

AIRBUS

CMA CGM



TotalEnergies

# Le rôle des e-SAF dans l'atteinte du Net Zero

Principales conclusions de l'étude  
réalisée par notre groupe de travail  
dédié à l'aviation

Auteurs: Coalition New Energies

En collaboration avec



**NEW ENERGIES**  
The energies coalition for transport & logistics

## Préambule

Le besoin de **lutter contre le changement climatique** nécessitera une **réduction à grande échelle des émissions** dans tous les secteurs de l'économie, y compris le **transport aérien**. De nombreuses initiatives sont en cours dans le secteur de l'aviation pour favoriser cette réduction, ainsi **qu'une large gamme de technologies habilitantes**. En particulier, **l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI)** a développé le **Système de compensation et de réduction de carbone** pour l'aviation internationale (CORSIA), qui permet aux parties participantes de réduire les émissions par le biais de la **compensation** ou de l'utilisation de **carburants d'aviation durables (SAF)**.

Parmi les différentes options de filières SAF, **les e-carburants**, produits à partir de dioxyde de carbone capturé et d'hydrogène vert, auront des émissions de cycle de vie quasi nulles et, compte tenu de leur potentiel de mise à l'échelle, **pourraient jouer un rôle important** dans la feuille de route de décarbonation de l'industrie aérospatiale établie par ATAG, IATA et OACI. Ces principales autorités et organismes de réglementation de l'aviation considèrent les SAF comme un **contributeur clé pour atteindre des « émissions nettes de carbone nulles » d'ici 2050**.

Pour des raisons de compatibilité technique, toutes les filières SAF actuelles sont limitées à un ratio de mélange maximum de 50 % avec des carburants fossiles dans le cadre de la spécification de carburant ASTM en vigueur. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre comment permettre l'utilisation de 100 % de SAF – éliminant ainsi le besoin de les mélanger avec des carburants fossiles. Il y a un intérêt particulier pour les e-carburants, dont la production n'est pas soumise à la disponibilité des matières premières de biomasse. Comprendre la **faisabilité technique, les coûts, le déploiement, les contraintes potentielles ainsi que les impacts sociaux et environnementaux des e-carburants** (y compris la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)) fait l'objet de recherches en cours dans plusieurs secteurs.

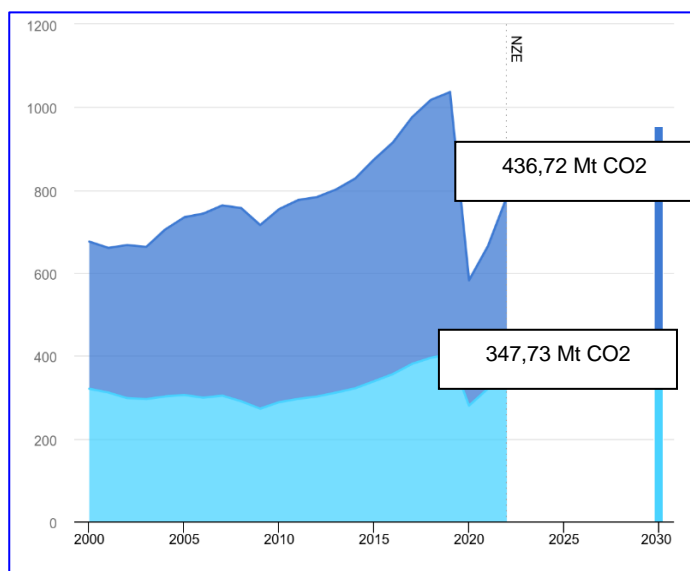
Ce rapport met en lumière le travail réalisé sur le sujet, par la [Coalition New Energies Coalition](#), à travers l'un de ses groupes de travail dirigé par **Rolls Royce**, avec la contribution significative d'**Airbus, CMA CGM, TotalEnergies**, et une analyse menée par le **cabinet de conseil ERM**.

## Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Le rôle crucial du SAF dans la décarbonation du secteur de l'aviation</b> | <b>3</b>  |
| Qu'est-ce que les SAF ?  |           |
| Focus sur les e-SAF  |           |
| SAF : principaux avantages et défis  |           |
| <b>Comment atteindre 100%</b>  | <b>8</b>  |
| Faisabilité du 100% drop-in e-SAF  |           |
| Production   |           |
| Infrastructures de distribution  |           |
| Coûts  |           |
| Emissions de gaz à effet de serre  |           |
| <b>Aperçu des catégories d'e-carburants</b>                                  | <b>14</b> |
| <b>Conclusions</b>   | <b>15</b> |
| <b>Glossaire</b>   | <b>16</b> |

## Les SAF joueront un rôle clé dans la décarbonisation du secteur de l'aviation (particulièrement jusqu'en 2050) mais font face à plusieurs défis.

Selon [l'Agence Internationale de l'Energie](#) (AIE), le **transport aérien est responsable** d'environ 800 Mt d'émissions de CO<sub>2</sub> (2022), représentant environ **2 à 3 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES)** d'origine humaine.



Il est important de souligner que **le trafic aérien domestique a été multiplié par 4 depuis 1990**, cependant les émissions de l'aviation n'ont que doublé grâce à une amélioration de 50 % de l'efficacité énergétique de la flotte.

**Figure 1: Émissions de CO<sub>2</sub> dans l'aviation dans le scénario de zéro émission nette, 2000-2030, en million de tonnes par an**

Source: IEA (2023)

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-in-aviation-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>

License: CC BY 4.

● Domestic aviation ● International aviation

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) s'attend à ce que les émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation augmentent dans les prochaines décennies en raison de la demande accrue de voyages aériens.

Pour relever ce défi et **atteindre l'objectif de l'industrie de l'aviation de « zéro émission nette de carbone » d'ici 2050**, plusieurs leviers complémentaires sont explorés : le renouvellement de la flotte actuelle avec des avions de dernière génération, des améliorations de l'efficacité opérationnelle, des innovations technologiques pour les avions de nouvelle génération, la compensation et la suppression du carbone, et... les carburants d'aviation durables (SAF). Il est largement reconnu que les SAF devront jouer un rôle essentiel dans ce parcours de décarbonisation du secteur, à court et à long terme.

L'IATA estime que le SAF pourrait contribuer à environ 65 % de la réduction des émissions nécessaires à l'aviation pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Cependant, cela nécessitera une augmentation massive de la production.

La plus grande accélération est attendue dans les années 2030, lorsque le soutien politique deviendra mondial, que le SAF deviendra plus économiquement compétitif par rapport au kérosène fossile et que les compensations crédibles deviendront plus rares.

