pilote rWGS de l'IFPEN

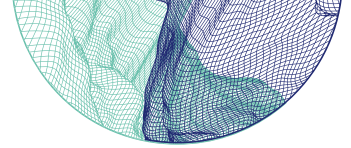
LA CONVERSION EN E-CARBURANT BRUT

La réaction de Fischer-Tropsch associe sous pression l' H_2 et le CO pour produire du pétrole de synthèse. Il s'agit d'une réaction catalytique similaire à une forme de polymérisation. Les choix de catalyseurs, réacteurs et conditions opératoires déterminent la nature des hydrocarbures produits et la performance de la réaction.

Le réacteur mis en oeuvre dans le cadre du projet Take Kair est de type « Colonne à Bulles Slurry ». La spécificité de ce type de réacteur est que le catalyseur n'est pas fixe, mais sous forme de particules solides en suspension.



Une usine de démonstration Fischer-Tropsch (0,1 t/h) a été mise en place par AXENS / IFPEN au sein de la raffinerie ENI de Sannazzaro (en Italie). Elle a fonctionné pendant 25 000 heures, ce qui a permis de tester une large gamme de conditions de fonctionnement, sélectionner celles qui optimisent les performances, et confirmer les consignes d'exploitation de l'unité.



QUELLE EST L'HISTOIRE SUR LE FISCHER TROPSCH ?

L'invention du procédé Fischer-Tropsch remonte aux années 1920. Le procédé a suscité un vif intérêt en Angleterre, au Japon et aux Etats-Unis où beaucoup de temps et d'efforts ont été consacrés à l'amélioration de la technologie. Des travaux d'ingénierie considérables et le développement de catalyseurs se sont poursuivis en Allemagne pendant la Seconde Guerre Mondiale pour produire du carburant à partir de charbon, puis après la guerre par crainte de la pénurie de pétrole, et enfin en Afrique du Sud à la suite des sanctions sur l'exportation du pétrole vers l'Afrique du Sud. De nombreuses usines ont été construites dans le monde (en Afrique du Sud, en Allemagne, au Japon, au Qatar, au Nigéria, en Malaisie, en Egypte, etc.) notamment par les sociétés SASOL et Shell, à partir de gaz naturel et de charbon pour produire des carburants de synthèse et des produits chimiques. La production mondiale totale d'hydrocarbures Fischer-Tropsch a été estimée à environ 10 millions de tonnes par an. Il s'agit donc d'un procédé très éprouvé industriellement.

LE RAFFINAGE

Une fois le CO_2 et l' H_2 convertis en hydrocarbures de synthèse, il est nécessaire de les raffiner en suivant le même principe que le raffinage du pétrole traditionnel. Le raffinage permet de transformer les hydrocarbures en différents produits finis tels que l'essence, le diesel, ou le naphta. L'enjeu pour le projet Take Kair lors de cette étape est de maximiser la fraction « kérosène ».

Le terme raffinage regroupe un ensemble de procédés tels que :

- « **l'hydrocracking** » pour convertir les hydrocarbures trop lourds en hydrocarbures plus légers ;
- « **l'isomérisation** » pour ramifier les chaînes carbonées et répondre aux propriétés d'écoulement à froid du kérosène ;
- **la distillation**, pour extraire les fractions correspondant au e-kérosène et au e-naphta.

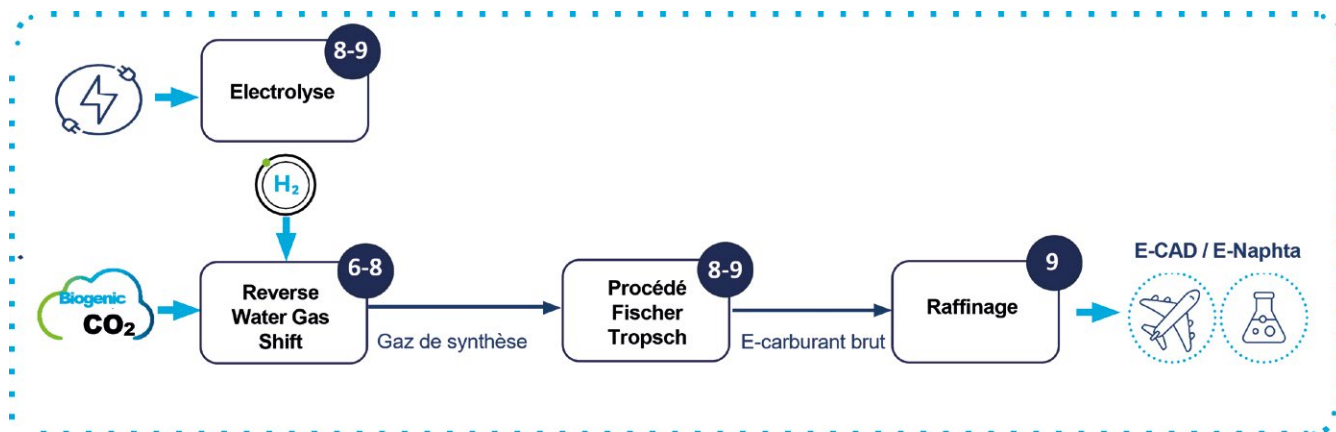
Cette étape du procédé est celle qui bénéficie de la plus longue expérience. AXENS, en particulier, possède 60 ans d'expertise dans ce domaine, avec plus de 115 projets de référence.

UNITES AUXILIAIRES

Enfin, comme toute installation industrielle, l'usine de Take Kair comprendra, en plus des unités technologiques mentionnées ci-dessus, des installations auxiliaires nécessaires à son bon fonctionnement : des cuves de stockage d'hydrocarbures, une station de production d'eau déminéralisée, une unité de traitement des effluents, ou encore une chaudière auxiliaire électrique pour assurer les phases de démarrage.

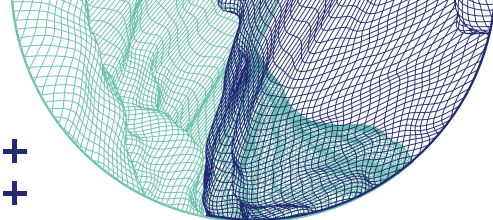


3. La maturité des différents procédés de la chaîne



Maturité technologique des procédés utilisés
selon l'indicateur TRL (*Technological Readiness Level*)

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 Découverte d'un principe physique | 6 Pilote en conditions représentatives |
| 2 Validation du principe | 7 Démonstrateur |
| 3 Validation de la faisabilité | 8 Tête de série |
| 4 Maquette de laboratoire | 9 Technologie commerciale |
| 5 Pilote de laboratoire | |



FICHE N°4

L'analyse de cycle de vie

Une analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation utilisée pour quantifier les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie. Ce cycle s'étend « du berceau à la tombe » : de l'extraction des matières premières à l'élimination finale, en passant par la production, l'utilisation et le traitement en fin de vie.

