

## INTRODUCTION

L'aérien est un contributeur majeur aux émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (2,8% des émissions). On lui attribue 8% de la consommation mondiale de pétrole, sous forme de kérosène. En 2024, c'est 22,1 millions de tonnes de carburant utilisé pour tout le transport aérien français. Enfin, on calcule en moyenne 9kg CO<sub>2</sub>/100km/pax ce qui correspond au moyen de transport le plus polluant, son empreinte devrait être divisée par 10 d'ici 2050 pour respecter les accords de Paris.

Des efforts ont été déployés par les industriels (avionneurs/compagnies aériennes) dans cette direction. On peut principalement citer ces points : fuselage en carbone plus léger, moteur plus efficient, et enfin l'inclusion de SAF dans le kérosène. C'est ce point qui nous intéresse.

Les SAFs (Sustainable Aviation Fuel) sont des carburants de synthèse, durable, et qui réduisent grandement l'impact du secteur aérien sur l'environnement. Sa combustion génère naturellement du CO<sub>2</sub>, mais celui-ci était déjà dans l'environnement, et non stocké sous forme de pétrole.

## IMPOSER LES SAFs

### ReFuelEU Aviation

Une contrainte de volume est fixée sur l'apport en carburant. Les fournisseurs de carburant dans les aéroports de l'UE doivent incorporer plus de SAF (carburant d'aviation durable) dans le kérosène fossile.

#### Trajectoire d'incorporation :

2025 : 2% 2035 : 20%  
2030 : 6% 2050 : 70% (dont 35% de e-fuels)

### CORSIA & objectif Net Zéro 2050

Le dispositif CORSIA, porté par l'OACI, encadre les émissions de l'aviation internationale via des mécanismes de compensation. Les SAF sont reconnus comme un levier de réduction, sans obligation chiffrée contraignante.

#### Trajectoire internationale :

2021-2023 : phase pilote (volontaire)  
2024-2026 : première phase volontaire  
2027-2035 : phase obligatoire pour les États participants  
2050 : objectif sectoriel mondial de neutralité carbone (Net Zéro)

### SEQE-UE (quotas d'émissions)

Les compagnies doivent acheter des droits d'émission pour leurs vols intra-européens selon un principe de cap-and-trade. La suppression progressive des quotas gratuits renchérit le coût du kérosène fossile et renforce l'intérêt économique des SAF.

#### Trajectoire entre 2024 et 2026 :

2024 : -25 % de quotas gratuits  
2025 : -50 %  
2026 : suppression totale des quotas gratuits

### Loi Climat et Résilience (2021) –

#### Taxe Chirac

La loi Climat et Résilience vise à réduire l'empreinte carbone du transport aérien en France, principalement par des mesures de sobriété et de signal-prix. Elle n'impose pas directement l'usage des SAF.

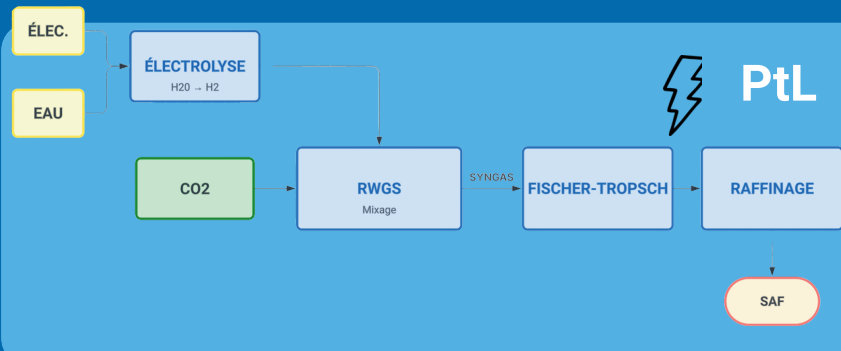
#### Trajectoire nationale :

2021 : adoption de la loi  
2023 : interdiction de liaisons aériennes intérieures avec alternative ferroviaire < 2h30  
2024-2030 : maintien de la taxe Chirac (1,5 € à 18 € par billet)  
Absence de trajectoire obligatoire d'incorporation de SAF

