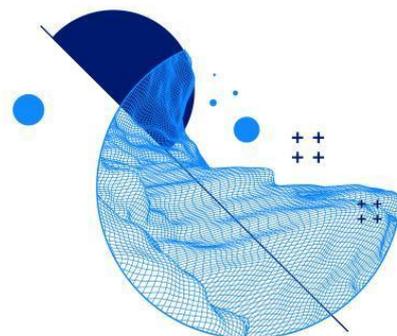




CONCERTATION PRÉALABLE

16 décembre 2024
9 mars 2025



Cahier d'acteur



Les Shifters - Loire Atlantique

Date : 9/03/2025

Contact : Jérémie POUPON - shifters44@theshifters.org

Ce cahier d'acteur est proposé aux personnes morales (collectivités, entreprises, associations...) dans le cadre de la concertation préalable sur Take Kair, qui se déroule du 16 décembre 2024 au 9 mars 2025, afin qu'elles partagent un avis argumenté sur le projet au nom de leur structure.

Comité de rédaction

Les auteurs

Jérémie Poupon (Bénévole, The Shifters 44)

Les relecteurs

François Peyret (Bénévole, The Shifters 44)

Victor Spitzer (Bénévole, The Shifters 44)

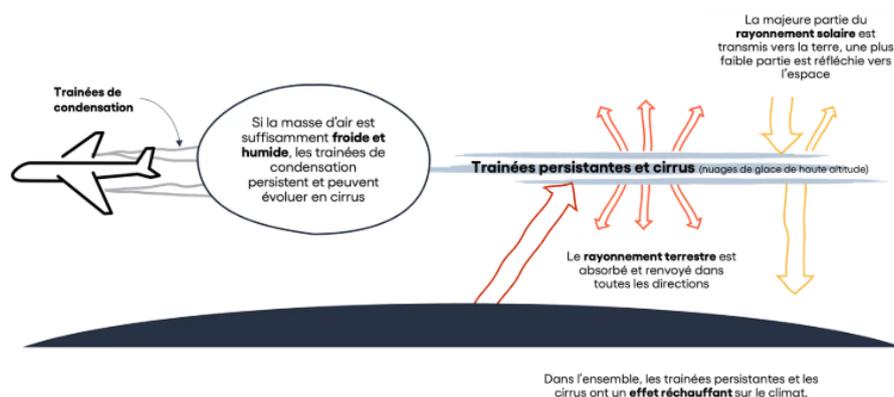
Loïc Bonifacio (Bénévole, Aéro Décarbo)

Les propos exprimés dans ce rapport n'engagent que leurs auteurs.

Résumé

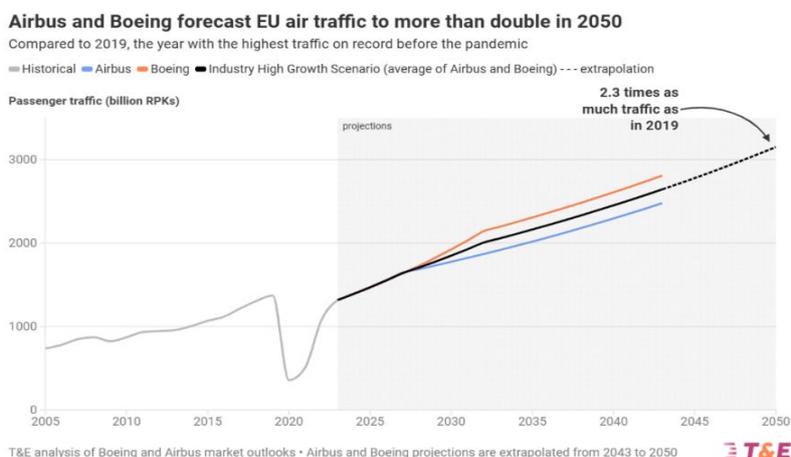
L'aviation mondiale est responsable de 2.5% (5.4% pour la France) des émissions de CO2, hors impact "non CO2" (effet des traînées). Les impacts non-CO2 peuvent représenter entre 1/2 et 2/3 des effets du réchauffement climatique.

Effet des traînées de condensation sur le climat

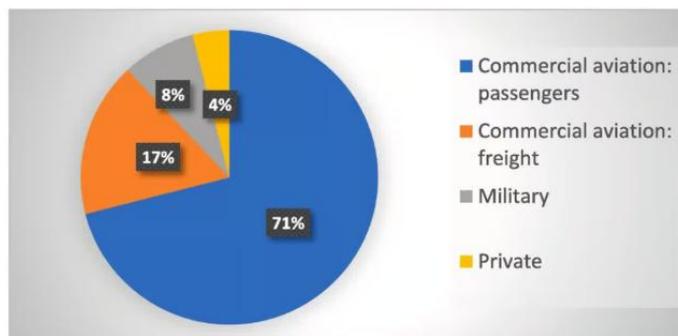


On peut donc considérer que l'aviation mondiale est responsable de 5% des effets du réchauffement climatique, malgré une hausse continue de l'amélioration de l'efficacité des avions (+2%/an depuis les 2 dernières décennies). Ces gains sont grevés par la hausse du trafic aérien (+4%/an sur la même période hors Covid) : c'est un effet rebond. Il ne faut pas confondre émissions en intensité (par passager.km) et émissions en absolu. Comme on économise du carburant, voler coûte moins cher, et donc on vole plus...

Les prévisions du secteur projettent une hausse continue du trafic aérien pour atteindre des niveaux multipliés par 2,3 en 2050 par rapport à ceux de 2019. En France, c'est l'un des rares secteurs à avoir augmenté ses émissions de GES, alors que le respect des accords de Paris impliquerait que chaque secteur décroisse de 5%/an ses émissions de GES.

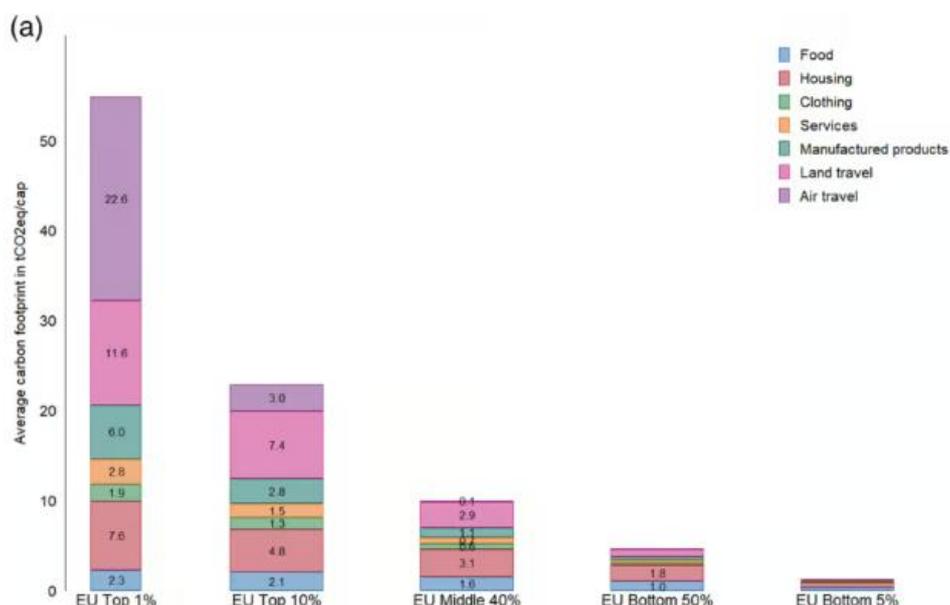


L'aviation commerciale de transport de passagers est quant à elle la principale activité émettrice de GES, avec 71% des émissions.



Crédit : Gössling & al. 2020
The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change

Parmi cette activité commerciale, **les vols pour le loisir représentent 75% des émissions de GES**. D'un point de vue de la justice sociale, 1% des usagers réguliers de l'avion sont responsables de 50% des émissions et 80% de la population mondiale n'a jamais pris l'avion.



[The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. Source : Ivanova & al. \(2020\)](#)

Le niveau des revenus conditionne fortement la part des émissions de GES liée au transport en avion. Jusqu'à 41%¹ des émissions de GES dans l'empreinte carbone des 1% des européens les plus aisés.

¹ [The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. Source : Ivanova & al. \(2020\)](#)

Les ressources nécessaires à la production des futurs carburants bas carbone destinés à l'aviation sont limitées et seront à l'avenir disputées avec d'autres secteurs majeurs (construction, mobilité, chauffage) pour assurer leur décarbonation. Le secteur aérien, responsable d'au moins 5% des émissions de CO₂, montre une dynamique de croissance importante difficilement conciliable avec les Accords de Paris. Ramenées au nombre d'utilisateur, ce secteur affiche des émissions de GES majeures dans le bilan carbone de ces derniers.

Un débat plus global doit être engagé pour planifier l'allocation des ressources primaires et prioriser les usages de ces futurs carburants et pour atténuer les questionnements d'injustice sociale.

Certains usages de l'avion (militaire, transports d'urgence, marchandises à haute valeur ajoutée...) conserveront cependant de toute évidence une part non-négligeables des déplacements. Même dans un scénario où l'usage de l'avion serait très fortement revu à la baisse, il serait donc toujours nécessaire de développer des carburants alternatifs bas carbone.

Avant-propos

The Shifters² est une association loi 1901, d'intérêt général, créée en 2014 pour apporter un soutien bénévole au laboratoire d'idées The Shift Project, dont l'action consiste à éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique. Initialement conçu comme une structure permettant d'accueillir toute personne souhaitant supporter le Shift Project dans son travail de recherche, de relais ou de soutien, nous sommes aujourd'hui un mouvement citoyen d'ampleur, fort de 4000 inscrits cotisants, dont l'ambition est de « faire shifter » la France.

The Shift Project³ est un *think tank* qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. C'est une association loi 1901 d'intérêt général, guidée par l'exigence de la rigueur scientifique. Notre mission consiste à éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique.



La réponse à la consultation publique du projet TAKE KAIR par le biais de ce cahier d'acteur est une initiative autonome du Groupe Local des Shifters de Loire-Atlantique (ou Shifters 44). Il s'appuie notamment sur les informations disponibles du projet mises à disposition par le porteur de projet : site internet⁴ de la consultation encadrée par la CNDP et des réunions d'informations auxquelles nos bénévoles ont pu participer.

Le cahier d'acteur propose un avis argumenté sur le projet TAKE KAIR en particulier et également une mise en perspective plus globale des carburants de synthèse destinés à l'aviation.

² <https://www.theshifters.org/association/qui-sommes-nous/>

³ <https://theshiftproject.org/ambition/>

⁴ <https://www.takekair-concertation.fr/>

THE SHIFTERS 44 tient à remercier le porteur de projet pour son invitation très précoce à participer à la pré-consultation publique et pour sa reconnaissance de la qualité de l'expertise sur les sujets Energie/Climat portée par notre association.

THE SHIFTERS 44 salue également la démarche de consultation large des parties prenantes et la volonté affichée de transparence du porteur de projet.

Liste des abréviations

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
ACV	analyse du Cycle de Vie
CAD	Carburant Aviation Durable
CARENE	Communauté d'agglomération de la région nazairienne et estuaire
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CNDP	Comité National du Débat Public
CPT	Centre de Production Thermique
ENRi	Énergie Renouvelables intermittentes (Photovoltaïque, éolien)
e-SAF	electrical sustainable aviation fuel
GES	Gaz à effet de serre
GHG	GreenHouse gas = GES
GIFAS	Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales
GO	Garantie d'Origine
IATA	International Air Transport Association
IFPEB	Institut Français pour la performance du bâtiment
ISAE	Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace
Mds€	Milliards d'euros
MJ	Méga joule (10e6 joules)
MTep	MégaTonne équivalent pétrole = 11.63TWh
PPA	Power Purchase Agreement
PRG	Pouvoir Réchauffant Global en équivalent CO2
PTEF	Plan de Transformation de l'Économie Française
PtL	Power to Liquid ("électricité vers carburant")
RE2020	Réglementation Énergétique 2020 - Construction
RED III	directive révisée sur les énergies renouvelables
RWGS	Reverse Water Gas Shift
SAF	Sustainable Aviation Fuel (CAD)
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone
TRL	Technology Readiness Level - "Taux de maturité technologique" de 1 à 9
TWh	TéraWatttheure (10e9 kWh)
ZAN	Zéro artificialisation nette

Table des matières

1 LE PROJET TAKEKAIR	10
1.1 Présentation.....	10
1.2 Les impacts environnementaux	12
1.3 Les ressources nécessaires.....	15
1.4 Benchmark des projets en France.....	22
2 PRIORITE D'USAGES DE L'HYDROGENE	25
2.1 Scénarios énergétiques	25
2.2 Orientation des usages.....	31
2.3 Trajectoire de décarbonation de l'aviation.....	36
3 CONCLUSION	42
4 BIBLIOGRAPHIE	44

1 Le projet TakeKair

1.1 Présentation

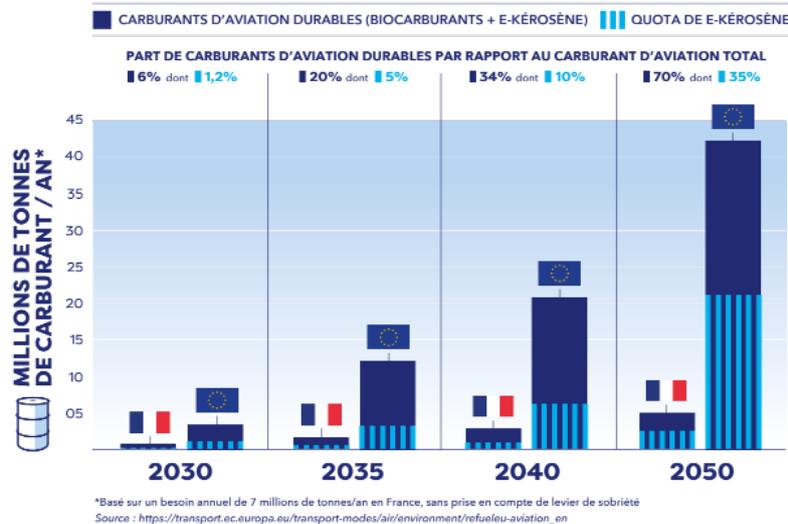
Le projet TAKEKAIR, porté par HYNAMICS et RTE, ambitionne de produire des électro-carburants pour l'aviation (en 1^{er} chef AIR France à ce jour) à partir d'hydrogène issu d'électrolyse, recombinaé avec du CO2 biogénique capté dans une cimenterie LAFARGE issu de la combustion de bois déchet.