À chaque étape, le cycle de vie du produit interagit avec l'environnement en consommant des ressources naturelles et en émettant des polluants. L'analyse du cycle de vie dite multi-critères permet de décrire ces interactions et leurs incidences potentielles sur le changement climatique, la qualité des écosystèmes, la santé humaine et la disponibilité de la ressource. Elle est basée sur divers indicateurs d'impacts tels que : le potentiel de réchauffement climatique des Gaz à Effet de Serre (GES), l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification des milieux terrestres et d'eau douce, l'émission de particules fines ou la consommation de ressources (eau, sol, ressources minérales et métalliques, ressources fossiles).

La méthodologie de l'ACV a été normalisée dans les années 1990 par l'organisation internationale (ISO) dans les normes ISO 14040, et 14044 et est toujours mise à jour et étendue régulièrement.

LES GAZ À EFFET DE SERRE (GES), QU'EST-CE QUE C'EST ?

Les gaz à effet de serre sont des gaz présents dans l'atmosphère qui absorbent et réémettent du rayonnement infrarouge, ce qui empêche une partie de la chaleur de s'échapper dans l'espace. Ce phénomène permet de retenir la chaleur dans l'atmosphère et de maintenir la température de la Terre à un niveau propice à la vie, mais l'augmentation des concentrations de ces gaz, principalement due aux activités humaines, participe au réchauffement climatique. Les principaux gaz à effet de serre incluent le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote, chacun ayant un pouvoir de réchauffement spécifique. Le CO₂ étant retenu comme unité de référence, ce réchauffement spécifique est caractérisé par un facteur exprimé en tonnes de CO₂ équivalent.

1. Quels sont les objectifs d'une analyse de cycle de vie ?

L'ACV est un outil précieux d'aide à la décision dans la conception du projet et des procédés de fabrication. Grâce à son approche holistique, elle permet d'identifier les éventuels transferts d'impact entre les différents aspects environnementaux et étapes du cycle de vie.

Dans le cadre du projet Take Kair, l'analyse de cycle de vie permet de :

- **s'assurer** qu'il est préférable de produire du kérosène à partir de CO₂ et de H₂ plutôt qu'à partir de pétrole extrait du sous-sol ;
- **d'évaluer** la réduction de l'impact environnemental associé ;
- **d'identifier** où se situent les postes à impact les plus significatifs sur l'ensemble de la chaîne de valeur pour les réduire, dans une démarche d'éco-conception.

2. Quelle est l'empreinte carbone du projet Take Kair ?

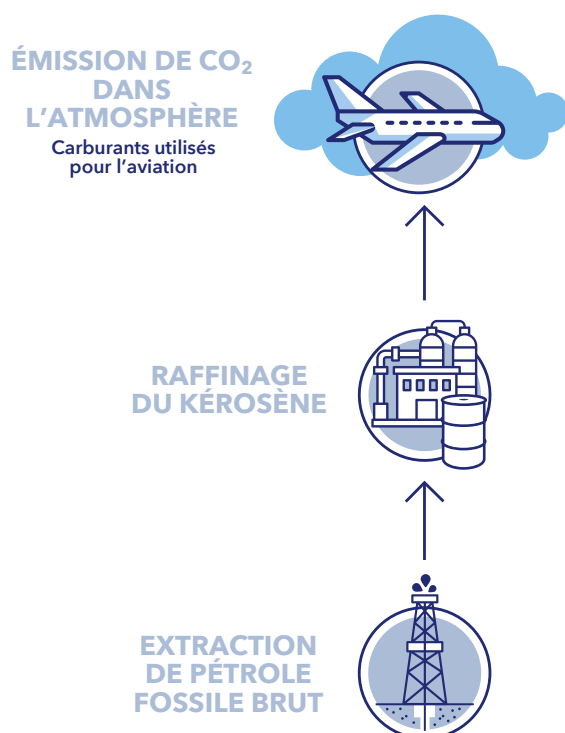
Parce qu'il constitue la raison d'être même du projet Take Kair, l'indicateur environnemental « Changement Climatique » est celui qui est analysé en priorité. Celui-ci évalue les émissions des gaz à effet de serre, principalement le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), en prenant en compte les intrants des phases de production (énergies et consommables), le transport, la distribution, jusqu'à la combustion du carburant dans l'avion.

Une analyse du cycle de vie préliminaire a été réalisée par la R&D d'EDF, sur la base des études de faisabilité de projet. Au fur et à mesure de l'avancement du projet, ces données seront affinées. Une mise à jour de l'ACV est notamment prévue dans le cadre du Dossier de Demande d'Autorisation Environnementale.

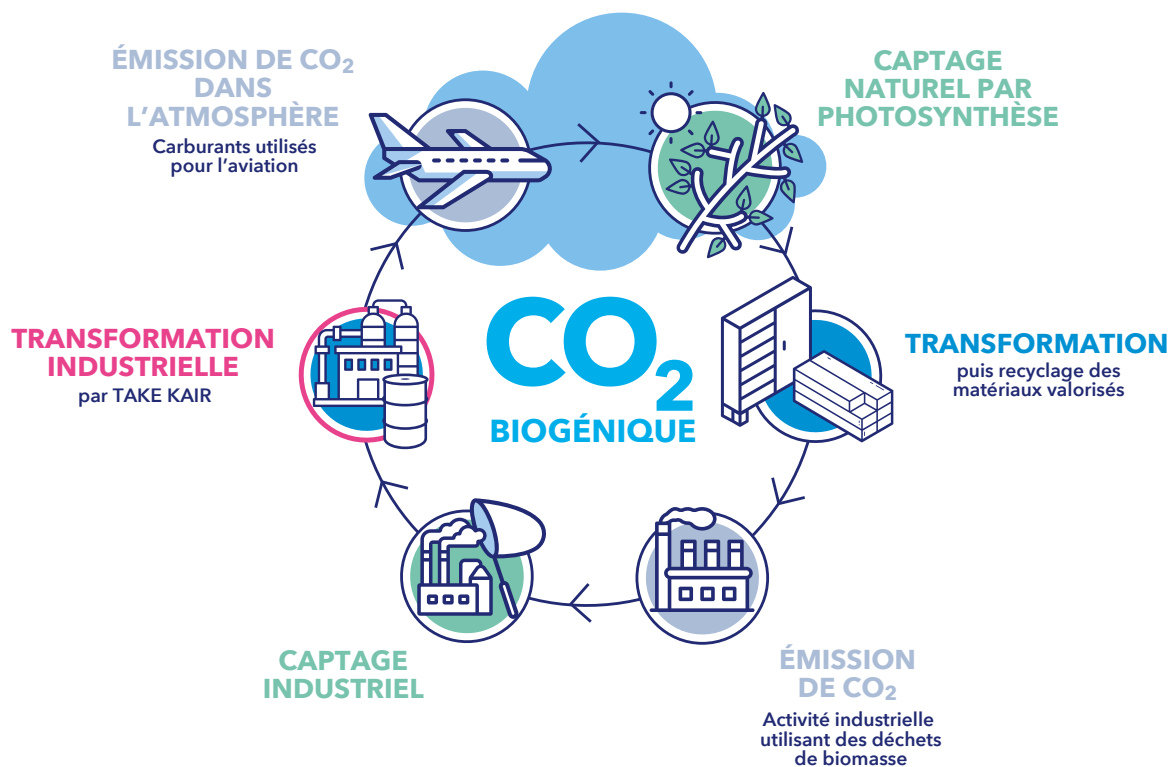
Les résultats de cette première étude ont montré que la production et utilisation d'e-carburant pour l'aviation par le projet Take Kair représente une empreinte carbone d'environ $24 \text{ gCO}_2 \text{ eq/passager.km}$ alors que son équivalent fossile représente une empreinte carbone de $110 \text{ gCO}_2 \text{ eq/passager.km}$ pour un vol moyen-courrier. Cet e-kérosène représente donc un abattement en émissions de GES d'environ 80 %.