## LES TECHNOLOGIES

### HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)

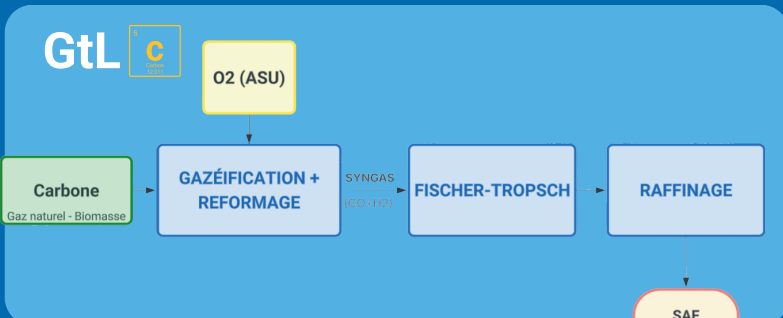
Le processus HEFA repose sur l'utilisation de matières premières telles que les huiles végétales, de cuisson ou les graisses animales. Le processus se caractérise par une étape d'hydro-traitement suivie d'une isomérisation permettant d'obtenir un carburant "drop-in". Il s'agit de la solution la plus mature pouvant être mélangée à 50% avec du jet A1, elle est déjà certifiée commercialement et constitue la voie la moins coûteuse du marché.



### PtL (Power to Liquids)

Le procédé PtL utilise comme matières premières du CO<sub>2</sub> capté et de l'hydrogène vert obtenu par électrolyse de l'eau. La synthèse Fischer-Tropsch transforme l'électricité en hydrocarbures liquides bas carbone.

En termes de développement, elle est considérée comme le levier de décarbonation stratégique pour 2050, bien que ses coûts de production restent très élevés aujourd'hui.



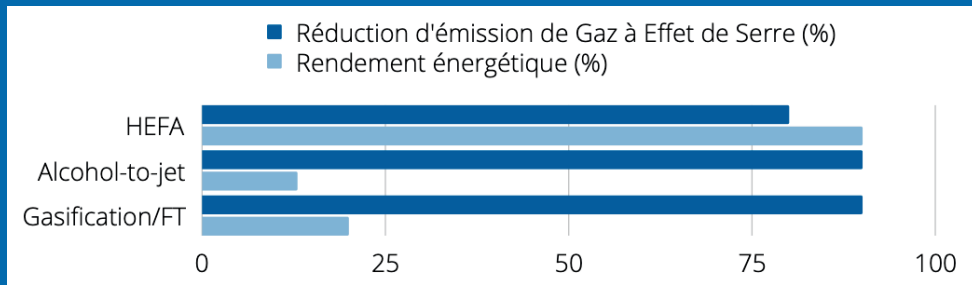
### AtJ (Alcohol-to-Jet)

La filière AtJ exploite des alcools comme l'éthanol ou le butanol, produits à partir de matières premières telles que les sucres, la biomasse ou même du CO<sub>2</sub> fermenté. La technologie repose sur une suite de transformations chimiques incluant la déshydratation, l'oligomérisation et l'hydrogénation. Bien que prometteuse, cette technologie demeure encore peu industrialisée par rapport aux solutions plus anciennes comme l'HEFA.



### FT / GTL (Fischer-Tropsch / Gas-to-Liquid)

Synthèse à partir de gaz naturel ou de biomasse pour créer un e-fuel par gazéification, reformage puis par synthèse Fischer-Tropsch. Le raffinage permet de séparer les différents éléments issus de la synthèse FT (Cires, Diesel, kérosène, etc.).



## PROSPECTIVE 2050

### Les atouts du territoire français pour la transition

#### MIX ÉNERGÉTIQUE BAS-CARBONE

Nucléaire et ENRs - 95% de l'électricité française est décarbonée

#### Investissement en R&D accrus

285M € de crédits CORAC\* annuels pour la recherche aéronautique décarbonée

#### CO2 biogénique

140 TWh de potentiel biogaz en France

710 sites injectant du biométhane dans le réseau

Méthanisation agricole : env. 1Mt CO2/an

Le CO2 biogénique est particulièrement important pour le développement des SAF puisqu'en comptabilisant carbone, il est considéré comme neutre et éligible pour les technologies SAFs.