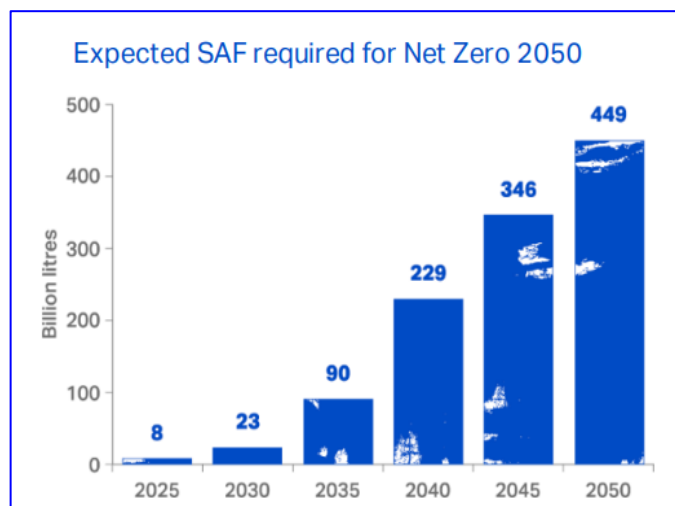
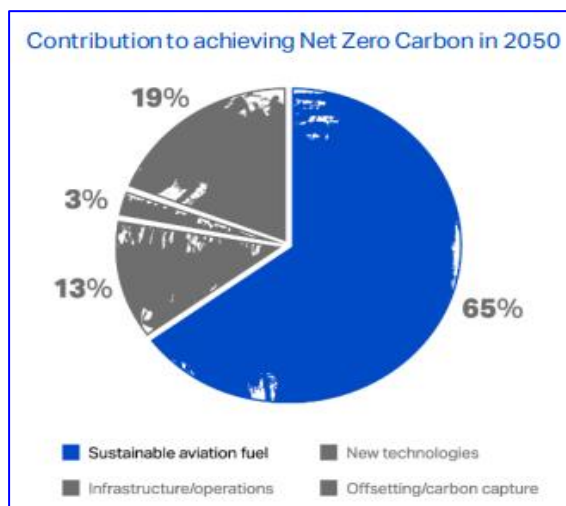


Figure 2 & 3: Contribution du SAF à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050

Source: IATA (2024) <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels>

En 2023, les volumes de SAF ont doublé et ont atteint plus de 600 millions de litres (0,5 MT) contre 300 millions de litres (0,25 MT) en 2022, mais ne représentant toujours que moins de 0,2 % de la consommation de carburant pour l'aviation de l'année.

## Qu'est-ce que le SAF ?

Le **carburant d'aviation durable**, souvent abrégé en **SAF**, est généralement défini comme un **carburant renouvelable conçu pour l'aviation**. Les approvisionnements actuels en SAF peuvent réduire les émissions de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble du cycle de vie de 80 % en moyenne par rapport aux carburants pour avions dérivés de combustibles fossiles.

Le SAF peut être **produit à partir de premières renouvelables**, telles que les déchets biologiques provenant d'autres industries comme l'agriculture, l'alimentation, l'huile de cuisson usagée et les graisses animales, ... (« **bio-SAF** »). Il peut également être **produit en capturant le carbone** (à partir de sources ponctuelles ou directement de l'air) **et en le combinant avec de l'hydrogène vert pour produire des hydrocarbures** (« **e-SAF** »). Le SAF mélangé avec un certain pourcentage de volumes de carburéacteur dérivé de combustibles fossiles peut être utilisé directement dans les avions actuels sans nécessiter de modifications – le mélange en est un carburant à faible teneur en carbone « drop-in » (conforme aux spécifications JET A/A-1, par exemple qualifié selon ASTM D1655 et Def Stan 91-091).

Pour se conformer à CORSIA ou aux réglementations locales (par exemple, la directive ReFuelEU en Europe), le composant synthétique du SAF doit répondre à certains « critères de durabilité » visant à garantir que le SAF :

- génère des émissions de GES inférieures sur une base de cycle de vie (au moins 10 % par rapport à une référence de carburant fossile de 89 grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par mégajoule (g CO<sub>2</sub>e/MJ) selon CORSIA, ou au moins 70 % par rapport à 94 gCO<sub>2</sub>e/MJ selon ReFuelEU Aviation)
- est produit à partir de matières premières qui ne sont pas des cultures alimentaires, et qui ne favorisent pas le défrichement/la déforestation, la perte de productivité des sols ou la perte de biodiversité

Pour être considéré comme « Carburants d'Aviation », le SAF doit répondre aux exigences des tests de conformité des carburants spécifiées dans la norme ASTM D7566. De plus, le mélange de carburant SAF doit satisfaire aux tests qualité basés sur la norme ASTM D1655/DEF STAN 91-091.

Dans le contexte des Carburants d'Aviation Durables (SAF), [ASTM International](#) joue un rôle crucial dans l'établissement de normes et de spécifications pour la production, le mélange et l'utilisation des SAF dans l'aviation commerciale.

L'organisation fournit un **cadre clair** pour que les producteurs **développent et augmentent** leurs processus de production tout en **garantissant que les carburants répondent à des normes de qualité et de performance strictes** afin d'assurer la **compatibilité** avec les avions, moteurs et infrastructures de carburant existants.

L'ASTM a qualifié plusieurs voies pour produire des SAF, les principales sont (liste exhaustive [ici](#)) :

- **Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA-SPK)**: Cette voie implique l'hydrotraitement de matières premières telles que les huiles usagées, les graisses animales et les huiles végétales pour produire des composants de carburant pour avions. À ce jour, c'est la voie la plus mature avec des sites de production en activité aux États-Unis, en Europe et en Asie.
- **Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)**: L'ATJ-SPK est produit par la conversion d'alcools, tels que l'éthanol ou l'iso-butanol, en carburant pour avions à l'aide d'une série de processus chimiques. Ces alcools peuvent être produits par fermentation de sucres obtenus à partir de ressources agricoles riches en glucose (canne à sucre, maïs, etc.) lorsque la réglementation le permet, ou à partir de déchets et résidus biogéniques. Les premières usines commerciales de conversion d'alcool en carburant pour avions ont récemment commencé leurs opérations.
- **Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)** : Le FT-SPK est produit en utilisant le procédé de synthèse Fischer-Tropsch, qui consiste à convertir le gaz de synthèse (principalement un mélange de CO et de H<sub>2</sub>) en hydrocarbures liquides. Le gaz de synthèse (« syngas ») est souvent dérivé par gazéification de la biomasse et des déchets, mais peut également être généré catalytiquement à partir de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>. Actuellement, la capacité de production mondiale pour cette voie est très limitée.

## Focus sur l'e-SAF

L'e-SAF est un **type de carburant d'aviation durable produit par des procédés synthétiques combinant le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) capturé dans l'atmosphère ou provenant de sources industrielles avec de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) obtenu à partir d'électricité renouvelable ou à faible teneur en carbone.**

Les principaux procédés de production d'e-SAF sont résumés dans la Figure 4 ci-dessous.