Au lieu d'extraire de l'énergie fossile venant augmenter la quantité de CO_2 rejetée dans l'atmosphère, la solution proposée par Take Kair réutilise le CO_2 biogénique (c'est-à-dire issu de la combustion de déchets de biomasse) capté dans les fumées de la cimenterie (voir encart sur le CO_2 biogénique plus bas). Le CO_2 ainsi émis par l'avion est de source biogénique, c'est-à-dire durable et neutre pour l'environnement. Il rentre dans un cycle court de séquestration/émission par la végétation, contrairement au CO_2 fossile, provenant de la combustion de combustibles fossiles stockés dans le sous-sol depuis des millions d'années, qui s'accumule dans l'atmosphère.

L'APPROVISIONNEMENT DU SECTEUR DE L'AVIATION ACTUELLEMENT



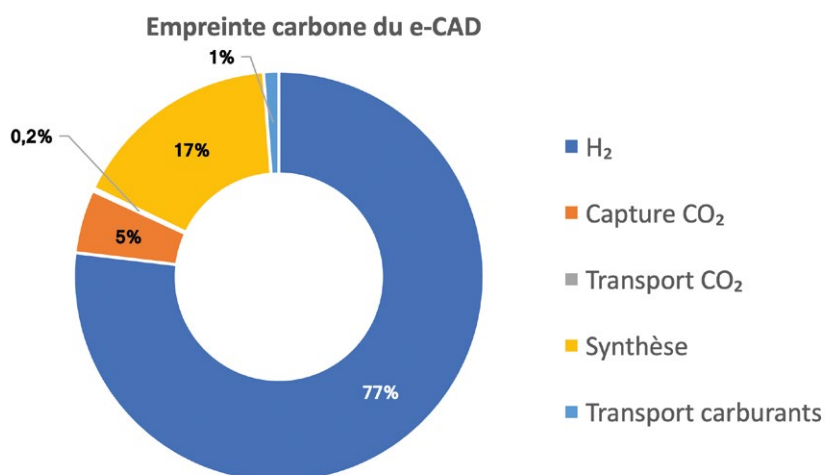
L'APPROVISIONNEMENT DU SECTEUR DE L'AVIATION AVEC TAKE KAIR



QUELLES SONT LES ORIGINES DES ÉMISSIONS DE GES DE TAKE KAIR ?

Produire du e-kérosène nécessite :

- de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau alimentée par de l'électricité renouvelable et bas-carbone ;
- de capter du CO₂ de la cimenterie et de le transporter par pipeline jusqu'au site ;
- de synthétiser du kérosène à partir de CO₂ et d'H₂ ;
- de transporter le e-kérosène jusqu'au consommateur final ;
- d'utiliser le e-kérosène comme carburant.



D'OÙ PROVIENT LE CO₂ BIOGÉNIQUE UTILISÉ PAR TAKE KAIR ?

Hynamics prévoit d'utiliser du CO₂ exclusivement biogénique pour Take Kair. Le fournisseur pressenti à ce stade est la cimenterie Lafarge de Saint-Pierre-La-Cour. Ce CO₂ est déjà tracé et certifié par un organisme externe dans le cadre des déclarations des émissions de CO₂ de la cimenterie au titre de l'EU-ETS (système d'échange européen de quotas d'émissions).

Ce CO₂ provient de la combustion de la fraction biomasse des combustibles solides employés dans la cimenterie, à savoir : des déchets de bois traités et impropres à un autre usage, des refus de tri, etc. À noter que l'utilisation de CO₂ biogénique pour la production de e-carburant est favorisée au niveau européen : l'usage de CO₂ fossile sera interdit à partir de 2041.

3. La réduction des émissions de gaz à effet de serre, un enjeu également réglementaire

La production de carburant d'aviation durable, en tant qu'alternative aux carburants fossiles, est encouragée par les états membres de l'Union européenne, dont la France, car ils joueront un rôle clé dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur du transport aérien. Cela se traduit par la promulgation de lois et directives imposant un objectif d'incorporation d'e-carburant pour l'aviation ambitieux.

Les actes délégués de la Directive sur les énergies renouvelables et de la Directive sur les règles communes pour les marchés intérieurs du gaz renouvelable, du gaz naturel et de l'hydrogène (Directive (UE) RED2 2018/2001 et Directive (UE) 2024/1788) décrivent les conditions pour lesquelles les carburants à base d'hydrogène peuvent être considérés comme des carburants renouvelables pour le transport d'origine non-biologique (RFNBO) et/ou bas-carbone, et définissent des méthodes claires de calcul des réductions des émissions de GES à respecter. Cette comptabilisation des émissions de GES diffère de la méthodologie ACV, car elle est conçue pour répondre aux objectifs spécifiques liés à la politique énergétique européenne, et utilise des facteurs d'émissions standardisés qui permettent de simplifier le processus de comptabilisation.

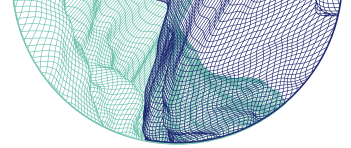
Pour être conformes aux objectifs réglementaires, les carburants produits par Take Kair doivent démontrer une réduction de 70 % de l'intensité carbone a minima par rapport à leur équivalent fossile.

L'enjeu est essentiel pour obtenir les certifications nécessaires à la vente des produits et la viabilité du projet. Pour produire des carburants certifiés RFNBO et/ou bas-carbone, le projet s'inscrira dans un schéma de certification par un auditeur tiers.

À noter que l'énergie électrique nécessaire à la production des produits est le poste d'émission de CO₂ le plus important. À ce titre, il nécessitera une vigilance particulière.



VOIR FICHE N°1 L'APPROVISIONNEMENT EN ÉLECTRICITÉ

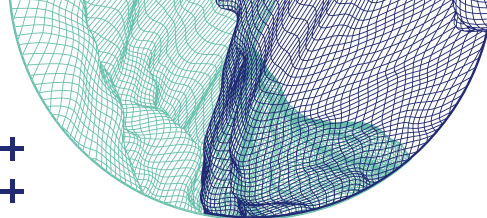


COMMENT TAKE KAIR S'INSCRIT DANS LES OBJECTIFS EUROPÉENS ?

