



POUVOIR VOLER SANS PÉTROLE: QUEL APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE POUR LE SECTEUR AÉRIEN ?

Rapport final — Février 2026



Table des matières

A propos d'Aéro Décarbo	8
A propos du Shift Project	8
A propos de l'Institut Mobilités en Transition	9
Liste des abréviations	10
INTRODUCTION	13
PARTIE I – QUE SONT LES SAF ?	17
I. Comprendre les avantages climatiques des SAF	18
A. CO ₂ biogénique et CO ₂ fossile : une même molécule aux effets différenciés sur le climat	18
B. Analyses de cycle de vie comparées	20
C. ACV, ILUC et frontières du système : l'empreinte carbone dépend fortement des conventions méthodologiques	21
D. SAF : un seul terme pour une pluralité de réalités	23
II. Cartes d'identité des bioSAF	24
A. Voie HEFA	25
B. Voie AtJ	25
C. Voie BtL	27
D. Voie PBtL (Power Biomass-to-Liquid) ou e-bioSAF	28
III. Cartes d'identité des e-SAF	30
A. Voies de production	30
B. Avantages climatiques et comptabilité du CO ₂ capté	30
C. Consommation électrique et intensité carbone	31
IV. Synthèse des filières de production de carburant aérien non fossile	34
A. Rendement de conversion massique	35
B. Rendement énergétique	35
C. Sélectivité	35
D. Facteur d'émission	36
E. Coût	37
F. Maturité technologique	37
G. Tableau de synthèse	38
V. Régulations et certifications	39
A. Certification ASTM	39
B. Mécanisme de compensation carbone CORSIA	40
C. Directive européenne RED	40
D. Règlement européen ReFuel EU Aviation	43
Conclusion	43

PARTIE II – QUELLES RESSOURCES POUR LES BIOCARBURANTS ?.....44

I. Préambule	45
II. Inventaire des matières premières pour les biocarburants	47
A. Biomasse forestière et déchets de bois.....	48
B. Cultures dédiées à une valorisation énergétique sur terres arables	49
C. Résidus de cultures agricoles	50
D. CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique).....	51
E. Huiles de cuisson usagées et graisses animales	52
F. Déchets municipaux.....	53
G. Effluents d'élevages.....	53
H. Synthèse des estimations	54
III. Hiérarchie des usages de la biomasse-énergie.....	56
A. Compétition pour les surfaces agricoles.....	56
B. Compétition pour l'utilisation de la biomasse	56
C. Compétition entre filières énergétiques	57
IV. Demandes en carburants	61
A. Aérien	61
B. Maritime	62
C. Poids lourds	64
D. Véhicules légers	66
E. Agriculture et pêche	67
F. Synthèse de l'évolution de la demande mondiale en carburants	68
V. Comparaison des volumes potentiels de biocarburants	69
A. Hypothèses.....	69
B. Résultats.....	70
C. Analyse et points de vigilance sur les biocarburants	70
Conclusion.....	72

PARTIE III – QUELLE CONTRIBUTION DES E-SAF POUR SORTIR DU KÉROSÈNE FOSSILE ?.....73

I. Des limites différentes de celles des biocarburants	74
A. Gisements de CO ₂	74
B. Usage d'hydrogène.....	74
C. Ressources métalliques	74
D. Consommation d'eau	75
E. Surface au sol.....	76
II. Consommation d'électricité	77
A. Ordres de grandeur à l'échelle française, européenne et mondiale.....	77
B. Limites "dures" (physiques) vs. "molles" (sociétales).....	77
III. Points de vigilance e-SAF	78
A. Origine du CO ₂	78
B. Intensité carbone de l'électricité	78

C. Risque de dérive sur l'électricité consommée	78
D. Émissions évitées par kWh d'électricité bas-carbone	79
IV. Des importations sous contraintes	80
A. Facteurs géographiques propices à la production d'e-SAF	80
B. Des capacités incertaines	80
C. Grands pays exportateurs	81
D. Souveraineté et balance commerciale	82
E. Sous-mandats ReFuel EU et enjeux du déploiement d'une filière européenne	83
Conclusion.....	83

PARTIE IV – QUELS SCÉNARIOS DE DÉCARBONATION DE L'AVIATION MONDIALE ?

I. Préambule	85
A. Différentes options de décarbonation.....	85
B. Scénarios de référence et méthodologie.....	86
C. Facteurs d'émissions considérés	88
D. Budgets carbone.....	90
II. Scénario de base : annonces du secteur et gisements SAF estimés par l'AIE	93
A. Méthodologie - Scénario de base.....	93
B. Résultats - Scénario de base	94
C. Analyses - Scénario de base	96
D. Conclusions - Scénario de base.....	98
III. Scénario alternatif : recours à des SAF à la durabilité dégradée	99
A. Méthodologie - Scénario SAF à la durabilité dégradée	99
B. Résultats - Scénario SAF à la durabilité dégradée	99
C. Analyses - Scénario SAF à la durabilité dégradée	100
D. Conclusions - Scénario SAF à la durabilité dégradée	101
IV. Scénario alternatif : modification de l'arbitrage	103
A. Méthodologie - Scénario modification arbitrage	103
B. Résultats - Scénario modification arbitrage	104
C. Analyses - Scénario modification arbitrage	105
D. Conclusions - Scénario modification arbitrage	106
V. Scénario alternatif : e-bioSAF & e-SAF additionnels	107
A. Méthodologie - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels	107
B. Résultats - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels.....	108
C. Analyses - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels	109
D. Conclusions - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels	111
VI. Scénario alternatif : modération du trafic	112
A. Méthodologie - Scénario modération trafic (1.5°C).....	112
B. Résultats - Scénario modération trafic (1.5°C)	113
C. Méthodologie - Scénario modération trafic (1.7°C).....	114
D. Résultats - Scénario modération trafic (1.7°C)	115

E. Analyses - Scénarios modération trafic (1.5°C et 1.7°C)	115
F. Conclusions - Scénarios de modération de trafic (1.5°C et 1.7°C)	119
Conclusion.....	120
PARTIE V – QUEL APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE POUR L'AVIATION FRANÇAISE ?.....121	
I. Approvisionnement en carburants liquides.....	122
A. Aérien	123
B. Maritime.....	123
C. Routier.....	124
D. Agriculture et pêche	125
E. Synthèse de l'évolution de la demande française en carburants	126
II. Gisements CO₂.....	127
A. Gisement de CO ₂ fossile capté en sortie de sites industriels.....	127
B. Gisement de CO ₂ biogénique	128
C. Synthèse des gisements de CO ₂ mobilisables	129
III. Gisements en biomasse pour les biocarburants	130
A. Matière première pour les voies HEFA et AtJ	131
B. Matière première pour les voies BtL et PBtL	132
C. Synthèse.....	136
IV. Capacités de production ou d'importation d'e-SAF	138
A. Comparaison avec les scénarios de 2021 de RTE.....	138
B. Produire plus d'électricité en France ?	139
C. Reposer sur des importations ?	139
V. Contraintes de production et projets en cours.....	140
A. e-SAF	140
B. HEFA	142
C. AtJ	142
D. BtL et PBtL.....	143
E. Risques et points de vigilance.....	144
VI. Transition énergétique de l'aérien français.....	146
A. Hypothèses d'approvisionnement	146
B. Un approvisionnement en biomasse complexe	148
C. Capacité de production potentielle	149
D. Alignement avec les objectifs réglementaires et climatique	152
E. Adaptation nécessaire du trafic aérien	153
F. Vers une sobriété aérienne organisée.....	155
Conclusion.....	157
CONCLUSION	
Auteurs et remerciements	160
Table des illustrations	161

ANNEXES **164**

Annexe 1 – Ordres de grandeur	165
A. Quelles quantités de matières premières pour alimenter en SAF un avion reliant Paris à Montréal ?	165
B. Quelle distance parcourue avec 1 MWh d'électricité ?	165
C. Comment maximiser la production de SAF sur une surface donnée ?	166
Annexe 2 – Récapitulatif des matières premières biologiques	168
Annexe 3 – Traduction ANNEXE IX RED (réglementation européenne)	169
Annexe 4 – Analyse supplémentaire des scénarios à l'échelle mondiale	171
Différents mix considérés	171
Sensibilité à l'ambition des hypothèses	173

A propos d'Aéro Décarbo

Aéro Décarbo rassemble des femmes et des hommes, salariés, entrepreneurs, retraités, étudiants et passionnés d'aéronautique et d'aérospatial, autour d'une mission commune : accompagner ces secteurs vers un avenir respectueux des limites planétaires. Avec rigueur scientifique et honnêteté intellectuelle, l'association analyse et encourage la transformation de l'usage de l'air afin d'assurer la pérennité des industries qui en dépendent.

En 2021, nous avons publié, en collaboration avec le Shift Project, *Pouvoir voler en 2050*, un rapport fondateur qui a identifié les leviers de décarbonation de l'aéronautique, sensibilisé à l'importance du cumul des émissions jusqu'en 2050, et surtout souligné la nécessité de réfléchir à la fin de la croissance du trafic aérien.

Depuis, l'association participe régulièrement aux réflexions sur l'avenir de l'aviation, en donnant une voix aux personnes et aux territoires qui en dépendent. Dans le domaine spatial, deux travaux novateurs, en partenariat avec d'autres associations, ont mis en lumière les enjeux environnementaux d'une industrie unique en ce qu'elle impacte l'atmosphère au-delà de la tropopause.

À travers nos actions de sensibilisation et de plaidoyer, nous cherchons à intégrer les préoccupations environnementales dans les décisions stratégiques, tout en offrant aux professionnels un espace pour exprimer leurs besoins et partager leurs expériences. Parce que l'aviation et le spatial évoluent dans les airs, il nous semble essentiel qu'ils se préoccupent non seulement de l'état actuel de l'atmosphère, mais aussi de son avenir.

www.decarbo.org

A propos du Shift Project

The Shift Project est un groupe de réflexion qui vise à éclairer et influencer le débat sur les défis climat-énergie. Association d'intérêt général, nous sommes guidés par l'exigence de rigueur scientifique et technique, et notre regard sur l'économie est avant tout physique et systémique.

Nous réalisons des études sur les enjeux clés de la décarbonation. Nous constituons des groupes de travail qui produisent des analyses robustes, quantitatives et qualitatives, ainsi que des propositions pragmatiques. Notre démarche de recherche est ouverte, itérative et collaborative. Nos publications sont librement accessibles à toute personne intéressée. Nous les diffusons auprès des professionnels, dirigeants et corps intermédiaires des secteurs et enjeux concernés. Ce réseau d'experts est mobilisé constamment, pour consolider nos travaux, et nous aider à les faire connaître. Nous favorisons les discussions entre parties prenantes, de manière apartisane.

Le Shift Project a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public. Il est soutenu par plusieurs grandes entreprises.

www.theshiftproject.org

A propos de l’Institut Mobilités en Transition

L’Institut Mobilités en Transition (IMT) est un think tank français indépendant, créé en 2023 après deux ans d’incubation au sein de l’Institut du développement durable et des relations internationales (IDDR). A la fois plateforme de dialogue et lieu de production d’analyses et de recommandations, l’IMT a pour mission de contribuer concrètement au succès de la transition du secteur des mobilités, en organisant un dialogue de haut niveau entre parties prenantes et en produisant des analyses et recommandations fondées sur des données fiables. Avec pour ambition d’objectiver les enjeux environnementaux, sociaux, industriels et politiques, pour faciliter une mise en œuvre opérationnelle de la transition, l’IMT :

- Anime une plateforme de dialogue protégée (règle de Chatham House) qui rassemble industriels, ONG, collectivités, universités, think tanks, et énergéticiens.
- Analyse des bases de données techniques sur le parc routier français, la fiscalité, le profil des détenteurs, etc.
- Met en place des collaborations techniques au niveau européen (C-Ways, ICCT, etc.)
- Publie des rapports, policy briefs et blogs qui sont destinées à éclairer les décideurs publics français et européens, en apportant une base factuelle et une vision systémique, qui peuvent être ensuite reprises et réutilisées pour du plaidoyer.

Jean-Philippe Hermine est le directeur général de l’IMT, et Sébastien Treyer (DG de l’IDDR) en est le président. L’équipe se compose d’experts spécialisés dans les transitions industrielle, circulaire, énergétique et sociale.

www.institut-mobilites-en-transition.org

Contacts

Timon Vicat-Blanc, Président, Aéro Décarbo, contact@decarbo.org

Loïc Bonifacio, Vice-président, Aéro Décarbo, contact@decarbo.org

Ilana Toledano, Responsable communication, The Shift Project,
ilana.toledano@theshiftproject.org

Jean-Philippe Hermine, Directeur, Institut Mobilités en Transition,
jeanphilippe.hermine@sciencespo.fr

Liste des abréviations

ACV (Analyse de cycle de vie) : Évaluation des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie.

AIE (Agence internationale de l'énergie) : (Voir IEA) Organisation intergouvernementale pour l'analyse des politiques énergétiques.

AtJ (Alcohol-to-jet) : Procédé de production de biocarburants en passant par la conversion d'alcools (éthanol, butanol).

ASTM (American Society for Testing and Materials) : Organisme de normalisation technique pour les carburants.

bioSAF (Biomass-based Sustainable Aviation Fuel) : SAF produit à partir de biomasse.

Biocarburant : Carburant produit à partir de biomasse.

Biomasse : Matière organique d'origine végétale ou animale valorisée énergétiquement.

BtL (Biomass-to-Liquid) : Transformation thermochimique de biomasse en carburant liquide.

Budget carbone : Volume d'émissions de CO₂.

CAD (Carburant d'aviation durable) : (Voir SAF) Carburant alternatif au kérosène fossile, bas carbone.

CIVE (Culture intermédiaire à vocation énergétique) : Culture temporaire non alimentaire dédiée à la production de biomasse énergétique.

CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) : Mécanisme de compensation carbone pour le transport aérien international.

DAC (Direct Air Capture) : Technologie de captage direct du CO₂ dans l'air ambiant.

e-SAF : SAF synthétique produit à partir d'électricité et de CO₂ capté.

EJ (Exajoule) : Unité d'énergie équivalente à 10¹⁸ joules.

Facteur de charge : Ratio entre production effective et capacité maximale d'une installation.

FT (Fischer-Tropsch) : Procédé de synthèse de carburants à partir de gaz de synthèse.

Forçage radiatif : Influence d'un gaz ou d'une particule sur l'équilibre énergétique terrestre.

gCO₂e/MJ (Grammes de CO₂ équivalent par mégajoule) : Indicateur de l'intensité carbone d'un carburant.

GES (Gaz à effet de serre) : Gaz contribuant au réchauffement climatique (CO₂, CH₄, N₂O).

HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) : Procédé de production de carburants à partir d'huiles végétales ou animales.

ICCT (International Council on Clean Transportation) : Organisation experte des politiques de transport propre.

ICE (Internal Combustion Engine) : Moteur thermique fonctionnant par combustion interne (essence, diesel, biocarburant, etc.).

IEA (International Energy Agency) : (Voir AIE) Organisation internationale spécialisée dans l'analyse énergétique.

ILUC (Indirect Land Use Change) : Émissions liées à des changements indirects d'affectation des sols.

LCAF (Low-Carbon Aviation Fuel) : Carburant fossile avec une intensité carbone réduite.

LCA (Life Cycle Assessment) : (Voir ACV) Méthode d'analyse environnementale globale d'un produit ou service.

Méthanisation : Dégradation anaérobique de matière organique pour produire du biogaz.

MS (Matière sèche) : Masse de biomasse hors humidité.

MSW (Municipal Solid Waste) : Déchets solides municipaux valorisables pour l'énergie ou les carburants.

OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) : (Voir ICAO) Agence des Nations Unies pour l'aviation civile.

PBtL (Power-and-Biomass-to-Liquid) : Procédé combinant biomasse et électricité pour produire des carburants liquides.

PCI (Pouvoir calorifique inférieur) : Énergie récupérable lors de la combustion sans condensation de la vapeur d'eau.

PtL (Power-to-Liquid) : Production de carburants synthétiques à partir d'électricité bas carbone et de CO₂ capté.

RED (Renewable Energy Directive) : Directive européenne sur les critères de durabilité des énergies renouvelables.

ReFuel EU Aviation : Règlement européen imposant des quotas d'incorporation de SAF dans l'aviation.

Rendement carbone : Fraction du carbone initial présent dans le carburant final.

Rendement énergétique : Ratio entre l'énergie du produit fini et celle utilisée pour le produire.

Rendement massique : Rapport entre la masse de carburant obtenu et celle de la matière première.

RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) : Carburants synthétiques non issus de biomasse (ex. e-SAF).

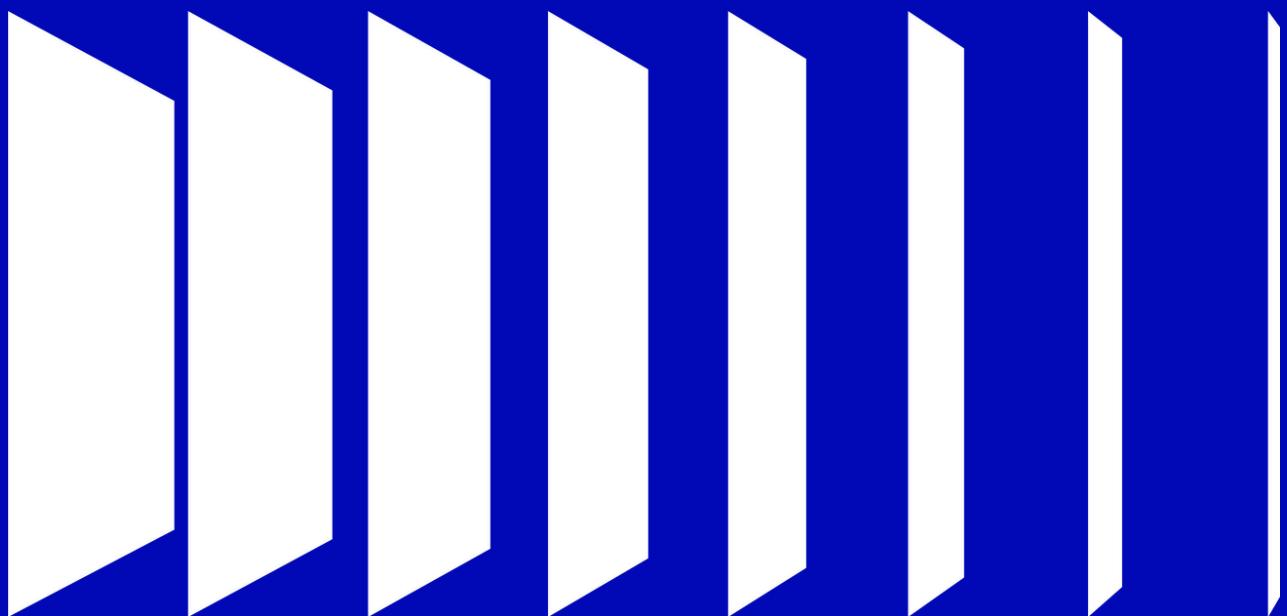
SAF (Sustainable Aviation Fuel) : (Voir CAD) Carburant durable alternatif au kérosène fossile.