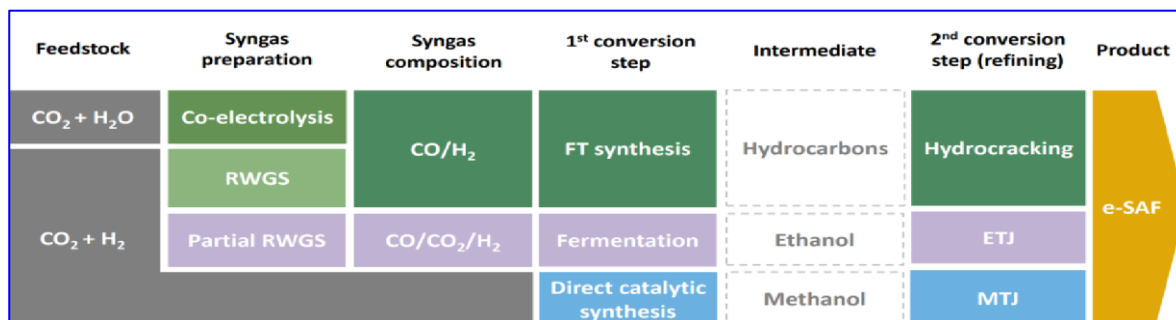







Figure 4 : Les 4 principales voies de production de e-SAF.

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)



## SAF : principaux avantages et défis

Les carburants d'aviation durables sont clés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'aviation, diversifier les sources d'énergie, soutenir une économie circulaire et aider l'industrie à atteindre ses objectifs environnementaux. Cependant, des **défis tels que la disponibilité des matières premières, le coût de production et le soutien politique** doivent être relevés pour une adoption généralisée. La recherche et le développement se poursuivent pour rendre le SAF une solution plus viable pour l'industrie, grâce à une meilleure disponibilité et à des coûts réduits.

| Avantages   | Défis   |
|---|---|
| <b>Environnement</b>  |   |
|  <p><b>Emissions réduites de gaz à effet de serre</b><br/>En moyenne, les SAF émettent 80 % moins de CO<sub>2</sub> que les carburants conventionnels tout au long de leur cycle de vie</p> <p><b>Soutien à l'économie circulaire</b><br/>Certaines filières de production de SAF utilisent des matériaux de déchets ou des sous-produits comme matières premières</p> | <p><b>Durabilité des matières premières</b><br/>Doit être approvisionnée de manière responsable pour éviter la concurrence avec la production alimentaire et les impacts négatifs sur le changement d'utilisation des terres induit ou la déforestation</p>   |
| <b>Production</b>   |   |
|  <p><b>Diversification des sources d'énergies</b><br/>Peut être produit à partir de diverses ressources durables (huiles usagées, résidus agricoles, algues, déchets solides municipaux...)</p>  | <p><b>Production</b><br/>Nécessite des investissements très importants dans de nouvelles usines.</p> <p><b>Disponibilité des matières premières</b><br/>Doit être collectée en quantités suffisantes pour produire le volume nécessaire afin de répondre aux objectifs de décarbonisation de l'industrie.</p> <p><b>Energie électrique</b><br/>De très grandes quantités d'électricité verte seront nécessaires</p>                             |
| <b>Avion &amp; Infrastructure</b>   |   |
|  <p><b>Compatibilité avec les avions et les infrastructures existants</b><br/>Pour les carburants de substitution, jusqu'à 50 % de mélange avec des carburants fossiles conventionnels</p>   | <p><b>Développement des infrastructures</b><br/>Installations de mélange, distribution de carburant depuis le nouveau site de production</p>  |
| <b>Réglementation</b>   |   |
|  <p><b>Conformité aux réglementations et objectifs de durabilité</b><br/>Alors que les politiques internationales et nationales se concentrent de plus en plus sur la réduction des émissions de GES, les réglementations soutenant le déploiement des SAF envoient un signal de "certitude de la demande" aux investisseurs.</p>                                    | <p><b>Cadre réglementaire</b><br/>Le manque de cohérence et/ou de stabilité peut créer de l'incertitude pour les investisseurs et freiner la croissance de l'industrie des SAF</p>  |
| <b>Techno-économie</b>  |   |
|  <p><b>Création d'emplois et avantages économiques</b><br/>Nouvelles opportunités d'emploi dans la production de matières premières, le traitement des carburants et d'autres industries connexes</p>  | <p><b>Coût de production</b><br/>Significativement plus cher que le carburant d'aviation conventionnel</p> <p><b>Développement technologique</b><br/>Pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et augmenter l'évolutivité</p> <p><b>Concurrence autour des ressources</b><br/>Concurrence potentielle autour des matières premières, de l'accès à l'électricité bas carbone, etc., dont certains seront déterminés par des politiques.</p> |

<sup>1</sup> Chiffre utilisé par Airbus, basé sur les voies de production actuelles nommées par HEFA.

<sup>2</sup> Électricité produite à partir de ressources renouvelables telles que le solaire, l'éolien, la géothermie, l'hydroélectricité.

**Actuellement, toutes les filières SAF sont limitées à un ratio de mélange maximum de 50 % avec du carburant d'aviation fossile, tel que défini dans les normes ASTM pertinentes. Pour atteindre l'objectif de décarbonisation de l'industrie, cette limite devra être surmontée à l'avenir. Il est nécessaire de comprendre comment atteindre 100 % de SAF, y compris l'e-SAF.**

Pour être entièrement compatible avec les avions et les infrastructures existants (« drop-in »), le SAF doit être chimiquement comparable au carburant fossile conventionnel.

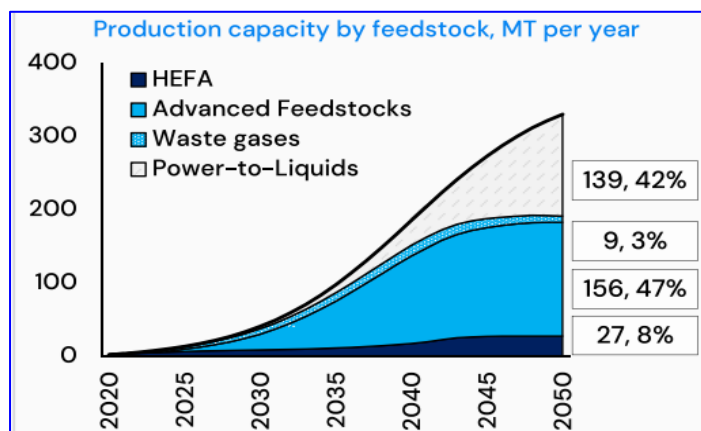
Aujourd'hui, les composants du mélange SAF sont principalement des hydrocarbures paraffiniques via la voie HEFA-SPK, et l'exigence en hydrocarbures aromatiques (minimum 8 % en volume) requise dans la spécification du carburant pour avions ASTM provient de la composante fossile du mélange. Selon les propriétés de la composante fossile du mélange, atteindre effectivement un ratio de mélange de 50 % de SAF peut être difficile. La densité et la teneur en aromatiques sont de bons exemples de propriétés potentiellement limitantes.