L'Union européenne, signataire de l'Accord de Paris formulé lors de la COP 21, s'est engagée à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 afin de limiter le réchauffement climatique à 1,5 degré. Le projet Take Kair s'inscrit dans le cadre de plusieurs textes législatifs promulgués à la suite de l'accord de Paris pour atteindre cet objectif :

- **Le Pack « Fit for 55 »** est un ensemble de mesures législatives de l'Union européenne qui engage les états membres à réduire les émissions de GES (gaz à effet de serre) d'au moins 55 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 1990. Il inclut des initiatives pour augmenter l'utilisation des énergies renouvelables et réformer le système de quotas d'émissions, avec notamment la suppression des quotas carbone gratuits pour l'aviation.
- En support de ces textes, **la Directive sur l'énergie renouvelable** (Directive (UE) RED3 2023/2413) fixe des objectifs pour augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie dans le secteur des transports jusqu'à 29 % d'ici 2030, ou bien une réduction de 14,5 % d'émission de gaz à effet de serre du secteur d'ici 2030. La Directive impose également une part de 5,5 % de carburants renouvelables d'origine non-biologique (RFNBO) et de biocarburants avancés dans le mix énergétique des transports d'ici 2030, dont un minimum de 1 % de RFNBO.
- **Enfin, le Règlement ReFuel Aviation**, adopté en octobre 2023, est une déclinaison opérationnelle de ces objectifs sur le marché de l'aviation. En s'alignant sur les critères définis par la Directive sur l'énergie renouvelable, il vise à inscrire 35 % de carburant synthétique pour 2050 et fixe des étapes intermédiaires d'incorporation à 1,2 % (0,72 Mt) en 2030, 5 % (3 Mt) en 2035, 10 % (6 Mt) en 2040 et 35 % (21Mt) en 2050.





FICHE N°5

Les enjeux de la décarbonation du secteur aérien en France

1. L'état des lieux : les émissions du secteur aérien

Selon la feuille de route décarbonation de l'aviation¹, les émissions mondiales du secteur aérien sont en croissance depuis 1990 en raison de la forte hausse du trafic. En France, les émissions domestiques sont passées de 4,2 Mt CO₂ à 5,4 Mt CO₂ en 2019 et les émissions des vols internationaux au départ de la France de 8,9 Mt de CO₂ à 19,2 Mt de CO₂. Au total, cela représente 5,4 % des émissions de l'économie française. Néanmoins, les émissions unitaires, c'est-à-dire par passager et kilomètre parcouru ont drastiquement baissé notamment du fait de progrès techniques importants et d'une meilleure efficacité des moteurs. Elles ont été divisées par 5 depuis 1960 et par 2 depuis 1992. Selon l'INSEE, la consommation de kérosène en 2019 en France s'est établie à 7,1 Mt².

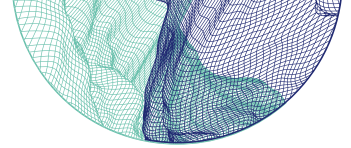
2. Les trajectoires de décarbonation

Introduite par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) est la feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique. Elle donne des orientations pour mettre en œuvre, dans tous les secteurs d'activité, la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable. Elle définit une trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre jusqu'à 2050 et fixe des objectifs à court-moyen termes : les budgets carbone.

Adoptée pour la première fois en 2015, la SNBC a été révisée en 2018-2019, en visant à atteindre la neutralité carbone en 2050 (ambition rehaussée par rapport à la première SNBC qui visait le facteur 4, soit une réduction de 75 % de ses émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990). La nouvelle version de la SNBC, la SNBC 2, et les budgets carbone pour les périodes 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033 ont été adoptés par décret le 21 avril 2020.

¹ Proposition de feuille de route décarbonation transport aérien.pdf (ecologie.gouv.fr)

² Consommation de produits pétroliers | Insee



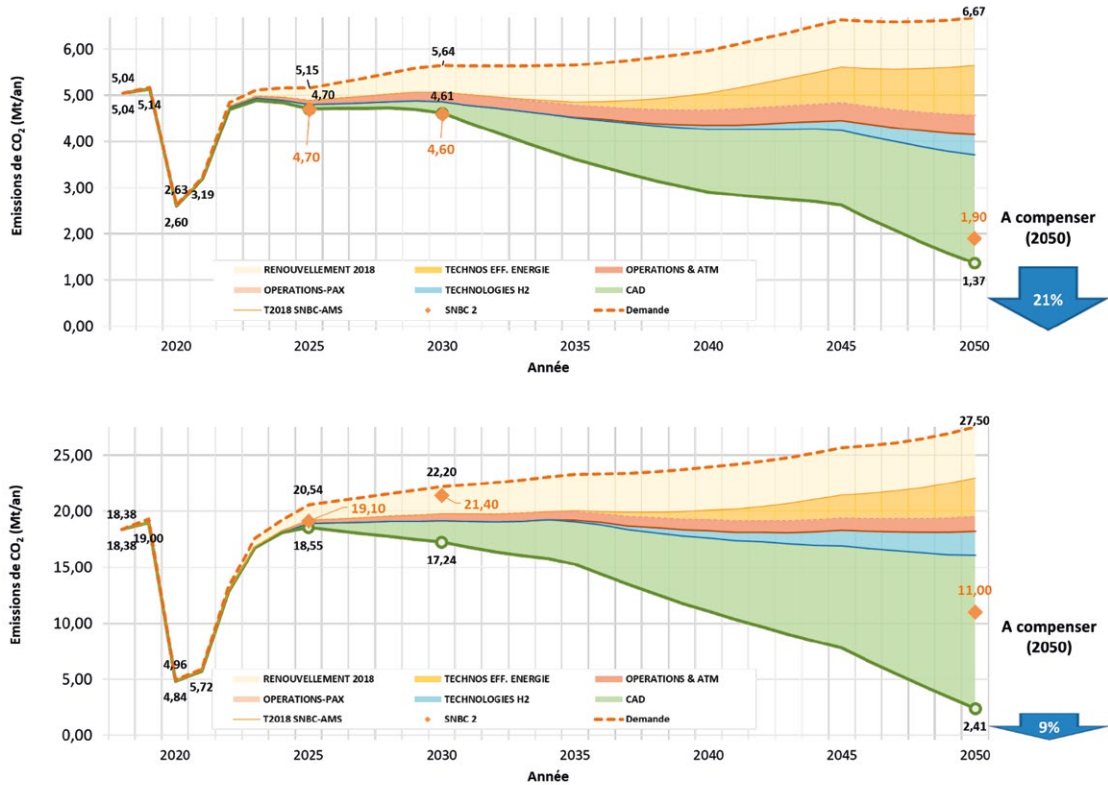
La SNBC 2 en vigueur fixe à l'aérien en France les objectifs d'émissions maximales suivantes :

PROJETÉ : SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE LA SNBC 2 ¹⁵				
Mt CO2 eq	2015 (observé)	2025	2030	2050
Aviation FRANCE	4,6	4,7	4,6	1,9
Aviation INTERNATIONAL	17,5	19,1	21,4	11

En d'autres termes, la SNBC 2 fixe pour l'aérien français un objectif de stabilité du volume des émissions de CO₂ jusqu'en 2030 qui est une date charnière dans la trajectoire de décarbonation, date à laquelle s'enclenche une diminution des émissions jusqu'en 2050, grâce notamment au recours à des énergies décarbonées et à des ruptures technologiques espérées comme l'avion à hydrogène.