TRL (Technology Readiness Level) : Échelle de maturité technologique (de 1 : concept, à 9 : déploiement).

TWh (Térawattheure) : Unité d'énergie équivalente à 10^{12} wattheures, couramment utilisée pour exprimer des volumes nationaux d'électricité.

ZEV (Zero Emission Vehicle) : Véhicule sans émission directe de GES (électrique, hydrogène...).

Introduction



Avant de regarder ce qu'on met dans le moteur, on voulait prendre un instant, cockpit ouvert, pour vous dire d'où on décolle. Aéro Décarbo est un collectif d'ingénieur·es, de technicien·nes, de passionné·es d'aéronautique et d'espace. Des aérophiles, des enthousiastes du ciel, qui ont grandi le nez en l'air, fascinés par la mécanique du vol et les promesses d'horizons lointains. Mais nos rêves ont besoin d'un plan de vol. Parce que l'aviation, comme toute aventure humaine, doit aujourd'hui affronter des turbulences bien réelles : celles des limites planétaires. Et pour continuer à voler demain, il faut repenser notre trajectoire aujourd'hui.

Notre boussole, c'est l'honnêteté intellectuelle. Dans un ciel souvent brouillé par les postures et les passions, on essaie de voler aux instruments : éclairer, sans juger. Tracer une route pour un secteur qu'on veut durable. Pas seulement au sens environnemental, mais dans sa globalité : sa pérennité, ses emplois, son savoir-faire, sa raison d'être dans les décennies à venir. C'est dans cet esprit que la collaboration avec le Shift Project, think tank guidé par l'exigence de rigueur scientifique et visant à éclairer le débat climat-énergie à travers une approche physique et systémique de l'économie, s'est imposée comme une évidence.

Portée par l'abondance d'un pétrole longtemps perçu comme inépuisable, l'aviation civile s'est imposée en un demi-siècle comme l'un des moteurs les plus puissants de l'internationalisation des échanges. Elle tient aujourd'hui une promesse vertigineuse : relier, en quelques heures, presque n'importe quel pôle d'attraction du globe, créant ainsi une continuité géographique et économique sans précédent. L'opération et le développement des lignes aériennes reposent encore entièrement sur les énergies fossiles, ce qui place désormais le secteur face à une **double contrainte carbone** : d'une part, l'aggravation du changement climatique impose une réduction rapide de ses émissions, d'autre part, le verrouillage géopolitique actuel et le déclin à venir du pétrole fragilisent son approvisionnement. La France, dont 7 des 10 principaux fournisseurs de pétrole risquent de voir leur production fortement décliner d'ici à 2050¹, doit tout particulièrement travailler à cette nécessaire souveraineté énergétique.

Le secteur aérien est aujourd'hui responsable de 2 à 3% des émissions mondiales de CO₂.² Cette part s'élève à environ 5% dans l'Union européenne³ et 6,8% en France lorsque l'on prend en compte l'ensemble du cycle de vie du kérosène, incluant sa production, sa distribution ainsi que sa combustion.⁴ Ce premier constat s'accompagne d'une problématique majeure : les émissions liées à l'aviation continuent d'augmenter avec la croissance constante des déplacements internationaux, régionaux et locaux, malgré les gains d'efficacité des avions et de leurs opérations. **La décarbonation du secteur s'impose alors comme une priorité** si l'on souhaite atteindre les objectifs climatiques fixés par l'Accord de Paris, tout en veillant à préserver un accès équitable au transport aérien pour tous et des conditions sociales justes pour les salarié·es du secteur. Il est également important de reconnaître que l'usage de l'avion est très hétérogène au sein de la population : un tiers des Français et Françaises ne le prennent jamais, alors que 11% le prennent régulièrement, et 2 % plusieurs fois par mois⁵ ; au niveau mondial, c'est même 89% de la population qui n'a pas volé en 2018.⁶

¹ Rapport "La Souveraineté par la décarbonation : voie nécessaire pour la France et l'Europe" The Shift Project Novembre 2025

² Environ 1 Gt de CO₂ sur les 40 Gt de CO₂ émises mondialement ([IEA](#) , [IATA](#))

³ [Parlement Européen](#)

⁴ [Emissions annuelles 2023 en France](#) et [Emissions gazeuses liées au trafic aérien en France en 2023](#)

⁵ [Les Français, les voyages et l'avion](#)

⁶ [The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change, Nov 2020](#)

En mars 2021, nous publiions en partenariat avec le Shift Projet le rapport “Pouvoir voler en 2050⁷” (PVE 2050), visant à définir des trajectoires de réduction des émissions du transport aérien compatibles avec les objectifs climatiques de l’Accord de Paris. Ce rapport repose sur une analyse par scénarios afin d’**identifier et de quantifier les principaux leviers de réduction de l’empreinte carbone du secteur aérien**.

Le rapport PVE 2050 proposait deux scénarios prospectifs, dont le plus ambitieux, intitulé « MAVERICK », reposait sur l’hypothèse de percées technologiques majeures, permettant des améliorations substantielles des performances des aéronefs, conformes aux annonces les plus ambitieuses des industriels et des opérateurs. Ce scénario envisageait également l’allocation de l’intégralité des carburants alternatifs produits au seul secteur aérien. Même dans ce scénario très optimiste, **le secteur n’atteindrait pas un niveau de décarbonation compatible avec l’Accord de Paris à l’horizon 2050, les gains en efficacité énergétique et la réduction des intensités carbone ne suffisant pas à compenser l’augmentation prévue du trafic.**

Le précédent rapport soulignait également que les contributions climatiques du secteur aérien se répartissent en deux catégories : **les émissions de CO₂** issues de la production et de la combustion des carburants, et **les impacts dits “non-CO₂”** qui incluent notamment l’effet des traînées de condensation persistantes et celui des émissions d’autres gaz comme les oxydes d’azote, très réactifs dans l’atmosphère. Ces effets, bien que plus complexes à évaluer, ont une influence significative sur le réchauffement climatique, d’un ordre de grandeur au moins équivalent à celle résultant de l’accumulation du CO₂. La quantification et la réduction de l’impact hors CO₂ nécessitent des actions spécifiques, qui ne seront pas traitées de manière détaillée dans ce rapport mais qui commencent à être promues et développées par les institutions et les acteurs du secteur.

La dernière contribution du rapport PVE 2050 a été d’identifier les leviers techniques jugés crédibles pour atténuer l’impact climatique du transport aérien, et qui restent à ce jour les seules pistes envisagées par le secteur. Parmi ces leviers, on retrouve :

- **L’amélioration de l’efficacité énergétique** des avions, combinée à un renouvellement accéléré des flottes, pourrait permettre de réduire les émissions par appareil de 30 à 40 % d’ici 2050 par rapport à 2020. En intégrant l’optimisation des opérations en vol et au sol (notamment l’électrification du roulage, la gestion optimisée des itinéraires de vol, ainsi que l’amélioration des procédures de décollage et d’atterrissement) ces gains d’efficacité pourraient entraîner une réduction annuelle des émissions de 1 à 1,5 %, soit une baisse cumulée d’environ 25 % sur la période 2025–2050.
- **L’adoption de technologies de rupture** telles que l’électrification (avec des batteries ou des piles à combustible hydrogène) et l’avion à hydrogène, qui bien qu’elles soient prometteuses sur le papier, ne sont pas encore suffisamment matures pour être déployées à grande échelle et pouvoir être considérées comme contributrices à l’horizon 2050, comme en témoignent les récentes annonces d’Airbus repoussant une entrée en service d’un appareil « ZEROe » à une date ultérieure à 2040.
- **Le recours à des carburants alternatifs** dits aussi durables ou non-fossiles (appelés CAD en français ou SAF pour Sustainable Aviation Fuels en anglais)

⁷ [Pouvoir Voler en 2050](#)

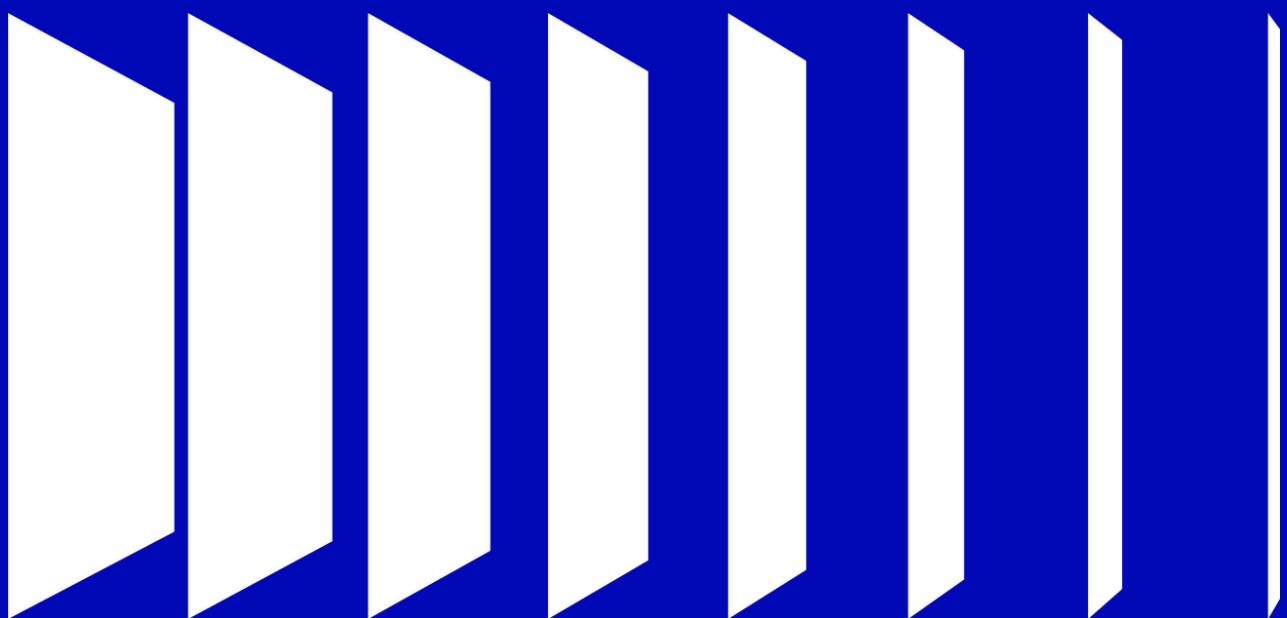
constitue le levier central dans PVE 2050, mais aussi dans les principales feuilles de route du secteur, pour atteindre les objectifs de décarbonation de l'aérien. En effet, c'est aujourd'hui plus de 50% de la réduction des émissions prévue d'ici 2050 qui repose sur le recours massif aux SAF, dont il faut pourtant assurer la durabilité.

L'objectif de ces travaux n'était pas de discréditer l'ensemble des efforts fournis par le secteur et ses différents contributeurs, mais bien de mettre en lumière l'impact réel de sa feuille de route de décarbonation sur les émissions cumulées et ainsi sur le réchauffement induit à l'échelle planétaire. La conclusion de PVE 2050 soulignait ainsi que ces leviers ne suffiraient pas à réduire son impact sur le climat, relativement à celles des autres secteurs, et appelait donc à une maîtrise de la croissance du trafic, voire à sa réduction future. **Pour un budget carbone donné, la modération du trafic (était et) reste un enjeu d'autant plus fort que celle-ci intervient tard.**

Près de 5 ans après la publication du rapport PVE 2050, le présent rapport a vocation à examiner en profondeur la crédibilité et le potentiel des SAF dans la décarbonation du secteur aérien. Plus spécifiquement, l'objectif est de décrire à un large public ce que sont ces fameux SAF : de quelles matières ils proviennent, quels processus sont mis en jeu dans leur production, quel est leur réel pouvoir de décarbonation, quelles sont les réglementations à leur sujet, quels sont les obstacles à leur déploiement à grande échelle et surtout quelle part est-il réellement envisageable d'allouer au seul secteur aérien. Cette mise en contexte précède l'analyse approfondie de différents scénarios d'utilisation de ces carburants, ainsi que de leur impact attendu sur les émissions à l'horizon 2050 et sur le cumul des émissions d'ici là.

Partie 1 -

Que sont les SAF ?



Les SAF - acronyme anglais pour Sustainable Aviation Fuels, parfois nommés en français CAD pour Carburants d'Aviation Durable - forment un ensemble diversifié de kéroses alternatifs reposant sur des ressources, des procédés et des logiques industrielles très variés. Leur lien très étroit avec le monde du vivant les rend sans doute plus complexes à appréhender dans leur ensemble que leurs cousins fossiles. Avant d'aborder dans les chapitres suivants les enjeux de ressources mobilisables et les scénarios énergétiques de déploiement, il est essentiel de présenter un cadre clair : que sont les SAF ? quel est leur intérêt pour le climat et les points de vigilance à leur sujet ? comment les produit-on, selon quelles technologies et avec quel niveau de maturité industrielle ? Cette première partie vise à dresser un panorama synthétique mais rigoureux des filières SAF existantes, de leurs logiques de production et de leurs potentiels respectifs.

I. Comprendre les avantages climatiques des SAF

A. CO₂ biogénique et CO₂ fossile : une même molécule aux effets différenciés sur le climat

Pour comprendre l'intérêt climatique de l'utilisation des SAF, il est d'abord essentiel de comprendre la différence entre le CO₂ biogénique et le CO₂ fossile. Bien qu'il s'agisse de la même molécule de dioxyde de carbone, produit de la combustion d'une chaîne carbonée, c'est l'origine de cette chaîne carbonée qui permet de les distinguer : lorsqu'elle est issue de carburants fossiles, c'est-à-dire de matière organique enfouie dans le sol et transformée pendant des millions d'années (pétrole, gaz fossile, charbon), on parle de CO₂ fossile. Au contraire, si cette chaîne carbonée provient de matière organique récente, comme des plantes ou des déchets organiques, on parle de CO₂ biogénique. Cette différence temporelle se traduit par un effet différencié sur le climat :

- Dans le cas du CO₂ fossile, la combustion du carburant perturbe le cycle naturel du carbone en injectant dans l'atmosphère une quantité de carbone qui n'y circulait plus depuis des ères lointaines. Cette injection entraîne une augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique, contribuant ainsi à l'augmentation de l'effet de serre et au dérèglement climatique.
- Dans le cas du CO₂ biogénique, le carbone libéré lors de la combustion de biomasse a été capté dans l'atmosphère sur une période courte à l'échelle humaine, allant de moins d'un an à quelques décennies. Ce carbone a d'abord été absorbé par les plantes au cours de leur croissance (photosynthèse), puis relâché lors de leur utilisation (combustion ou transformation). Si cette biomasse provient d'une gestion durable assurant un renouvellement biologique équilibré, la repousse des végétaux permet une nouvelle phase de captation.

Zoom sur l'impact climatique du CO₂ biogénique

Dans le cadre du cycle dit « fermé » du carbone, la quantité de CO₂ émise lors de la combustion est approximativement compensée par celle absorbée au cours de la croissance de la biomasse, ce qui permet, en première approximation, de considérer ces émissions comme neutres à long terme.

Cependant, plusieurs travaux scientifiques ont montré que **cette neutralité n'est pas instantanée** : avant d'être recapté, le CO₂ biogénique demeure plusieurs années dans l'atmosphère, contribuant à **un effet de serre additionnel temporaire**. Ce phénomène, parfois qualifié de *biogenic carbon debt*, a été formalisé par Cherubini et al. (2011), qui ont introduit la notion de GWPbio (Global Warming Potential biogenic) pour quantifier le forçage radiatif associé à ces émissions. Selon leurs calculs, le PRG du carbone biogénique varie entre 0 et 1 kg CO₂éq/kg CO₂ selon la vitesse de repousse et le type de biomasse utilisée.

Ces conclusions sont corroborées par des travaux de synthèse ultérieurs (Helin et al., 2013 ; Guest et al., 2013 ; Levasseur et al., 2012), qui confirment que les systèmes bioénergétiques reposant sur la biomasse forestière, caractérisés par des cycles de croissance longs, peuvent présenter un surplus transitoire de CO₂ dans l'atmosphère avant que la neutralité carbone ne soit atteinte, parfois sur des décennies. À l'inverse, le bilan carbone des cultures annuelles, dont les cycles de renouvellement sont courts, est généralement plus direct et plus rapidement équilibré, rendant l'évaluation de leur neutralité climatique plus évidente.

Du point de vue réglementaire toutefois, la **directive européenne RED III** (2023/2413), cadre de référence de l'Union européenne pour la promotion des énergies renouvelables (présentée plus en détail à la fin de cette partie 1), a tranché en considérant les émissions de CO₂ biogénique issues de la biomasse durable comme neutres à l'échelle du cycle de vie. Cette convention méthodologique, adoptée pour les analyses ACV réglementaires et industrielles, repose sur l'hypothèse que la ressource provient de systèmes de production assurant le renouvellement du stock de carbone.

Pour les besoins de ce rapport, qui vise à s'aligner sur les hypothèses du secteur industriel et du cadre réglementaire européen, les émissions de CO₂ biogénique seront donc considérées comme nulles à l'échelle du cycle de vie, conformément à la méthodologie retenue par la RED III.

B. Analyses de cycle de vie comparées

Puisque les émissions de CO₂ générées lors de la combustion⁸ d'un SAF sont d'origine biogénique, elles sont comptabilisées comme nulles dans les bilans réglementaires d'émissions. Mais cela ne signifie pas pour autant que l'usage d'un SAF soit neutre en carbone.

En effet, pour mesurer l'empreinte carbone réelle d'un litre de carburant, il faut quantifier les émissions sur l'ensemble du cycle de vie, qui prend en compte l'ensemble des émissions associées à sa production, son transport, sa transformation et sa combustion. Pour un carburant fossile, la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre provient de sa combustion, tandis que les étapes en amont – telles que l'extraction, le raffinage et la distribution – représentent environ 20 % du total des émissions.