Les acteurs du projet TAKEKAIR

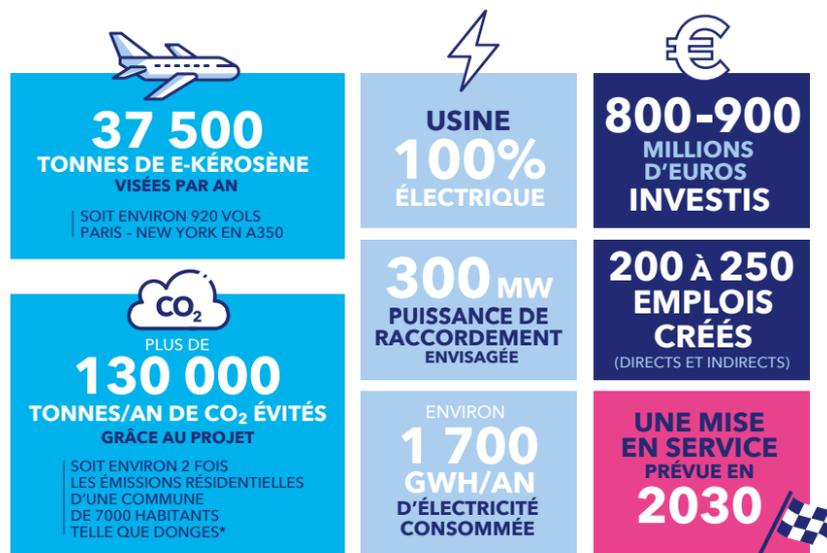
Cet électro-carburant, incorporé dans du kérosène fossile devient une obligation réglementaire (REFUEL UE) pour le secteur de l'aviation.

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



Extrait dossier TAKEKAIR

Le dossier de présentation public du projet TAKEKAIR, affiche les données clés du projet.



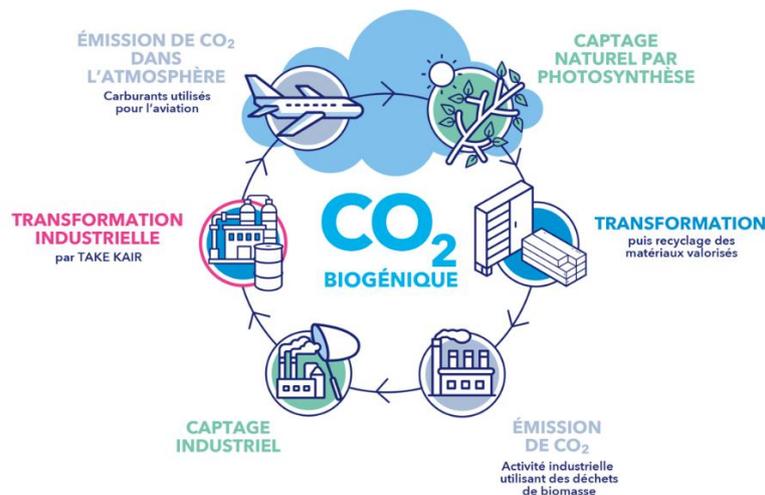
*En France, les émissions de CO₂/habitant étaient estimées en 2022 à environ 9,2 tonnes de CO₂/an selon le Rapport du Ministère de la Transition Écologique - Inventaire des Émissions de GES.

Extrait dossier TAKEKAIR

1.2 Les impacts environnementaux

1.2.1 L'analyse du cycle de vie

Le projet annonce une réduction d'environ 80% des émissions de CO₂ par rapport à un kérosène d'origine fossile⁵, dont 78% de ce gain interviennent pendant la phase de combustion du carburant, notamment par l'utilisation de CO₂ biogénique (cycle court du carbone).



Malgré l'absence du détail du calcul de l'ACV et des hypothèses associées (demande faite en séance publique), l'ordre de grandeur du gain en émission de CO₂ est plutôt bon, seulement avec l'utilisation de CO₂ biogénique et d'électricité bas carbone. Cependant, les effets des traînées ne sont pas pris en compte, et peuvent représenter une part majeure dans l'effet de serre⁶. En revanche, le CO₂ n'est pas le seul élément qui perturbe l'atmosphère : le e-kérosène n'a pas d'impact sur les NOX ou l'eau, car il s'agit du même type de combustion, et les traînées de condensation, bien que réduites par la présence moindre d'aromatiques dans le carburant (le carburant final est mélangé à 50% avec du kérosène fossile), demeurent présentes. Ainsi la réduction sur les **effets hors CO₂ ne serait que d'environ 12%**⁷, ce qui se traduit par une réduction globale **jusqu'à 50 % de l'impact climatique**.

⁵ 88gCO₂eq/MJ pour kérosène fossile

⁶ [The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 - ScienceDirect](#)

⁷ <https://www.carbone4.com/analyse-faq-aviation-climat>

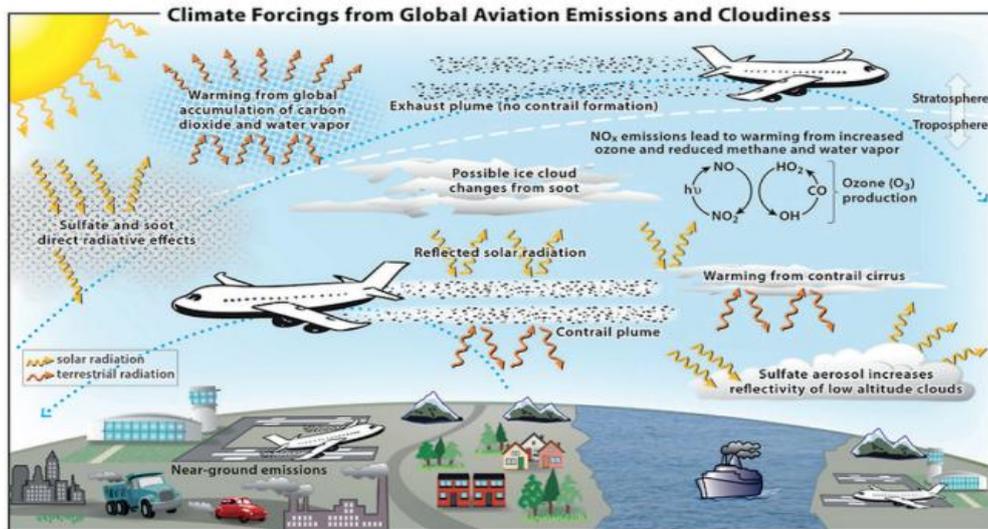


Figure 2 : Aperçu schématique des effets CO₂ et non-CO₂ de l'aviation (Lee et al.).

En séance, le porteur de projet précise en réponse à notre question, que les fuites d'hydrogène seront minimales mais sans quantifier un taux de fuite. Les fuites d'hydrogène seraient prises en compte dans l'ACV du projet. Etant donné le Potentiel de Réchauffement Global (PRG sur 100 ans) de 13⁸ de l'hydrogène, et la présence d'événements sur le processus de production d'hydrogène (et la complexité à garder étanche les réseaux hydrogènes), nous pensons que les valeurs du taux de fuites d'hydrogène du projet sont à préciser et à affiner lors de l'avancement du projet.

Par ailleurs, la technique de capture de CO₂ sur un procédé industriel implique une baisse de rendement de production à consommation énergétique constante d'environ 30%⁹. A priori ce rendement a été pris en compte dans le calcul ACV. Nous ne savons pas si le cimentier va réduire sa production de 30% pour conserver une consommation d'énergie constante ou s'il va augmenter sa consommation d'énergie de +30% pour maintenir sa production industrielle constante.

THE SHIFTERS 44 demande à nouveau à ce que l'ACV (détails du calcul + hypothèses, avec taux de fuite) du e-kérosène soit versée au débat public et remise à jour aux étapes clés du projet. A la vue des investissements majeurs sur ce projet, il serait pertinent de confier cette prestation à un cabinet spécialisé tiers. De plus, étant donné l'impact non-CO₂ des traînées de combustion, il serait judicieux d'intégrer cette donnée dans les communications.

⁸ <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/benefice-climatique-dune-future-economie-de-lhydrogene> .

France Hydrogène précise cependant que la durée de vie de l'H₂ est de 2 ans dans l'atmosphère. Il faudrait considérer un PRG (20 ans) de 32 : <https://www.france-hydrogene.org/publication/note-de-decryptage-les-fuites-dhydrogene-et-leur-impact-potentiel-sur-le-climat/>

⁹ https://www.linkedin.com/posts/jean-marc-jancovici_les-echos-viennent-de-consacrer-2-articles-activity-7251181706521493504-PfTj/?originalSubdomain=fr

1.2.2 Le cycle de l'eau

L'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène nécessite une consommation nette d'eau. Pour le projet TAKE KAIR, cette consommation¹⁰ est annoncée à 220 000 m³/an soit près de 3.6% de la consommation d'eau potable de la CARÈNE¹¹.

Un prélèvement d'eau complémentaire est également nécessaire pour les circuits de refroidissement. Celui-ci est estimé en valeur haute à 1 600 000 m³/an dont 90% serait rejeté dans le milieu naturel dans le cas d'un refroidissement par eau.

Un autre projet, porté par LHYFE, de production d'hydrogène par électrolyse est envisagé dans la zone.

La Banque Mondiale¹² précise que les besoins en eau pour la production d'hydrogène vont croître exponentiellement, dans un contexte de réchauffement climatique et d'augmentation de stress hydrique chronique. De plus, la moitié des projets prévoient de s'installer dans des zones présentant un stress hydrique moyen à élevé.

Figure 17: Annual water demand to 2050 from clean hydrogen by production route

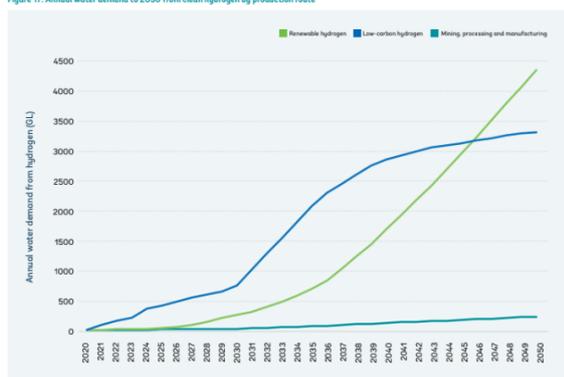
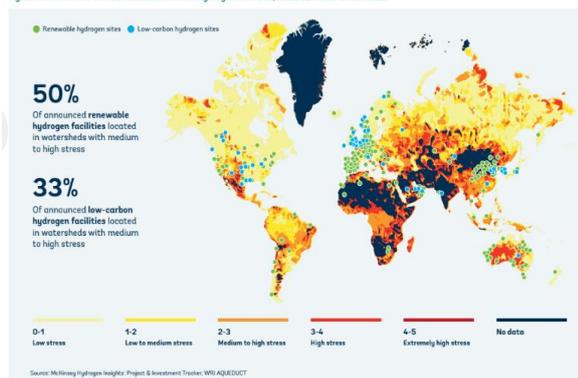


Figure 18: Announced low-carbon and renewable hydrogen locations, and 2020 watershed stress



THE SHIFTERS 44 demande une analyse plus fine des impacts sur le cycle de l'eau local, en intégrant une vision plus globale des projets d'électrolyses envisagés et en anticipant les impacts du réchauffement climatique sur le cycle de l'eau local.

¹⁰ Cette eau sera restituée au milieu naturel lors de la combustion du e-kérosène dans une autre zone

¹¹ Les 10 communes de la CARENE (agglomération de St Nazaire) consomment 6 millions de m³/an

¹² [Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen](#)

1.2.3 Résilience vis à vis des aléas climatiques

Le projet prévoit de s'installer dans l'estuaire de la Loire (soumis au marnage). La création d'une plateforme surélevée est prévue mais sans indication sur la cote retenue en réponse à notre interrogation en séance.

THE SHIFTERS 44 préconise une approche prudente pour réduire la vulnérabilité du site, et de retenir des hauteurs d'eau prévues par les scénarios d'évolution du réchauffement climatique les plus pessimistes. THE SHIFTERS44 demande le détail des définitions des hauteurs d'installation retenues et une clarification sur la concomitance des effets du réchauffement climatique (en particulier sur les hauteurs d'eau) et de l'aléa sismique.

Par ailleurs, la réglementation limite la température (en différentiel avec la température de prélèvement et en valeur maximale absolue) de rejet des effluents en Loire (ici l'eau nécessaire au refroidissement). Les mêmes dispositions s'imposent au Centre de Production Thermique (CPT) EDF de Cordemais et ont déjà conduit la centrale à réduire voir stopper sa production à cause de cette contrainte.