Une même logique a gouverné la définition des objectifs de l'aviation internationale de la SNBC 2, avec néanmoins une légère augmentation des émissions jusqu'en 2030 en raison de la hausse du trafic avant de baisser grâce à l'activation de ces leviers de décarbonation.

Dans la feuille de route décarbonation, pilotée par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) et le Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS), le scénario de référence « Action » prévoit une trajectoire de décarbonation avec une cible d'émission à 1,37 Mt/an de CO₂ sur le périmètre domestique et 2,41 Mt/an de CO₂ sur le périmètre international, soit en deçà des objectifs prévus dans la SNBC 2.



Ces deux scénarios prennent en compte une croissance du trafic de 0,8 % par an (en passagers-kilomètres- PKT). Cette croissance du secteur aérien peut être remise en question en cas d'actions fortes en faveur de la sobriété. Dans le scénario S2 Transition(s) 2050 de l'ADEME, une part importante de sobriété est prise en compte et considère notamment une baisse du trafic d'environ 1 % par an.



	DOMESTIQUE MÉTROPOLE : continent & Corse				DOM-TOM				INTERNATIONAL			
	2015	2019	2030	2050	2015	2019	2030	2050	2015	2019	2030	2050
S2	14,3	16,2	9,5	5,7	31,4	39,6	34,6	26,7	153,3	182,3	153,3	122,7

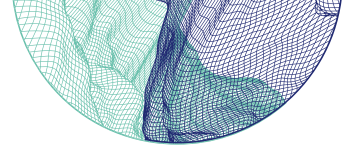
Trafic aérien en Milliards de passager-kilomètre dans le scénario S2 Transition(s) de l'ADEME

En complément de la sobriété, 3 principaux leviers technologiques ont été identifiés.

- 1. Le renouvellement des flottes**, permettant de remplacer les appareils opérant en France et au départ de la France par des appareils de dernière génération à meilleure efficacité carbone.
- 2. La conception et l'industrialisation d'une nouvelle génération d'avions**, gamme complète d'appareils d'efficacité énergétique accrue, capables d'utiliser des énergies bas-carbone (électricité, carburants d'aviation durable, hydrogène), et à forte efficacité économique et environnementale.
- 3. La compatibilité des aéronefs et moteurs existants et futurs avec une variété de carburants alternatifs** au kérosène, d'origine biomasse ou synthétique, sans mélange « 100 % carburants d'aviation durable ». À noter qu'il est déjà aujourd'hui possible de mélanger jusqu'à 50 % de e-kérosène pour une utilisation dans les aéronefs existants.

L'hydrogène est un candidat potentiel au remplacement du kérosène parce qu'il présente des caractéristiques énergétiques élevées (pouvoir calorifique massique trois fois supérieur à celui du kérosène) et qu'il est d'ores et déjà possible de le produire de manière industrielle sans émissions de CO₂ par électrolyse de l'eau et utilisation d'électricité décarbonée. Son utilisation permet donc d'atteindre le « zéro émission ». Elle présente cependant quelques défis, principalement du fait de la très faible densité de l'hydrogène qui nécessitera un stockage sous forme liquide à très basse température (-253°C) pour son emploi sur l'essentiel des avions commerciaux. Cette faible densité, même sous forme liquide, limitera au moins dans un premier temps l'utilisation de l'hydrogène à des avions de types régionaux ou court-courriers. L'introduction de l'hydrogène requiert en outre, au-delà d'une nouvelle conception des avions, le déploiement de nouvelles infrastructures pour l'approvisionnement des aéroports et l'avitaillement des avions. Pour les courts-moyens courriers, l'utilisation de l'hydrogène est envisagée en combustion dans des turboréacteurs (ou des moteurs open-fan) tandis que la voie pile à combustible est également envisagée pour les avions régionaux.

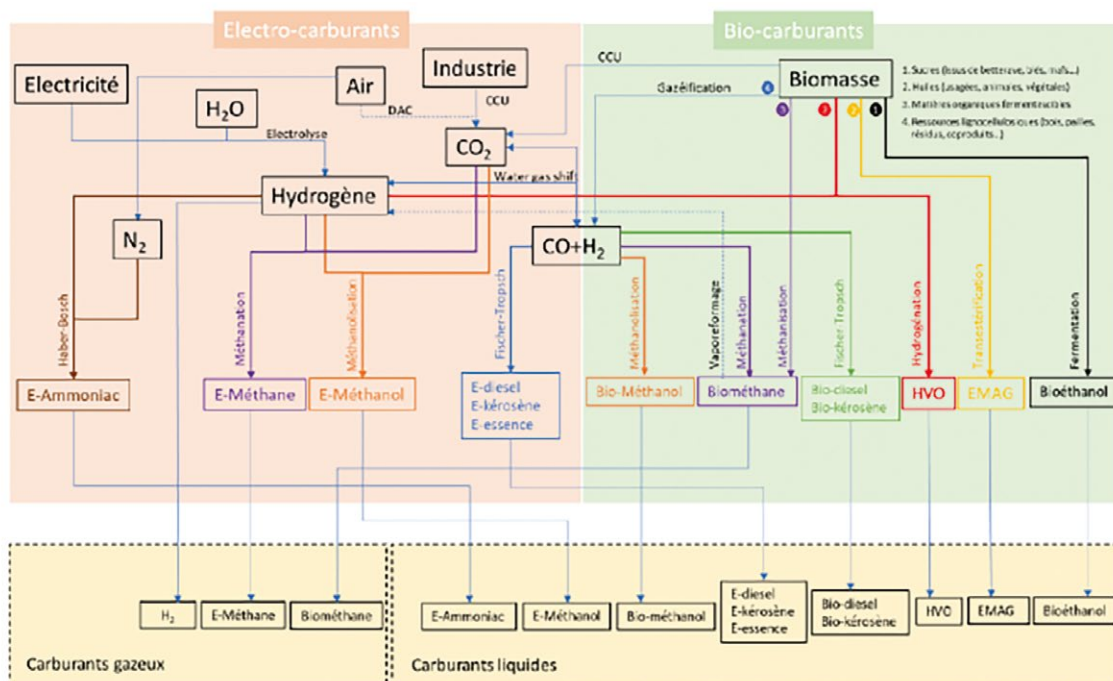
Pour ces raisons, les compagnies aériennes envisagent une utilisation croissante de carburants d'aviation durables (CAD). Les CAD sont produits à partir de biomasse (biocarburants) ou d'électricité (e-carburants) et sont substituables au kérosène fossile pour une utilisation directe dans les flottes d'avions existantes.