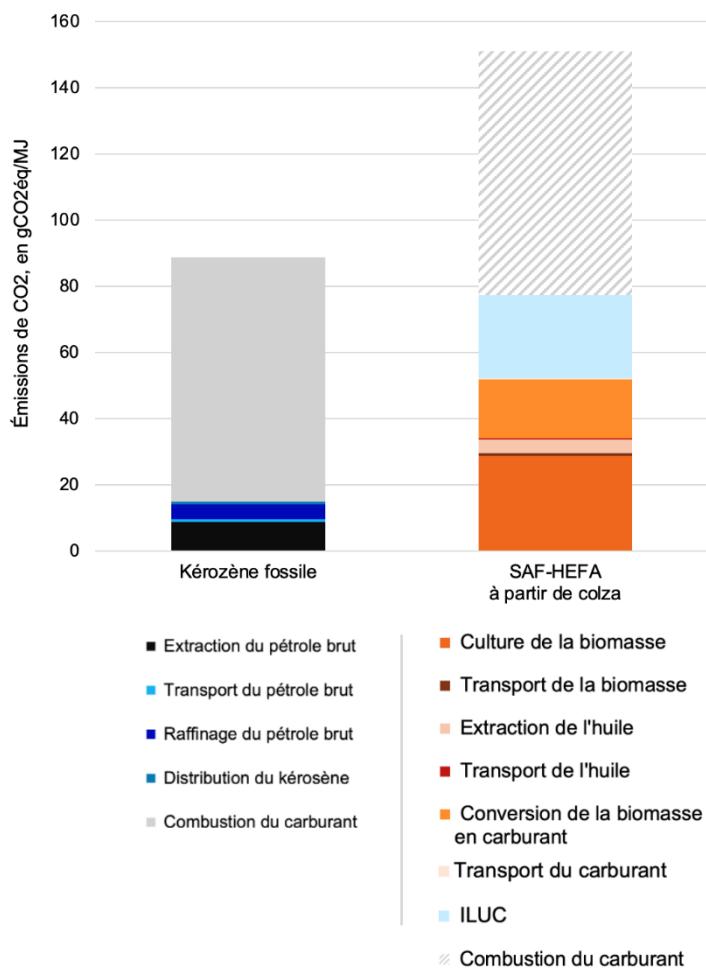


Figure 1.1 : Comparaison des émissions associées à la consommation d'un mégajoule (MJ) de kérosène vs SAF HEFA (gCO₂eq) - valeurs CORSIA⁹

⁸ À noter que lors de la transformation de la biomasse en carburant, une partie du carbone biogénique peut être relâchée sous forme de CO₂, indépendamment de la combustion finale. Cela peut survenir, par exemple, lorsque tout le carbone initial n'est pas converti en carburant et se retrouve émis au cours du procédé. Ces émissions restent néanmoins considérées comme neutres dans le cadre de l'analyse du cycle de vie (ACV), dès lors qu'elles sont d'origine biogénique.

⁹ Voir le document OACI, CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels, 10/2024

À l'inverse donc, dans le cas des SAF, l'étape de combustion est neutralisée, mais cela implique souvent une augmentation significative des émissions en amont, liées notamment à la production de biomasse (récolte, logistique, changements indirects d'usages des terres) et/ou à la consommation d'autres ressources énergétiques non renouvelables dans les procédés de production (hydrogène, électricité).

La décomposition des émissions de CO₂ d'un SAF dépend fortement de sa voie de production et des ressources utilisées comme intrants. Par exemple, récolter de l'huile de palme ou du bois, produire de l'hydrogène à partir de gaz naturel ou d'électricité renouvelable entraînent des profils d'émissions très différents. Il n'est donc pas possible de proposer une ventilation unique et générique des émissions associées à un SAF. Dans la suite de cette partie, nous nous attacherons ainsi à présenter, procédé par procédé, les principaux postes d'émissions identifiés dans la littérature, afin de mettre en évidence les leviers les plus structurants dans l'évaluation de leur performance climatique.

C. ACV, ILUC et frontières du système : l'empreinte carbone dépend fortement des conventions méthodologiques

Comme illustré dans le graphique ci-dessus, à l'analyse de cycle de vie dite « directe » (qui comptabilise les émissions de carbone liées aux étapes de production et d'utilisation du SAF, depuis la récolte de la biomasse jusqu'à sa combustion) doit s'ajouter une composante supplémentaire de l'évaluation des émissions : le changement indirect d'affectation des sols (ILUC, pour Induced Land Use Change). Cet ILUC cherche à estimer les émissions supplémentaires résultant des effets systémiques de la mobilisation de cultures agricoles pour la production de carburants. Par exemple, si une culture auparavant destinée à l'alimentation est réaffectée à un usage énergétique, cela peut provoquer un déplacement de la production alimentaire vers d'autres zones, entraînant une conversion de forêts ou de prairies en terres agricoles, avec à la clé des émissions indirectes de carbone.

L'empreinte carbone d'un carburant dépend fortement des méthodologies d'évaluation retenues¹⁰, en particulier du périmètre d'analyse et de l'intégration ou non du changement indirect d'affectation des sols (ILUC). La réglementation internationale, notamment le mécanisme CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale, impose la prise en compte de l'ILUC pour les matières premières agricoles concernées.

Au-delà de l'ILUC, le résultat dépend également de la manière dont sont réparties les émissions amont entre les différents produits issus d'un même système. Par exemple, dans le cas d'un SAF produit à partir de résidus issus de l'élevage, l'impact carbone peut varier considérablement selon que ces résidus soient considérés comme des coproduits, intégrant alors une part des émissions de l'élevage dans leur empreinte carbone, ou comme des déchets « fatals » auxquels ne seront pas attribuées les émissions amont.

¹⁰ Dans CORSIA, les émissions de l'ILUC sont estimées à partir de modèles globaux comme GLOBIOM (Global Biosphere Management Model) ou GTAP (Global Trade Analysis Project). Ces modèles simulent les impacts dans changement d'affectation des sols à échelle mondiale. Cependant, ces estimations présentent des incertitudes et un bilan ILUC est souvent appliqué à toutes les régions indépendamment des spécificités locales dans le but de simplifier l'évaluation. Ceci révèle une fois de plus la grande complexité et les incertitudes autour des évaluations environnementales de l'utilisation de biomasse-énergie.

SAF et effets non-CO₂

Si les carburants d'aviation durables (SAF) sont essentiellement développés pour leurs bénéfices en termes d'émissions de carbone sur leur cycle de vie, il est néanmoins intéressant d'évaluer leurs effets potentiels sur les impacts dits "non-CO₂" de l'aviation.¹¹ En effet, la combustion de kérosène fossile engendre non seulement des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et d'eau, mais aussi d'oxydes d'azote (NOx) et de soufre (SOx), ainsi que des suies (ou particules non volatiles, nvPM) et de composés organiques volatils (COV), précurseurs de particules. Lorsque ce panache rencontre, en sortie de moteur, une atmosphère suffisamment froide et humide, l'eau peut cristalliser autour des particules émises et former des traînées de condensation - ces lignes blanches visibles certains jours dans le sillage des avions.

Dans des conditions sur-saturées en glace, ces traînées persistent plusieurs heures et peuvent s'étendre sous forme de nuage de type cirrus de haute altitude, qui vont réfléchir une partie des radiations solaires qui les rencontrent, mais aussi piéger des infra-rouges réchauffants émis par la Terre. L'état de la science en matière d'impacts climatiques de l'aviation¹² montre que le forçage radiatif effectif des émissions de CO₂ de l'aviation, 34 mW/m² en 2018, est augmenté par celui des traînées de condensation persistantes (57 mW/m²) et celui des NOx (17,5 mW/m²), avec un faible effet refroidissant des sulfates résultant des émissions de SO₂ (-7,5 mW/m²).

Or, la composition chimique de la plupart des SAF est exempte de soufre et presque exempte d'aromatiques, qui sont des précurseurs de particules non volatiles. La combustion de ces carburants présente un avantage en termes de qualité de l'air par rapport au kérosène fossile. De plus, les traînées de condensation qu'ils génèrent sont moins opaques et plus éphémères, en raison d'une plus faible émission de particules de suie. Plusieurs expérimentations en vol ont permis de mesurer ce phénomène, par exemple lors de la campagne ECLIF-3 menée en France en 2021¹³, où la combustion d'un SAF 100% HEFA a généré 35% moins de particules non volatiles que celle d'un kérosène fossile, entraînant une réduction de 56% du nombre de cristaux de glace. Ces résultats, une fois injectés dans le modèle climatique global de l'institut DLR, ont permis d'estimer que, si la flotte de 2018 avait uniquement consommé du carburant de type HEFA¹⁴, l'impact climatique des traînées de condensation générées aurait été réduit d'au moins 26%. Il est néanmoins important de souligner que ces bénéfices seraient sans doute moins prononcés avec des moteurs émettant moins de particules, par exemple avec la technologie Lean Burn, et que les SAF ne permettent pas de réduire les émissions de NOx, puisque leur température de combustion est similaire à celle du kérosène fossile. Par ailleurs, les recherches se poursuivent pour mieux comprendre les différents effets du soufre (effet direct refroidissant, et effets indirects réchauffants) ou les interactions entre les aérosols et les nuages, ainsi que pour caractériser l'impact de traînées de condensation produites par l'usage d'hydrogène pur, en combustion ou par des piles à combustible.

¹¹ K. Gierens et al. [Influence of aviation fuel composition on the formation and lifetime of contrails](#) CONCAWE 2024

¹² D.S. Lee, et al. [The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018](#).

¹³ Märkl et al. [Powering aircraft with 100% sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails, 2024](#)

¹⁴ Il faut noter que des opérations 100% SAF constituent pour l'instant un cas théorique, dans la mesure où la réduction du soufre, et surtout des aromatiques, peut poser des problèmes de compatibilité avec les avions, notamment en termes de lubricté du fuel ou d'étanchéité des joints.

D. SAF : un seul terme pour une pluralité de réalités

Dans la littérature comme dans le débat public, les carburants alternatifs pour l'aviation sont désignés sous une multiplicité d'appellations : SAF, CAD, carburants alternatifs, carburants de substitution, e-carburants, carburants non-fossiles, carburants synthétiques, biocarburants, etc.

Ces termes décrivent des réalités techniques, réglementaires et climatiques différentes, et sont parfois employés de façon interchangeable, ce qui entretient la confusion. L'OACI définit les carburants d'aviation durables (SAF) comme « *a renewable or waste-derived aviation fuel that meets the CORSIA Sustainability Criteria under this Volume* ». Ces critères de durabilité sont précisés dans le document officiel intitulé CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels¹⁵.

Nous faisons le choix de nous aligner sur cette définition dans l'ensemble du rapport, car elle offre un cadre opérationnel clair tout en laissant la place à une analyse critique des différentes filières. Ainsi, dans notre usage, un e-fuel produit à partir de CO₂ capté dans l'atmosphère et d'hydrogène électrolytique est considéré comme un SAF, au même titre qu'un carburant HEFA issu d'huile usagée, dès lors qu'il remplit les trois critères ci-dessous :

- D'origine non fossile (issu de biomasse, de carbone recyclé, ou de CO₂ capté dans l'atmosphère)
- Techniquement compatible avec les moteurs et les infrastructures existantes (*drop-in fuel*),
- Et qui présente un bénéfice climatique démontré par une analyse de cycle de vie du carbone.

Il est entendu que l'usage du terme SAF, pris isolément, ne suffit pas à garantir la pertinence environnementale du carburant considéré. Le label "SAF" n'implique ni soutenabilité garantie, ni intérêt climatique assuré. Il s'agit ici d'un terme de regroupement, choisi pour sa simplicité et sa cohérence avec la terminologie internationale. Dans la suite du rapport, nous aurons l'occasion de différencier les filières SAF entre elles, en fonction de leurs performances climatiques, de leurs maturités technologiques, ou encore de leurs capacités réelles à rendre l'aviation *soutenable*.

Compte tenu des différences profondes en termes de technologies, de ressources mobilisées et de dynamiques industrielles, nous faisons le choix de séparer les SAF en deux grandes catégories : les bioSAF, dont la production repose sur l'utilisation directe de biomasse, et les e-SAF, dont le carbone est recyclé à partir de CO₂ capté (en sortie d'usine ou dans l'atmosphère), généralement combiné à de l'hydrogène bas-carbone. Ces deux catégories feront l'objet d'une présentation distincte dans les deux prochains chapitres.

¹⁵ L'ensemble des documents définissant les critères de durabilité, les valeurs par défaut d'émissions de gaz à effet de serre et les méthodologies d'évaluation dans le cadre du programme CORSIA est disponible sur le site officiel de l'OACI : <https://www.icao.int/CORSIA/corsia-eligible-fuels>

II. Cartes d'identité des bioSAF

Comme leur nom l'indique, les bioSAF sont des carburants produits à partir de biomasse, c'est-à-dire de matière organique non fossile d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique. Plusieurs voies technologiques permettent aujourd'hui de transformer cette biomasse en carburant pour l'aviation, chacune présentant des performances et des niveaux de maturité industrielle différents.

Schématiquement, l'objectif de ces procédés est de récupérer le carbone contenu dans la biomasse et de modifier la structure moléculaire des composés afin d'obtenir une configuration chimique très similaire à celle du kérósène. Cette conversion implique généralement une succession d'étapes physico-chimiques – chauffage, pressurisation, traitement biologique ou catalytique – nécessitant de l'énergie, et des quantités plus ou moins importantes d'hydrogène selon les procédés.

Le produit obtenu est un mélange d'hydrocarbures dits "bruts", ou *crude*, dont seule une fraction présente une composition compatible avec les spécifications du kérósène d'aviation. En effet, ce *crude* contient des molécules aux chaînes carbonées de tailles diverses, correspondant à différentes familles d'hydrocarbures :

- Le **kérósène**, utilisé dans l'aviation dont la proportion dans le mélange dépend du procédé utilisé, et de la qualité de la biomasse.
- Le **gazole**, utilisé comme carburant pour les véhicules routiers et les engins agricoles.
- Le **naphta**, principalement employé comme matière première dans l'industrie pétrochimique pour la production de plastiques, de solvants et d'autres produits chimiques.
- Les **gaz légers**, utilisés comme combustibles pour le chauffage, la cuisson et diverses applications industrielles.

La production de SAF s'accompagne donc inévitablement de la formation de coproduits, ce qui influence à la fois le rendement massique en SAF et l'économie globale du procédé. Sur le plan climatique, les émissions de la chaîne de production doivent être réparties entre tous ces produits via une méthode d'allocation, qui relève d'un choix méthodologique non tranchée définitivement à ce jour. L'allocation énergétique, où chaque coproduit se voit attribuer une part des émissions proportionnelle à son contenu énergétique, est une méthode classique mais pas universelle, et la directive RED III autorise plusieurs méthodes différentes.

Dans le cadre de cette étude, focalisée sur l'aviation, nous étudierons les principales voies de production envisagées par le secteur dans ses feuilles de routes. Pour fabriquer des bioSAF, quatre procédés thermochimiques principaux sont actuellement considérés, parmi une plus grande variété de voies en cours d'étude :

- La voie *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*, appelée HEFA
- La voie *Alcool-to-Jet*, plus communément appelée ATJ
- La voie *Fischer-Tropsch*, appelée FT, dont nous présenterons deux variations

A. Voie HEFA

La voie HEFA repose sur l'hydrotraitemen t d'huiles végétales (recyclées ou non) et de graisses animales¹⁶. Outre l'énergie nécessaire pour atteindre les conditions de température et de pression requises, la conversion de l'huile en SAF implique l'injection d'hydrogène (H₂), dont la quantité utilisée représente environ 4 à 6 % de la masse d'huile traitée¹⁷.

La configuration optimisée du procédé HEFA vise à maximiser le volume de SAF obtenu par l'hydrotraitemen t, génère plusieurs produits finaux avec la conversion massique suivante¹⁸:

- **Bio-kérosène et autres hydrocarbures (coproduits)** : de 80 à 90 %. Cela signifie que pour chaque tonne d'huile en entrée, on obtient entre 800 kg et 900 kg de biocarburant.
- **CO₂** : Environ 5 %
- **Eau** : Environ 5 %

Aujourd'hui, la filière HEFA a atteint une bonne maturité technologique et est la seule voie SAF exploitée à l'échelle industrielle ; elle devrait encore représenter environ 80 % de la production mondiale de SAF prévue d'ici 2030¹⁹.

L'empreinte carbone directe des SAF de type HEFA varie fortement selon la ressource utilisée, avec un facteur 3 à 4 entre les matières premières les plus et les moins vertueuses²⁰. La phase de conversion, stable autour de 10–15 gCO₂e/MJ, reste un poste important lié aux besoins en hydrogène et en énergie. Les résultats varient également en fonction du périmètre retenu pour l'analyse : lorsque la matière première est considérée comme un co-produit d'une activité agricole ou d'élevage, ou bien comme un résidu de consommation, les émissions associées à cette activité ne lui sont pas imputées dans le calcul de l'empreinte carbone.

B. Voie AtJ

La voie AtJ (Alcool-To-Jet) repose sur deux étapes : la première consiste à transformer la biomasse en alcool à l'aide de divers procédés biochimiques²¹. On obtient ainsi soit de l'éthanol, appelé dans ce contexte bioéthanol, soit de l'isobutanol. Dans ce qui suit, nous nous concentrerons principalement sur la voie à base d'éthanol, les deux options étant, toutes choses égales par ailleurs, de même nature et potentiel. La seconde étape convertit cet alcool en carburant pour l'aviation.

¹⁶ Le procédé HEFA consiste à traiter des huiles ou graisses avec de l'hydrogène sous haute pression et température. Ce traitement permet de saturer les liaisons carbonées, d'éliminer l'oxygène (sous forme d'eau ou de CO₂) et de réorganiser les chaînes carbonées via craquage ou isomérisation.

¹⁷ [Mannion et al. 2024 - A physics constrained methodology for the life cycle assessment of sustainable aviation fuel production](#)

¹⁸ Combinaison de métriques tirés de Mannion et al. 2024, ICAO, World Economic Forum, Académie des technologies

¹⁹ IATA - Communiqué N° : 23

²⁰ Selon CORSIA, l'empreinte carbone directe (hors changements d'affectation des sols – ILUC) du SAF HEFA issu d'huiles de cuisson usagées est de 14 gCO₂eq/MJ, soit environ 3,1 fois moins que celle d'un SAF HEFA produit à partir de colza cultivé.

²¹ Dans un premier temps, la biomasse est fermentée à l'aide de micro-organismes pour produire du bioéthanol (C₂H₅OH). Cette étape repose sur des procédés biochimiques où les sucres présents dans la matière première sont transformés en alcool sous l'action d'enzymes et de levures. Ensuite, le bioéthanol subit une conversion catalytique en hydrocarbures liquides via plusieurs étapes successives (déshydratation, oligomérisation, hydrotraitemen t et isomérisation) qui produisent finalement un carburant de synthèse aux caractéristiques similaires au kérosène fossile.