Les effets du réchauffement climatique sur la Loire réduiront le débit (-20 à -50% d'ici 2050¹³) de la Loire et pourront impacter le fonctionnement de l'installation TAKE KAIR. Un fonctionnement intermittent des électrolyseurs réduit la durée de vie de l'équipement¹⁴.

1.3 Les ressources nécessaires

Objectif

Au-delà du projet TAKE KAIR, les SHIFTERS 44 souhaitent apporter au débat public un éclairage plus global sur la place de l'hydrogène dans les scénarios de transition énergétique et sur l'usage de cet hydrogène pour la décarbonation du secteur aérien en s'appuyant sur une bibliographie jugée fiable, détaillée en fin de document.

Le bouclage selon les SHIFTERS

Les Shifters estiment que l'analyse des stocks et des flux physiques de matières et d'énergie est un socle irremplaçable pour toute analyse prospective, car la rareté, qui dessine la frontière entre le possible et l'irréalisable, est de nature physique avant tout. Les différents secteurs sont interdépendants,

¹³ [Impacts du changement climatique sur le bassin de la Loire & ses affluents](#)

¹⁴ [Hydrogène et énergies renouvelables : pourquoi l'intermittence pose problème ?](#)

et la vérification d'une cohérence interne permet ainsi un recensement des besoins physiques de la feuille de route décarbonée proposée.

Le bouclage est une façon de répondre à ces besoins de la manière la moins carbonée possible. L'intégration de la "ressource humaine" permet également une vision cohérente. Un rebouclage général entre les secteurs assure une compatibilité entre les ressources globales disponibles et les besoins de chaque secteur et évite le risque de conflits d'usage entre les besoins. Ce travail, certes conséquent, ne peut pas être évacué pour ce motif. Car il permet de proposer une feuille de route réaliste avec les ambitions de la trajectoire.

1.3.1 Les besoins en matériaux

La Banque Mondiale projette les besoins en ressources métalliques et minières du secteur de production hydrogène. Il apparaît des augmentations de matières premières (pour les électrolyseurs, réacteurs..) très importantes sur des ressources déjà identifiées en tension dans le futur par l'AIE¹⁵ **pour la transition énergétique** (électrification des usages, énergies renouvelables intermittentes, réseaux électriques).

Figure 5: Cumulative gross demand up to 2050 for Al, Zn, Cu and Ni from the hydrogen sector

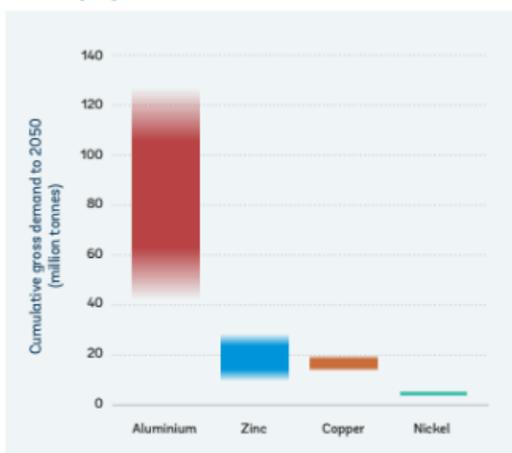


Figure 7b: Cumulative gross demand up to 2050 for Pt and Ir from hydrogen production under various assumptions

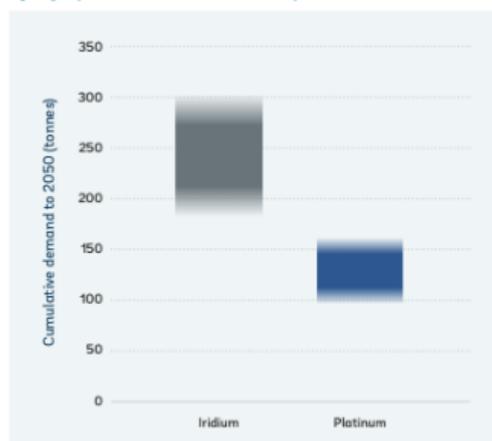
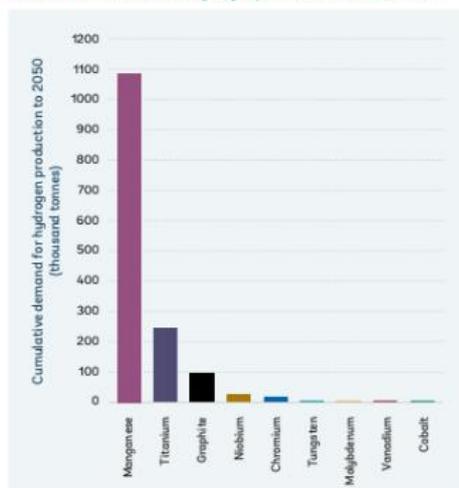


Figure 7a: Cumulative gross demand up to 2050 for Mn, Ti, Graphite, Nb and Cr, W, Mo, V and Co from hydrogen production in base scenario¹⁶



¹⁵ [The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions](#)

D'après la FAQ, la technologie PEM est privilégiée pour le projet. Cette technologie repose sur l'accès à un grand nombre de ressources rares comme le platine, le titane ou l'iridium. Il a été documenté que la technologie PEM est plus exposée que la technologie Alkaline à la criticité de l'accès aux matériaux clés (voir par exemple <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.6487>)

De plus, il faut considérer la durée de vie de l'électrolyseur (1 à 15 ans) au regard du contexte géopolitique. La pérennité des fournisseurs et des pièces de rechange peut s'avérer plus compliquée en cas de tensions politiques, droits de douane, protectionnisme avec les principaux pays fournisseurs (LONGI chinois ou PLUG POWER aux USA, par exemple).

Le choix de technologie d'électrolyseur conditionne le projet à une dépendance à des ressources rares et à des fournisseurs bien particuliers. Une attention doit être portée au risque que comporte la stratégie d'approvisionnement en électrolyseur portée par le projet TAKE KAIR.

Les contraintes amont sur la disponibilité des matériaux pourraient contraindre les ambitions et perspectives de production d'e-carburant et d'hydrogène plus globalement.

THE SHIFTERS⁴⁴ préconise de challenger la stratégie d'approvisionnement en électrolyseur (et pièces de rechange), en particulier si le fournisseur n'est pas Européen.

1.3.2 Le CO2 biogénique (et biomasse)

Le carbone biogénique est le carbone contenu dans la biomasse d'origine agricole ou forestière, émis lors de sa combustion ou dégradation, ainsi que celui contenu dans la matière organique du sol. Quelle que soit son origine, biogénique ou fossile, une molécule de CO2 agit de la même façon sur l'effet de serre. Cependant, au contraire des énergies fossiles, la biomasse peut se renouveler à l'échelle humaine, avec des cycles plus ou moins longs (cultures annuelles, forêts).

L'émission de la combustion du e-kérosène est comptée à 0 grâce au stockage de CO2 biogénique en amont (croissance de la plante, utilisation de CO2 capturé).

Il a été admis que, sous certaines conditions, les émissions de CO2 issues de la combustion du bois pouvaient être considérées comme équivalentes aux flux captés lors de la croissance de la biomasse, donc matérialisées par une valeur nulle. Ce bilan carbone global neutre a été considéré valable en France métropolitaine comme dans tous les pays où il y a peu de déforestation, pour l'ensemble de la biomasse agricole, et pour le bois lorsque les prélèvements restent en deçà de l'accroissement biologique forestier¹⁶ en attribuant ainsi l'accroissement forestier annuel au contrebalancement des émissions de CO2 biogéniques.

L'ADEME¹⁷ précise d'ailleurs que ces conditions (non déforestation et prélèvements en deçà de l'accroissement au niveau national) **sont nécessaires mais non suffisantes** pour évaluer l'impact climatique des émissions de CO2 d'origine biogénique. En effet, elles ne permettent pas de tenir pleinement compte des impacts de changements de pratiques de gestion forestières ou agricoles sur les stocks et les puits de carbone. **L'hypothèse d'une combustion du e-kérosène par l'utilisation de CO2 biogénique égale à 0 émission de CO2 ne sera peut être pas valable jusqu'en 2050** à la vue de la dégradation actuelle des puits de carbone des forêts et des besoins croissants de la biomasse (séquestration carbone dans la construction pour le Bois d'Oeuvre et ses dérivés, Bois Énergie pour le chauffage). De plus l'ADEME, dans son rapport "Electro Carburant en 2050" alerte sur la dépendance créée par la nécessité de développer les usages énergétiques de la biomasse, ce qui n'est pas l'usage prioritaire dans la réglementation REDIII (d'abord Bois d'Oeuvre, puis Bois Industrie et enfin Bois Énergie). Enfin, l'utilisation massive de CO2 biogénique "entre en concurrence avec la nécessité de le stocker dans le sol et le sous-sol pour atteindre la neutralité carbone".

Concernant le projet TAKE KAIR, l'origine du CO2 biogénique est identifiée chez la cimenterie Lafarge Holcim de Saint-Pierre-La-Cour (53). Le CO2 biogénique sera capturé lors de la combustion de biomasse de produits de récupération (déchets bois B, mobilier, refus de tri...). Ce CO2 biogénique sera injecté et mélangé dans un pipeline (GOCO2¹⁸) relié au site de TAKE KAIR. Via un mécanisme de garanties d'origines, le projet TAKE KAIR utilisera l'équivalent de CO2 biogénique injecté.

Les bétons actuels du secteur de la construction basés sur la technologie de ciment CLINKER (que produit l'usine Lafarge Holcim) ne sont actuellement pas compatibles avec les seuils de la RE2020 pour l'échéance 2030, voir celle de 2027 (actuellement 210 kgCO2/m3 à 135 kgCO2/m3 selon SNBC 2030 à iso volume selon IFPEB). Pour décarboner leur activité, les cimentiers pourront utiliser de la biomasse pour produire la chaleur nécessaire à leur process et capturer puis valoriser (ou séquestrer¹⁹) le CO2 émis via des garanties d'origines (dont le principe ressemble à ceux du marché de l'électricité). Dans cette configuration, comment l'allocation du gain en CO2 sera-t-elle attribuée entre le producteur du CO2 et l'utilisateur?

En effet, si le producteur (Lafarge) peut se targuer d'une réduction de ses émissions car son CO2 est réutilisé, les émissions de CO2 évitées ne peuvent pas être en même temps accaparées par l'utilisateur final (ici TAKE KAIR).

Ce problème d'allocation²⁰ similaire a dû être arbitré entre les sidérurgistes qui valorisent les émissions évitées du laitier de hauts fourneaux car utilisé par les producteurs de ciment sans clinker mais également par ces mêmes cimentiers car il s'agissait d'un déchet.

THE SHIFTERS 44 s'interroge sur l'étude d'approvisionnement en CO2 biogénique issu de la cimenterie Lafarge sur le long terme, notamment en cas de baisse importante de l'activité du secteur de la construction dont les pratiques visent à réduire l'usage du béton pour tenir leur trajectoire de décarbonation et respecter la loi ZAN.

THE SHIFTERS identifie un potentiel conflit d'usage du bois déchet utilisé soit dans la construction pour les panneaux de particules soit dans le chauffage des réseaux de chaleur. Comment pourrait être sécurisé l'approvisionnement de ce gisement par le cimentier sur le long terme?

¹⁶ En France, le taux moyen de prélèvements de bois entre 2009-2017 pour l'ensemble des usages représente 60 % de l'accroissement biologique de la forêt. Les objectifs du développement du bois énergie établis dans les politiques publiques ont été fixés en s'assurant que le taux de prélèvement pour l'ensemble des usages reste en deçà de l'accroissement des forêts.

¹⁷ [CO2 biogénique](#)

¹⁸ Grand Ouest CO2 - projet global de capture, transport et liquéfaction du CO2

¹⁹ L'application industrielle d'enfouissement par l'industrie pétrolière consiste à injecter le CO2 dans les puits existants pour le mettre sous pression et faciliter l'extraction des derniers barils. [Injection de CO2, injection d'eau et extraction au gaz dans l'industrie pétrolière et gazière](#)

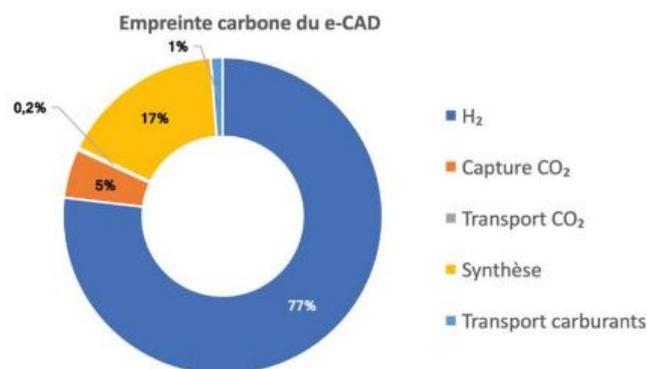
[Le CO2 du cimentier LafargeHolcim stocké dans les puits de pétrole d'Occidental](#)

[Stockage de CO2 : les manœuvres de Total](#)

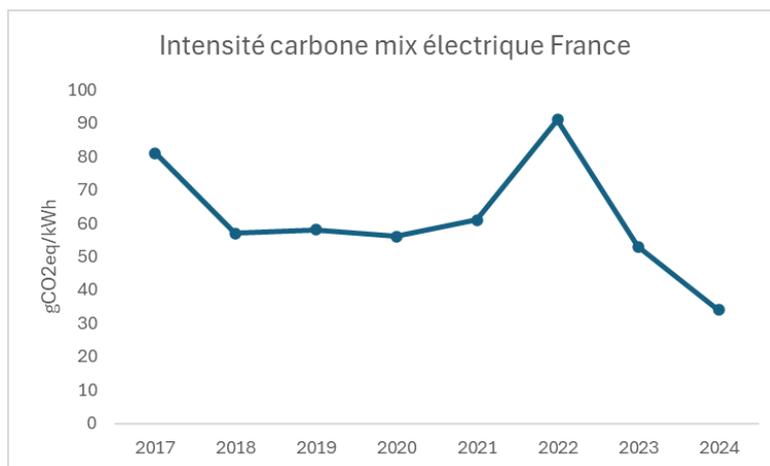
²⁰ [Allocation carbone des laitiers de haut fourneau et Déclarations Environnementales Produits \(DEP\) des ciments | Infociments](#)

1.3.3 L'électricité bas carbone

Le second levier de décarbonation de l'e-kérosène après l'utilisation de CO₂ biogénique est le recours à l'électricité bas carbone pour l'électrolyse de l'eau. Le procédé de production d'hydrogène est le principal contributeur d'émissions de CO₂ selon l'ACV du CAD de TAKE KAIR²¹.