3. Le marché des e-carburants : niveau de maturité et réglementation

LES E-CARBURANTS, DE QUOI PARLONS-NOUS ?

Les électro-carburants sont des carburants liquides ou gazeux, synthétisés à partir d'hydrogène - produit à partir d'électricité par électrolyse de l'eau - et de CO₂ : e-kérosène, e-méthanol, e-ammoniac, e-méthane. Ils constituent l'un des leviers de décarbonation future des activités des secteurs de l'aéronautique et maritime, en remplacement des carburants, de façon complémentaire aux biocarburants. Plusieurs voies technologiques existent selon le carburant recherché, dont les plus avancées sont répertoriées dans le schéma ci-dessous.



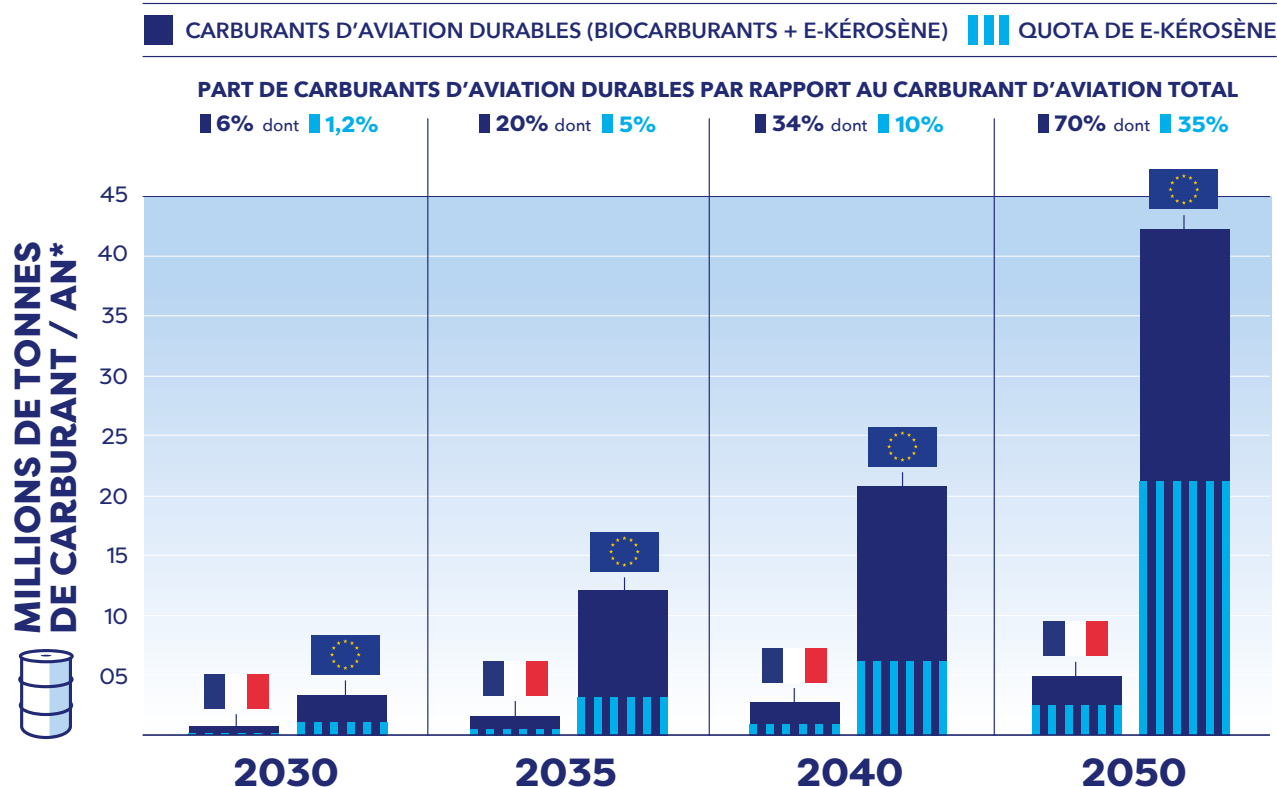
UNE REGLEMENTATION EN FAVEUR DU DEVELOPPEMENT DES E-CARBURANTS EN EUROPE

Les récents règlements européens ReFuelEU Aviation et FuelEU Maritime fixent, de 2025 à 2050, des objectifs ambitieux d'incorporation progressive de carburants durables pour l'aviation (minimum de 70 % en 2050) ou de baisse d'intensité en gaz à effet de serre (GES) des carburants des navires (baisse de 80 % à l'horizon 2050).

La directive européenne relative aux énergies renouvelables donne par ailleurs un cadre pour les carburants alternatifs utilisables dans le domaine des transports. L'une des exigences de cette directive porte sur la nature du CO₂ entrant dans la composition de ces carburants qui ne pourra pas être d'origine fossile au-delà de 2040. Cette mesure évite ainsi de pérenniser des filières qui seraient construites sur du CO₂ et des ressources fossiles, et de minimiser l'impact des gaz à effet de serre dans la chaîne globale.

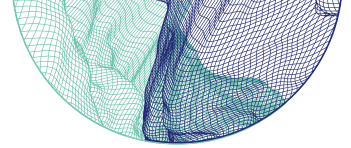


LES OBLIGATIONS D'INCORPORATION DE CARBURANTS D'AVIATION DURABLES EN FRANCE ET EN EUROPE



*Basé sur un besoin annuel de 7 millions de tonnes/an en France, sans prise en compte de levier de sobriété
Source : https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueu-aviation_en

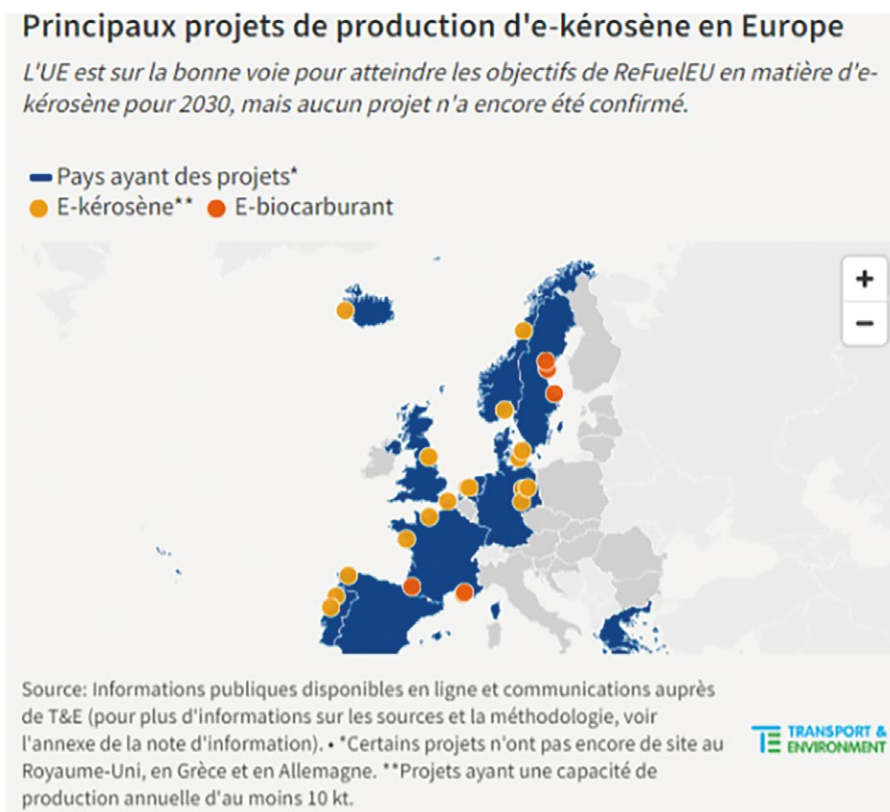
Plus faible au départ, la part des e-carburants augmentera ensuite plus vite que la part des biocarburants pour atteindre un volume similaire en 2050. Ceci résulte d'une filière des biocarburants plus mature à date mais reposant sur des gisements en biomasse, à terme, limités.