Pour surmonter cette limite et finalement atteindre un carburant durable entièrement synthétique (« 100 % SAF »), deux approches sont possibles :

- Les aromatiques « durables » seront synthétisés (séparément ou simultanément avec les paraffines) pour produire un « SAF 100 % drop-in ».
- Les avions et les infrastructures de ravitaillement seront adaptés pour être compatibles avec des carburants à faible teneur en aromatiques ou sans aromatiques (« SAF 100 % non-drop-in » car cela nécessite une nouvelle spécification de carburant).

L'industrie explore actuellement les deux options en parallèle.

Comme le suggèrent la plupart des scénarios de production de SAF, la disponibilité du bio-SAF sera limitée par les matières premières durables, et le e-SAF sera nécessaire pour compléter le bio-SAF afin de répondre aux objectifs de l'industrie.



HEFA: 27 MT (8%), Advanced Feedstocks: 156 MT (47%); Waste gases: 9 MT (3%); Power-To-Liquids: 139 MT (42%)

**Figure 5: Perspective technologique ambitieuse et agressive.**

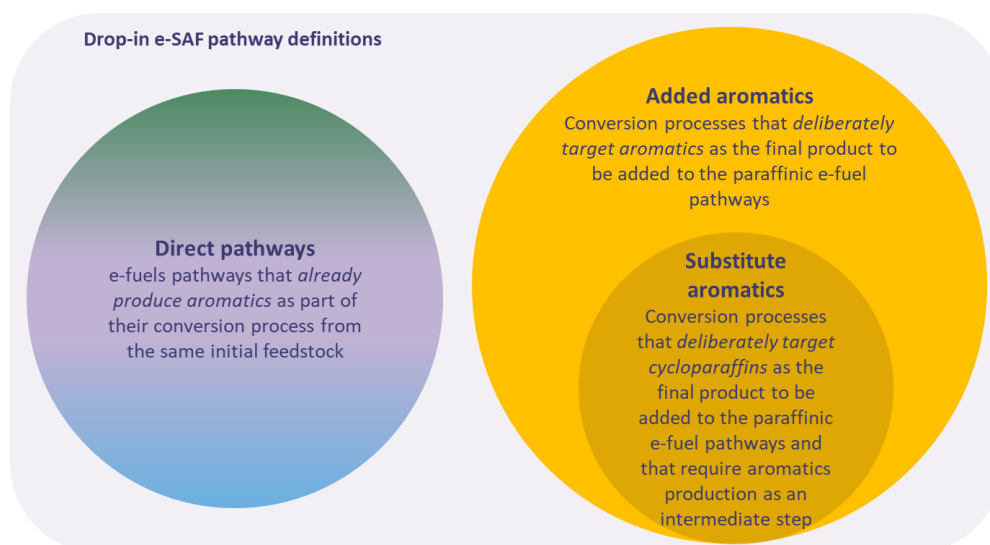
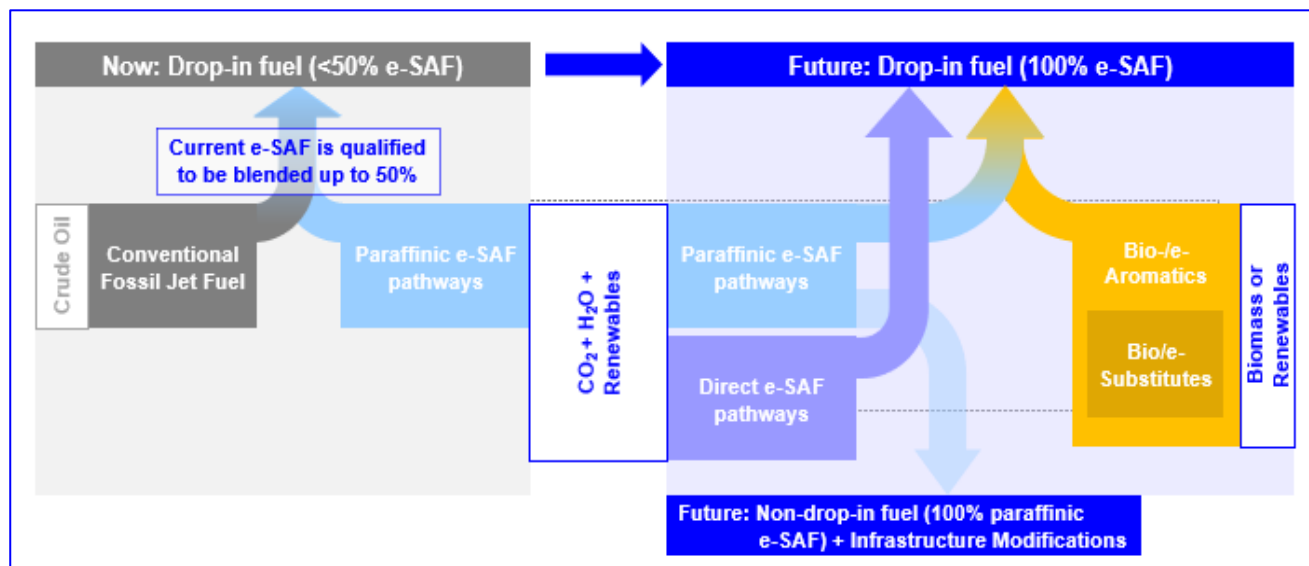
Source : ATAG & ICF Scenario 3 <https://atag.org/industry-topics/climate-action> - [https://aviationbenefits.org/media/167495/fueling-net-zero\\_september-2021.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167495/fueling-net-zero_september-2021.pdf)

Dans ce contexte, et en reconnaissant les limitations, l'étude de la New Energies Coalition s'est concentrée sur la compréhension de la faisabilité et du potentiel de l'e-SAF 100% drop-in.



## 100% drop-in e-SAF feasibility

L'étude a identifié 3 voies pour produire du e-SAF 100 % drop-in - Direct, ajout d'aromatiques, ou substitution d'aromatiques\* – détaillées sur figures ci-dessous :



Figures 6 & 7 : 3 groupements de voies pour produire 100% de e-SAF de substitution

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)

## Production

Parmi ces trois principaux groupements, notre étude a identifié plusieurs voies prometteuses pour produire du e-SAF 100 % drop-in, qui se distinguaient en termes de maturité technologique et de niveau d'activité des développeurs – voir tableau ci-dessous. Pour chaque voie, le coût de production nivelé et les émissions de GES ont été évalués par ERM en utilisant leur modèle techno-économique interne.