Le porteur de projet précise en séance que l'intensité carbone du kWh retenu dans le calcul de l'ACV est de **19 gCO₂eq/kWh**, en deçà de l'intensité moyenne annuelle du mix électrique français.



Selon Electricity Map²²

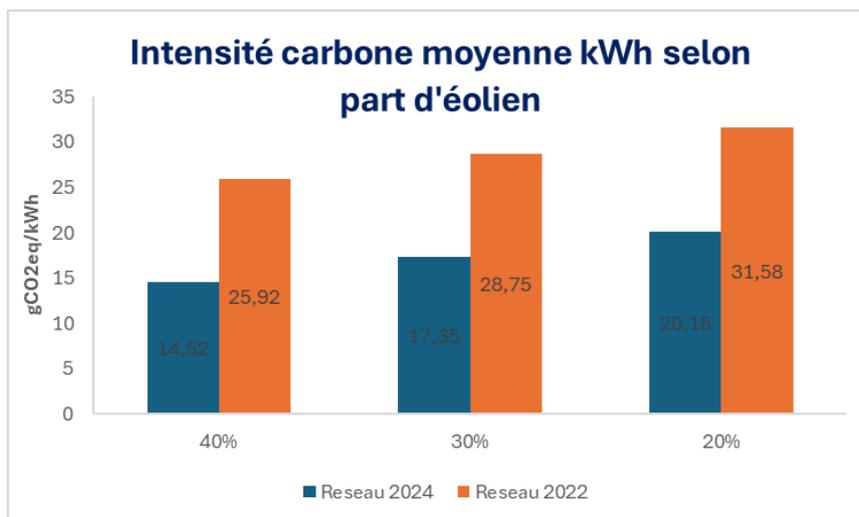
Pour parvenir à la valeur de 19 gCO₂eq/kWh, le porteur de projet aura recours à des garanties d'origines pour sa fourniture d'électricité et à des Power Purchase +Agreement (PPA²³). La répartition entre les différents moyens de production envisagée est : 40% PPA ENRi (a priori plutôt éolien offshore du fait de la proximité du parc offshore de St Nazaire) / 40% PPA Nucléaire²⁴ / 20% réseau public. En appliquant les facteurs d'émissions²⁵ de chaque moyen de production, des extremums de l'intensité carbone du mix réseau et la part d'éolien/photovoltaïque, nous aboutissons aux valeurs suivantes :

²¹ https://www.takekair-concertation.fr/media/c278d12de545ffad59b2/TAKE_KAIR-Fiches_the_matiques-web.pdf

²² [Electricity Maps](#)

²³ [Contrat PPA d'achat d'électricité & gaz : comment ça marche ? | Connaissances des énergies](#)

²⁴ A ce jour, la réglementation ne permet pas de genre de PPA



Pour maintenir l'objectif des 19 gCO2/kWh il faut que plusieurs conditions soient remplies :

- **Mix réseau fortement décarboné, disponibilité du parc nucléaire forte**
- **PPA ENRi avec environ 75%²⁶ minimum d'éolien offshore, le reste en photovoltaïque²⁷**
- **PPA Nucléaire autorisé par la réglementation**

Actuellement le mécanisme des garanties d'origines est le seul outil disponible pour prouver une démarche d'approvisionnement d'électricité renouvelable. Elle est cependant critiquée car la validité des certificats est trop longue et n'est pas limitée par les capacités physiques réelles de transport d'électricité. En effet, le mécanisme actuel des GO de l'électricité permet de prouver un approvisionnement d'électricité d'origine photovoltaïque depuis un pays européen dont les réelles liaisons électriques avec le consommateur ne permettent pas un transit des quantités d'électricité demandées, tout en consommant cette électricité la nuit (le raisonnement se base sur un volume annuel totalement désynchronisé).

²⁵ ADEME : 3.7 gCO2/kWh Nucléaire / 15.6 gCO2/kWh éolien offshore / 43.9 gCO2/kWh photovoltaïque

²⁶ 30% de PPA éolien au total soit 75% du PPA ENRi

²⁷ L'hydraulique n'est pas retenu car plutôt géographiquement éloigné

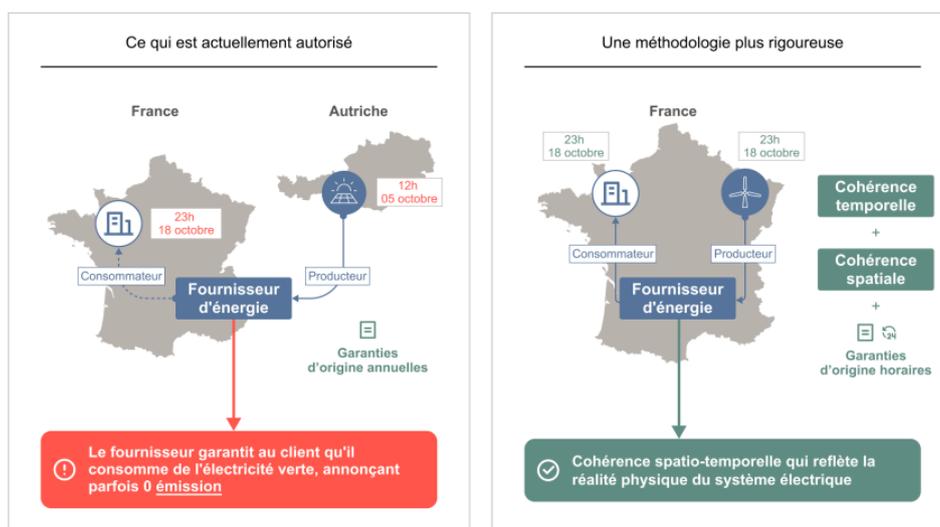


Image 1 - Illustration des incohérences spatiales et temporelles du système actuel de garanties d'origine

Le CEA préconise²⁸ d'ailleurs que le mécanisme des GO soit revu avec une validité des certificats ramenée à l'heure ou ½ heure et des volumes contraints par les capacités réelles des réseaux.

Le mécanisme des PPA semble plus approprié car la production ENRi est synchronisée avec la consommation. D'ailleurs, pour considérer l'hydrogène comme renouvelable dans la production de carburants renouvelables, la Commission Européenne²⁹ demande que les critères de temporalité et de localisation soient respectés : à partir de 2028, l'électricité renouvelable devra être produite dans la même heure que son utilisation et sur la même zone d'enchère (bidding zone).

THE SHIFTERS 44 s'interroge sur la solidité des hypothèses retenues (qui ne sont pas acquises à ce jour), dont dépend fortement la performance environnementale affichée du carburant. Nous invitons le porteur de projet à préciser à chaque étape du projet la validité de ces hypothèses.

²⁸ <https://www.cea.fr/Documents/positions-cea-UE/2020-09-CEA-UE-reponse-directive-energies-renouvelables.pdf>

²⁹ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2023.157.01.0011.01.ENG&toc=OJ%3AL%3A2023%3A157%3ATOC

1.4 Benchmark des projets en France

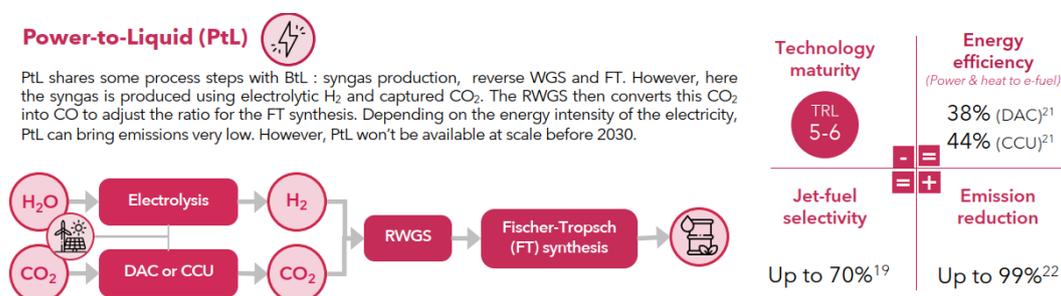
Nous avons pu synthétiser plusieurs données clés sur différents projets (non exhaustif) de production de e-carburant et d'hydrogène en France disponibles via la CNDP.

Chiffres clés projets H2							
	TAKEKAIR	DEZIR	H2V FOS	H2V Normandie	LiCHEN	ReSTART	EpHyne
Consommation électrique (TWh/an)	1,7	2,88	5,1	1,5			
Puissance électrique (MW)	300	400	750	200			
Production H2 (kT/an)		48	56	28	94	48	48
Production e-saf (kT/an)	37,5	81	-	-	153	81	81
Production e-methanol (kT/an)			135				
Conso CO2 (kT/an)	160	350			630	334	334
Conso eau (m3/h) (process)	39	100	140	69			
Emplois directs	100	100	165	70			
Heures de fonctionnement /an	5667	7200	8200	7500			
Capex (M€)	900	1300	910	240	2200	1400	1400
Gain emissions (kT CO2 / an)	-80% ?	200	800	550			
Ratios							
M€/Kt e-saf/an	24	16			14	17	17
MWh/Kt H2		60	91	54			
MWh/Kt e-saf	45	36					

Le projet TAKE KAIR affiche plusieurs valeurs qui nous semblent éloignées d'autres projets ou de ratios habituellement utilisés.

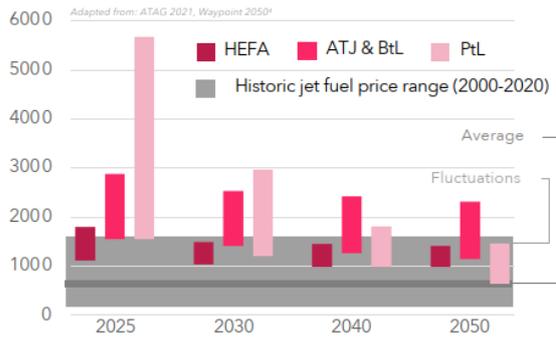
- La consommation d'eau apparaît sous estimée, (impact recyclage ?)
- Le nombre d'emplois directs générés semble sur-évalué,
- La consommation électrique (ou la puissance installée) semble quant à elle sous-évaluée,
- L'investissement (périmètre usine et raccordement électrique) apparaît sur-estimé

Sur ce dernier point, dont la viabilité du projet dépend, est peut être lié à la maturité technologique intermédiaire du RWGS (TRL de 6³⁰) ce qui serait cohérent avec le document de Zenon Research.

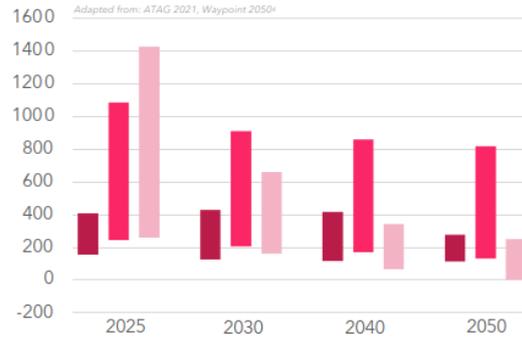


³⁰ TRL : à quoi ça sert ? - Grenoble INP - UGA

SAF production costs (\$/ton) compared to fossil jet fuel



GHG abatements costs of SAFs (\$/tonCO₂)



PtL

PtL is currently much more expensive than other SAF pathways but costs are expected to decrease rapidly as electrolyzer CAPEX, DAC costs and renewable electricity costs decrease. However, the price is so high now that it is unlikely to become competitive before the 2040s and thus airlines will still have to pay for a residual premium as the share of e-fuels increases.

Ce document conclut que la technologie retenue pour TAKE KAIR de production de e-kérosène est actuellement l'une des plus coûteuses et ne sera certainement pas compétitive avant 2040. Cependant, les espoirs (non acquis) de gains sur les électrolyseurs, les systèmes de capture de CO₂ et la baisse du prix de l'électricité issue des ENRi permettra d'afficher des coûts inférieurs au kérosène fossile.

On notera également que le coût d'abattement de la tonne de CO₂ fluctue de 300 à 1400 €/tonne. Il est plutôt de 250 €/tonne pour une voiture électrique.

THE SHIFTERS 44 souhaite que les données clés du projet soient régulièrement mises à jour à l'avancement du design du projet.

L'indicateur du coût d'abattement de la tonne de CO₂ pour le projet TAKE KAIR en particulier serait à calculer et à communiquer pour permettre des arbitrages d'allocation de ressources financières au besoin.