1) AtJ - Étape de fermentation

L'obtention de bioéthanol à partir de biomasse repose sur une étape de fermentation, un processus qui ne convient pas à toutes les matières premières. En effet, cette méthode est particulièrement adaptée aux végétaux riches en sucres fermentescibles (comme la betterave sucrière ou la canne à sucre) ou en amidon (tels que le maïs, le blé ou la pomme de terre). Aujourd'hui, la fermentation de biomasse pour produire du bioéthanol est développée à l'échelle industrielle. De nombreuses usines en fabriquent à partir de cultures spécifiques (chaque site étant généralement conçu pour traiter une seule culture) comme le maïs, la betterave sucrière ou le blé. Ces raffineries sont implantées dans des régions où ces cultures sont largement présentes, afin de faciliter la logistique et de maximiser le volume de production.

La matière lignocellulosique – qui correspond à la fibre des végétaux, particulièrement présente dans le bois, la paille ou les coques – peut également être fermentée, mais elle nécessite préalablement une étape d'hydrolyse afin de libérer les sucres contenus dans sa structure. Cette étape reste moins maîtrisée à l'échelle industrielle, ce qui explique en partie le nombre limité de projets de production de bioéthanol à partir de lignocellulose. En revanche, les effluents d'élevage ainsi que les huiles ne sont pas compatibles avec cette voie de production.

Le processus de fermentation génère divers produits :

- **Bioéthanol** : Le rendement de production de bioéthanol par fermentation varie considérablement en fonction du type de biomasse utilisée. Ce qui importe, c'est la teneur en sucres dans le cas des cultures riches en sucre et en amidon, et la teneur en cellulose et hémicellulose dans le cas de la biomasse lignocellulosique. Il est donc difficile de donner des ordres de grandeur précis pour les cultures spécifiquement destinées à la production de bioéthanol. En revanche, pour la biomasse lignocellulosique, on peut prendre comme référence la paille de blé, qui représente une moyenne parmi les sources lignocellulosiques courantes²² et dont une tonne sèche permet en moyenne de produire environ 300 kg d'éthanol²³.
- **Vinasse** : Liquide riche en nutriments, la vinasse peut être valorisée comme engrais ou en méthanisation.
- **Drêche** : Constituée principalement de la matière solide résiduelle, elle peut être utilisée en alimentation animale ou en méthanisation.
- **CO₂** : La fermentation génère une quantité significative de CO₂ biogénique, pouvant atteindre environ 50 % de la masse initiale de la matière première²⁴.

2) AtJ - Étape de fermentation

La conversion du bioéthanol en SAF nécessite une étape supplémentaire, le procédé Ethanol-to-Jet (ETJ), qui combine une déshydratation du bioéthanol à une réaction chimique effectuée à haute température en présence de catalyseurs. Encore au stade de la recherche, aucune usine industrielle n'est vraiment opérationnelle pour cette étape qui permettrait théoriquement

²² Taux de cellulose + hémicellulose d'environ 60 % pour la paille de blé, contre 55 à 70 % pour le miscanthus, le bois ou encore le switchgrass

²³ Basaglia et al. 2021 - Agro-Food Residues and Bioethanol Potential: A Study for a Specific Area

²⁴ Webber et al. 2024 - Lignin deoxygenation for the production of sustainable aviation fuel blendstocks

de transformer 1 tonne de bioéthanol en environ 600 kg d'hydrocarbures (kérosène et coproduits²⁵).

C. Voie BtL

La voie BtL pour Biomass-to-Liquid ou bio-FT (pour Fischer-Tropsch à partir de biomasse) repose sur deux étapes : la gazéification de la biomasse en gaz de synthèse (syngas), puis la conversion de ce syngas en kérosène via la réaction chimique de Fischer-Tropsch.

1) BtL - Étape de gazéification

La gazéification, ou pyrogazéification, est une technologie qui convertit la biomasse en syngas. Actuellement en phase d'expérimentation, cette technologie n'a pas encore atteint le stade industriel, mais sa maîtrise à grande échelle est envisagée d'ici 2030. Particulièrement adaptée aux matières lignocellulosiques (mentionnées précédemment) cette technologie pourrait également s'appliquer, dans une certaine mesure, à des effluents d'élevage ou à des déchets municipaux. En revanche, elle n'est pas adaptée aux huiles et aux graisses. Par ailleurs, la forte hétérogénéité et l'acidité de certaines matières premières pourrait réduire le rendement et endommager les équipements.

2) BtL - Étape réaction Fischer-Tropsch (FT)

Utilisée depuis des décennies au Qatar et en Afrique du Sud pour produire du kérosène à partir de syngas d'origine fossile, la réaction Fischer-Tropsch (FT) est maintenant en cours de développement industriel pour le gaz de synthèse provenant de la biomasse.

Le procédé BtL permet de convertir une tonne de matière sèche de biomasse en :

- **Bio-kérosène et coproduits** : Environ 22 à 25 % de la masse sèche initiale
- **CO₂ biogénique**
- **Eau de condensation**

Ici encore, l'empreinte carbone du SAF dépend fortement du type de biomasse utilisé et des hypothèses retenues sur la gestion agronomique. Les résidus agricoles (maïs, blé) présentent des niveaux d'émissions relativement faibles lorsqu'aucune restitution de nutriments au sol n'est considérée, mais ces valeurs augmentent fortement dès lors qu'on prend en compte les intrants d'origine fossile nécessaires au maintien de la fertilité des sols. Les résidus forestiers, grâce à leur statut de déchet, apparaissent comme l'une des options les plus performantes sur le plan climatique, à condition de respecter également des taux de prélèvement de la biomasse qui n'appauvrisse pas les sols. En revanche, les cultures dédiées telles que le peuplier, le miscanthus ou le switchgrass affichent des émissions plus élevées, en particulier au stade de la culture, même si certaines d'entre elles peuvent être associées à des ILUC négatifs si elles contribuent à régénérer des sols dégradés. On constate également que la phase de conversion thermochimique de la biomasse en carburant reste un poste modéré d'émissions.²⁶

²⁵ [The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation](#)

²⁶ Les émissions associées à cette étape dépendent fortement du mix électrique considéré. Dans les modèles cités par l'ICAO, les mixs électriques retenus sont de 450 et de 785 gCO₂/kWh, respectivement pour les États-Unis et l'Inde.

Enfin, le transport de la biomasse peut constituer un poste non négligeable, notamment pour les ressources à faible densité énergétique comme les cultures herbacées.

La biomasse lignocellulosique, adéquate pour la voie BtL, peut également être utilisée par la voie AtJ. Toutefois, la filière AtJ valorise une proportion significativement moindre du carbone initialement présent dans la biomasse lignocellulosique (entre 15 et 22 %) comparativement à la voie BtL (environ 50 %²⁷). La filière AtJ requiert donc au moins deux fois plus de biomasse pour atteindre un rendement équivalent à celui obtenu par la voie FT. Malgré cette différence notable en termes de rendement, la voie AtJ est parfois envisagée pour la valorisation de biomasse lignocellulosique en raison de considérations économiques potentiellement plus avantageuses. Dans le cadre de nos études, puisque nous écartons temporairement les contraintes économiques et cherchons à maximiser les rendements afin d'obtenir des estimations optimistes, nous considérerons que la filière FT sera privilégiée pour la valorisation de la biomasse lignocellulosique.

D. Voie PBtL (Power Biomass-to-Liquid) ou e-bioSAF

Il est possible d'augmenter le rendement de production d'hydrocarbures, et donc de kérosène, par la voie BtL en ajoutant de l'hydrogène (H_2) au syngas issu de la gazéification. Cela optimise le ratio H_2/CO et valorise l'ensemble des molécules de carbone de la biomasse en réduisant les émissions de CO_2 biogénique. Ce procédé permet de plus que doubler les quantités d'hydrocarbures produites, ce qui permet d'obtenir une masse de kérosène représentant jusqu'à 30 % de la masse initiale de biomasse. Dans ce cas, on parle d'e-bioSAF en référence à l'électricité utilisée pour produire l'hydrogène. Ce procédé n'est intéressant, du point de vue de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, que si l'électricité servant à produire l'hydrogène²⁸ (voir encadré hydrogène) provient de sources bas carbone.

²⁷ Académie des technologies p.40

²⁸ Académie des Technologies

Les grands principes de l'hydrogène

S'il est souvent présenté comme un vecteur énergétique d'avenir, l'hydrogène est aujourd'hui utilisé quasi exclusivement comme un intrant industriel, et non comme source d'énergie ou carburant. Ses principaux usages concernent la synthèse d'ammoniac (engrais), le raffinage du pétrole, la production de méthanol, ainsi que d'autres procédés chimiques et métallurgiques.

Cette demande repose presque exclusivement sur une production issue d'énergies fossiles. Trois procédés dominent :

- Le vaporeformage de gaz naturel (62 % de la production mondiale en 2022), qui sépare l'hydrogène du carbone via de la vapeur d'eau – le carbone étant ensuite rejeté sous forme de CO₂.
- La gazéification du charbon (21 %), consistant à faire réagir le charbon avec de l'eau et de l'oxygène pour extraire l'hydrogène contenu dans l'eau, au prix d'émissions de CO₂ très élevées.
- L'électrolyse de l'eau (moins de 1 %), qui utilise de l'électricité pour dissocier l'hydrogène et l'oxygène de la molécule H₂O.

S'y ajoutent des formes d'hydrogène dit fatal (16 %), coproduit involontairement dans certaines réactions chimiques industrielles. La production mondiale d'hydrogène s'élevait à environ 94 Mt en 2021²⁹, générant près de 1 Gt de CO₂,³⁰ soit plus de 2 % des émissions mondiales.

Pour décarboner la production d'hydrogène, deux grandes voies technologiques sont envisagées. La première consiste à associer aux procédés fossiles existants (vaporeformage, gazéification) des dispositifs de capture et de stockage du carbone (CCS), afin de limiter les émissions de CO₂. La seconde, aujourd'hui au cœur des stratégies industrielles et politiques, repose sur le déploiement massif de l'électrolyse de l'eau, à condition qu'elle soit alimentée par une électricité bas carbone. Cette méthode permettrait de réduire fortement l'empreinte carbone, passant de 10 à 2 kg de CO₂ émis par kilogramme d'hydrogène produit avec les procédés fossiles, à potentiellement moins de 1 kg avec une électrolyse décarbonée. Toutefois, cette solution implique une consommation électrique considérable : produire par électrolyse les 95 Mt d'hydrogène générés en 2022 nécessiterait environ 5 000 TWh d'électricité, soit près de dix fois la production annuelle de la France.

D'autres pistes comme la pyrolyse du méthane (produisant du carbone solide au lieu de CO₂)³¹ ou l'hydrogène naturel (extrait directement du sous-sol) suscitent un intérêt croissant. Ce dernier pourrait jouer un rôle important à horizon 2050, mais son exploitation reste aujourd'hui très incertaine (TRL faible).

La stratégie hydrogène à 2040-2050 devra donc à la fois décarboner la production existante et répondre à de nouveaux usages (notamment les carburants de synthèse, dont les e-SAF pour l'aviation), tout en maîtrisant les impacts énergétiques de cette transition.

²⁹ Le rapport Global Hydrogen Review 2024 de l'AIE donne la valeur de 920 Mt de CO₂ en 2023.

³⁰ Le rapport Global Hydrogen Review 2024 de l'AIE donne la valeur de 920 Mt de CO₂ en 2023.

³¹ Laurent Fulcheri 2022 - [« L'hydrogène turquoise », une solution viable sans CO₂ ?](#)

III. Cartes d'identité des e-SAF

A. Voies de production

1) Voie Fischer-Tropsch (FT)

La filière PtL repose sur la synthèse d'hydrocarbures liquides à partir de dihydrogène et de CO₂ issues de captage. L'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau à l'aide d'électricité bas-carbone. Le CO₂ est transformé en CO via une réaction Reverse Water Gas Shift (RWGS) puis injecté avec l'hydrogène dans un réacteur Fischer-Tropsch (FT) pour former un carburant liquide, qui peut ensuite être raffiné en e-kérosène conformément aux spécifications aéronautiques. Cette voie est aujourd'hui la plus étudiée et la plus mature technologiquement pour produire de l'e-SAF à grande échelle.

2) Voie Methanol-to-Jet (MtJ)

La voie MtJ consiste à produire dans un premier temps du méthanol synthétique à partir de H₂ et de CO₂ (via la réaction de méthanolisation), puis à convertir ce méthanol en carburant aviation par une série d'étapes catalytiques, incluant la déshydratation et l'oligomérisation. Bien que cette filière soit encore en phase de développement, elle présente un intérêt croissant en raison de la simplicité relative de la synthèse du méthanol, de la flexibilité d'usage de ce composé chimique, et des coûts potentiellement plus bas. Elle constitue une alternative prometteuse à la voie FT.

B. Avantages climatiques et comptabilité du CO₂ capté

L'avantage climatique des e-SAF est similaire à celui des bioSAF : il s'agit de produire un carburant à partir de CO₂ capté, qui sera ensuite relâché lors de la combustion, sans ajouter de carbone net dans l'atmosphère.

La différence entre les bioSAF et les e-SAF tient à la forme et à l'origine du CO₂ utilisé. Dans le cas des bioSAF, le CO₂ est stocké sous forme solide dans la biomasse pendant sa croissance. Pour les e-SAF, le CO₂ est capté sous forme gazeuse, soit :

- Dans les fumées des grandes installations industrielles, via un procédé appelé CCU, acronyme de Carbon Capture and Utilization.
- Directement dans l'air ambiant (CO₂ atmosphérique), le procédé est alors appelé DAC pour Direct Air Capture.

L'origine du carbone capté pour produire un e-SAF est déterminante du point de vue climatique. Si ce CO₂ provient de l'atmosphère (captage direct) ou de sources biogéniques (comme les fumées issues de la combustion de biomasse), il est considéré comme ayant été prélevé, directement ou indirectement, dans l'air ambiant. Lorsqu'un carburant est ensuite brûlé, ce même carbone est simplement restitué à l'atmosphère. On considère alors que le bilan carbone de cette combustion est neutre, au sens où les émissions compensent les captures sur le cycle de vie du carbone.

En revanche, si l'on réutilise du CO₂ d'origine fossile, par exemple capté en sortie d'une centrale à charbon ou d'un site pétrochimique, le carbone serait alors relâché dans l'air pour la première fois, ce qui augmente la concentration atmosphérique de CO₂. Le cycle n'est donc

plus équilibré. En Europe, le recours à un CO₂ fossile pour la production d'e-SAF demeure autorisé jusqu'en 2041, probablement afin de faciliter la phase d'amorçage industrielle. Néanmoins, la quasi-totalité des projets actuellement recensés misent sur une origine biogénique du CO₂, sans doute afin d'assurer la compatibilité réglementaire du projet à long terme.

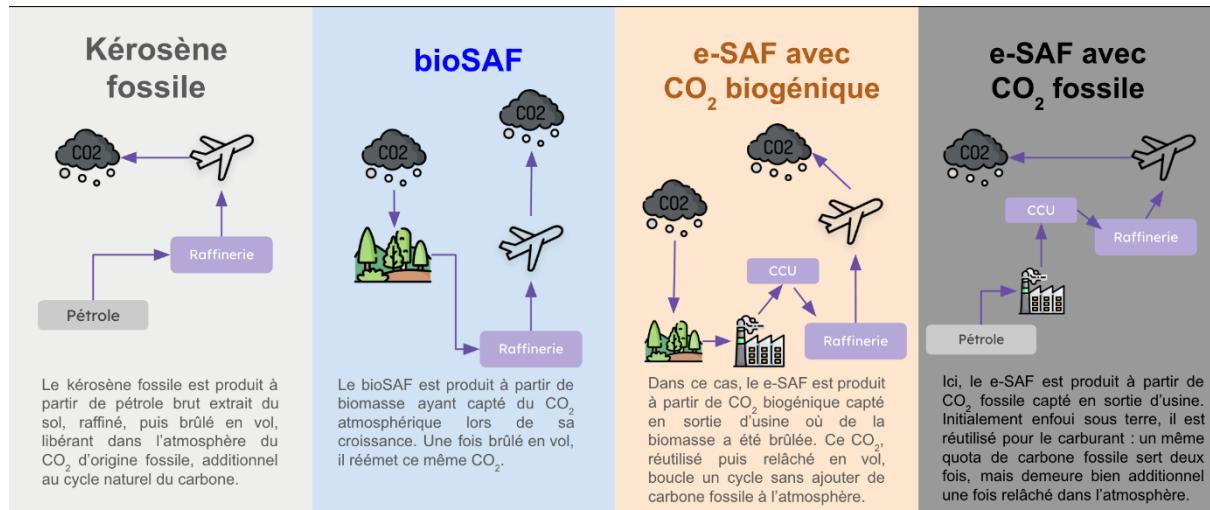


Figure 1.2 : Schéma des chemins carbone des différents carburants d'aviation

Au-delà de la physique du carbone, cette question soulève un enjeu méthodologique : qui doit bénéficier du crédit lié à la capture du CO₂ ? Le producteur de carburant qui l'utilise comme matière première, ou l'industriel qui l'a extrait de ses émissions ? Ces arbitrages comptables entraînent des conséquences majeures, notamment en matière d'éligibilité aux crédits carbone, d'allocation de quotas sur les marchés réglementaires du carbone, ou de conformité avec les objectifs climatiques. En tout état de cause, les réductions de CO₂ ne doivent être attribuées qu'une seule fois, le "double comptage" étant strictement interdit. Nous reviendrons sur ces arbitrages en partie 4 consacrée aux scénarios à l'échelle mondiale.

C. Consommation électrique et intensité carbone

L'électricité joue un rôle central dans la production des e-SAF, ce qui rend leur empreinte carbone extrêmement dépendante du mix électrique utilisé, et constitue l'un des principaux facteurs de son coût élevé. L'électricité est mobilisée pour le captage du CO₂, que ce soit à partir des fumées des installations industrielles ou directement dans l'air, et elle alimente aussi la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, une étape particulièrement énergivore. L'ensemble du processus repose donc sur trois intrants fondamentaux : du carbone, de l'eau, et de l'électricité.

En termes d'ordre de grandeur, la production d'une tonne d'e-SAF requiert environ 3 tonnes de CO₂, 6 à 7 tonnes d'eau³², et entre 25 et 40 MWh d'électricité³³. La masse finale de carburant est inférieure à celle des intrants, car une partie de l'hydrogène est perdue sous

³² CONCAWE-ARAMCO, [E-Fuels: A technoeconomic assessment of European domestic production and imports towards 2050](#), (technical annex). Si l'on ajoute la brique DAC, la consommation d'eau varie de -0.8 à 8 kg H₂O / kg fuel. Voir [Colelli et al. 2026](#), Figure 9

³³ Référentiel ISAE-SUPAERO (2021)

forme d'eau, et que l'oxygène, qui est une molécule lourde n'est pas conservé dans les molécules d'hydrocarbures synthétiques.