Avec 37,5 kT de e-kérosène par an produits, Take Kair permettra de répondre à environ la moitié des volumes nécessaires en France pour satisfaire à l'obligation en 2030.

À noter que les volumes de CAD totaux nécessaires pour répondre aux obligations dépendront de l'évolution du trafic aérien d'ici 2050 et de la consommation de carburants résultante. En revanche, aucune des trajectoires envisagées aujourd'hui ne prévoit un arrêt total du trafic aérien en 2050, assurant un débouché potentiel pour Take Kair au-delà de 2050.

Parmi les pays européens, l'Allemagne et la France accueillent un nombre relativement élevé de projets de production d'e-kérosène. Le Portugal, la Norvège, la Suède font également partie des pays accueillant des projets de production d'e-kérosène. Au début de l'année 2024, 45 projets de production de e-kérosène étaient dénombrés en Europe, dont 25 de capacité industrielle, c'est-à-dire d'une capacité de production annuelle du même ordre de grandeur que la capacité de Take Kair. Parmi les projets européens, notons le projet Norsk e-Fuel qui s'appuie sur les mêmes technologies de synthèse que Take Kair.



4. Les ressources utilisées pour la production de e-carburant à destination de l'aviation

Le recours au e-kérosène permet de limiter la pression sur les gisements de biomasse, contrairement aux biocarburants. Mais elle nécessite l'utilisation d'autres ressources : électricité, eau et CO₂.

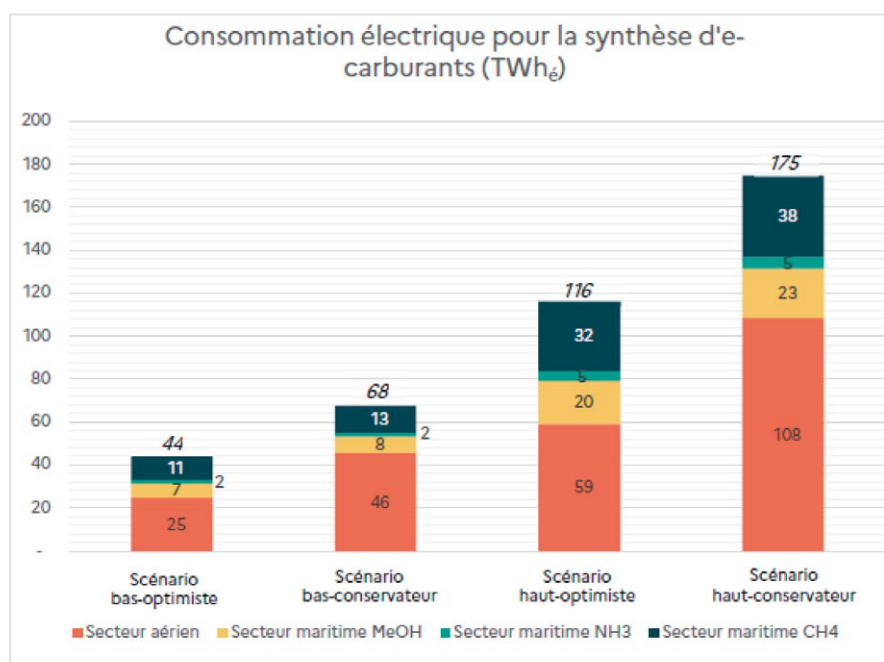
ELECTRICITE

Assurer un bon approvisionnement en électricité est essentiel pour produire des e-carburants.

+ VOIR FICHE N°1 L'APPROVISIONNEMENT EN ÉLECTRICITÉ

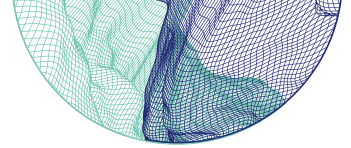
Au-delà du projet Take Kair, la question de la disponibilité d'électricité bas-carbone et renouvelable à un prix accessible se pose lorsqu'on envisage une montée en puissance de la filière des e-carburants.

Selon une étude de l'ADEME³, la consommation électrique pour la production d'e-kérosène pourrait représenter entre 25 et 108 TWh en 2050 en France, selon les projections de croissance ou décroissance du trafic aérien et selon le niveau d'efficacité technologique. La consommation électrique pour le captage du CO₂ dans les fumées représenterait entre 1 et 4 TWh. En revanche, l'étude ne prend pas comme hypothèse une part d'importation des e-carburants ou de l'hydrogène nécessaire à sa production, ce qui réduirait la consommation électrique sur le sol français.



Les besoins en électricité, en lien avec le développement de ces nouvelles filières, sont intégrés dans les scénarios de besoin en électricité à horizon 2050, qui prévoient une production bas-carbone et renouvelable comprise entre 525 et 800 TWh selon les scénarios ADEME (S2 Transition(s) 2050, S3_EnR Transition(s) 2050) et RTE (N02 Futurs énergétiques, N02 Réindustrialisation, Futurs énergétiques).