2 Priorité d'usages de l'hydrogène

Cette section a l'ambition de verser au débat public les tendances prospectives de la production d'hydrogène, notamment pour le secteur aérien, et l'électricité inhérente à sa fabrication ainsi que les préconisations d'arbitrages des usages de plusieurs organismes. Enfin, les trajectoires de décarbonation du secteur aérien proposés par les industriels du secteur seront confrontées aux perspectives d'autres professionnels de l'aérien de l'association AERO-DÉCARBO

2.1 Scénarios énergétiques

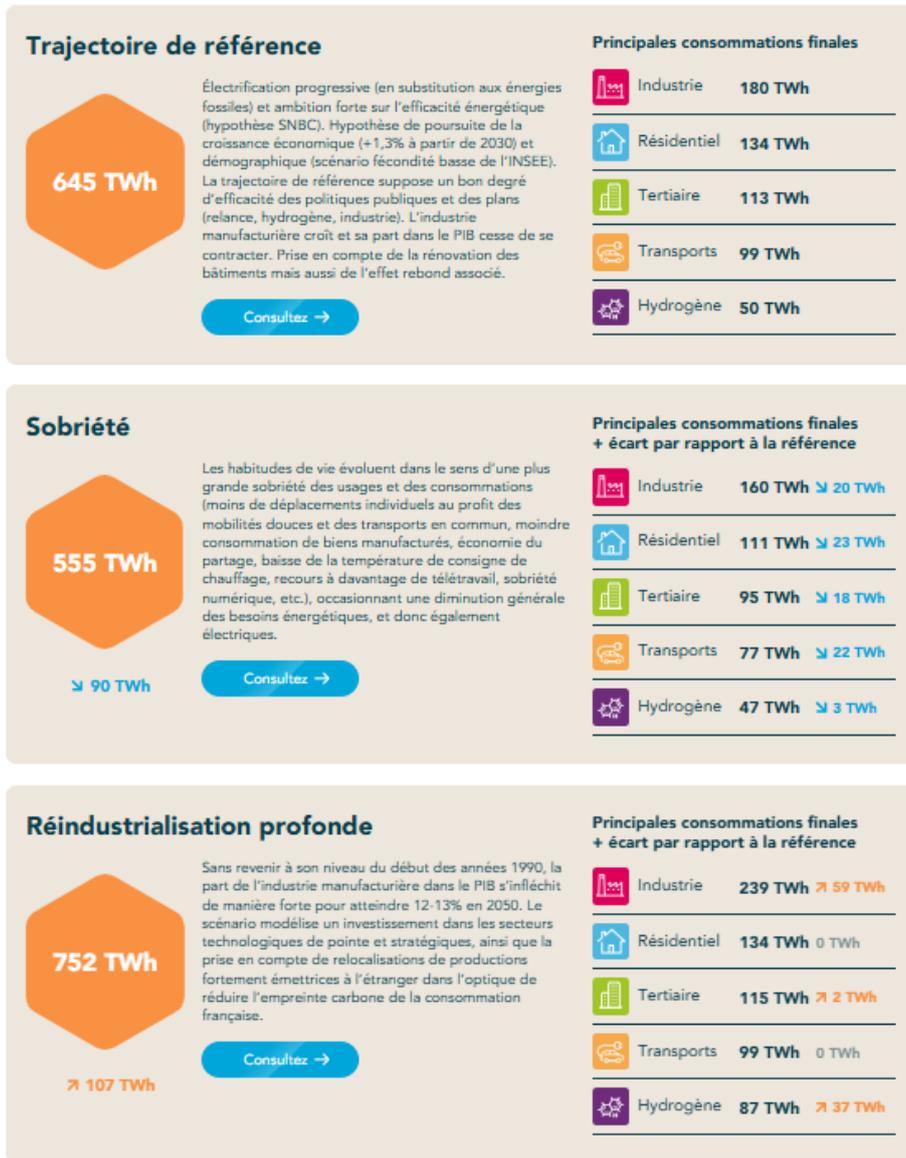
2.1.1 RTE "Futurs Énergétiques 2050"

Dans son exercice de prospective réalisé avec l'AIE, RTE a établi plusieurs trajectoires énergétiques de référence permettant de viser la neutralité carbone et l'équilibre du réseau. Pour chaque trajectoire est allouée une **quote part d'électricité dédiée à la production d'hydrogène, de 47 TWh à 87 TWh avec un valeur intermédiaire à 50 TWh en 2050.**

Sur la base de la consommation annuelle du projet TAKE KAIR (1.7 TWh), seulement 30 projets (pour 24 Mds€ sur la base du Capex TAKE KAIR) pourraient être alimentés en 2050, si on affectait l'intégralité de la production d'hydrogène à la production de e-CAD.

Cela permettrait de produire 1 125 000 tonnes de e-kérosène soit seulement 14%³¹ de la consommation de carburant de la seule flotte AIR FRANCE sur le territoire.

³¹ Site AF : 80 000T e-SAF = 1% en 2023.



Trajectoires RTE Futurs Énergétiques

En regardant dans le détail, quels sont les usages de l'hydrogène produit que RTE imagine, **seulement 5.5 TWh sont affectés au transport aérien** en 2050 dans les 2 scénarios extrêmes.



Dans ces conditions, l'étude prospective de RTE/AIE réserve l'équivalent de 3 à 4 projets similaires à TAKE KAIR en 2050 sur le territoire.

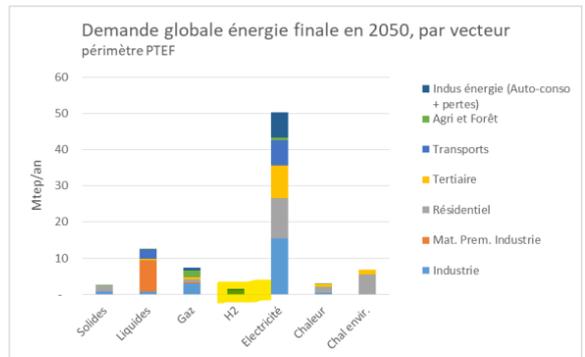
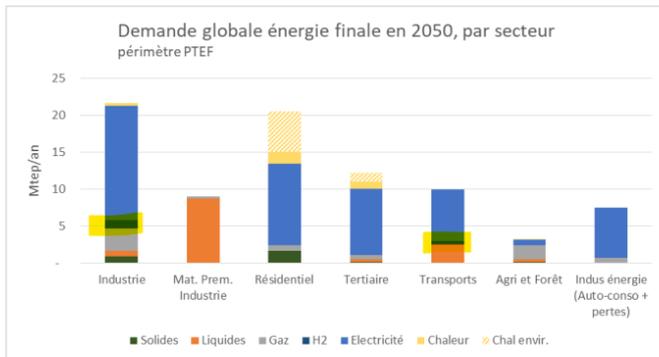
2.1.2 The SHIFT PROJECT “Plan de Transformation de l'économie Française”³²

Lancé par le Shift Project au printemps 2020, Le Plan de transformation de l'économie française (PTEF) vise à proposer des solutions pragmatiques pour décarboner l'économie, secteur par secteur, en favorisant la résilience et l'emploi. Né dans le sillage de la crise sanitaire du COVID 19, ce plan s'inscrit dans la perspective du fameux « monde d'après » et a vocation à alimenter le débat public, en particulier en amont de l'élection présidentielle de 2022. Il s'agit de concevoir à grande échelle un programme systémique de mesures opérationnelles destinées à rendre l'économie compatible avec la limite des 2 °C. Cela implique de libérer l'économie française de la double contrainte carbone en réduisant à la fois sa dépendance aux énergies fossiles et ses émissions de gaz à effet de serre.

La note d'évaluation du volet Énergie propose quant à lui le mix énergétique suivant :

³² [Publication du Plan de transformation de l'économie française – The Shift Project](#)

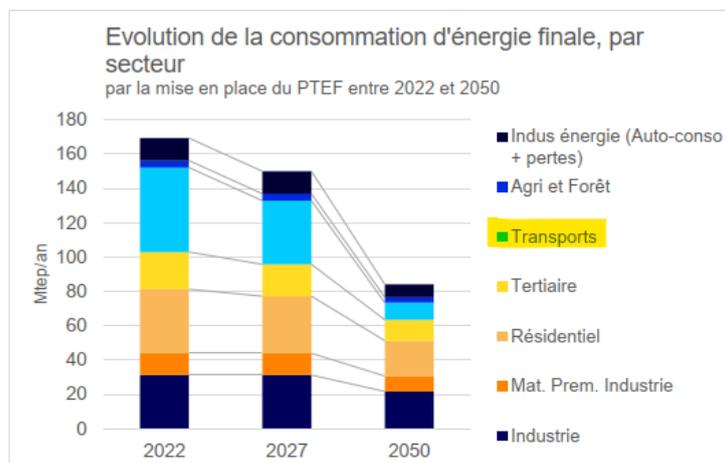
Energie (Mtep)	Biomasse énergie	Charbon	Déchets non renouv.	Fioul	Essence	Diesel	Kérosène	Autres (prod. pétr.)	GPL	H2	Elec.	Gaz hauts fourneaux	Gaz	Chaleur envir.	Solaire thermique	Chaleur de réseau	Total
Demande de l'Industrie	0,64	-	0,18	0,06	-	0,38	-	0,32	-	1,1	16	-	3,1	-	-	0,41	22
Demande du Résidentiel	1,6	-	-	-	-	-	-	-	0,05	-	11	-	0,76	5,5	-	1,6	21
Demande du Tertiaire	0,12	-	-	0,29	-	-	-	-	0,05	-	9,0	-	0,61	1,2	-	0,89	12
Demande des Transports	-	-	-	-	-	0,03	2,5	-	-	0,43	7,0	-	-	-	-	-	10
Demande de l'Agri & Forêt	0,14	-	-	-	-	0,30	-	-	-	-	0,81	-	1,9	-	-	0,03	3,2
Demande des secteurs (hors secteur de l'Energie)	2,5	-	0,18	0,35	-	0,70	2,5	0,32	0,10	1,5	43	-	6,3	6,8	-	2,9	68
Demande de l'Energie	4,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,1	-	1,1	-	-	-	15
dont auto-conso + pertes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,9	-	0,65	-	-	-	7,5
dont pour la Production d'électricité	3,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,09	-	-	-	3,5
dont pour la Production d'autres vecteurs finaux	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2	-	0,32	-	-	-	3,7
Demande non énergétique	-	-	-	-	-	0,77	-	7,9	-	-	-	-	0,32	-	-	-	9,0
Total à produire	2,5	-	0,18	0,35	-	1,5	2,5	8,3	0,10	1,5	50	-	7,3	6,8	-	2,9	84



L'évaluation énergie-climat du PTEF (relecture) – The Shift Project – février 2022



La demande en électricité en 2050 est de 50 Mtep soit environ 581 TWh (valeur proche du scénario sobriété de RTE) et 1.5 Mtep (17.4TWh) d'hydrogène sont nécessaires dont **seulement 0.43 Mtep (5 TWh) alloués au secteur des transport (aviation comprise).**



Toutes énergies confondues, le secteur des transports est le secteur qui présente l'effort de sobriété et d'efficacité le plus important.

2.1.3 ADEME “Electro Carburants en 2050”

En octobre 2023, l'ADEME a publié un rapport dédié aux électro-carburants (maritime et aviation notamment) selon 4 scénarios de besoins. Le rapport étudie les besoins en électricité et en CO2 biogénique. Le rapport se limite à regarder les besoins en électro-carburants et ne réalise pas de bouclage avec les autres secteurs d'activité.

Les besoins électriques pour la synthèse des carburants est dissociée des besoins électriques pour le captage du CO2.

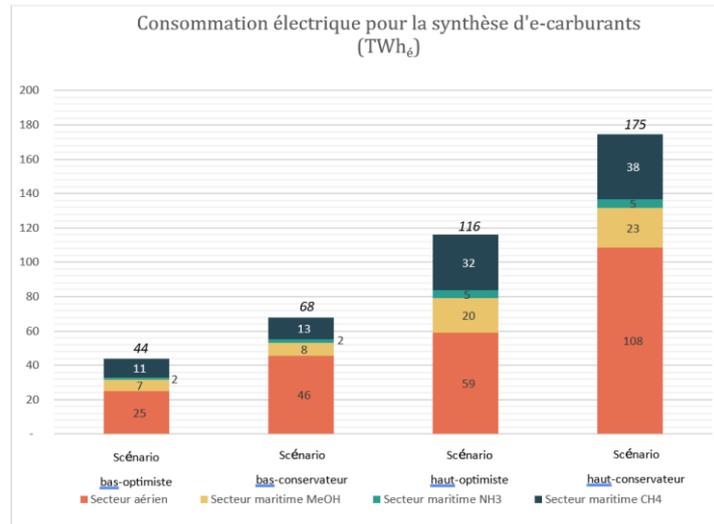


Figure 6 : Estimation des besoins en électricité (en TWh_e) selon la demande et les hypothèses technologiques

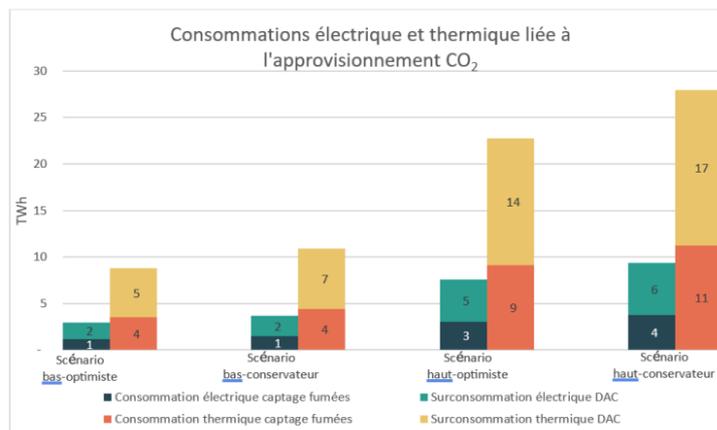


Figure 8 : Différences de consommations énergétiques selon le recours ou non au DAC

En ajoutant les besoins électriques, les valeurs extrêmes des besoins électriques passent de 31 TWh (62% de la production projetée pour l'hydrogène de RTE) pour le scénario le plus sobre à 125 TWh (150% de la production projetée pour l'hydrogène de RTE) pour le scénario le plus énergivore.