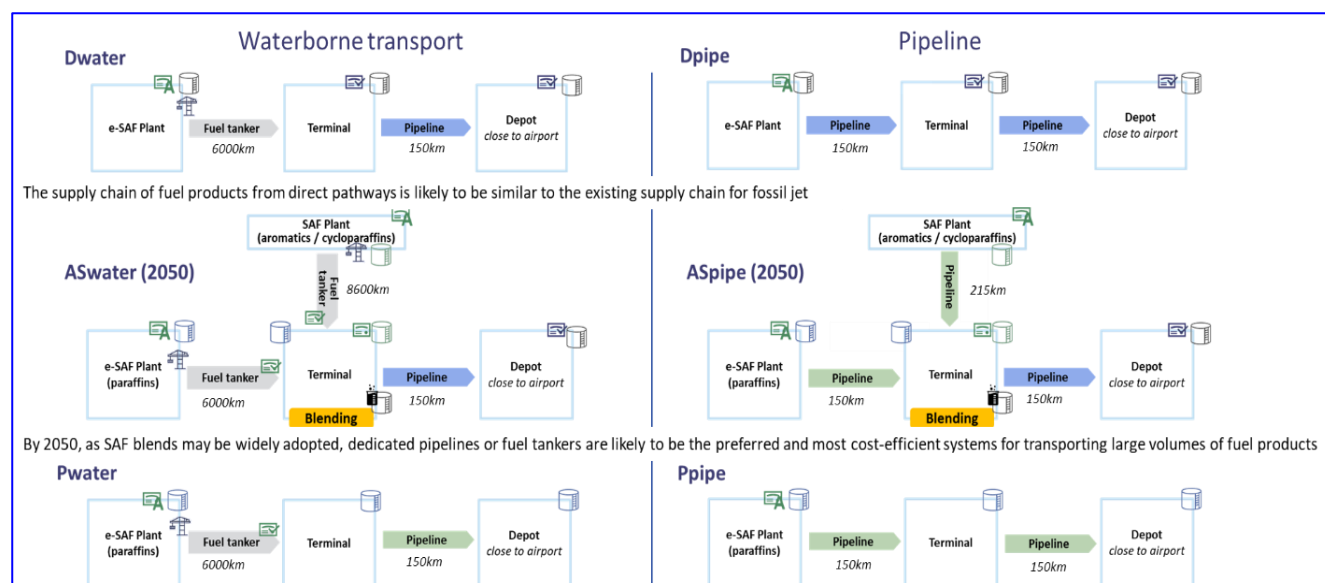
| Fuel pathway                                | Feedstock/main input   | Fuel products                   | Non-fuel co-products | TRL ERM |
|---|--|---------------------------------|----------------------|---------|
| Direct FT                                   | Renewable electricity via grid   | Jet, naphtha, diesel (only MTJ) | Steam                | 5       |
| Methanol (MEOH) to jet (via MTO)            |  |                                 |                      | 5-6     |
| Paraffinic FT via RWGS                      |  |                                 |                      | 6       |
| Catalytic reforming of Naphtha (with Capex) | Bio-naphta from HVO production<br>e-naphtha as a byproduct of FT synthesis | Naphtha reformat, LPG           | Gaseous hydrogen     | 7-9     |
| Catalytic reforming of Naphtha (w/o Capex)  |  |                                 |                      | 6-9     |
| Bioethanol to aromatics                     | 2G bioethanol  | Liquid hydrocarbon product      |                      | 6       |
| Hydropyrolysis                              | Wood chips (50% moisture)  |                                 | Char, ammonia, steam | 5       |
| APR (imported hydrogen)                     | Lignocellulosic biomass  |                                 | Steam, electricity   | 5       |
| APR (hydrogen in situ)                      |  |                                 | Steam                | 5       |

**Figure 8: Voies prometteuses pour produire du e-SAF 100% drop-in**

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)

## Infrastructures de Distribution

Les coûts et les émissions de GES liés au transport, au stockage et à la distribution de SAF ou de composants SAF ont été comparés pour les voies directes (« D »), le mélange de composants paraffiniques et aromatiques (ou substituts aromatiques) (« AS »), et les carburants uniquement paraffiniques (« P »), en tenant compte des modes de transport par voie maritime ou par pipeline. Les étapes d'infrastructure modélisées dans l'étude d'ERM pour ces options sont illustrées dans la figure ci-dessous :



**Figure 9 : Infrastructure de distribution de SAF de la production au dépôt de l'aéroport**

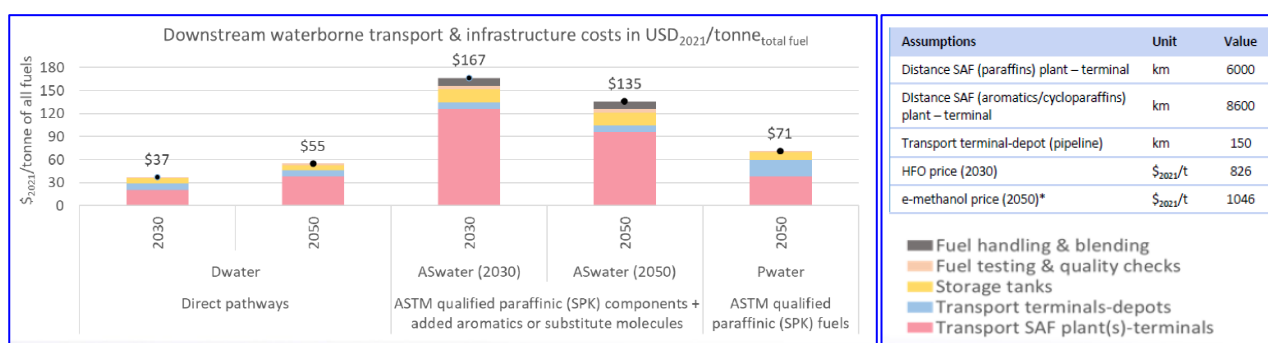
Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)

Ces scénarios ont été évalués pour les années 2030 et 2050, en tenant compte des coûts et de l'intensité en GES des intrants pour l'infrastructure de transport et de distribution attendue à ces horizons. Étant donné que l'adoption de carburants paraffiniques non drop-in devrait être limitée par la préparation technique et réglementaire, une infrastructure dédiée à ces filières ne devrait être développée qu'après 2030, de sorte que les options de distribution Pwater et Ppipe n'ont été évaluées qu'en 2050.

Notez que l'infrastructure présentée ici se termine au dépôt où le carburant est stocké près de l'aéroport. Des efforts considérables supplémentaires seraient nécessaires pour les chaînes d'approvisionnement transportant des carburants paraffiniques non drop-in à 100 % du dépôt à l'avion, tandis que les carburants drop-in pourront utiliser l'infrastructure existante entre le dépôt et l'avion.

## Coûts

Pour les scénarios étudiés et les hypothèses considérées par l'étude, les coûts associés à l'infrastructure de transport et de distribution sont faibles par rapport à leurs coûts de production - voir l'exemple ci-dessous pour le transport par voie d'eau.