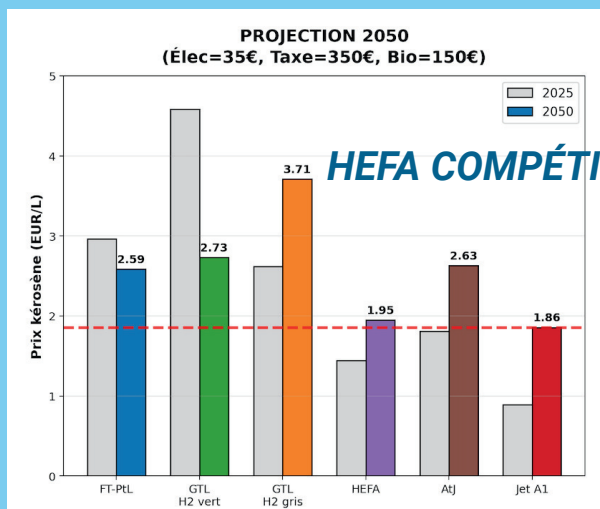
\*CORAC : Conseil pour la Recherche Aérospatiale Civile

Ministère de l'écologie, Affaires Européennes et de la Transition Énergétique

### Comment rendre les technologies SAF compétitives et viables d'ici 2050 en France ?

#### (1) Scénario de prospective - horizon 2050

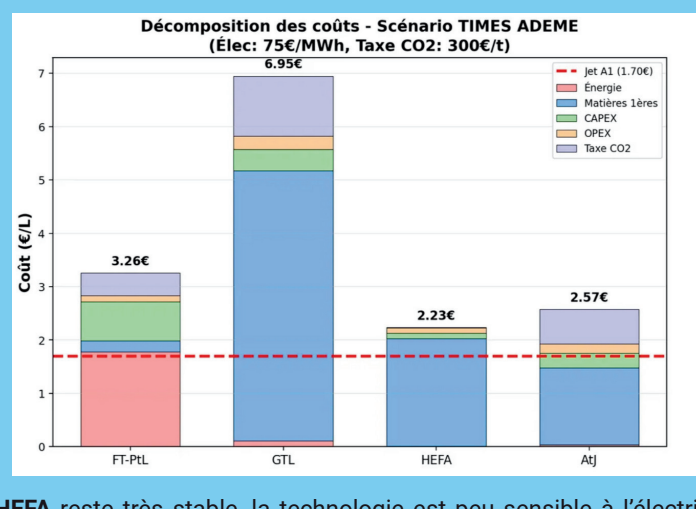
Améliorer la compétitivité des technologies SAFs



La taxe carbone plus élevée et la diminution du coût de l'électricité permettent à deux, d'élever le coût au litre du kérosène JetA1 et de diminuer le coût au litre du procédé HEFA.