Si l'on considère une consommation moyenne de 30 MWh d'électricité par tonne de carburant, il faut que son intensité carbone soit inférieure à 128 gCO₂/kWh pour que les e-SAF soient plus vertueux que le kérosène, dont l'empreinte de référence est de 89 gCO₂/MJ (soit environ 3,84 tCO₂ par tonne). L'utilisation de sources d'électricité bas carbone permet donc de réduire drastiquement l'empreinte carbone des e-SAF, la plaçant largement en dessous de celle du kérosène fossile (Éolien : 10–15 gCO₂/kWh, Solaire : 30–50 gCO₂/kWh, Nucléaire : 5–12 gCO₂/kWh)³⁴. Cependant, l'intensité carbone de l'électricité délivrée sur le réseau dépasse souvent le seuil de 128 gCO₂/kWh dans le monde, elle est en moyenne de 442 gCO₂/kWh³⁵. En Europe, la réglementation n'autorise la production de carburants synthétiques qu'à partir d'électricité renouvelable additionnelle, et impose une réduction de l'empreinte carbone supérieure à 70 % par rapport au kérosène fossile.

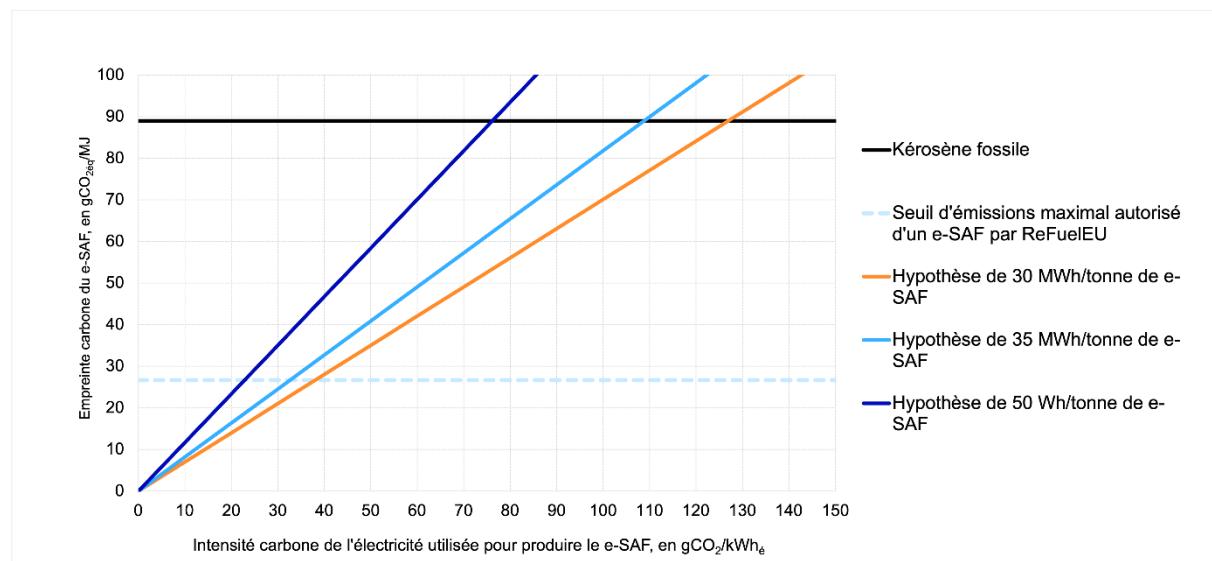


Figure 1.3 : Empreinte carbone d'un e-SAF en fonction de l'intensité carbone du mix électrique

En termes de volumes, la substitution complète du kérosène fossile actuellement utilisé à l'échelle mondiale (plus de 300 Mt/an) nécessiterait près de 10 000 TWh d'électricité, soit environ la **production mondiale actuelle d'électricité renouvelable**³⁶, ou **un tiers de toute l'électricité actuellement produite dans le monde**.

Cet ordre de grandeur souligne une limite physique fondamentale des e-fuels : leur très faible rendement énergétique. En effet, bien que les e-SAF aient des propriétés énergétiques similaires à celles du kérosène conventionnel (environ 12 MWh d'énergie chimique par tonne), leur production nécessite plus du double en électricité, soit un rendement de l'ordre de 40 %, le reste étant dissipé sous forme de pertes thermiques ou de conversion avant même d'arriver au moteur.

³⁴ [UNECE](#)

³⁵ [Global Data Monitor](#)

³⁶ Chiffres 2024 (315 Mt de kérosène pour 9800 TWh d'électricité renouvelable)

Néanmoins, le déploiement à grande échelle de la production d'électricité bas-carbone ne devrait pas se confronter à des problématiques aussi complexes que celles relatives à la durabilité de la biomasse, avec des besoins bien moindres en termes d'usage des sols ou de consommation d'eau, et des impacts beaucoup plus faibles sur les écosystèmes.

Néanmoins, le déploiement à grande échelle de la production d'électricité bas-carbone ne devrait pas se confronter à des problématiques aussi complexes que celles relatives à la durabilité de la biomasse, avec des besoins bien moindres en termes d'usage des sols ou de consommation d'eau, et des impacts certainement beaucoup plus faibles sur les écosystèmes.

Enfin, les perspectives de baisse du coût de l'électricité renouvelable et des électrolyseurs devraient rendre la filière e-SAF plus compétitive, notamment par rapport aux Bio-SAF. La partie 3 de ce rapport est dédiée aux e-SAF et entre plus dans le détail des différents enjeux qui entourent sa production.

IV. Synthèse des filières de production de carburant aérien non fossile

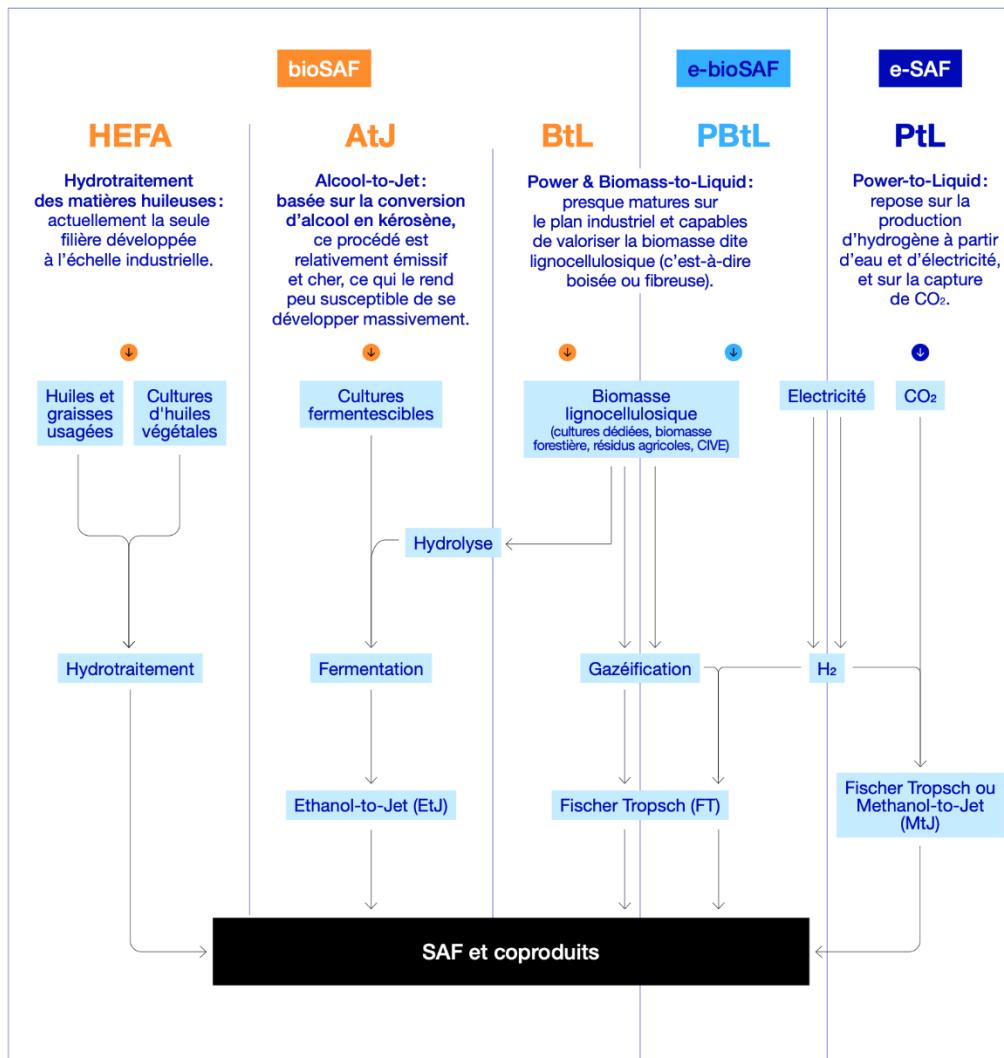


Figure 1.4 : Schéma synthétique des filières de production de carburants aéronautiques non fossile

Comme expliqué précédemment, les différents procédés de production présentés mobilisent des ressources variées et affichent des performances hétérogènes. Afin de les caractériser de manière rigoureuse, plusieurs métriques peuvent être utilisées, telles que :

- Le rendement de conversion massique
- Le rendement énergétique
- La sélectivité
- Les émissions de CO₂
- Le coût
- La maturité technologique.

Nous les présenterons brièvement une à une, avant d'en proposer une synthèse dans un tableau récapitulatif en fin de chapitre.

A. Rendement de conversion massique

Un premier indicateur pour caractériser la production de carburants est le rendement de conversion massique en biomasse ρ , défini comme le rapport entre la masse d'hydrocarbures produits (ce qui inclut donc d'autres produits que le SAF recherché) et la masse d'intrant fournie sous forme de biomasse :

$$\rho = \frac{\text{masse de biocarburants}}{\text{masse de biomasse introduite}}$$

Dans le cas des e-SAF, ce rendement n'est donc bien entendu pas pertinent puisque ne faisant pas appel à la biomasse. En ce qui concerne la voie PBtL (e-bioSAF), ce rendement de conversion massique est logiquement plus élevé, car optimisant la ressource en biomasse par l'ajout d'hydrogène exogène pour améliorer ce rendement de conversion massique.

B. Rendement énergétique

Le rendement énergétique est couramment utilisé pour décrire un processus de transformation d'une ressource en une autre, et peut donc être utilisé dans notre cas, à condition de bien préciser ce qui est compté comme entrée et sortie du processus. Si on parle de rendement énergétique en biomasse, on peut par exemple définir la métrique suivante :

$$r_{bs} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\text{énergie SAF}}{\text{énergie biomasse}}$$

Dans la mesure où elle ne prend pas en compte les apports extérieurs en énergie, et notamment les besoins en électricité pour la captation de CO₂ et la production d'hydrogène, cette métrique ne peut pas à elle seule caractériser ce que l'on aurait envie d'appeler l'efficacité énergétique globale d'un procédé : un procédé de production de e-bioSAF présente en général un excellent rendement énergétique en biomasse (100% dans le modèle idéalisé, 80% en conditions réelles), mais ne signifie pas que pour obtenir 0,8 kWh dans un SAF, il faille apporter en entrée 1 kWh d'énergie globale (ce sera en réalité bien davantage avec l'hydrogène ajouté).

C. Sélectivité

La sélectivité désigne, dans un procédé de transformation chimique, la capacité à orienter la production vers un certain produit cible, aussi appelé fraction cible. Ici, la sélectivité correspond au rapport (ou ratio) de la masse de SAF obtenu sur la masse de produit brut ("crude"). Comme nous l'avons brièvement expliqué lors de la présentation des bioSAF, il est impossible d'obtenir 100 % de kérosène en sortie d'un procédé, car des réactions chimiques telles que la synthèse Fischer-Tropsch ou l'hydrotraitement HEFA génèrent inévitablement un mélange d'hydrocarbures. Par conséquent, la sélectivité limite mécaniquement le rendement de conversion massique global en SAF. Ainsi, produire 1 tonne de SAF signifie toujours produire d'autres fractions, qui seront utilisées par d'autres secteurs d'activités. La sélectivité vers les coupes aviation varie selon la filière technologique et la nature des ressources mobilisées. Elle dépend notamment des propriétés chimiques de la matière première, des conditions opératoires, et du procédé de conversion utilisé (hydrotraitement, synthèse Fischer-Tropsch, oligomérisation...). Certaines voies permettent d'optimiser la production de

kérosène, mais souvent au prix d'une réduction du rendement de conversion massique global et d'une augmentation des coûts de production³⁷. Il existe ainsi un arbitrage technique et économique entre la quantité de carburant d'aviation obtenue et la dépense énergétique ou économique du procédé.

D. Facteur d'émission

Les facteurs d'émission correspondent aux empreintes carbone par unité de SAF. Pour les bioSAF, deux composantes sont distinguées : d'une part, l'analyse du cycle de vie (Core LCA), qui couvre l'ensemble des émissions directes liées à la production et à la transformation du carburant ; d'autre part, le facteur ILUC, qui représente, comme expliqué plus haut, les émissions indirectes liées à l'évolution de l'affectation des sols induite par la production de biomasse. Par ailleurs, le facteur d'émission de la filière e-bioSAF (PBtL) se base sur les ratios de consommation, à la fois en termes de biomasse par rapport aux bioSAF (1 / 2,1) et en termes d'électricité par rapport aux e-SAF (1 / 2,6).³⁸ L'empreinte carbone des e-SAF a été détaillée un peu plus haut.

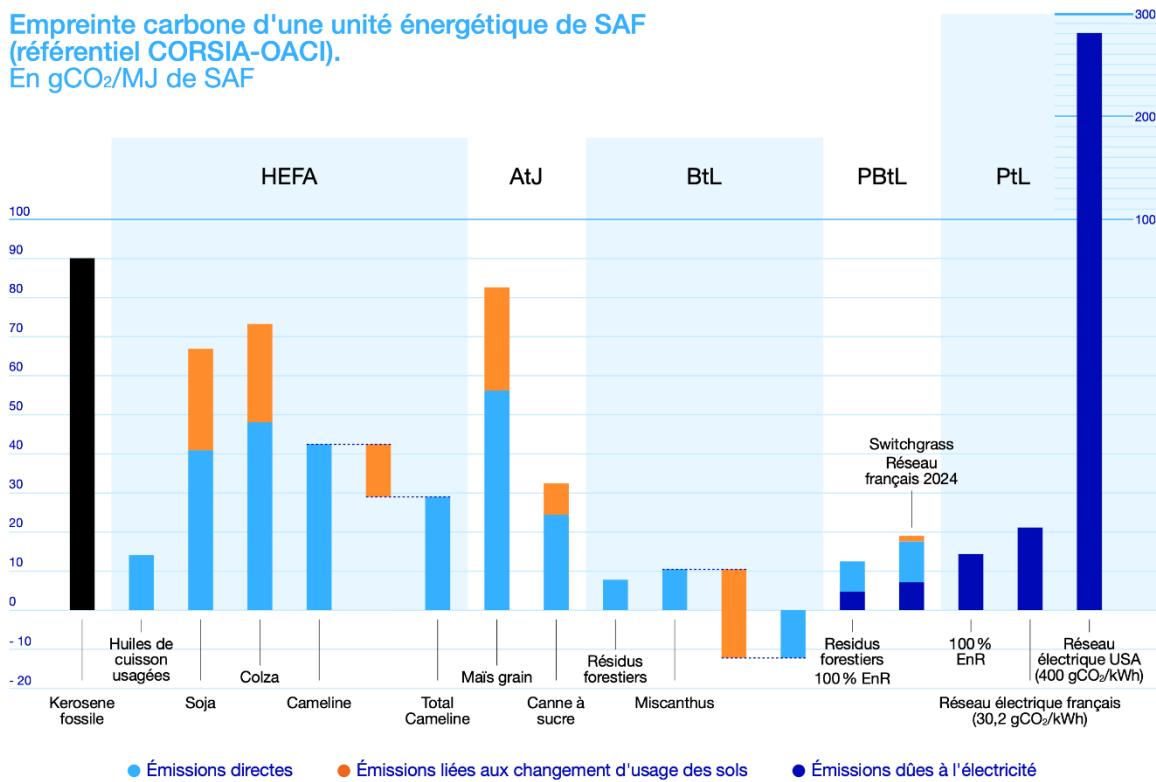


Figure 1.5 : Comparaison des empreintes carbone des principaux SAF selon la méthodologie CORSIA

Le graphique ci-dessus, qui illustre les empreintes carbone des principales filières de production de SAF, met également en évidence une forte variabilité des données selon les ressources mobilisées, les procédés technologiques et la localisation géographique des projets. La valeur centrale retenue pour chaque filière correspond à une estimation représentative lorsqu'elle existe, ou à une moyenne simple dans les autres cas. En conclusion, ce graphique rappelle qu'il est impossible d'attribuer une empreinte carbone universelle à un SAF. Celle-ci dépend étroitement de la nature des intrants, du procédé utilisé, du contexte

³⁷ IEA Bioenergy Task 39

³⁸ Rapport Five Years to Chart a New Future for Aviation de l'Université de Cambridge - Aviation impact Accelerator, voir Key fact 3

local de production et du mode de culture ou de collecte de la biomasse. Toute évaluation doit donc être contextualisée.

E. Coût

Ce rapport n'a pas vocation à détailler les aspects économiques des différentes filières SAF. Nous nous contenterons donc ici de rappeler les principaux enseignements sur les ordres de grandeur des coûts de production de chacune des principales filières présentées dans cette partie. Rappelons d'abord que tous les SAF sont plus coûteux que le kérósène fossile, parfois dans des proportions importantes.

- La filière HEFA est aujourd'hui la plus économiquement compétitive des voies de production, avec des coûts environ 2 à 3 fois supérieurs³⁹ au prix moyen du jet A-1 fossile. Cela s'explique par le fait que des unités industrielles sont déjà opérationnelles, initialement conçues pour produire des biocarburants pour le transport routier. Toutefois, le coût des matières premières représente plus des trois quarts du coût de production, rendant cette filière fortement dépendante du prix des huiles usagées ou des graisses animales. Avec des perspectives de tensions croissantes sur ces ressources, on peut même penser que les coûts de production des bio-SAF de type HEFA n'auront pas beaucoup de marge d'amélioration dans le futur.
- La voie AtJ, qui repose principalement sur l'éthanol, bénéficie aussi d'une base industrielle existante. Les coûts y sont plus équilibrés entre la matière première et les investissements en infrastructure, rendant envisageable l'adaptation d'installations déjà en service, ainsi que des améliorations de procédés susceptibles de faire baisser les coûts.
- La filière BtL mobilise des ressources moins coûteuses, mais dont la faible densité énergétique renchérit la logistique. Les coûts d'infrastructure sont très élevés mais devraient diminuer rapidement avec l'industrialisation des procédés.
- La filière PtL est aujourd'hui de loin la plus coûteuse, en raison des investissements nécessaires pour l'électrolyse, la capture de CO₂ et l'accès à une électricité renouvelable bon marché. Les coûts sont appelés à baisser rapidement avec les progrès technologiques, mais les projections suggèrent qu'ils ne seront pas compétitifs à grande échelle avant les années 2040⁴⁰.