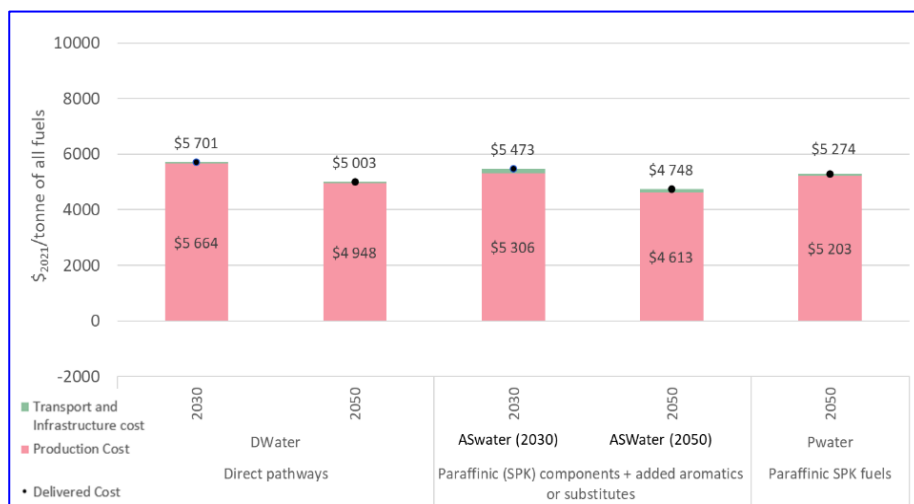


**Figure 10: Coûts de transport fluvial et d'infrastructure en aval.**

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)

Ces coûts de distribution ont été ajoutés au coût de production du carburant des filières sélectionnées pour déterminer le « coût livré » du carburant, c'est-à-dire le coût du SAF au dépôt de carburant de l'aéroport. Dans le cas du coût paraffinique non drop-in, le coût supplémentaire de l'infrastructure de distribution séparée au sein de l'aéroport devrait être ajouté, ce qui pourrait également avoir un impact sur la réduction des GES et l'acceptabilité.

Le graphique ci-dessous montre les résultats pour le transport par voie d'eau, en tenant compte des bio-aromatiques pour la filière des « aromatiques ajoutés ».

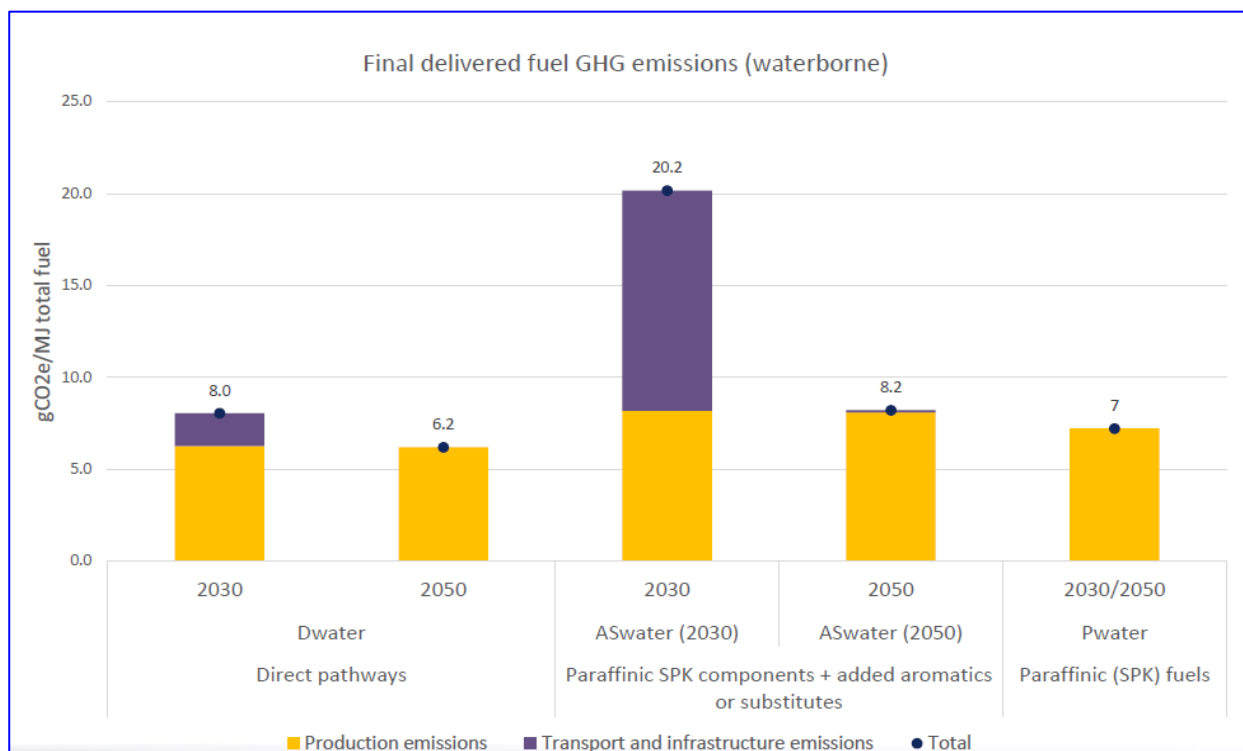


**Figure 11: Coûts de l'e-SAF livré par voie d'eau en 2030 et 2050, pour les voies directes, les aromatiques ajoutés et les paraffiniques non drop-in**

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)

- Les coûts de transport et d'infrastructure (en vert) sont faibles par rapport au coût de production de carburant (en rose).
- En général, sur une année, le coût livré à travers toutes les filières est similaire avec des différences qui se situent dans la marge d'erreur.
- En plus des « filières directes », une autre option consiste à mélanger des aromatiques avec du e-SAF paraffinique. Cependant, lorsque des e-aromatiques sont utilisés à la place des bio-aromatiques, le coût de production du mélange sera plus élevé que celui indiqué ci-dessus. Par conséquent, l'incorporation de bio-aromatiques serait probablement une première étape avant que l'industrie ne vise à développer des solutions plus sophistiquées telles que les e-aromatiques.
- En effet, les projections de production d'aromatiques réalisées dans le cadre de cette étude suggèrent que si les deux filières bio-SPK et e-SPK (paraffinique) nécessitent des aromatiques externes pour le mélange, il pourrait ne pas y avoir une offre mondiale suffisante d'aromatiques renouvelables en 2050 pour atteindre les objectifs de l'industrie. Il pourrait être nécessaire d'utiliser davantage de filières directes, ou de substituts aromatiques tels que les cycloalcanes, ou d'utiliser des solutions entièrement paraffiniques non drop-in. La concurrence avec d'autres utilisations des aromatiques renouvelables (par exemple dans l'industrie chimique) est également probable.

## Emissions de gaz à effet de serre



**Figure 12: Livraison des émissions de GES de SAF électronique par voie d'eau en 2030 et 2050 pour les voies directes, les aromatiques ajoutés et les paraffiniques non intégrées.**

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)

- Les aromatiques modélisés dans la Figure 12 sont produits à partir de matières premières de biomasse et peuvent avoir des émissions de GES légèrement plus élevées que le e-SAF. Par exemple, les bio-aromatiques issus du bio-naphta via le CNR (Reformage Catalytique du Naphta) et le bioéthanol de 2G ont respectivement ~15 et 14 gCO2e/MJLHV (ce qui reste très faible).
- Basé sur ces hypothèses, le mélange de bio-aromatiques avec du e-SAF paraffinique peut légèrement augmenter les émissions de GES par rapport au SAF drop-in produit via des voies directes. Les e-aromatiques auraient probablement des émissions de GES plus faibles que les bio-aromatiques, ce qui réduirait légèrement les émissions de production globales.
- Les émissions de distribution sont plus élevées pour la voie des « aromatiques ajoutés » par rapport aux voies directes. Cela est dû au besoin supplémentaire de transporter les composants de mélange vers une installation de mélange avant la distribution du produit final 100% drop-in. Cela pourrait être assez pénalisant pour la voie des « aromatiques ajoutés » en 2030 mais devient négligeable d'ici 2050 car on suppose que le transport se décarbonise également.