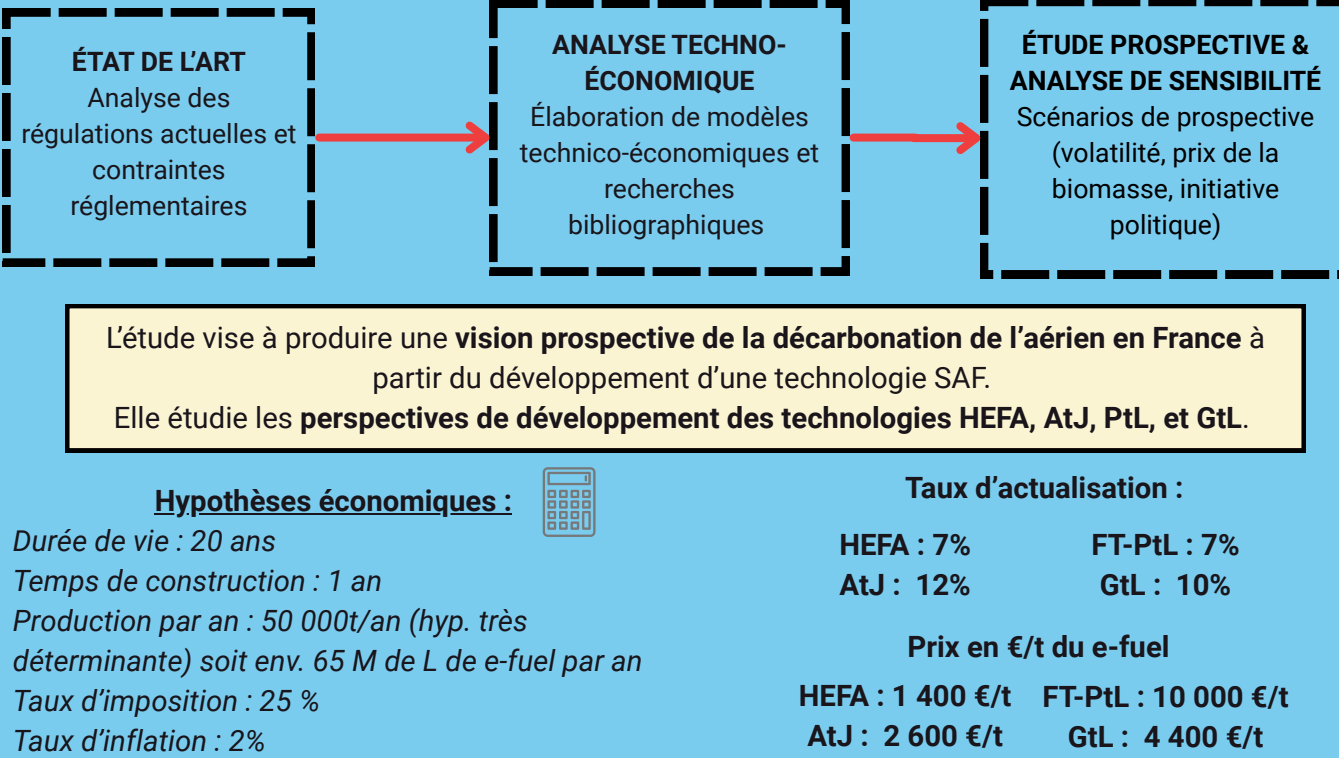
#### (2) Scénario de prospective - horizon 2050