Même si l'exercice de bouclage avec les autres secteurs d'activité n'a pas été réalisé, l'ADEME préconise de retenir le scénario de sobriété pour permettre aux autres secteurs de se décarboner.

Ainsi, le déploiement « raisonné » des e-carburants, souhaitable pour ne pas pénaliser les autres secteurs qui auront besoin d'électricité et de CO2 pour se décarboner (industrie et transport notamment), nécessiterait la priorisation des ressources électriques et CO2 à l'échelle nationale, par exemple au sein de la future Stratégie Française Energie Climat, en parallèle de politiques court terme de modération de la croissance du trafic international, et de report vers d'autres modes de déplacement pour les courts courriers.

décarboner l'industrie et le transport lourd, etc. Ainsi la priorisation d'usage doit être pensée lors de la planification afin d'éviter une cannibalisation des gisements (d'électricité et de CO₂ biogénique) par un rapide déploiement d'unités d'e-carburants qui nuirait à la décarbonation des autres secteurs, rendant ainsi impossible un bouclage énergétique et climatique à horizon 2050. Une mesure possible pour limiter ce risque serait de définir des quotas maximums d'allocation des ressources (électricité, CO₂, pour 2030 et 2050) pour la production d'e-fuel pour les différents secteurs au sein de la prochaine SFEC-PPE et des différentes stratégies sectorielles (hydrogène, CCUS, transports, produits biosourcés et carburants durables...)

2.1.4 GIFAS “Feuille de route de décarbonation de l'aérien

Les industries du secteur aérien ont produit une feuille de route pour décarboner leur secteur et tenir les trajectoires de la SNBC 2, et anticiper celles de la SNBC3.

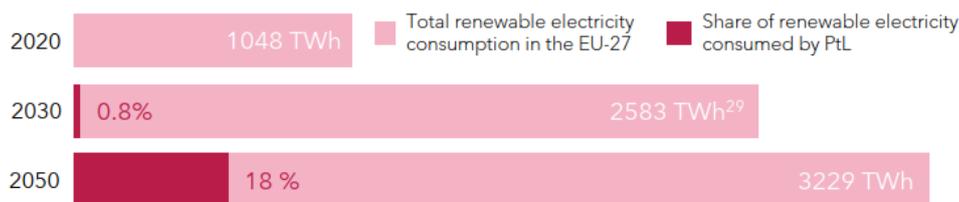
2 scénarios sont proposés : ACTION” et ACCÉLÉRATION, déclinés pour l'aérien domestique et international.

Emissions CO2 mondiales aviation 2019 915 Mt	Emissions CO2 2019 (Mt)	Scénario	Projection d'activité décarbonée en 2050	Biomasse dédiée CAD 2050 (Mt)	Energie électrique décarbonée dédiée 2050 (TWh)	Part de la production selon scénario RTE
France (métropole et outre-mer)	5,4	Action	-79%	1,2	11,4	1,8%
		Accélération	-92%	0,8	20,5	3,2%
International départ France	19,2	Action	-77%	9,4	45,5	7,1%
		Accélération	-91%	6,7	92,4	14,3%

Les besoins en électricité s'établissent en cumulé (domestique + international) entre 56.9 TWh et 112.9 TWh, bien au-delà des valeurs anticipées pour cet usage par RTE (5.5 TWh pour la production d'hydrogène destiné à l'aérien) et supérieurs aux projections sobres de l'ADEME (31 TWh) pour les électro carburants de l'aérien.

Ces ordres de grandeurs des besoins du secteur aérien sont confirmés par la note de *Zenon Research* et *MINES PARIS*, à savoir un **besoin électrique d'environ 18% de la production totale d'électricité** en 2050 dans le scénario EU REF 2020 net-zéro³³.

³³ [EU Reference Scenario 2020 - European Commission](#)



Les auteurs précisent que cette production de e-CAD est très énergivore et que la nécessaire électrification de nombreux usages pour leur décarbonation va rendre rare l'électricité bas-carbone.

L'exemple du projet TAKE KAIR va capter près de 7%³⁴ de la consommation électrique actuelle de la Région Pays de la Loire pour produire l'équivalent de carburant nécessaire à 900 vols Paris/NY.

THE SHIFTERS 44 constate que les scénarios énergétiques considérés comme sérieux, n'envisagent pas une disponibilité d'électricité bas carbone à la hauteur des attentes des acteurs de l'aérien pour produire assez de e-carburants nécessaires selon ces derniers pour atteindre trajectoires de décarbonation du secteur de l'aviation.

L'absence de planification des usages de l'électricité bas carbone entraînera un retard de décarbonation sur d'autres secteurs d'activités de l'Economie.

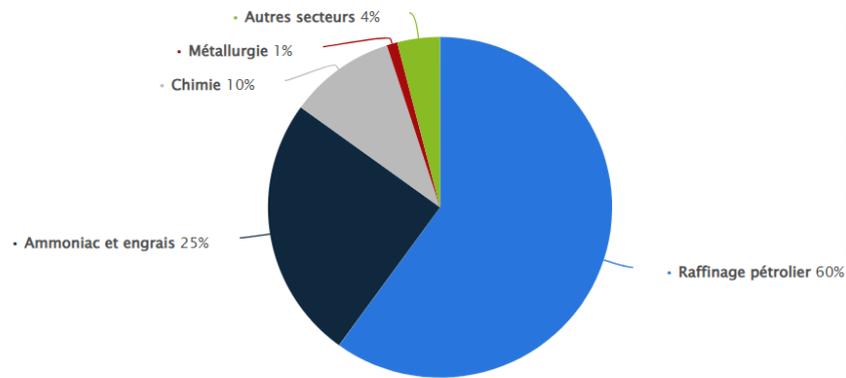
2.2 Orientations des usages

L'hydrogène est produit actuellement à 95% à partir d'énergie fossile dont la moitié à partir de gaz. L'empreinte carbone pour produire 1kg d'hydrogène est d'environ 15 kgCO₂eq.

En 2019, la demande mondiale d'hydrogène s'élève à 110 millions de tonnes, dont environ 1 million de tonnes pour la France, répartie selon ces usages³⁵ :

³⁴ 23.8TWh de consommation électrique en PDL en 2021

³⁵ [Hydrogène : consommation selon le secteur en France | Statista](#)



La décarbonation de l'hydrogène est incontournable pour de nombreux secteurs dont les substituts restent compliqués. Les usages possibles de l'hydrogène identifiés dans l'étude³⁶ **CARBONE 4** sont :

Industrie	Transports	Énergie
Production d'ammoniac	Maritime	Consommation en mélange dans les réseaux de gaz
Production de méthanol	Aérien	Stockage pour le système électrique
Production d'acier	Routier : camions	Raffinage
Usage chaleur	Ferroviaire	

Une synthèse de priorisation est également disponible mettant en avant les usages à privilégier et la temporalité de déploiement.

³⁶ [Hydrogène bas carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné](#)

	Pertinence de l'H ₂ bas-carbone	Pouvoir unitaire de décarbonation ¹	Horizon temporel	Alternatives décarbonantes, complémentaires ou concurrentes	Potentiel H ₂ bas-carbone en 2030 : borne haute (MtH ₂)	
Industrie	Production d'ammoniac	✓	-73%	⌚	CCS sur le site de production	5
	Production de méthanol	✓	-70%	⌚		10
	Acier : DRI à l'H ₂	✓	-76%	⌚⌚	CCS sur le site de production, voie recyclage de la ferraille par four électrique, réduction directe « gas based »	3
	Acier : injection dans BF-BOF	✗	-14%	⌚		n.a.
Mobilité	Ferroviaire	✓ / ~	-78%	⌚⌚	Electrification directe des voies, batteries	3
	Camions	~ / ✗	-70%	⌚⌚	Batteries, BioGNV, biocarburants 2G	4
	Maritime : LH2	✗	-44% [-89%]	⌚⌚⌚		n.a.
	Maritime ² : e-ammoniac	~	-39% [-60%]	⌚⌚	Bioénergies : bioliquides 2G et BioGNL 2G	6 ³ 30 ³
	Maritime ² : e-méthanol	✓	-50% [-78%]	⌚		8 ⁴ 20 ⁴
	Maritime ² : e-GNL	✓	-53% [-79%]	⌚		4 ³ 15 ³
	Aérien court à moyen courrier : usage direct	✗	-64%	⌚⌚⌚	Batteries, biocarburants	n.a.
	Aérien : synfuels	✓	-42%	⌚⌚		-0
	Énergie	Consommation en mélange dans les réseaux de gaz	✗	-4%	⌚	Biogaz et gaz de synthèse
Stockage pour le système électrique		Nécessaire si bcp d'EnRv ⁵	n.a.	⌚⌚	Réservoirs hydrauliques	9
Raffinage		~	-18%	⌚ Transitoire	CCS sur le site de production	25

Notes : ⁽¹⁾ Pour les carburants maritimes, la fourchette haute correspond à une variante utilisant un hydrogène très-bas-carbone, à 1 kgCO₂e / kgH₂, c'est-à-dire à une électrolyse à partir d'une électricité avec un contenu carbone autour de 20 gCO₂e / kWh. En outre, des hypothèses plus optimistes ont été prises pour le e-GNL concernant les taux de fuites et la consommation d'énergie pour la liquéfaction. | ⁽²⁾ Les 3 potentiels pour le secteur maritime ne se somment pas : ils correspondent aux potentiels pour 3 variantes d'un scénario de décarbonation du secteur privilégiant, chacune, un carburant de synthèse. Ces scénarii sont décrits dans les notes ci-après. L'intervalle correspond aux résultats selon que l'on fait l'hypothèse d'une forte ou faible disponibilité de biocarburants 2G. | ⁽³⁾ Le scénario e-GNL (resp. e-ammoniac) considère que les nouvelles motorisations dédiées aux fuels de synthèse tourneront exclusivement au e-GNL (resp. e-ammoniac) en mobilisant les volumes d'hydrogène représentés en dernière colonne. Ce scénario prévoit également une consommation additionnelle (non représentée ici) de 5 MtH₂ pour la production de e-méthanol, utilisé comme carburant pour les unités retrofitées de la flotte. | ⁽⁴⁾ Le scénario e-méthanol ne prévoit que l'utilisation de méthanol, pour les unités retrofitées et les nouvelles motorisations. | ⁽⁵⁾ Énergies renouvelables variables.

Les principaux enseignements de cette étude :

- Pour les usages actuels de l'hydrogène que sont la production d'ammoniac, principalement destiné à la fabrication d'engrais, et la production de méthanol, **il est nécessaire et prioritaire de substituer cet hydrogène fossile par de l'hydrogène bas-carbone afin de décarboner ces usages pour lesquels peu d'autres leviers existent.**
- **La sidérurgie (pour la réduction directe du minerai de fer) et le secteur maritime (pour la production de e-GNL et e-méthanol) auront nécessairement un besoin en hydrogène bas-carbone à moyen terme pour suivre leur trajectoire 2°C.** Pour ces deux secteurs, l'hydrogène est à la fois incontournable et complémentaire avec d'autres solutions : le développement de la voie du recyclage et la capture du carbone pour l'acier, les bioénergies pour le maritime. En ce qui concerne les carburants maritimes, le e-GNL peut être aisément utilisé dans les navires GNL actuels ou en cours de construction, afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'économiser du gaz naturel.

- **L'utilisation d'hydrogène comme brique de flexibilité pour les systèmes électriques sera probablement incontournable, à moyen terme et surtout à long terme**, pour accompagner le développement de moyens de production intermittents d'électricité, tels que l'éolien et le photovoltaïque.
- **Le secteur aérien aura également besoin d'accéder à l'hydrogène bas-carbone pour les carburants de synthèse**, là encore en complément des bioénergies, **mais à plus long terme** : les volumes potentiels en 2030 sont quasi-nuls. L'hydrogène en usage direct dans l'aviation quant à lui ne verra pas le jour avant 2035 car les technologies ne sont pas assez matures.

Le site [Comprendre les scénarios de transition 2050](#) qui vulgarise et concatène différents scénarios énergie-climat du SHIFT PROJECT, de l'ADEME et de NÉGAWATT, confirme également ces enseignements.

On peut y lire notamment dans les fiches "décryptage" sur l'hydrogène :

- ***"Hydrogène, quelle place dans la transition énergétique française"***³⁷

L'électrolyse à partir d'électricité décarbonée devient le mode de production central de l'hydrogène d'ici 2050 dans tous les scénarios. **Ainsi, la disponibilité en hydrogène décarboné sera limitée par la disponibilité de l'électricité.** Le déploiement rapide des premières capacités d'électrolyse d'ici 2030 est proposé par tous les scénarios. L'hydrogène décarboné pourrait également être importé, sous certaines conditions. Les usages de l'hydrogène devraient évoluer, avec de nouveaux débouchés en substitution à des solutions carbonées et le déclin de certaines applications actuelles. **Tous les scénarios s'accordent sur son utilisation pour produire des engrais et de l'acier décarbonés dans le futur.** Son usage pour la désulfuration des composés pétroliers devrait se réduire fortement, voire disparaître. Dans certains scénarios, l'hydrogène contribue à la production de plastique non fossile, à l'alimentation de transports lourds, ou encore à l'évolution des systèmes électriques ou gaziers. Enfin, tous les scénarios s'accordent sur le fait que l'utilisation d'hydrogène n'est pas une option pertinente pour décarboner les transports légers.