## Overview of e-fuels categories

Les deux tableaux ci-dessous résument les principales conclusions de l'étude en termes de niveau de maturité technologique (TRL), de contraintes de matières premières et de statut ASTM (Figure 14), ainsi que les coûts de production de carburant / infrastructure, le potentiel de réduction des GES et d'autres considérations (Figure 15).

**Les voies directes sont moins matures, mais le mélange d'aromatiques avec des composants paraffiniques repose sur des matières premières qui peuvent avoir des demandes concurrentes. De plus, l'ASTM joue un rôle clé en travaillant avec les fabricants de moteurs et de cellules pour qualifier de nouvelles voies de SAF.**

| e-fuel category |  | TRL / Level of activity   | Feedstock constraints   | ASTM Qualification status  |
|-----------------|--|---|---|--|
|                 |  | <input type="radio"/> TRL 8-9 and high activity<br><input type="radio"/> TRL 5-7 and mid activity<br><input type="radio"/> TRL 1-4 and low activity   | <input type="radio"/> Low constraints<br><input type="radio"/> Medium constraints<br><input type="radio"/> High constraints   | <input type="radio"/> Many qualified<br><input type="radio"/> Few qualified/ in progress<br><input type="radio"/> None qualified   |
| Drop-in         | Direct pathways  | TRL5-6: still at a relatively early stage, with some developers pursuing this space. Projected rate of supply ramp up is expected to be slower.   | Do not rely on external feedstocks to obtain aromatic content. Depend on CO <sub>2</sub> and renewable electricity availability.  | One ASTM qualified pathway (ATJ-SKA) but limited to <50% blend, others in the process of obtaining qualification   |
|                 | Paraffinic pathways + Added aromatics (A) or substitutes (S) | (A) Could utilize technologies present in existing refineries (e.g. CNRs) with feedstock from mature (e.g. HEFA) or maturing (Gasification + FT) routes<br>(S) Currently, all pilot/demo stage routes to cycloparaffins have aromatic intermediate products, whilst routes without prior aromatic hydrotreatment are at R&D/lab scale. There still remains significant uncertainty over level of cycloparaffins needed to replace aromatics for seal swelling, as well. | <b>Aromatics &amp; Substitutes</b><br>Rely on obtaining feedstocks (e.g. bio or e-naphtha, 2G bioethanol) from other low carbon fuel pathways, which might imply competition for feedstock (and bio-SAF pathways may also need aromatics) | <b>Aromatics &amp; Substitutes</b><br>One 50% ASTM qualified pathway (CHJ), several others in the process of certification<br><b>Paraffinic components</b><br>Multiple ASTM qualified pathways (max 50%) |
| Non drop-in     | Paraffinic (SPK) fuels                                       | <b>Paraffinic components</b><br>Similar TRL to Direct pathways (5-6), but higher level of developer activity  | <b>Paraffinic components</b><br>Same as for Direct pathways   | <b>100% paraffinic fuels:</b> (due to non drop in nature)  |

Figure 14: Vue d'ensemble des catégories de e-carburants : Prêt technologique, Contraintes de matières premières et Statut des qualifications ASTM.

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)

**Tous les e-SAF devraient avoir des coûts similaires et un potentiel de réduction des GES comparable, mais les voies directes auront un avantage en termes de facilité de transport et de manipulation du carburant.**

| e-fuel category |  | Fuel production costs   | Infrastructure costs   | GHG emissions reduction potential  | Wider sustainability considerations   |
|-----------------|--|---|--|--|---|
|                 |  | <input type="radio"/> Medium production costs<br><input type="radio"/> High production costs<br><input type="radio"/> Higher production costs   | <input type="radio"/> Lower infrastructure costs<br><input type="radio"/> Medium infrastructure costs<br><input type="radio"/> Higher infrastructure costs | <input type="radio"/> High reduction potential<br><input type="radio"/> Medium reduction potential<br><input type="radio"/> Low reduction potential                      | <input type="radio"/> Low risks<br><input type="radio"/> Medium risks<br><input type="radio"/> High risks                                   |
| Drop-in         | Direct pathways  | Potentially slightly higher than blending, but within uncertainty margin  | Lowest as fewest changes expected to infrastructure  | As per paraffinic component below. May have slight benefit in terms of transportation GHGs as only one 'set' of molecules needs to be transported                        | No high risks identified for any pathways – but there are some considerations related to water and land needs, and usage of mined resources |
|                 | Paraffinic pathways + Added aromatics (A) or substitutes (S) | Expected to be slightly lower than other two categories as can benefit from use of cheaper bio-based feedstock (but note future competition for bio-based feedstock from bio-SAF and chemicals) | Highest as essentially two 'sets' of molecules need to be transported and stored then blended  | <b>Aromatics &amp; Substitutes</b><br>Very good if waste-based biomass used, and renewable hydrogen used for upgrading   | For bio-aromatics, impact on water and land usage is highly dependent on feedstock (crop-based vs. waste-based)                             |
| Non drop-in     | Paraffinic (SPK) fuels                                       | Expected to be similar to Direct Pathways   | Higher than Direct but lower than blending   | <b>Paraffinic components</b><br>Can be very good if renewable heat used for processing and renewable electricity is used to produce hydrogen and capture CO <sub>2</sub> | 0 aromatic content potentially beneficial regarding non-CO <sub>2</sub> effects and local air quality                                       |

Figure 15: Évaluation des catégories de carburants électroniques : Coûts de production, Exigences en matière d'infrastructure, Potentiel de réduction des émissions et Considérations de durabilité.

Source : Etude ERM pour la Coalition New Energies (2023)



## Conclusions

**La quantité de SAF nécessaire pour atteindre la neutralité carbone à l'échelle mondiale d'ici 2050 est importante**, allant de 330 à 440 millions de tonnes par an selon le scénario (Source: [ATAG/ICF Fuelling Net Zero report](#)).

À court et moyen terme, **l'accent sera principalement mis sur le bio-SAF** en raison de son niveau de maturité technologique existant et de l'émergence de sa production à l'échelle commerciale.

L'e-SAF devrait atteindre sa maturité au plus tôt **au milieu des années 2030** et pourrait représenter **jusqu'à 25 %** de la production totale de SAF en 2050

Sur la base des développeurs actuels et de l'orientation de leurs activités, d'ici 2050, **20 % de l'e-SAF** pourrait provenir **de voies directes drop-in**. **Les voies directes drop-in** pourraient devenir le **choix préféré** car elles ne sont pas en concurrence pour les aromatiques et sont entièrement compatibles avec les infrastructures existantes, mais elles ne sont pas encore techniquement matures et aucune production commerciale à l'échelle industrielle n'est envisageable dans un avenir proche.