F. Maturité technologique

Nous avons déjà évoqué que la filière HEFA est, à ce jour, la plus mature technologiquement, car elle est déjà déployée à grande échelle. Les autres voies de production de bioSAF sont encore au stade des essais industriels, tandis que la filière e-SAF reste moins avancée. Un indicateur couramment utilisé pour évaluer la maturité technologique est le TRL, pour Technology Readiness Level, qui classe les technologies sur une échelle de 1 à 9. Voici les niveaux pertinents pour notre étude :

- TRL 5 : Technologie validée dans un environnement expérimental
- TRL 6 : Prototype démontré dans un environnement expérimental

³⁹ [Zenon : Sustainable Aviation Fuel](#)

⁴⁰ Dans certains pays comme la Norvège, où l'électricité décarbonée est abondante et peu chère grâce à de grandes capacités hydrauliques, la production de e-SAF est déjà compétitive avec celle de certains bio-SAF.

- TRL 7 : Prototype démontré dans un environnement opérationnel
- TRL 8 : Système complet qualifié dans des conditions réelles
- TRL 9 : Technologie éprouvée en conditions d'utilisation réelle

G. Tableau de synthèse

Procédé	Matières premières	TRL	Emissions CO2 en kgCO2/kgFuel 41	Coût ⁴²	Cas maximisation portion bio-kérosène			Apport en électricité		
					Rendement massique biocarburant	Rendement énergie biocarburant ⁴³	Sélectivité kérosène			
HEFA	Résidus d'huiles	9	[0,6-1,2]	€€	85% [80 - 90]	90% [85 - 95]	80% [74 - 90]	3 MWh/t		
	Huiles végétales	9	[1,2-2]	€€€						
AtJ	Cultures fermentescibles	7-8	[1-2,8]	€€	Forte hétérogénéité selon la teneur en sucre ou en amidon [20-30]	Forte hétérogénéité selon la teneur en sucre ou en amidon [50-75]	70% [65-80]	0		
	Résidus de biomasse ligno	6-7	[1-1,8]	€€	15% [13-19]	38% [33-48]				
	Cultures de biomasse ligno	6-7	[1,2-1,8]	€€€						
BtL	Résidus de biomasse ligno	6-7	[0,3-0,35]	€€€	20% [14-22]	50% [35-55]	60% [50-70]	0		
	Cultures de biomasse ligno	6-7	[0,4-0,55]	€€€€						
	Déchets organiques	5-6	[0,2-0,3]	€€€	7% [7-31]	18% [18-78]				
PBtL	Résidus de biomasse ligno	6-7	[0,8 - 1,6 en France]	€€€€	45% [45]	100% Ce rendement énergétique ne tient pas compte de l'énergie apportée par l'H ₂ dans l'énergie initiale.	60% [50-70]	10 MWh/t		
	Cultures de biomasse ligno	6-7	[0,9 - 2 en France]	€€€€						
e-SAF FT	CO2 atmosphérique	5-6	[0,6 - 2 en France]	€€€€€			60% [50-70]	30 MWh/t [25 - 40]		
	CO2 en sortie de cheminée	5-6	[0,5 - 2 en France]	€€€€€						
e-SAF MtJ	CO2 atmosphérique	5-6	[0,6 - 2 en France]	€€€€€			90% [82-97]	30 MWh/t [25 - 40]		
	CO2 en sortie de cheminée	5-6	[0,5 - 2 en France]	€€€€€						

Tableau 1.1 - Tableau de synthèse (4.G)

⁴¹ Sans ILUC. Données ICAO https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF_RULESOFTHUMB.aspx

⁴² Chaque symbole "€" représente le coût relatif d'un facteur par rapport au kérosène fossile. Par exemple, la voie HEFA est 2 à 3 fois plus coûteuse que le kérosène fossile, ce qui correspond à une notation "€€-€€€". Les estimations ont été compilées en croisant plusieurs sources industrielles et revues scientifiques (IATA: [IATA SAF procurement pricing options for different strategies](#), EASA : [EASA sustainable aviation fuel market](#))

⁴³ Calculés à partir des rendements massiques avec PCI de la biomasse à 17 MJ/kg MS et PCI kérosène à 43 MJ/kg MS

V. Régulations et certifications

L'encadrement réglementaire des SAF repose sur une double exigence : il doit à la fois garantir la sécurité en vol et assurer que les carburants utilisés présentent effectivement des réductions d'émissions de GES sur l'ensemble de leur cycle de vie, sans impliquer d'autres impacts environnementaux (eau, sol, air). Pour répondre à ces objectifs, plusieurs dispositifs réglementaires, internationaux et européens ont été mis en place. Nous allons en étudier quatre :

- **La certification ASTM** qui permet de s'assurer que les SAF répondent aux normes techniques strictes nécessaires pour garantir la sécurité en vol.
- **Le mécanisme de compensation carbone CORSIA** (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) de l'OACI qui a pour objectif de compenser et réduire les émissions de CO₂ du transport aérien international.
- **La directive européenne RED** (Renewable Energy Directive) qui encadre les biocarburants au niveau européen en posant des critères stricts en matière de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- **Le règlement européen ReFuel EU Aviation**, qui impose des quotas d'incorporation de SAF dans les aéroports européens.

A. Certification ASTM

Afin de garantir la compatibilité de leurs produits avec les exigences de sécurité aérienne, les procédés de production de SAF doivent être certifiés par un organisme spécialisé, l'ASTM⁴⁴, ce qui leur permet alors d'être incorporés, en mélange avec du kérósène d'origine fossile, par les compagnies aériennes. En juillet 2023, 11 procédés de production de SAF à partir de biomasse étaient certifiés ASTM. Parmi ces procédés, deux reposent sur le co-processing avec du pétrole brut, tandis que les autres correspondent à des variantes des voies HEFA, ATJ et FT. La voie MTJ, actuellement en cours de certification, peut être écartée de notre analyse, car elle présente des similitudes avec la voie FT, tant en termes de choix des matières premières que de performances obtenues.

Selon la technologie utilisée, les taux d'incorporation autorisés par l'ASTM varient de 5 % à 50 %. Des essais sont en cours par les constructeurs de moteurs et d'avions, pour définir les conditions d'utilisation de certains SAF en pur (100 %), sans nécessiter de mélange. À l'horizon 2030, les principaux constructeurs aéronautiques se sont engagés à ne produire que des avions compatibles avec un usage 100 % SAF. Dans cette étude, nous faisons donc l'hypothèse que cette compatibilité ne constitue pas un facteur limitant au développement des carburants durables.

⁴⁴ ASTM International est un organisme chargé de la normalisation de matériaux, produits, systèmes et services. Le comité D02, dédié aux produits pétroliers, carburants liquides et lubrifiants, est chargé de certifier la fiabilité des SAF.

B. Mécanisme de compensation carbone CORSIA

Lancé en 2016 par l'OACI, le dispositif CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) constitue un mécanisme international de compensation carbone spécifiquement dédié au secteur aérien. Il vise à garantir une croissance neutre en carbone de l'aviation commerciale internationale à partir de 2019, année retenue comme référence. Concrètement, toute émission de CO₂ supérieure au niveau de 2019 (moins 15% à partir de 2024) doit être compensée par l'achat de crédits carbone ou par des investissements dans des projets de réduction ou de captation du CO₂, et ce, jusqu'à l'horizon 2035. Un crédit correspond à une tonne de CO₂ équivalent.

Le dispositif s'applique uniquement aux vols internationaux et aux compagnies aériennes émettant plus de 10 000 tonnes de CO₂ par an. Il ne couvre ni les vols domestiques ni les liaisons internationales impliquant un pays non participant. CORSIA se déploie en deux phases : une première, de 2021 à 2026, reposant sur la participation volontaire des États, puis une phase obligatoire à partir de 2027 jusqu'en 2035, à quelques exceptions près. Les États insulaires et ceux dont le trafic représente moins de 0,5 % du total mondial sont exemptés, bien qu'ils puissent rejoindre le dispositif sur une base volontaire. En 2025, 129 États participent activement à CORSIA.

Le mécanisme présente toutefois certaines limites, au-delà des angles morts de la compensation carbone. Sa portée géographique est restreinte aux vols entre pays participants, ce qui laisse une part d'émissions non couvertes. Par ailleurs, CORSIA prend en compte certains carburants fossiles à plus faible intensité carbone, communément appelés LCAF (Low-Carbon Aviation Fuels) dont la réduction des émissions de CO₂ peut se limiter à seulement 10 %, reste bien inférieure à celle des SAF. C'est pourquoi nous avons choisi de ne pas les inclure dans ce rapport. En les promouvant, CORSIA réduit le niveau d'ambition nécessaire pour atteindre une décarbonation réellement durable de l'aviation.

C. Directive européenne RED

Les directives RED II (2018) puis RED III (2023) fixent les critères d'éligibilité des biocarburants et des carburants de synthèse⁴⁵ aux mécanismes européens de soutien à la transition énergétique. Elles visent à garantir que les carburants alternatifs utilisés dans l'UE permettent une réduction effective des émissions de gaz à effet de serre, tout en respectant des critères stricts de durabilité environnementale et sociale.

Générations de biocarburants

Pour caractériser l'origine des matières premières utilisées dans la production de biocarburants, on utilise couramment la distinction par génération.

La première génération de biocarburants est issue de cultures alimentaires et entre en concurrence directe avec la production destinée à l'alimentation humaine ou animale. Aujourd'hui, les cultures amylacées (comme le maïs ou le blé) et sucrières (telles que la betterave ou la canne à sucre) sont principalement transformées en bioéthanol, tandis que les oléagineux (soja, palme, colza, tournesol) sont plutôt utilisés pour produire du biogazole (ou

⁴⁵ Dits RFNBO pour Renewable Fuels of non-biological origin

biodiesel) par un procédé comparable à la voie HEFA. Certains biocarburants de première génération à haut risque d'ILUC, comme ceux à base d'huile de palme, verront leur contribution aux objectifs nationaux progressivement réduite à zéro d'ici 2030 par la directive, sauf s'ils sont certifiés à faible risque.

La deuxième génération désigne les biocarburants produits à partir de matières premières non alimentaires ce qui réduit la compétition avec les usages alimentaires : des ressources lignocellulosiques, des résidus agricoles et forestiers, ou encore des déchets organiques.

Enfin, une troisième génération, basée sur la valorisation d'algues produites dans des unités dédiées, est depuis longtemps en phase de recherche. Les procédés de production sont encore loin d'être techniquement matures, les cultures d'algues étant particulièrement gourmandes en eau et en intrants (notamment en potasse et en azote). Le coût de production reste élevé, et ces biocarburants algaux offrent peu de perspectives de développement à court terme. C'est pourquoi nous avons choisi de les écarter de ce rapport, qui se concentre sur les solutions现实和被实际考虑过的 by les acteurs du secteur.

Matières premières avancées

Cependant, au sein de la deuxième génération, toutes les matières premières n'offrent pas les mêmes garanties en matière de durabilité : les déchets et résidus véritablement valorisables sont à privilégier, car ils n'entrent pas en conflit avec l'alimentation ni avec la gestion durable des forêts. À l'inverse, certaines cultures énergétiques dédiées ou un prélèvement excessif de biomasse peuvent générer des conflits d'usage, notamment en ce qui concerne les surfaces agricoles.

La directive RED introduit à ce titre la notion de matières premières « avancées », c'est-à-dire des ressources non alimentaires présentant un faible impact environnemental et social (essentiellement des déchets, résidus ou coproduits). Ces matières premières sont listées dans l'annexe IX de la directive. Pour les matières agricoles cultivées (non résiduelles), une distinction importante est faite selon la nature de la surface : ne sont listées dans l'annexe IX que les cultures implantées sur des «sols sévèrement dégradés». Plus précisément, il s'agit de sols fortement dégradés ou pollués, présentant une faible valeur en biodiversité, et ayant été durablement salinisés, gravement érodés ou fortement appauvris en matière organique⁴⁶. De même pour le bois, seuls les résidus forestiers (écorces, cimes, branches, bois morts, etc.) et les déchets issus de l'industrie du bois (scieries, menuiseries...) sont listés dans l'annexe IX et donc considérés comme matières premières avancées. Le bois issu d'arbres entiers, même s'il est utilisé à des fins énergétiques, n'est donc pas automatiquement reconnu comme «avancé».

Il existe ainsi une zone grise en matière de durabilité dans la catégorie des biocarburants de deuxième génération, notamment pour les matières lignocellulosiques cultivées sur terres arables et le bois de coupe utilisé pour la production d'énergie. Ces ressources peuvent être classées comme de première génération puisqu'elles mobilisent des surfaces critiques, ou comme de deuxième génération non avancée, dans la mesure où elles sont non comestibles sans pour autant être issues de résidus. Nous les considérons ici comme des ressources de deuxième génération non avancées.

⁴⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32018L200>

Première génération

Cultures spécifiques bioéthanol : canne à sucre, betterave, maïs, blé
Cultures spécifique biogazole : huiles de colza, de tournesol ...

Interdit par la directive RED à partir de 2030
Huile de palme et de soja non certifiés durables

Deuxième génération

Zone grise
Cultures lignocellulosiques sur terre arable
Bois de coupe

Matières avancées (annexe IX de la directive RED)
Résidus de culture (pailles, tiges de maïs...)
Résidus forestier
Fumier et lisier
Fraction biodégradable des déchets municipaux
Coquilles de noix, coques de fruits à coque
Huiles de cuisson usagées et graisses animales

Troisième génération

Algues cultivées
Algues sauvages

Figure 1.6 : Schéma des typologies de matières premières de biocarburants

Origine du CO₂ capturé et électricité renouvelable

La directive RED caractérise également l'origine du CO₂ utilisé dans la production de carburants de synthèse, appelés carburants renouvelables d'origine non biologique (RFNBOs) dont font partie les e-SAF par la voie PtL. Ainsi, le CO₂ d'origine fossile, issu de sources industrielles telles que les aciéries ou les cimenteries, ne sera plus autorisé pour la production de carburants de synthèse à partir de 2035 ou 2042, selon les secteurs concernés. En revanche, le CO₂ biogénique, issu par exemple de l'utilisation énergétique de la biomasse, pourra continuer à être capté et valorisé à cet effet. Par ailleurs, les carburants synthétiques doivent respecter des critères stricts concernant l'électricité utilisée pour produire l'hydrogène qui les compose : cette électricité doit être d'origine renouvelable, additionnelle, et répondre à des exigences de cohérence géographique et temporelle, telles que définies dans les actes délégués adoptés en 2023.

Réduction effective

Pour être comptabilisés dans les objectifs d'énergie renouvelable des États membres, les carburants d'origine non fossile doivent démontrer qu'ils contribuent à la réduction de l'empreinte carbone du secteur des transports. Ainsi, les biocarburants doivent permettre une réduction d'au moins 65 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport au kérósène fossile, tandis que pour les carburants de synthèse, cette exigence s'élève à 70 %.⁴⁷

⁴⁷ [ICAO](#)

D. Règlement européen ReFuel EU Aviation

Le règlement européen ReFuel EU Aviation, adopté en 2023, constitue un dispositif central dans la stratégie de décarbonation du secteur aérien européen. Son objectif principal est d'accélérer le déploiement des carburants d'aviation durables (SAF) en fixant des obligations d'incorporation croissantes pour les fournisseurs de kérosène sur les aéroports européens.

À partir de 2025, le taux d'incorporation de SAF exigé est de 2%. Cette proportion augmentera régulièrement pour atteindre 6 % en 2030, 20 % en 2035, 34 % en 2040, 42 % en 2045, et 70 % à l'horizon 2050. L'Union Européenne a également défini un sous-mandat d'incorporation spécifique pour les e-SAF, de 0.7% en 2030 jusqu'à 35% en 2050, soit la moitié des SAF requis.

Les matières premières autorisées pour les bio-SAF et le CO2 capturé pour les e-SAF dans cette réglementation sont celles encadrées par l'annexe IX de la directive RED présentée ci-dessus et disponible en annexe. Les biocarburants issus de cultures alimentaires ou fourragères (comme le maïs ou le colza) sont exclus. Cela signifie que les options HEFA et AtJ à partir de cultures spécifiques sont interdites. Cependant, des incertitudes demeurent concernant les cultures lignocellulosiques sur terres arables en raison du flou entourant la définition de "terres dégradées". Il en va de même pour les ressources en bois : le bois issu de coupes directes est interdit. Seuls sont autorisés les résidus forestiers, le bois de récupération, et les déchets issus de la transformation du bois.

Conclusion

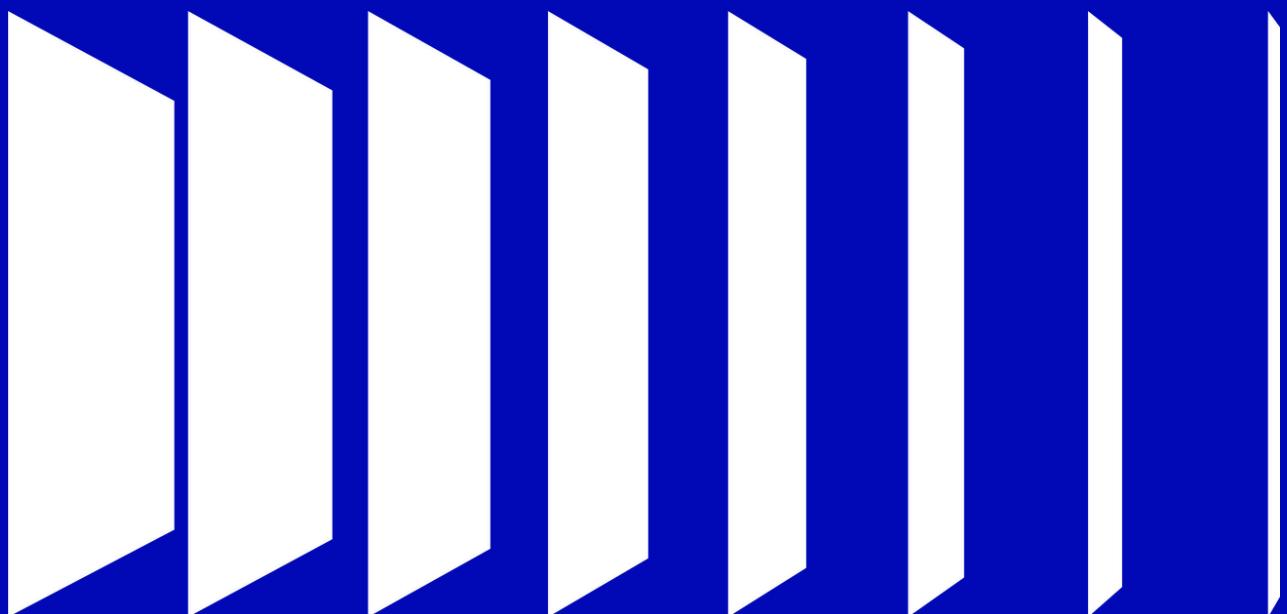
Le développement des SAF repose sur la satisfaction de plusieurs conditions essentielles. En mettant de côté les seuls aspects réglementaires ou économiques, s'assurer que l'usage des SAF constitue une véritable avancée climatique et environnementale implique de porter une attention particulière à trois grands types de contraintes.