D'après des scénarios RTE, modèle TIMES-France

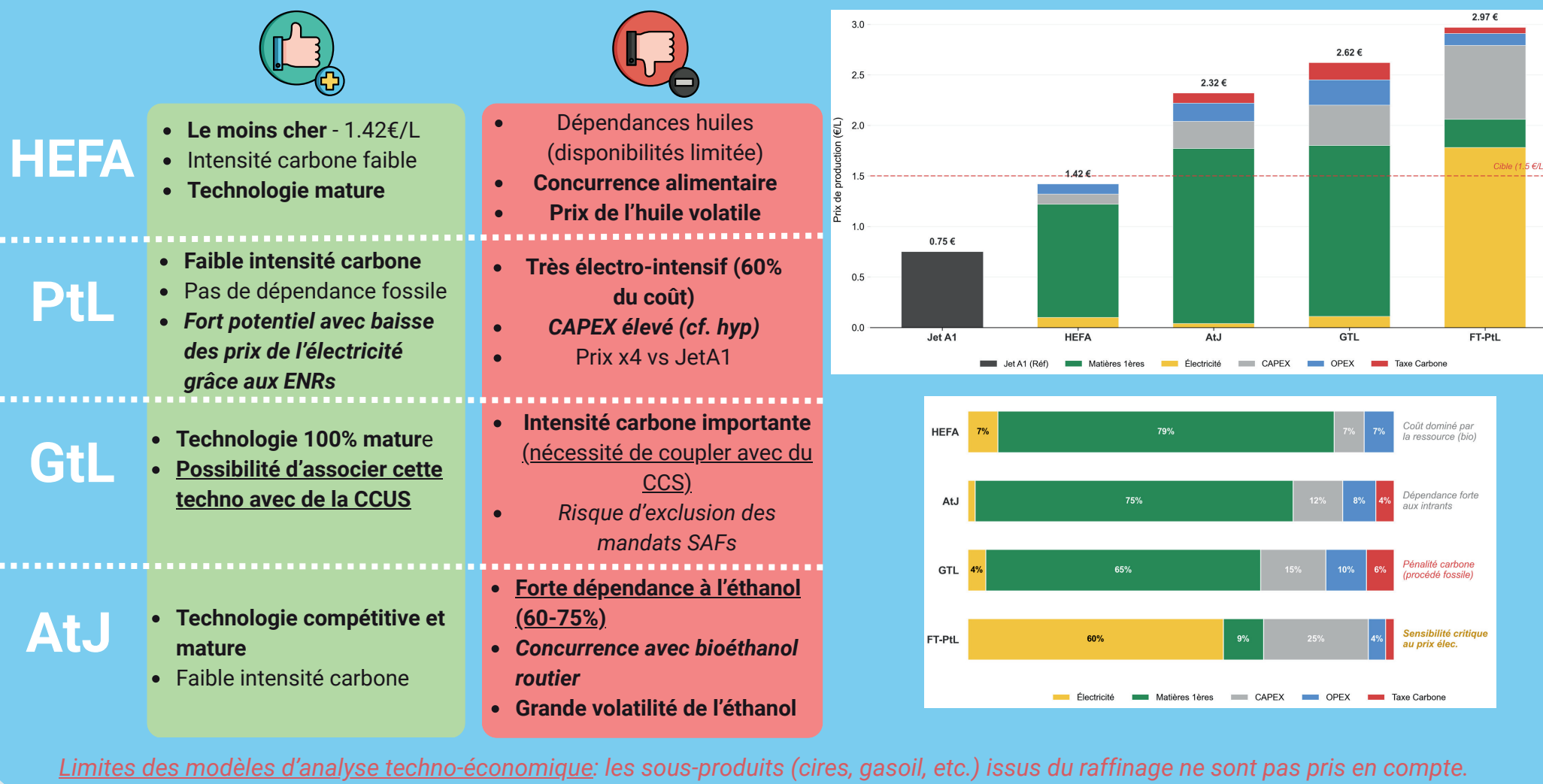


HEFA reste très stable, la technologie est peu sensible à l'électricité. FT-PtL varie fortement avec l'augmentation du coût de l'électricité. Une diminution du coût de l'électricité permettrait de rendre cette technologie plus compétitive. GTL reste très cher et n'est pas compétitive à cause de la taxe carbone élevée (3.76 kgCO<sub>2</sub>/L). JetA1 augmente avec la taxe carbone mais reste le carburant le plus compétitif.