**L'offre projetée d'aromatiques pourrait être suffisante pour permettre à l'e-SAF paraffinique de devenir 100 % drop-in** – cependant, **des aromatiques d'origine biologique pourraient également être nécessaires** pour que le SAF dérivé de bio-paraffine devienne drop-in et il pourrait y avoir une concurrence pour les aromatiques renouvelables provenant d'autres secteurs, par exemple, les produits chimiques.

**La complexité du développement d'infrastructures** supplémentaires pour utiliser des mélanges paraffiniques/aromatiques ou des carburants paraffiniques purs est significative, avec des **coûts de transport et d'infrastructure plus élevés** et des émissions de GES attendues.

Des **aromatiques/substituts ajoutés** seront **nécessaires pour permettre aux voies paraffiniques établies de dépasser les niveaux de mélange actuels**, mais la production mondiale d'aromatiques/substituts à faible teneur en carbone pourrait ne pas être suffisante.

Pour **la voie entièrement paraffinique (non drop-in)**, des **incertitudes** subsistent concernant les **considérations d'infrastructure**.

En fin de compte, **les trois catégories (direct drop-in, aromatiques/substituts ajoutés et entièrement paraffinique non drop-in)** seront probablement **nécessaires pour atteindre l'objectif de décarbonisation de l'industrie**, et des efforts de **développement** supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les incertitudes clés et accélérer leur déploiement.

## Glossaire

**APR : Aqueous-Phase Reforming** (APR) est un processus de reformage à haute température utilisant un catalyseur chimique pour convertir les sucres (qui peuvent être dérivés de l'hydrolyse de la biomasse et des déchets) en un mélange de composés oxygénés, y compris des acides, des cétones, des aromatiques et des hydrocarbures cycliques. Ce produit intermédiaire peut ensuite être amélioré pour fabriquer une gamme de produits hydrocarbonés, y compris des paraffines pour carburateur, des aromatiques et/ou des cycloparaffines.

**ASTM International : ASTM International**, anciennement connue sous le nom de American Society for Testing and Materials, est une organisation de normalisation qui élabore et publie des normes techniques internationales consensuelles et volontaires pour une large gamme de matériaux, produits, systèmes et services.

**CORSIA : The Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation** (CORSIA) est un programme de compensation et de réduction des émissions de carbone visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des vols internationaux, afin de limiter l'impact de l'aviation sur le changement climatique. Il a été développé par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et adopté en octobre 2016.

**CNR : Catalytic Naphtha Reforming** (CNR) est un processus utilisé pour convertir les naphthas à faible indice d'octane en composants de mélange d'essence à indice d'octane élevé appelés reformats. Le reformage est l'effet total de plusieurs réactions qui se produisent simultanément, y compris le craquage, la polymérisation, la déshydrogénation et l'isomérisation.

**ETJ : Ethanol-to-Jet** est un processus catalytique de déshydratation de l'éthanol (généralement dérivé de matières premières telles que le maïs, la canne à sucre ou les déchets) en éthylène, suivi d'une oligomérisation et d'un hydrotraitement pour produire du carburateur.

**MTJ : Methanol-to-Jet** est un processus catalytique qui convertit le méthanol (un alcool simple pouvant être dérivé de diverses sources de biomasse, de gaz naturel ou d'électricité renouvelable et de CO<sub>2</sub>) en oléfines à chaîne courte (telles que le propylène et l'éthylène), suivi d'une oligomérisation et d'un hydrotaitement pour produire du carburateur.

**FT : Fischer-Tropsch** (FT) est un processus catalytique utilisé pour produire des hydrocarbures à partir de gaz de synthèse, un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Les cires FT générées sont hydrogénées pour produire des hydrocarbures à chaîne plus courte, tels que le carburateur.

**GHG : Greenhouse Gas Emissions** (GHG) Les émissions provenant des activités humaines intensifient l'effet de serre. Cela contribue au changement climatique. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), issu de la combustion de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, est l'un des facteurs les plus importants dans la cause du changement climatique.

**IATA : International Air Transport Association** (IATA) est une association commerciale des compagnies aériennes mondiales fondée en 1945. En plus de fixer des normes techniques pour les compagnies aériennes, l'IATA a également organisé des conférences tarifaires qui ont servi de forum pour la fixation des prix.

**LPG : Liquefied Petroleum Gas** (LPG) est un mélange de butane et de propane, dont les proportions dépendent de la saison.

**MTO : Methanol To Olefins** (MTO) est une brique de processus intermédiaire pour produire du SAF à partir de méthanol.

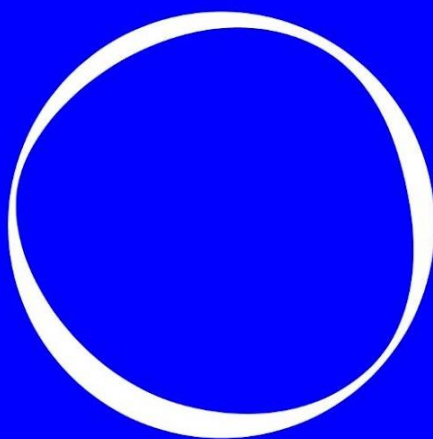
**OACI : l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale** (ICAO en anglais) est une agence spécialisée des Nations Unies qui coordonne les principes et les techniques de la navigation aérienne internationale et favorise la planification et le développement du transport aérien international pour assurer une croissance sûre et ordonnée.

**RWGS : La réaction Reverse Water-Gas Shift** (RWGS) est un processus chimique qui convertit le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et l'hydrogène (H<sub>2</sub>) en monoxyde de carbone (CO) et en eau (H<sub>2</sub>O).

**SAF : Sustainable Aviation Fuel** (SAF) ou carburant d'aviation durable est un type de carburant conçu pour alimenter les avions avec une empreinte carbone réduite par rapport aux carburants d'aviation conventionnels à base de fossiles.

**SPK : Synthetic Paraffinic Kerosene** (SPK) est un type de carburant d'aviation durable produit par divers procédés chimiques pour créer un carburant pour avion de haute qualité et renouvelable. Le SPK est conçu pour être compatible avec le carburant pour avion conventionnel et, lorsqu'il est mélangé, peut être utilisé dans les moteurs d'avion et les infrastructures existants sans modifications.

**TRL : Technology Readiness Levels** (TRL) est une métrique utilisée pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie particulière. Chaque voie est évaluée par rapport aux paramètres de chaque TRL et se voit ensuite attribuer une note TRL. Il existe neuf niveaux de maturité technologique, avec le TRL 1 comme le plus bas (concept théorique) et le TRL 9 (entièrement commercialisé) comme le plus élevé. Plus d'infos [ici](#)



# **NEW ENERGIES**

The energies coalition for transport & logistics

[www.newenergiescoalition.com](http://www.newenergiescoalition.com)