D'abord, une contrainte en ressources, liée à la disponibilité des intrants, notamment la biomasse, qui fera l'objet d'un traitement approfondi dans la partie 2. Ensuite, une contrainte en émissions de CO₂, car le bilan carbone des carburants dépend fortement de l'origine du carbone utilisé (biomasse, atmosphère, sources fossiles), un enjeu qui sera développé dans les scénarios prospectifs de la partie 3. Enfin, une contrainte de passage à l'échelle, tant sur le plan technique que logistique, qui sera analysée à travers le prisme d'un cas d'étude national dans la partie 4, consacrée à la France.

Partie 2 -

Quelles ressources pour

les biocarburants ?



Cette partie a pour objectif d'estimer les gisements de biomasse mobilisables pour produire des biocarburants. Il s'agit d'abord d'identifier les ressources disponibles en regard du niveau de durabilité considéré, puis de voir comment elles peuvent être réparties entre les différents secteurs qui en ont besoin. L'analyse présentée ici s'inscrit à l'échelle mondiale. Un focus spécifique sur la situation en France sera développé en partie 4.

I. Préambule

La production de biomasse, ainsi que les questions liées à ses usages, sont étroitement liées aux dynamiques de production agricole et sylvicole. Bien que notre analyse se concentre sur le carbone et l'énergie, il est important de garder à l'esprit que l'agriculture doit avant tout nourrir les populations et que la production de bioénergie ne doit pas se faire au détriment de cet objectif. De plus, le secteur sylvicole qui gère l'exploitation de forêts naturelles, semi naturelles et plantées est au cœur d'autres enjeux environnementaux majeurs.

L'agriculture joue un rôle majeur dans le dépassement de plusieurs limites planétaires⁴⁸ étant à la fois contributrice majeure et secteur particulièrement vulnérable face aux risques liés au changement climatique, à l'utilisation excessive de l'eau douce et aux modifications des flux biogéochimiques. Ce secteur se trouve au cœur d'une transition économique, sociale et environnementale complexe, et demander l'augmentation de la productivité pour des fins énergétiques pourrait retarder cette transition. Dans le même temps, face aux bouleversements climatiques en cours, anticiper le rendement biologique des écosystèmes devient une équation incertaine, rendant particulièrement délicate toute estimation des ressources en biomasse, y compris celles qui feront l'objet de cette partie.

L'un des enjeux majeurs auxquels l'agriculture est confrontée concerne la gestion durable des ressources en eau. Compte tenu des prévisions indiquant une disponibilité hydrique de plus en plus contrainte dans certaines régions, il apparaît indispensable d'engager une réflexion approfondie sur la hiérarchisation des usages de l'eau ainsi que sur les choix stratégiques des cultures agricoles. Les cultures énergétiques, comme la majorité des espèces cultivées, nécessitent des volumes d'eau importants, susceptibles d'entraîner des déficits hydriques sur d'autres parcelles agricoles.

Un autre enjeu majeur qui préoccupe le secteur agricole est la conservation des cycles des éléments nutritifs tels que le carbone, l'azote, le phosphore et le potassium. L'azote, en particulier, est aujourd'hui massivement synthétisé hors d'Europe à partir d'énergies fossiles. Il est donc essentiel, d'un point de vue stratégique et écologique, de parvenir à faire retourner l'azote (et les autres éléments nutritifs) de la biomasse dans le sol. C'est ce que l'on appelle l'enjeu du retour au sol. Certaines filières sont plus adaptées que d'autres à cet enjeu de retour au sol de la matière organique stable et des nutriments. La méthanisation, par exemple, produit un digestat qui contient la majorité de ces éléments et qui peut ensuite être épandu sur les parcelles. La production d'éthanol permet également, via la vinasse, de récupérer une partie

⁴⁸ Campbell et al (2017) - Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries

de ces éléments. En revanche, la récupération des éléments nutritifs est faible voire nulle pour les filières BtL et PbtL.⁴⁹

Un dernier élément essentiel sur lequel le secteur réfléchit actuellement est la préservation des sols. L'agriculture intensive, notamment le labour et l'utilisation d'intrants chimiques, menace la structure naturelle et la biodiversité des sols.⁵⁰ Ces pratiques affectent directement la fertilité et la capacité de rétention d'eau des terres agricoles. Demander au secteur agricole de réduire l'érosion et de restaurer la vitalité des sols tout en maintenant une production de biomasse suffisante pour répondre aux enjeux énergétiques peut sembler paradoxalement. Finalement, la production agricole à des fins énergétiques soulève une préoccupation majeure quant à l'ensemble des enjeux écologiques évoqués, dans un contexte où les craintes directes pour la santé humaine sont nécessairement moindres. Lorsque les récoltes ne sont plus destinées à l'alimentation, remettons-nous en question nos limites éthiques face à la toxicité que nous sommes prêts à tolérer ? Quelles en sont les répercussions sur l'altération des écosystèmes agricoles et de leurs abords ?

La forêt est un écosystème qui se renouvelle lentement. Le cycle de gestion forestière s'étend généralement sur plusieurs dizaines d'années, entre 15 ans pour les cycles courts à plus de 100 ans pour les plus longs. Or, les changements climatiques attendus à l'horizon 2100 sont d'une ampleur telle que, dans beaucoup de régions du monde, les espèces sylvicoles cultivées aujourd'hui ne seront plus adaptées aux conditions climatiques futures, ce qui pourrait compromettre leur survie⁵¹. Partout dans le monde, les forêts font face à une augmentation de la mortalité des arbres due aux incendies, aux sécheresses, aux maladies, aux parasites et à la dégradation des écosystèmes, phénomènes directement ou indirectement causés par le réchauffement climatique global. Par exemple, depuis 2018, la crise des scolytes, amplifiée par des hivers doux et des étés chauds et secs, a sinistré environ 20 % des surfaces d'épicéas en France⁵². Les forêts, au cœur du cycle du carbone, deviennent à certains endroits émettrices nettes de carbone lorsque la photosynthèse de leurs arbres ne compense plus les émissions liées à la combustion, à la décomposition et à la respiration nocturne.⁵³

⁴⁹ Solagro (2024) - Quelles biomasses pour la transition énergétique ?

⁵⁰ Selosse, M.-A. (2021) - L'origine du monde : Une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent.

⁵¹ Wessely et al. (2024) - A climate-induced tree species bottleneck for forest management in Europe

⁵² [Agriculture.gouv](https://agriculture.gouv.fr)

⁵³ [La forêt au défi du changement climatique](https://agriculture.gouv.fr)

II. Inventaire des matières premières pour les biocarburants

Dans cette section, nous cherchons à estimer les gisements potentiels de biomasse pour la production de carburants liquides d'ici 2050, en analysant les estimations des secteurs de l'énergie, de l'agriculture et de la sylviculture. Nous examinerons les tendances actuelles et les dynamiques prévues, tout en identifiant les opportunités et les points de vigilance. Les matières premières biomasse, bien que regroupées en catégories, varient selon leur implantation géographique, leur accessibilité et leur réponse aux enjeux climatiques.

Lorsque nous parlons des ressources en biomasse, il convient de distinguer trois catégories : les **quantités produites**, les **quantités accessibles** (c'est-à-dire que l'humain peut prélever et transporter), et enfin les **quantités mobilisables pour l'énergie**. Pour illustrer les nuances de cette classification, prenons l'exemple d'une forêt. Dans une gestion durable, certaines zones sont volontairement préservées : les arbres n'y sont pas coupés pendant plusieurs années. Pourtant, ils continuent de croître. Il y a donc une production de biomasse, appelée ressource *produite*. Cependant, cette biomasse n'est pas *accessible*, car on choisit de la laisser sur place. La biomasse issue des arbres coupés durant l'année constitue la ressource accessible, aussi appelée biomasse récoltée. Elle peut être utilisée pour l'ensemble des usages évoqués dans la partie précédente. Enfin, une part de cette biomasse accessible est dédiée à la production d'énergie : c'est ce qu'on appelle la ressource mobilisable pour l'énergie. Dans ce contexte, c'est logiquement à cette dernière catégorie, les quantités mobilisables pour l'énergie, que nous nous intéressons.

Pour évaluer la disponibilité des ressources, nous allons estimer des volumes d'**énergie primaire**. Cette énergie est initialement présente dans la biomasse brute. Lorsqu'elle est transformée en vecteur énergétique (gaz, carburant, électricité), une partie est dissipée, tandis qu'une autre est conservée dans le vecteur. Nous appellerons **énergie finale** l'énergie disponible dans ce vecteur. Enfin, lorsque ce vecteur est consommé, nous pouvons évoquer l'**énergie utile**. Cette sémantique nous permettra de mieux décomposer les différentes étapes de l'utilisation de la bioénergie. Ainsi, l'énergie primaire considérée ici ne correspond pas directement à celle utilisée par un secteur donné mais bien celle présente dans la matière première.

Les quantités d'énergie sont exprimées en exajoules (EJ). 1 EJ équivaut approximativement à la production annuelle d'électricité de 30 réacteurs nucléaires. À titre de référence, environ 500 EJ d'énergie primaire fossile sont extraits chaque année à l'échelle mondiale dont 13 EJ sont consommés par le secteur de l'aviation.⁵⁴

Nous allons examiner, une à une, les différentes sources de matières premières classées selon leur volume potentiel pour la production de biocarburant liquide. Ce potentiel sera estimé plus en détail dans la suite du document.

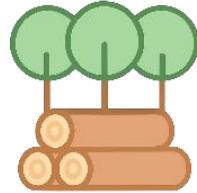
- Biomasse forestière : fort potentiel
- Cultures énergétiques sur terres arables : fort potentiel
- Résidus agricoles : potentiel moyen
- CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique) : potentiel moyen

⁵⁴ [IEA - World Energy Outlook](#)

- Huiles et graisses usagées : faible potentiel
- Déchets municipaux : faible potentiel
- Effluents d'élevage : faible potentiel

A. Biomasse forestière et déchets de bois

La biomasse forestière désigne l'ensemble des ressources issues des forêts notamment le bois de coupe, le bois mort, les résidus sylvicoles (comme les branchages laissés après exploitation), les chutes de scierie, ainsi que les branches et autres sous-produits des récoltes forestières. Dans cette catégorie, il est difficile de distinguer clairement les résidus de la production elle-même, car aujourd'hui, la production d'énergie est devenue une composante essentielle de l'exploitation forestière, pouvant même constituer la principale raison d'une coupe d'arbres. La valorisation de la biomasse issue des coupes forestières en biocarburants est légitimement controversée pour deux raisons majeures. D'une part, le temps de repousse des arbres, qui s'étend sur plusieurs décennies, rend le bilan carbone bien plus complexe que celui des cultures annuelles. La combustion peut ainsi créer une "dette carbone"⁵⁵ dont le remboursement par la repousse est long, avec des effets climatiques intermédiaires liés à l'excès de CO₂. D'autre part, le carbone stocké par les arbres a déjà été comptabilisé dans les bilans passés : le relâcher par combustion dégrade donc ces bilans a posteriori.⁵⁶ C'est pourquoi seule la biomasse forestière résiduelle devrait être utilisée pour la production de biocarburants.



Aujourd'hui, la valorisation du bois récolté suit la hiérarchisation des usages :

- Le bois d'œuvre (construction, ameublement) qui permet un stockage durable du carbone est l'utilisation prioritaire des coupes d'arbres.
- Le bois d'industrie (papier, panneaux, chimie du bois) qui est utilisé de manière intermédiaire avant une possible valorisation énergétique.
- Le bois énergie (bûches, chaudières biomasse, biocarburants et biogaz), dont l'utilisation est immédiate et restitue le carbone capté vers l'atmosphère.

Pour donner un ordre de grandeur en France, la répartition du volume récolté entre ces usages est d'environ 36 % pour le bois d'œuvre, 18 % pour le bois d'industrie et 46 % pour le bois énergie.⁵⁷ Nous excluons naturellement les deux premiers usages dans les volumes mobilisables pour l'énergie. Pour autant, il est essentiel de noter que la demande de bois dans le secteur de la construction ne cesse de croître, portée par la nécessité d'une transition écologique. En France, par exemple, les scénarios les plus ambitieux en matière de réduction de l'empreinte carbone du secteur du bâtiment prévoient un doublement de la demande en bois d'œuvre.⁵⁸ Cette demande étant prioritaire en termes de hiérarchie des usages, elle accentue la contrainte sur les volumes qui peuvent être utilisés pour l'énergie.

Estimations

Actuellement, environ 40 EJ/an d'énergie primaire mobilisable pour l'énergie proviennent de la biomasse dite « solide », c'est-à-dire issue du bois, ce qui en fait la principale composante

⁵⁵ [500 scientifiques alertent sur le bois énergie](#)

⁵⁶ [Briefing biomass carbon accounting is no longer fit to purpose](#)

⁵⁷ [Franceboisforet.fr](#)

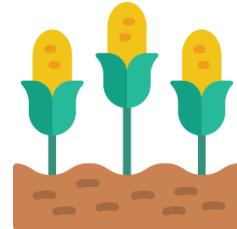
⁵⁸ [Codifab](#)

de la bioénergie.⁵⁹ Cela inclut à la fois le bois brûlé sous forme de bûches ou de branches pour la cuisine et le chauffage, ainsi que les granulés et les plaquettes fabriqués à partir de sciure ou de résidus sylvicoles, mais aussi les déchets de bois (mobilier, bâtiment, emballages). Il est très difficile de déterminer la part exacte qui respecte les critères de durabilité RED. Ce volume global disponible n'est pas augmentable d'ici 2050 au vu des longs cycles forestiers. S'il s'agit de surfaces avec des arbres à court cycle nous les compterons dans la catégorie cultures dédiées présentée plus loin. Nous considérons alors que le flux de biomasse forestière mobilisable pour l'énergie restera le même d'ici 2050, hypothèse optimiste au vu des problèmes de mortalité forestière et d'adaptation au changement climatique évoqué dans le préambule de cette partie. En s'appuyant sur les statistiques françaises, qui estiment que la moitié du bois-énergie est à la fois encadrée et de nature résiduelle,⁶⁰ on considérera arbitrairement que seule la moitié de ce volume est compatible avec les exigences de l'annexe IV de la directive RED.

B. Cultures dédiées à une valorisation énergétique sur terres arables

On considère ici les cultures principales sur terres arables. On distingue 3 types de cultures qui correspondent aux 3 filières de valorisation énergétique :

- **Les cultures oléagineuses productrices d'huile** : Utilisées principalement pour la production de biodiesel, ces cultures incluent des plantes comme le colza, le tournesol et le soja. Ces plantes sont particulièrement adaptées pour des productions de biodiesel et de bioSAF via la voie HEFA.
- **Les cultures sucrières et amylacées pour la production de bioéthanol** : La production de bioéthanol, première étape dans le processus AtJ, nécessite des cultures riches en amidon ou en sucre, faciles à fermenter. Les principales cultures sont la betterave sucrière, la canne à sucre, le maïs et le blé. Les usines de bioéthanol utilisent souvent une seule matière première, ce qui impose leur implantation dans des régions spécialisées, comme celle de la betterave sucrière dans le nord de la France.
- **Les espèces lignocellulosiques** : Les cultures lignocellulosiques sont des végétaux spécialement cultivés pour leur richesse en lignine, cellulose et hémicellulose, composés essentiels pour produire des biocarburants par les procédés BtL et PBtL. Ce groupe de cultures inclut des plantes comme le miscanthus, le switchgrass et le peuplier en taillis à très courte rotation (TCR). Elles sont particulièrement intéressantes car elles présentent un rendement élevé, nécessitent peu d'intrants et ont un faible besoin en eau et en nutriments.



Les cultures dédiées constituent aujourd'hui la principale matière première pour la fabrication de biocarburants, essentiellement du biodiesel et du bioéthanol. Cependant, elles représentent moins de 8 % de l'énergie primaire issue de la biomasse, ce qui en fait la deuxième source, loin derrière la biomasse forestière.⁶¹ Malgré un fort potentiel, le développement des cultures dédiées à l'énergie reste freiné par le besoin de libérer des surfaces agricoles. Cela suppose

⁵⁹ Energy Transition Commission 2021 et [IEA - World Energy Outlook](#)

⁶⁰ [Rapport Biomasse un réel potentiel pour la transition énergétique](#)

⁶¹ [IEA - World Energy Outlook](#)

une réorganisation complexe des usages, comme la réduction de l'élevage, qui permettrait de dégager des terres aujourd'hui occupées par les animaux ou leur alimentation, ou encore la valorisation de terres peu fertiles, voire dégradées ou polluées.

Estimations

Actuellement, les biocarburants produits sont essentiellement du biodiesel et du bioéthanol. Les cultures spécifiques destinées à la production de bioéthanol représentent environ 5 EJ d'énergie primaire annuelle⁶², tandis que celles utilisées pour produire des huiles végétales atteignent un volume de 2 EJ/an⁶³. Le potentiel annuel estimé pour 2050 pour ces 2 types de cultures est un total de 12,5 EJ⁶⁴.

En ce qui concerne les cultures lignocellulosiques, les quantités sont plus difficiles à estimer, car elles sont regroupées dans ce que l'AIE appelle la biomasse solide, aux côtés des résidus agricoles, des déchets municipaux et industriels, ainsi que des produits forestiers. De plus, la distinction entre la biomasse forestière et les cultures lignocellulosiques est ténue, puisque les arbres des forêts sont eux-mêmes des matières lignocellulosiques. Inversement, certaines cultures lignocellulosiques, comme les peupliers en taillis à très courte rotation, peuvent s'apparenter à des forêts cultivées.

Pour estimer le potentiel des cultures lignocellulosiques à l'horizon 2050, on se heurte au même enjeu de distinction entre ces cultures et les produits forestiers. En croisant plusieurs études⁶⁵, nous évaluons que leur potentiel en 2050 se situerait dans une large fourchette entre 20 et 40 EJ/an. Nous retenons une valeur médiane de 30 EJ/an, ce qui porterait le total des cultures dédiées à l'énergie à environ 42 EJ/an, un niveau cohérent avec la moyenne des estimations disponibles.