- ***"Comment l'hydrogène contribuera-t-il à décarboner l'industrie"***³⁸

L'industrie sera l'un des consommateurs majeurs d'hydrogène au cours de la transition. Pour la sidérurgie et la production d'engrais, l'hydrogène est l'un des seuls moyens envisagés de décarbonation. Les scénarios le mobilisent quasiment tous. La production de plastique pourrait davantage reposer sur l'hydrogène, si le choix politique en est fait. Cependant l'hydrogène ne pourra pas couvrir plus de la moitié de la production de plastique, **le volume global d'hydrogène étant limité par la disponibilité en électricité. Dans ce volume, d'autres usages sont jugés plus prioritaires**

³⁷ [Hydrogène : Quelle place dans la transition énergétique française ?](#)

³⁸ [Quelle place pour l'hydrogène dans l'industrie au cours de la transition ?](#)

pour l'hydrogène, comme la décarbonation de l'acier, des engrais, ou du méthane. L'utilisation d'hydrogène pour la désulfuration des composés pétroliers devrait se réduire fortement voire disparaître, avec la fermeture des raffineries fossiles. La plupart des scénarios parviennent d'ici 2050 à un arrêt des huit raffineries fossiles opérant actuellement en France.

Enfin, l'Académie des Sciences a publié un rapport sur l'hydrogène en 2024³⁹. On retrouve également les mêmes préconisations sur le nécessaire arbitrage de l'allocation de l'électricité bas carbone et de l'hydrogène produit.

le produire à partir du méthane⁶⁹. Il en découle qu'une utilisation d'hydrogène vert massivement supérieure à celle que nous consommons aujourd'hui, à des niveaux d'au moins 1 Mt et jusqu'à 4 Mt par an, comme cela est proposé dans divers scénarios pour la France (SNBC, RTE), ne pourra être effective qu'à la condition d'ouvrir, en nombre, de nouvelles capacités de production électrique bas carbone (parcs éoliens et solaires, et réacteurs nucléaires) et que ces installations soient opérationnelles d'ici 2050.

Comme nous l'avons déjà indiqué, en raison des rendements faibles des électrolyseurs (hors électrolyse à haute température, non mature industriellement pour le moment), la production d'1 Mt d'hydrogène stocké à 350 bar, contenant une énergie de 33 TWh, nécessite environ 55 TWh. Pour donner un ordre de grandeur⁷⁰, cela correspond à la production annuelle de 5 réacteurs nucléaires de type EPR ou de 8,5 réacteurs nucléaires actuels de 1 GW. RTE note, dans son rapport de 2020, que la production d'1 Mt d'hydrogène par électrolyse n'est pas un enjeu de production électrique car le besoin correspondant en électricité (environ 50 TWh) est équivalent à l'électricité que nous exportons dans les meilleures années⁷¹. À l'inverse, produire 4 Mt d'hydrogène vert (limite maximale des scénarios), nécessiterait 220 TWh d'électricité, soit l'équivalent de 20 réacteurs EPR, soit un nombre très supérieur à celui qui a été récemment demandé par le gouvernement français à EDF (6 réacteurs + 8 supplémentaires). Ces chiffres montrent clairement qu'il est irréaliste d'envisager beaucoup plus que 1 à 1,5 Mt d'hydrogène vert à l'horizon 2050, dans un contexte où la demande électrique va exploser pour assurer l'électrification du transport, du chauffage et de

procédés industriels. Si la demande était supérieure, la seule solution consisterait à répondre à cette demande par des importations issues de pays producteurs d'hydrogène vert, qui n'existent pas pour l'instant.

La même conclusion découle du calcul de la puissance d'électrolyseurs nécessaire. Le plus grand électrolyseur du monde, mis au point par Air Liquide au Québec et aujourd'hui fonctionnel, produit 8 tonnes d'hydrogène par jour grâce à une puissance nominale de 20 MW (technologie PEM). Un électrolyseur équivalent devrait être mis en fonction en Allemagne en 2024. Il n'en existe pas en France. Pour produire 1 Mt il en faudrait environ 350 en 2050, soit la mise en fonction de 15 installations de ce type par an environ⁷². Il convient de noter qu'Air Liquide travaille sur un électrolyseur alcalin de 200 MW, sans donner toutefois de date pour sa mise en fonctionnement.

Une production d'hydrogène coûteuse.

Le second problème, identifié depuis longtemps, est celui du coût de production de l'hydrogène vert. C'est évidemment un frein économique sérieux à son développement industriel d'autant que l'écart entre le prix du kg d'hydrogène vert et celui de l'hydrogène gris reste élevé et stable dans le temps (Figure 6). Alors que le second se situe entre 1 et 2 €/kg, le premier est en moyenne 4 fois plus élevé, se situant entre 4 et 8 €/kg, selon la technologie utilisée⁷³. Notons que 2/3 environ de ce coût est associée à la consommation d'électricité⁷⁴. C'est ce coût élevé qui explique que la demande d'hydrogène décarboné est actuellement faible, démotivant les efforts des producteurs potentiels⁷⁵.

En 2050, il est peu probable selon le rapport, que la production d'hydrogène vert dépasse les 2 Mt (soit environ 130 TWh d'électricité), à partager entre la production d'acier, la production d'engrais décarboné, les carburants de synthèse pour le transport maritime, la production de ciments bas carbone et le stockage stationnaire pour la stabilité du réseau.

³⁹ [L'hydrogène aujourd'hui et demain - Rapport de l'Académie des sciences](#)

Près d'un million de tonnes d'hydrogène sont actuellement nécessaires pour des usages industriels et agricoles et sont difficilement substituables et sont essentiels. Une quote part dédiée au raffinage d'hydrocarbure pourra à terme être affectée à d'autres usages.

THE SHIFTERS 44, est convaincu que les limites des flux physiques piloteront in fine les capacités de production d'hydrogène et de e-carburants.

THE SHIFTERS 44 préconise au porteur de projet d'étudier d'autres débouchés possibles pour la production d'hydrogène ou d'é-méthanol pour le transport maritime notamment au regard de l'implantation du site TAKE KAIR.

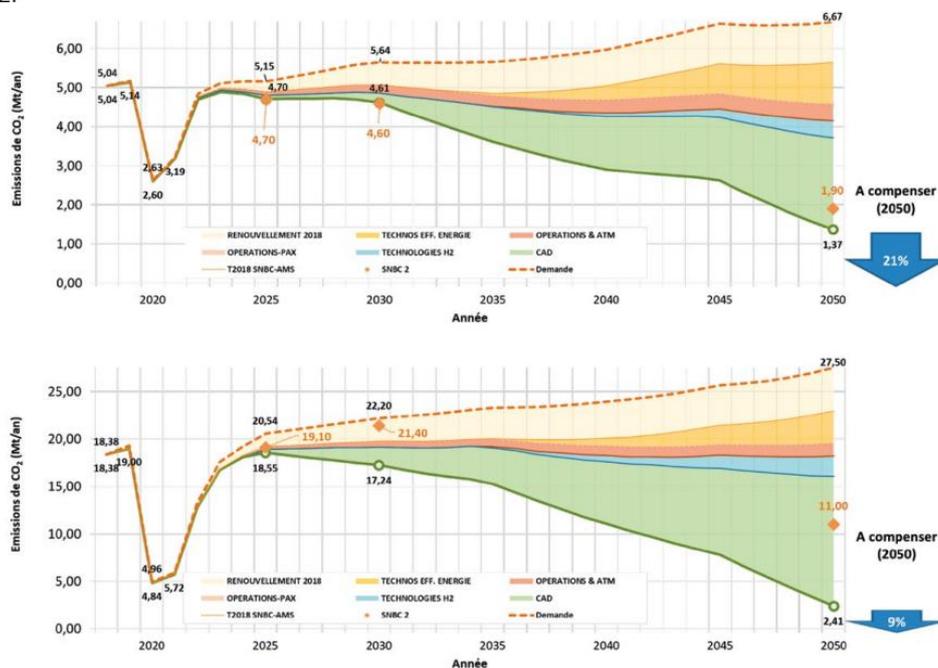
2.3 Trajectoire de décarbonation de l'aviation

2.3.1 GIFAS “Feuille de route de décarbonation de l'aérien”

Les industriels du secteur misent principalement sur les carburants d'aviation durable (CAD), le renouvellement de la flotte et l'efficacité énergétique (solutions technologiques) pour atteindre les trajectoires de décarbonation. Les gains espérés sur l'hydrogène (en combustion directe) seront à priori à reporter sur d'autres actions au regard des annonces de reports attendues sur le projet Hydrogène d'AIRBUS⁴⁰.

⁴⁰ [Airbus stoppe son projet d'avion à hydrogène... pour l'instant - ladepeche.fr](https://www.ladepeche.fr)

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).

Scénarios GIFAS

L'hypothèse de croissance retenue pour les 2 scénarios du **GIFAS** est de +0,8 % de passagers.km par an, en deçà des prévisions de l'International Air Transport Association (IATA) qui indique un trafic 2024 au niveau de celui de 2019 et une croissance de +4 %/an sur 2019-2039. En 2025, l'organisme prévoit même un record de 5,2 Milliards de personnes transportées, en hausse de +6,4 % par rapport à 2024⁴¹.

2.3.2 AERO DECARBO “Pouvoir voler en 2050”

L'association de professionnels de l'aérien **AERO DECARBO**⁴², qui se décrit composé “d'aérospatiophiles climato-concernés, qui revendiquent pouvoir faire partie de la solution plutôt que du problème, en portant une parole transparente, désintéressée et scientifiquement étayée sur ce que peut faire - mais aussi ne peut faire - le secteur aérospatial pour se décarboner.” a publié en 2021 en collaboration avec le SHIFT PROJECT un rapport sur les capacités de décarbonation du secteur aérien, avec 2 scénarios prospectifs “MAVERICK” (très ambitieux sur les technologies) et “ICEMAN”.

⁴¹ [Le transport aérien se prédit une année 2025 de tous les records, sauf en matière de décarbonation.](#)

⁴² [Aéro Décarbo](#)

	MAVERICK	ICEMAN
Gains en efficacité énergétique et sur les opérations au sol et en vol	Le gain en efficacité énergétique est une hypothèse raisonnable	
Roadmap industrielle d'arrivée sur le marché de nouveaux avions	Roadmap conforme aux prévisions les plus optimistes du secteur, détaillée par type d'avion, incluant : <ul style="list-style-type: none"> • Gains technologiques optimistes • Entrée en service de courts et/moyens courriers à hydrogène en 2035 • Entrée en service d'un long-courrier pouvant voler avec 100% de carburants alternatifs en 2035 	Décalage de 5 ans par rapport à Maverick.
Cadence de renouvellement des flottes	Tous les 15 ans	Tous les 25 ans
Priorité des carburants alternatifs pour l'aérien (production abondante pour les deux scénarios)	100% de la production de carburants alternatifs dédiée à l'aviation	50% de la production de carburants alternatifs dédiée à l'aviation
	■ Hypothèse raisonnable	■ Hypothèse optimiste ■ Hypothèse très optimiste

Supaéro Décarbo

Les principaux enseignements de ce rapport montrent que même en poussant tous les curseurs technologiques au maximum, une réduction du trafic aérien, ou du moins de sa croissance, est incontournable, notamment via la réglementation de l'usage en conséquence, la limitation de l'activité (limitation des créneaux aéroportuaires, encadrement des subventions, moratoires sur la construction de nouvelles infrastructures), par la restriction de la demande (modification du signal-prix, allocation de droits à voyager) ou encore par la fiscalité. Plus le retard est pris dans la décarbonation réelle du secteur et plus les efforts de sobriété et de réduction seront importants pour tenir les trajectoires de décarbonation.

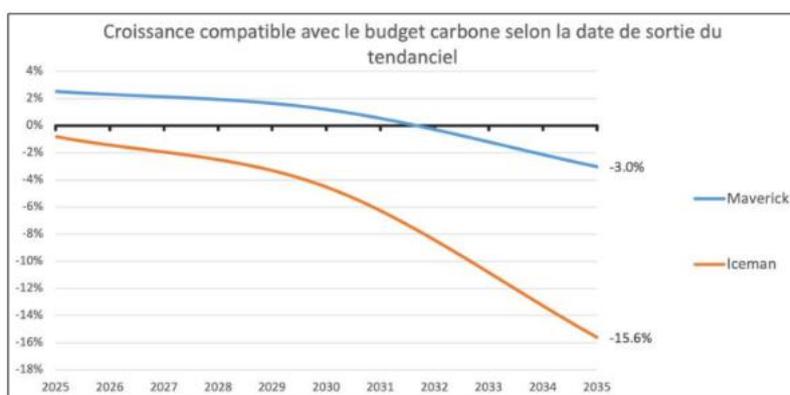


Figure 2 - Évolution de la croissance de trafic compatible avec le budget carbone en fonction de l'année où la trajectoire décroche du tendancier

2.3.3 ISAE SUPAERO “Référentiel AVIATION et CLIMAT”

Ces constats rejoignent les conclusions du référentiel de 2021 “AVIATION ET CLIMAT⁴³” de l’ISAE SUPAERO :

Impact climatique de l’aviation : des estimations qui dépendent du périmètre

L’aviation contribue à l’accentuation du réchauffement climatique via ses émissions de CO₂ et plusieurs effets non-CO₂ comme les traînées de condensation. L’évaluation de l’impact du secteur aérien peut se limiter aux seules émissions de CO₂, ou bien considérer l’ensemble des effets. Dans le premier cas, l’aviation commerciale a été responsable de 2,6 % des émissions anthropiques mondiales de CO₂ en 2018. Si l’on considère l’ensemble des effets (CO₂ et non-CO₂), l’aviation commerciale a représenté 5,1 % de l’impact climatique sur la période 2000-2018.