## MÉTHODOLOGIE & HYPOTHÈSES

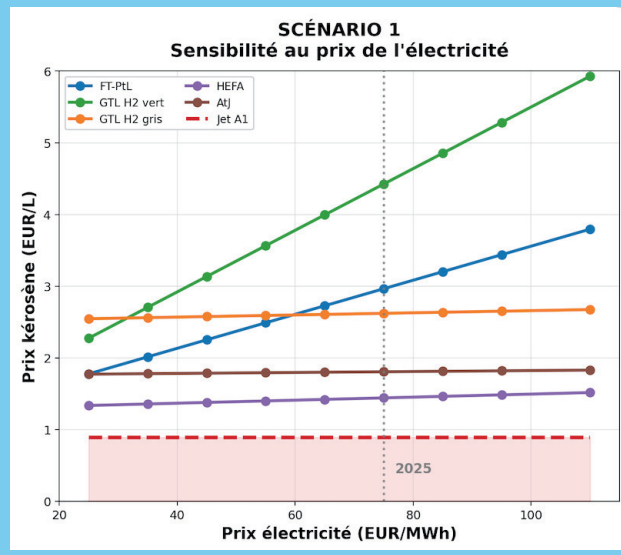


## ANALYSE TECHNO-ÉCONOMIQUE

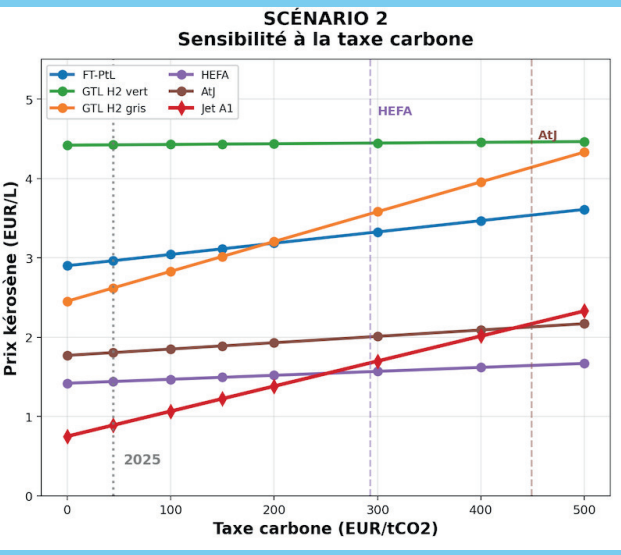


## ANALYSE DE SENSIBILITÉ

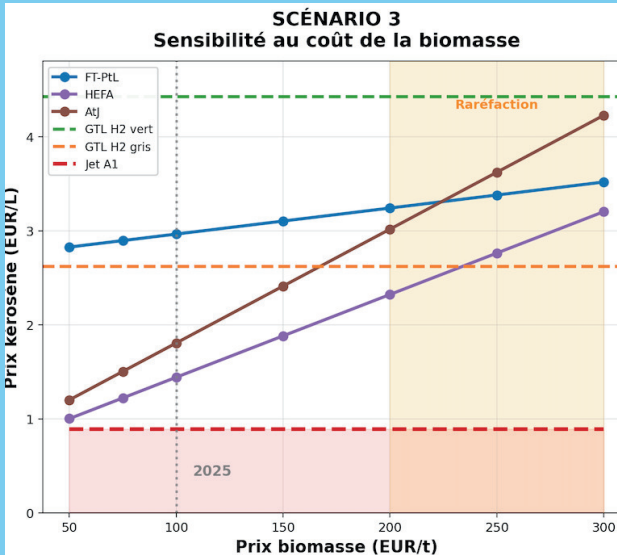
### Scénario 1 : sensibilité du prix des SAF au prix de l'électricité



### Scénario 2 : sensibilité du prix des SAF à la taxe carbone



### Scénario 3 : sensibilité du prix des SAF au coût de la biomasse



### Scénario 1 : sensibilité du prix des SAF au prix de l'électricité

Le Jet-A1 (kérosène fossile) n'est pas impacté par le coût de l'électricité, pas plus que les filières AtJ, HEFA et GTL avec H2 gris (H2 fossile). Ce constat est très cohérent avec des filières basées sur des intrants fossiles ou issue de la biomasse. Au contraire, la PtL et GTL verte proposent des prix très corrélés à celui de l'électricité, cela s'explique par le recours à l'électrolyse dans les deux cas. Ainsi, si on veut rendre viable une de ces deux technologies (et particulièrement la PtL qui est très prometteuse), il est impératif de disposer d'une électricité abondante et peut onéreuse.

### Scénario 2 : sensibilité du prix des SAF à la taxe carbone

C'est le seul scénario où le prix du Jet A1 augmente drastiquement. Le GTL H2 gris utilisant du gaz naturel fossile, voit aussi son coût augmenter parallèlement au Jet-A1. Hormis le GTL gris, les SAF renouvelables restent à des prix globalement stables. On peut d'ailleurs noter que c'est l'unique scénario où un SAF devient moins cher que le Jet-A1, en particulier avec les technologies HEFA et AtJ. La mise en place de politique de crédits Carbone et l'influence de la taxe carbone pourraient donc permettre de rendre les technologies HEFA et AtJ plus compétitives face au JetA1 usuel.

### Scénario 3 : sensibilité du prix des SAF au coût de la biomasse

Les filières HEFA et AtJ voient leurs coûts exploser si le prix de la biomasse augmente. Par ailleurs, au-delà de 200€/t l'HEFA devient plus cher que la PtL, pourtant la technologie la plus cher par essence. La PtL justement, est relativement peu sensible au prix de la biomasse, c'est un avantage important sur les autres technologies. Il est ainsi impératif de maintenir des prix raisonnables sur la biomasse afin de permettre l'utilisation des technologies courts-terme, comme la filière HEFA.