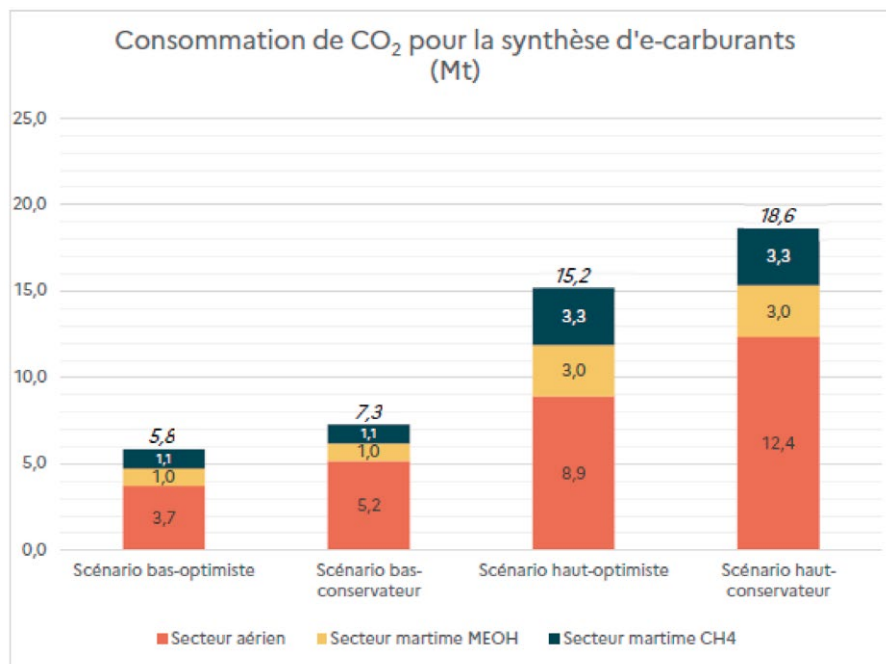
³ Electro-carburants en 2050 : Quels besoins en électricité et CO₂ ? - La librairie ADEME



SCÉNARIOS DE TRANSITION	S2 Transition(s) 2050	S3_EnR Transition(s) 2050	N02 Futurs énergétiques	N02 Réindustrialisation, Futurs énergétiques
Production d'électricité TWh	525,9	660	688,3	808,6
Dont renouvelable (hors bioénergies) TWh	442,7	567,4	419,9	531,6

CO₂

Le CO₂ est également une ressource essentielle à la production d'e-kérosène. Ce CO₂ peut être capté typiquement sur des installations industrielles (cf. *Fiche captage du carbone*). Il devra également être biogénique, c'est-à-dire issu de la combustion de biomasse ou extrait de l'air grâce aux technologies Direct Air Capture (DAC). Selon la même étude ADEME, la consommation de CO₂ pourrait être comprise entre 3,7 et 12,4 Mt d'ici 2050.



Selon le registre des émissions polluantes (IREP)⁴, en 2021, le gisement de CO₂ biogénique captable s'élève à :

- 6,5 Mt CO₂/an pour les sites émetteurs de plus de 200 kt CO₂/an, soit 33 % des émissions totales de CO₂ biogénique. Cela concerne 17 sites en France.
- 16,6 Mt CO₂/an pour les sites émetteurs de plus de 30 kt CO₂/an, soit 84 % des émissions totales de CO₂ biogénique. Cela concerne 153 sites en France.



⁴ Installations industrielles rejetant des polluants | Géorisques (georisques.gouv.fr)

L'EAU

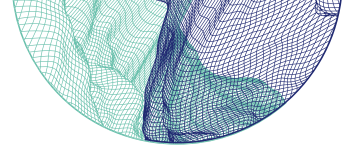
La production d'e-carburant implique l'utilisation d'eau, d'une part pour la production d'hydrogène si elle est produite par électrolyse, et d'autre part pour le captage du CO₂. Selon l'Observatoire des e-fuels, cette consommation serait respectivement de 11 litres d'eau pour la production de 1 kg d'hydrogène et de 2,15 litres d'eau par kg de CO₂ capté (estimations basées sur des dires d'experts et le rapport Water footprint of CCS technologies, L. Rose & Co (2020)⁵).

De l'eau peut également être nécessaire pour le refroidissement des unités de production. Cette consommation est très dépendante du choix de la technologie de refroidissement utilisée. L'utilisation de tours humides est moins consommatrice de foncier, mais plus consommatrice d'eau, bien que l'eau prélevée soit en grande partie rejetée dans le milieu nature (on estime une restitution d'environ 90 % de l'eau prélevée). L'utilisation d'aéroréfrigérant sec permet quant à elle de limiter le prélèvement d'eau par rapport à l'utilisation de tours humides, mais avec un impact foncier plus important.

À noter que dans le cas du procédé Fischer-Tropsch, celui retenu par Take Kair, ce dernier produit de l'eau qui peut être recyclée et réutilisée, limitant le besoin d'apport en eau.

À titre indicatif, l'ensemble des prélèvements en eau en France se sont montés à 30 Mds de m³ en 2020, dont 2,3 Mds de m³ pour le secteur industriel.

⁵ Rosa, Lorenzo; et al. (2020): The water footprint of carbon capture and storage technologies : Carbondioxide Removal



5. L'impact bénéfique des e-carburants sur les effets non-CO₂ de l'aviation

Le réchauffement climatique causé par l'aviation ne se limite pas seulement au CO₂ émis par les moteurs d'avions. En effet, d'autres effets indirects, comme les trainées de condensation et l'émission d'oxydes d'azote principalement, contribuent au réchauffement de l'atmosphère. Certaines études indiquent même que le forçage radiatif de ces effets non-CO₂ pourrait être plus important que celui des émissions de CO₂ seules.

Ces phénomènes sont en revanche complexes à modéliser, car ils dépendent de multiples facteurs comme la trajectoire de l'avion, la météorologie, la position du soleil, ou encore la composition chimique de l'air ambiant.

Les trainées de condensation se forment lorsque la vapeur d'eau émise par les moteurs d'avions se condense en cristaux de glace. Dans certaines conditions atmosphériques, les trainées de condensation peuvent se transformer en nuages appelés cirrus induits, qui peuvent couvrir de grandes surfaces et persister plusieurs heures. Ce phénomène a pour effet de piéger la chaleur dans l'atmosphère et de contribuer au réchauffement climatique. Bien que les petits cristaux de glace puissent agir comme des miroirs et réfléchir une partie du rayonnement solaire, entraînant un léger refroidissement, l'effet net est un réchauffement.

Contrairement aux émissions de CO₂, qui ont un effet à long-terme, les cirrus induits ont un impact climatique à court-terme, mais potentiellement intense.

La formation des trainées de condensation et des cirrus induits est favorisée par l'émission de particules de suie et d'aérosols par les moteurs d'avions, qui agissent comme noyau de condensation de la vapeur d'eau. Une caractéristique des CAD est d'avoir une quantité plus faible de composés aromatiques. Les aromatiques étant les principaux précurseurs de la suie, il s'ensuit que les CAD permettent de limiter la formation des trainées de condensation.

Une étude menée en 2023 par ESTUAIRE sur la base des caractéristiques des CAD produits par Take Kair, a montré qu'une utilisation sélective de ces carburants sur des trajectoires d'avion optimisées permettrait une réduction de l'impact des trainées de condensation significative (environ 3 fois supérieure en tCO₂ eq. à la réduction des émissions de CO₂ seules).

Par ailleurs, sur le plan environnemental, l'utilisation de CAD permet aussi de réduire les émissions de polluants autour des aéroports. En effet, les CAD génèrent moins de particules fines que leur équivalent fossile, mais également moins de SOx, responsables des pluies acides, car ils ne contiennent pas de soufre.