Effets non-CO₂ : des stratégies prometteuses

Les stratégies spécifiques de réduction des effets non-CO₂ représentent un levier majeur pour limiter l’impact climatique de l’aviation. En raison de la courte durée de vie des effets non-CO₂, ces stratégies peuvent être efficaces rapidement. Même si des travaux de recherche sont encore nécessaires pour réduire les incertitudes, ces stratégies pourraient être déployables à brève échéance. Néanmoins, ces mesures ne peuvent pas se substituer aux efforts de réduction des émissions de CO₂ du secteur.

Effets CO₂ : des opportunités technologiques limitées à court terme

D’ici 2050, des solutions de rupture permettent d’envisager un avion bas-carbone. À plus court terme, pour diminuer les émissions de CO₂ dans les délais impartis par l’urgence climatique, les seuls leviers matures sont les améliorations incrémentales de l’efficacité des avions et l’utilisation des biocarburants. Néanmoins, les améliorations incrémentales sont en passe d’atteindre des limites technologiques, alors que les contraintes de disponibilité énergétique, de capacité de production et de concurrence sur les usages risquent de limiter la disponibilité des biocarburants.

Un arbitrage nécessaire entre le niveau de trafic et la part du budget carbone mondial allouée au secteur aérien

Hormis les leviers technologiques et opérationnels, le niveau de trafic et la part du budget carbone mondial allouée à l’aviation sont les deux paramètres qui déterminent la durabilité d’une trajectoire pour le secteur aérien. Leur valeur doit être fixée par des décisions d’ordre politique. Les limites sur la capacité du secteur aérien à diminuer rapidement ses émissions de CO₂ impliquent que, si le trafic croît au rythme envisagé par l’industrie aéronautique, alors il consommera une part plus importante du budget carbone que sa part actuelle des émissions, nécessitant ainsi que d’autres secteurs d’activité réduisent leurs émissions plus rapidement que la moyenne.

Des incertitudes sur la disponibilité énergétique

La décarbonation des carburants pour l’aviation pourrait être limitée par la disponibilité en ressources énergétiques bas-carbone. Leur utilisation massive pourrait alors entraîner un déplacement de problème environnemental, notamment lié à l’usage des sols. De façon générale, il est nécessaire de penser la transition du secteur aérien de manière systémique dans le cadre des limites planétaires.

ISAE SUPAERO

⁴³ [Référentiel Aviation et Climat | ISAE-SUPAERO](#)

2.3.4 TRANSPORT & ENVIRONMENT “Down to earth”

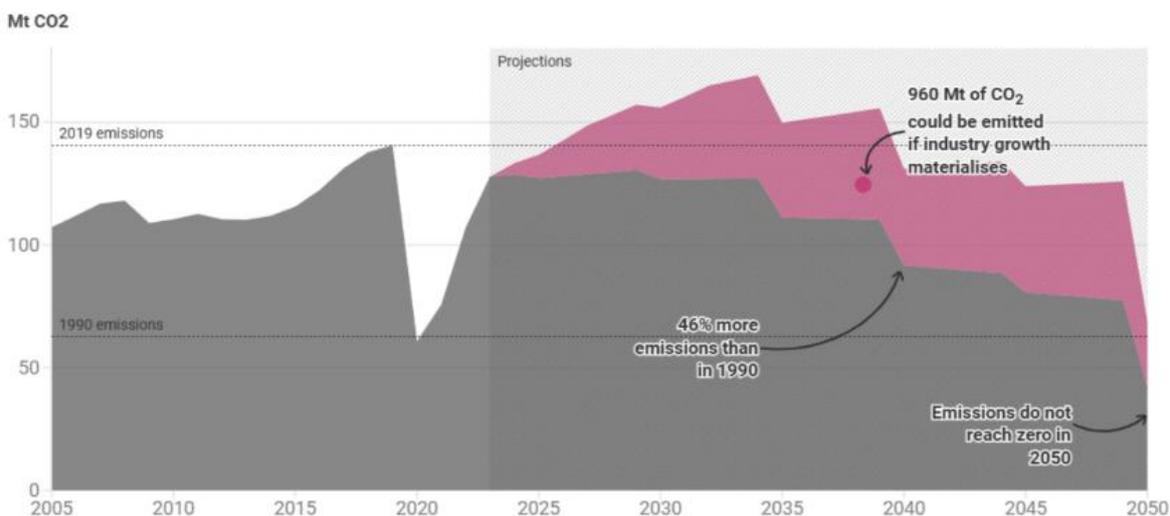
Enfin, l'association **TRANSPORT & ENVIRONMENT**, dans son rapport de janvier 2025 “DOWN TO EARTH⁴⁴”, sur la base des projections de BOEING et AIRBUS, montre que les trajectoires de trafic envisagées sont incompatibles avec celles de décarbonation et se heurtent à certaines limites physiques notamment la disponibilité d'électricité bas carbone.

En 2050, 585 TWh d'électricité bas carbone seraient nécessaires pour couvrir les besoins en e-carburants selon ReFuelEU⁴⁵, soit plus que la demande totale d'électricité de l'Allemagne (506 TWh en 2023). En 2040, les émissions de GES de l'aviation seraient même encore 46% plus élevées que celles de référence en 1990.

European Commission's 2040 scenario is still not up to the decarbonisation challenge

And **960 additional million tonnes of CO₂** could be emitted if traffic growth is left unchecked

- Emissions under the EC 2040 modelling scenario
- Additional emissions if the the traffic growth from the Industry High Growth materialises

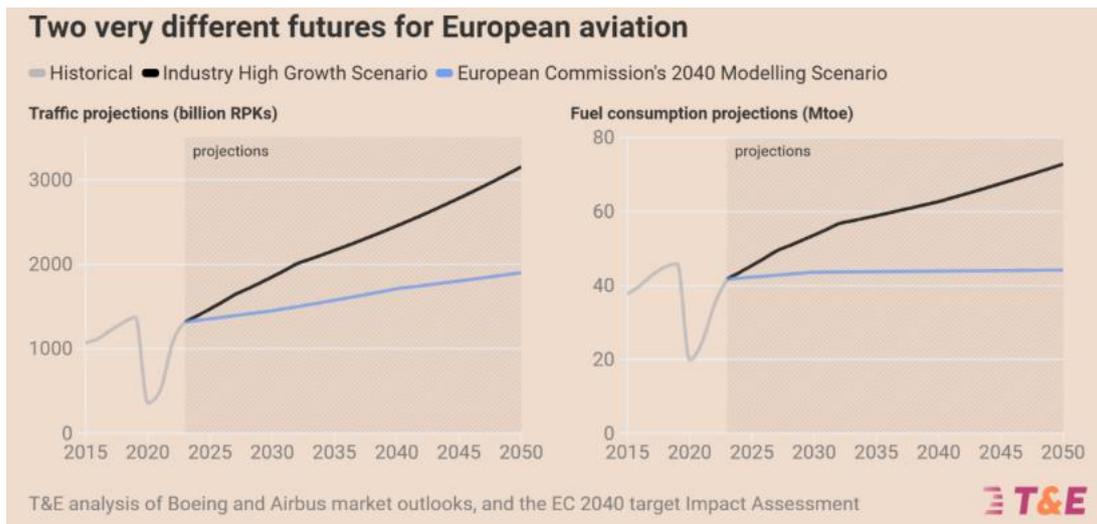


Source: T&E modelling based on the European Commission 2040 Impact assessment and Airbus and Boeing market outlooks

Il apparaît également que les projections de trafic des 2 principaux constructeurs mondiaux de l'aviation sont bien au-delà des scénarios de l'UE pour tenir les quotas d'émissions de GES.

⁴⁴ [Aviation industry plans for growth 'irreconcilable' with Europe's climate goals](#)

⁴⁵ [ReFuelEU Aviation - European Commission](#)



THE SHIFTERS 44 s'aligne sur les constats et propositions pour une nécessaire réduction du trafic planifiée pour que les émissions de GES du secteur aérien soient compatibles avec les quotas carbone sectoriels des Accords de Paris.

Les solutions technologiques doivent également être développées mais en tenant compte des besoins énergétiques (électricité bas carbone notamment) d'autres secteurs essentiels.

Le projet TAKE KAIR doit impérativement s'inscrire dans une réflexion plus globale de planification d'accès aux ressources pour la production de e-carburants, au regard de la faible proportion de la population accédant aux services de l'aviation de tourisme essentiellement.

3 Conclusion

Le projet TAKE KAIR présente certains atouts, en particulier son choix de site d'implantation et son accès privilégié à de l'électricité bas carbone et aux infrastructures de transports (CO2, maritime).

La volonté de souveraineté pour la production d'e-carburants pour l'aviation est louable, mais cette vision doit être confrontée avec la disponibilité des matériaux, des pièces et des technologies, surtout si l'approvisionnement retenu se fait hors Europe.

La décarbonation du secteur aérien par l'utilisation de e-kérosène est possible mais dépend d'un accès important à de l'électricité bas carbone et de l'eau, ressources qui seront très demandées par d'autres secteurs.

Une planification et une allocation des ressources pour le secteur de l'aviation est incontournable pour que l'ensemble de l'économie puissent également se décarboner.

THE SHIFTERS 44 présente ses principales conclusions pour le projet TAKE KAIR, indissociables de celles du secteur aérien et de la production d'e-carburant en particulier :

- 1 - Le secteur aérien mise principalement sur les CAD pour tenir les trajectoires de décarbonation
- 2 - le secteur n'a jusqu'ici pas démontré ses capacités à réduire ses émissions de GES, malgré une amélioration continue de l'efficacité, car son trafic continuait d'augmenter très fortement (en partie alimenté par un effet rebond dû à la baisse du prix des billets, permise par les gains d'efficacité)
- 3 - Le performance de décarbonation des e-CAD dépend de la disponibilité de CO2 biogénique et d'électricité bas carbone en très grande quantité
- 4 - Le trafic aérien est tiré principalement par le tourisme de loisir, au bénéfice d'une petite fraction de la population dont le bilan carbone est fortement impacté par cet usage.
- 5 - Les besoins importants d'électricité bas carbone demandés par le secteur aérien rendent complexe voire impossible le bouclage énergétique des scénarios 2050 et risquent fortement de ralentir la décarbonation d'autres secteurs vitaux : le chauffage, la mobilité légère, la production d'engrais, production d'acier...
- 6 - La réduction du trafic aérien est le principal levier de décarbonation du secteur, activable immédiatement. La réduction du trafic ce jour à plus d'impacts environnementaux qu'une réduction future (les vols à l'avenir seront plus décarbonés).

7 - La réalisation des projets de production de e-kérosène tel que TAKE KAIR doit faire l'objet d'une planification en tenant compte des besoins des autres secteurs et des ressources disponibles projetées.

8 - La pertinence du projet TAKE KAIR ne peut s'évaluer qu'au regard d'une vision globale et cohérente de production nationale de carburants de synthèse. Ce projet présente de nombreux atouts, notamment sa localisation rendant plus facile sont raccordement aux ressources (eau, électricité bas carbone, CO2 biogénique, infrastructure d'exportation, ZIBAC).

9 - A court terme, la production d'e-méthanol pour le transport maritime serait plus pertinente, les usages du secteur maritime apparaissant plus difficilement substituables, comparativement à ceux de l'aérien. Des alternatives d'utilisation aval de la production de TAKE KAIR doivent être étudiées.

4 Bibliographie

<https://rte-futursenergetiques2050.com/>

<https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2024/09/rac-traffic-aerien-web.pdf>

<https://www.transportenvironment.org/articles/down-to-earth>

<https://www.isae-supaero.fr/fr/horizons-186/referentiel-aviation-et-climat/referentiel-aviation-et-climat/>

<https://www.carbone4.com/publication-hydrogene-bas-carbone>

https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rapport_hydrogene_2024.pdf

<https://theshiftproject.org/article/quelle-aviation-dans-un-monde-contraint-nouveau-rapport-du-shift/>

<https://www.zenon.ngo/insights/sustainable-aviation-fuels-safs>

<https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/02/Note-evaluation-energie-climat-PTEF-v1.1.pdf>

<https://www.cea.fr/Documents/positions-cea-UE/2020-09-CEA-UE-reponse-directive-energies-renouvelables.pdf>

https://www.carbone4.com/files/Publication_Carbone_4_Garanties_origine.pdf

<https://www.carbone4.com/electricite-verte-outil-pertinent-entreprises>

<https://www.carbone4.com/analyse-faq-aviation-climat>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>

<https://www.transportenvironment.org/uploads/files/Briefing-Evitement-des-trainees-de-condensation.pdf>

<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/12/WB-Hydrogen-Report-2022.pdf>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378020307779>

<https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/benefice-climatique-dune-future-economie-de-lhydrogene>

<https://librairie.ademe.fr/ged/8346/Electro-carburants-en-2050-rapport.pdf>

https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/v1681916727/Synth%C3%A8se_Feuille_de_route_d%C3%A9carbonation_transport_a%C3%A9rien_Article_301_Mars_2023.pdf

https://www.carbone4.com/files/Carbone_4_Etude_Hydrogene.pdf