## BILAN : QUELLE TECHNO DÉVELOPPER ?

La technologie HEFA est aujourd'hui la voie la moins chère des SAF, typiquement 1,5-2x le prix du kérosène fossile. La technologie AtJ apparaît parallèlement prometteuse mais les ressources manquent pour l'aérien, et elle est plutôt développée pour le secteur routier. Par ailleurs, la technologie power-to-liquid (PtL) est très prometteuse, en cela qu'elle permet un monté en volume très importante pour autant que la production d'électricité suive la demande, tant en quantité qu'en prix, c'est un point sur lequel la France est particulièrement avantagée. À court terme, si on veut augmenter la part de SAF, il est impératif de modérer les prix de la biomasse afin que les technologies HEFA et AtJ soient compétitives face au kérosène fossile. En parallèle, une montée en production de la GTL (verte ou grise), permettrait de familiariser l'industrie avec la synthèse Fischer-Tropsch à grande échelle. Cette expérience pourrait être réinjectée, à plus long terme, dans une filière power-to-liquid (PtL) durable, à faible impact environnemental, et avec des grands volumes. Dans le cadre de la PtL notamment, la captation de CO2 est une question essentielle, non traitée dans cette étude. À court terme, capter du CO2 émis du fossile pour le faire à nouveau travailler est une mesure d'atténuation, mais à plus long terme, il serait souhaitable de se "contenter" de capter et réémettre le même CO2 (technologies CCS/CCUS). Ce serait un cycle durable, ou l'apport d'énergie serait assuré par une électricité décarbonée et abondante, et où le carburant de synthèse ne sont qu'un vecteur de densité énergétique pour les applications qui le nécessitent, l'aviation en tête de file.

Rq: On observe sur le scénario prospective 2050 l'importance des CAPEX dans le coût au litre de la technologie PtL. Les hypothèses réalisées durant cette étude correspondent à une usine de taille petite à moyenne en développement. Or, en augmentant la production annuelle (ex. grande usine), les CAPEX peuvent aussi être diminués ce qui rendrait, à long terme, la technologie PtL encore plus compétitive.

[1] Barke, A. et al. (2022) « Are Sustainable Aviation Fuels a Viable Option for Decarbonizing Air Transport in Europe? An Environmental and Economic Sustainability Assessment », Applied Sciences, 12(2), p. 597. <https://doi.org/10.3390/app12020597>  
[2] Barouche, N. (2007) Étude technico-économique pour l'implémentation d'une unité de Gas To Liquids (GTL) en Algérie. Thèse: Ecole nationale polytechnique. <http://repositorio.univ-alger.dz/open/handle/123456789/1122>  
[3] Batist-Dupuyat, C. et al. « PROMOTION PAR LE LANTHANE DES CATALYSEURS A BASE DE COBALTE POUR LA REACTION FISCHER-TROPSCH »  
[4] Décarbonation du secteur de l'aéronautique - Sénat. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/23-450/23-450.html>  
[5] Dong, L. et al. (2008) « GTL or LNG, which is the best way to monetize "stranded" natural gas? », Petroleum Science, 5(4), p. 388-394. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9063-3>  
[6] Fernandez-Rojas Michaga, M. et al. (2022) « Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) potential in jet fuel production from forestry residues: A combined Techno-Economic and Life Cycle Assessment approach », Energy Conversion and Management, 255, p. 115346. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115346>  
[7] Naphtha (Northwestern Europe) - Spot price - Index in euros - Base 2010 | Insee (sans date) <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/D10002090>  
[8] Savin-Poncet, S. et al. (sans date) « Synthèse de Fischer-Tropsch sur catalyseur à base de cobalt supporté sur carbure de Silicium »  
[9] Schmidt, P. et al. (2018) « Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review », Chemie Ingenieur Technik, 90(1-2), p. 127-140. <https://doi.org/10.1002/cite.201700120>  
[10] Technology Data for Renewable Fuels | Energiystreken (2024). <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-renewable-fuels>