C. Résidus de cultures agricoles



Les résidus agricoles valorisables pour l'énergie comprennent des ressources renouvelées chaque année (paille de céréales, bagasse de canne, tiges de grandes cultures ...) et d'autres renouvelées sur plusieurs années (arrachages de vignes, kiwitiers ...). Aujourd'hui, ces résidus sont utilisés par les agriculteurs pour la fertilisation des sols (le fameux "retour au sol"), ainsi que comme combustible dans de nombreuses parties du monde pour produire de la chaleur ou encore de l'électricité.

Afin d'assurer le retour au sol du carbone, de l'azote et d'autres nutriments, mais aussi pour limiter l'érosion, il est important de ne pas prélever la totalité des résidus de culture. Le taux de prélèvement dépend de nombreux facteurs tels que le type de culture, le contexte pédoclimatique⁶⁶ ou encore les pratiques culturelles. Ce taux dépend également de la capacité de la filière de valorisation énergétique à récupérer les éléments nutritifs et à les épandre sur les champs. Ainsi, les filières de transformation de la biomasse en biocarburants ne disposent

⁶² [ifpenergiesnouvelles](#) donne une énergie finale de 2 EJ en 2022 et un rendement moyen de 40%

⁶³ [Rendering Biofuels](#)

⁶⁴ En partant d'une production de 2 EJ d'huile en 2025 et d'un rythme de croissance annuel de 3 %, celle-ci atteindrait 4,2 EJ en 2050. Dans le même temps, la matière première pour le bioéthanol, avec une croissance de 2 % par an, atteindrait 8,2 EJ. Au total, la production combinée s'élèverait ainsi à 12,5 EJ en 2050.

⁶⁵ Energy Transition Commission 2021, ICCT 2023 - Vision 2050, IEA World Energy Outlook 2024 - NZA

⁶⁶ Le contexte pédoclimatique désigne les conditions de sol et de climat d'un lieu, qui déterminent son potentiel agricole.

généralement pas de cette possibilité, alors que la méthanisation le permet. Par conséquent, le potentiel énergétique de la biomasse varie selon la filière choisie : il est possible de prélever davantage de biomasse lorsqu'une filière permet le retour au sol comparativement à une filière qui ne le permet pas. Combien concrètement ? Même si aucun consensus précis n'existe sur ce sujet, un ordre de grandeur peut être retenu pour les résidus agricoles : jusqu'à 50 % de la biomasse produite peuvent être prélevés dans le cas où le retour au sol est assuré, contre seulement 15 % lorsque ce retour n'est pas envisageable⁶⁷, comme pour la transformation en biocarburants. En d'autres termes, on prélève environ trois fois moins de matière lorsque l'objectif est la production de biocarburants par rapport à la méthanisation.

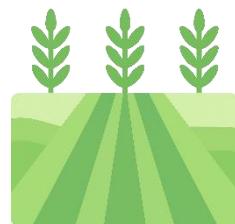
Selon le paysage agricole, cette matière première peut être très dispersée, ce qui soulève des enjeux logistiques importants liés à sa collecte. Ce défi concerne l'ensemble des matières premières, mais il est particulièrement marqué ici en raison de volumes très peu concentrés, c'est-à-dire un faible volume de biomasse par unité de surface, comparé aux cultures dédiées ou aux forêts. Au-delà d'un certain rayon de collecte, l'opération n'est plus économiquement viable.

Estimations

Estimer la quantité actuellement valorisée énergétiquement est complexe, pour les raisons évoquées dans la partie sur les cultures principales en terres arables. Pour la projection à l'horizon 2050, nous nous appuyons sur les données des spécialistes, qui avancent une estimation de 12 EJ/an d'énergie primaire issue des résidus agricoles sans mentionner si c'est dans une optique de valorisation avec retour au sol ou non.⁶⁸

D. CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique)

Les Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE) permettent de cultiver de la biomasse entre deux cultures dites principales. Par exemple, entre une récolte en automne et un semis de culture au printemps suivant, le sol est disponible pendant l'hiver. Cela permet, en quelque sorte, d'augmenter les surfaces disponibles pour produire de la biomasse. Cependant, les périodes de culture des CIVE sont par définition courtes et souvent situées à des moments peu favorables à la croissance végétale. En Europe et dans les régions tempérées, on distingue principalement deux périodes d'interculture : l'été, très court (3 à 4 mois), souvent limité par la sécheresse, et l'hiver, plus long (6 à 8 mois), mais marqué par des températures peu favorables. Les possibilités varient fortement selon les régions, certaines n'étant pas adaptées du fait de conditions climatiques difficiles (manque d'eau, températures trop basses).



Pour que la culture des CIVE soit économiquement viable pour l'agriculteur, un rendement minimal doit être atteint, ce qui peut nécessiter l'utilisation d'intrants et le recours à l'irrigation. En dessous de ce seuil, aux alentours de 5 tonnes de matière sèche par hectare en France⁶⁹, le coût par tonne devient trop élevé comparé à l'énergie vendue et la CIVE peut ne pas être récoltée.

⁶⁷ Solagro (2024) - Quelles biomasses pour la transition énergétique ?

⁶⁸ Energy Transition Commission (2021) Bioresources within a Net-Zero Emissions Economy

⁶⁹ France stratégie (2021) Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ?

Aujourd’hui, les CIVE sont principalement des végétaux méthanisables, notamment parce que la production de biomasse lignocellulosique en périodes courtes est complexe, et même si certaines études explorent des cultures capables de produire rapidement des graines oléagineuses, telles que la *Brassica carinata* (cultivée principalement en Amérique latine) ou la caméline (adaptée au climat tempéré), pour la filière HEFA.

L’ajout de couverts végétaux est aujourd’hui considéré comme une bonne pratique pour stocker du carbone dans le sol, réduire l’utilisation d’engrais azotés et limiter l’érosion⁷⁰. De plus, la culture des CIVE peut inciter des pratiques culturales moins intensives, comme la réduction du labour, ce qui permet de préserver les stocks de carbone dans le sol. Pour garantir le bénéfice environnemental de cette pratique, il est important d’assurer le retour au sol d’une partie de la biomasse produite. On applique généralement les mêmes ordres de grandeur que pour les résidus agricoles : environ 50 % de la biomasse est mobilisable dans les filières qui permettent le retour au sol, et seulement 15 % dans les filières qui ne le permettent pas. La majorité des filières aujourd’hui annoncées pour produire des biocarburants à partir de biomasse non-huileuse (notamment BtL et PBtL) ne permettent pas de restituer les nutriments au sol.

Estimations

L’utilisation actuelle des CIVE est très limitée, représentant moins de 1 EJ d’énergie primaire annuelle, de matière généralement adaptée principalement à la méthanisation⁷¹. Cette catégorie est rarement distinguée des cultures énergétiques dédiées dans les projections énergétiques globales, compliquant les estimations précises à l’horizon 2050. Il faut d’ailleurs un encadrement législatif strict afin d’éviter que certaines cultures dédiées soient abusivement classées comme CIVE.

En extrapolant les données françaises, nous estimons un potentiel de 25 EJ/an en méthanisation et 8 EJ/an en production de biocarburant en 2050⁷². Ce chiffre peut sembler faible mais la culture des CIVE dépend de contextes très locaux, et l’adoption de cette pratique récente est lente : les surfaces cultivées en CIVE en France représentent moins de 0,5 % de la Surface Agricole Utile (SAU)⁷³.

En plus d’un volume potentiel relativement faible, cette matière première est aujourd’hui peu adaptée à la production de biocarburants en raison des contraintes liées au retour au sol et de la rapidité des cycles de culture, qui limitent à la fois la nature et les volumes de biomasse produits.

E. Huiles de cuisson usagées et graisses animales

Cette catégorie regroupe les huiles de cuisson usagées ainsi que les graisses animales qui ne sont pas destinées à l’alimentation humaine ou animale. Ces ressources sont collectées auprès des transformateurs alimentaires, puis acheminées vers des bioraffineries pour être



⁷⁰ The Shift Project (2024) - Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère

⁷¹ Solagro (2024) - Quelles biomasses pour la transition énergétique ?

⁷² Selon Solagro, 40 MtMS de CIVE pourraient être produites avec un retour au sol de 50 %, soit 20 MtMS disponibles pour la méthanisation sur la SAU, correspondant à environ 0,3 EJ (avec un pouvoir calorifique de 15 MJ/kg MS). En extrapolant ce potentiel à l’échelle mondiale, sur 1,35 milliard d’hectares présentant des conditions climatiques similaires à la France (soit 85 fois la surface arable française), on obtient un potentiel de 25 EJ pour la méthanisation. Pour les carburants, en appliquant une division par 3 de ce volume, cela représente environ 8 EJ.

⁷³ Estimation surfaces de CIVE en France

transformées en biocarburant. Elles sont facilement transportables, car leur viscosité est similaire à celle du pétrole, dont la logistique est bien maîtrisée. Les huiles issues de cultures dédiées sont comptabilisées dans une autre catégorie appelée “Cultures dédiées à l’énergie”.

La distinction entre les huiles usagées et les huiles cultivées spécifiquement pour la valorisation énergétique pose des défis majeurs en matière de traçabilité. Pour prévenir les effets d’aubaine liés à l’importation des huiles, l’Union européenne a mis en place des réglementations strictes qui prévoient l’élimination progressive des biocarburants présentant un risque élevé d’induire de la déforestation, principalement de ceux produits à partir d’huile de palme et d’huile de soja, d’ici 2030.⁷⁴ Cependant, des pratiques commerciales complexes subsistent, où il peut être plus rentable pour les pays producteurs d’huile d’exporter des huiles usagées vers l’Europe et d’importer de l’huile de palme pour la consommation locale, plutôt que d’utiliser directement l’huile disponible.

Estimations

Aujourd’hui, les volumes mondiaux d’huile usagée et de graisse animale atteignent 12 millions de tonnes en 2023⁷⁵, ce qui donne 0,5 EJ d’énergie primaire annuelle. Le secteur estime que la quantité disponible en 2050 sera le double, soit 1 EJ par an.⁷⁶

F. Déchets municipaux

Le potentiel de valorisation des déchets municipaux solides (DMS ou MSW pour *Municipal Solid Waste*) présente plusieurs limitations techniques et économiques. La composition des DMS est fortement hétérogène, combinant des matières organiques avec des plastiques, textiles, métaux et autres matériaux dont la valorisation est complexe. Cette diversité implique des opérations de tri coûteuses et techniquement exigeantes afin d’éviter les risques de mélange et de contamination. Ces coûts et contraintes s’ajoutent à ceux liés à la logistique, nécessaire pour récupérer des déchets généralement dispersés géographiquement. C’est pourquoi la principale valorisation énergétique de ces déchets, aujourd’hui, consiste à produire localement de l’électricité ou de la chaleur à partir de leur combustion directe.



De plus, la valorisation des déchets municipaux en biocarburant n’est pas efficace, dans la mesure où son rendement énergétique est trois fois moins élevé que celui de la transformation de biomasse lignocellulosique d’après certains modèles⁷⁷. D’autres filières de valorisation, telles que le compostage et la méthanisation pour la fraction organique et le recyclage des composants non organiques, apparaissent plus appropriées. Cette catégorie est donc exclue des gisements considérés pour la production de biocarburants.

G. Effluents d’élevages

L’exploitation des effluents d’élevage pour la production de carburants liquides est limitée par plusieurs facteurs. D’une part, la réduction des émissions de CO₂ liées à l’élevage implique une diminution progressive du cheptel, corrélée à une baisse de la consommation de viande. Cette évolution entraîne mécaniquement une diminution des volumes d’effluents produits. D’autre part, ces effluents contiennent des nutriments essentiels, dont la récupération est nécessaire pour maintenir la fertilité des sols. De la même manière que pour les résidus

⁷⁴ [Lex europa](#)

⁷⁵ IRENA WETO (2023), [Global Data UCO Supply Outlook](#) et [Rendering Biofuels](#)

⁷⁶ [IRENA](#) et ICAO

⁷⁷ [Estimating sustainable aviation fuel feedstock](#)

agricoles et les CIVE, la méthanisation apparaît comme une solution plus adaptée pour cette matière.

Le pâturage contribue également à des services écosystémiques essentiels, notamment le stockage du carbone dans les sols des prairies. Or, la nécessité de confiner les animaux pour optimiser la récupération des effluents pourrait altérer ces dynamiques et réduire ces bénéfices environnementaux.

Sur le plan énergétique, la conversion des effluents en biocarburants liquides offre des rendements peu compétitifs par rapport à d'autres filières, notamment la méthanisation, qui reste la voie privilégiée pour valoriser ces ressources. Nous écartons donc cette catégorie des gisements potentiels pour produire des biocarburants.

H. Synthèse des estimations

Matière première	Énergie primaire actuelle	Potentiel maximal d'énergie primaire 2050	Filière SAF adaptée	Critères de durabilité	Levier pour le développement des biocarburants
Bioénergie forestière et déchets de bois	40 EJ	40 EJ	BtL/PBtL	La moitié du volume considérée comme résiduelle	Substitution du bois-énergie par des usages plus efficaces
Cultures dédiées à la production d'huile	2 EJ	4 EJ	HEFA	L'essentiel des surfaces potentielles de culture est en concurrence avec l'alimentation	Réorganisation de l'affectation des surfaces agricoles
Cultures dédiées à la production d'alcool	5 EJ	8 EJ	AtJ		
Cultures dédiées lignocellulosiques	<10 EJ	30 EJ	BtL/PBtL		
Résidus agricoles	5 EJ	12 EJ	BtL/PBtL	Conforme à la directive RED	Amélioration de la logistique de collecte
CIVE Lignocellulosiques	<1 EJ	8 EJ	BtL/PBtL	Conforme à la directive RED	Diffusion des pratiques culturelles et optimisation logistique
Huiles usagées et graisses animales	0,5 EJ	1 EJ	HEFA	Conforme à la directive RED	Amélioration de la logistique de collecte

Tableau 2.1 : Synthèse des estimations matières premières (2.H)

Il convient de souligner que cette estimation reste ambitieuse en ce qui concerne la disponibilité de la biomasse. Elle s'élève à environ 100 EJ/an, un ordre de grandeur cohérent avec les estimations de l'ETC et de l'AIE, deux organismes de référence dans l'industrie énergétique, dont les scénarios s'inscrivent dans des trajectoires volontairement ambitieuses appuyées sur de larges hypothèses de transformation. Les volumes d'énergie primaire disponibles selon l'ETC varient de 50 EJ/an dans un scénario prudent à 136 EJ/an dans une hypothèse plus favorable⁷⁸. De son côté, l'AIE estime ce volume à 102 EJ/an dans le cadre de son scénario « Net Zero Emissions » (NZE)⁷⁹. Ces estimations incluent parfois des sources telles que les déchets municipaux ou les effluents d'élevage, que nous avons choisi d'exclure de notre propre analyse.

Les projections de l'ETC et de l'AIE, tout comme les sources ayant permis d'établir les estimations présentées dans le tableau ci-dessus, ne tiennent pas compte des effets du changement climatique sur la production de biomasse. Il est important de rappeler que l'avenir reste incertain : les régions agricoles et les écosystèmes forestiers connaîtront des évolutions profondes, dont le rythme et l'intensité demeurent aujourd'hui impossibles à prévoir avec précision. Il est probable que ces estimations, bien qu'utiles pour donner un ordre de grandeur, s'avèrent éloignées de la réalité en 2050, probablement en deçà des valeurs anticipées.

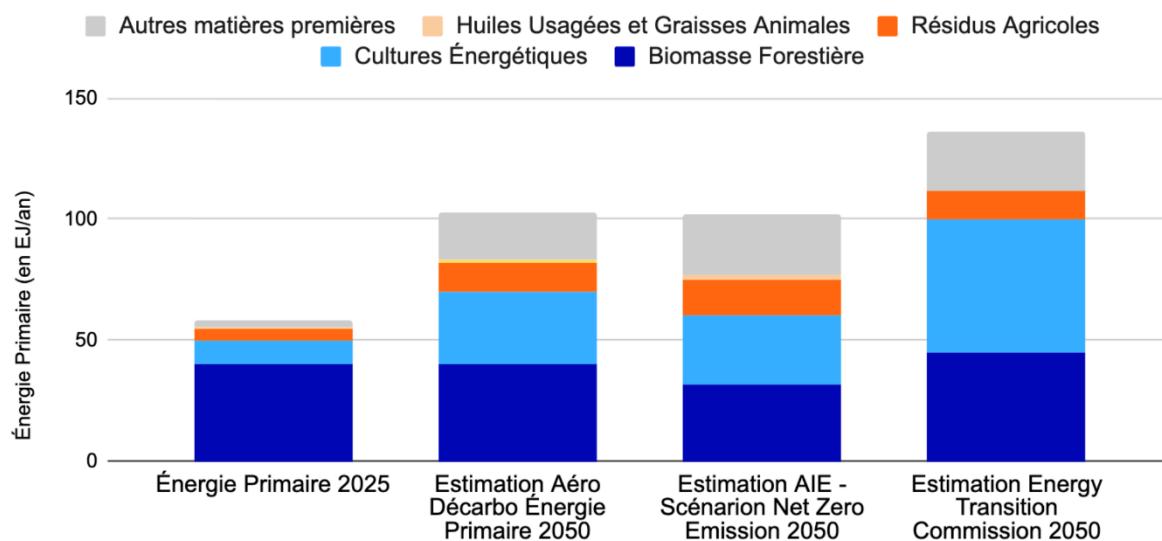


Figure 2.1 : Quantités d'énergie primaire valorisables selon les différents types de matières premières (estimations du rapport, ETC et AIE – hors CIVE)

⁷⁸ Energy Transition Commission (2021) Bioresources within a Net-Zero Emissions Economy

⁷⁹ [IEA - World Energy Outlook](#)

III. Hiérarchie des usages de la biomasse-énergie

A. Compétition pour les surfaces agricoles

Lorsqu'elle est basée sur des cultures dédiées, la production de biomasse nécessite l'accès à des surfaces cultivables situées dans des zones propices à la croissance végétale. L'expansion des surfaces agricoles est aujourd'hui limitée d'un côté par l'impossibilité de cultiver dans des régions aux reliefs accidentés, aux sols pauvres ou disposant d'un accès réduit à l'eau, et, de l'autre, par l'artificialisation des sols due à l'expansion des zones urbaines, qui gagne peu à peu les espaces cultivables. Ainsi, la superficie agricole mondiale demeure relativement stable depuis deux décennies malgré la décroissance constante de la surface forestière⁸⁰.

À l'échelle mondiale, l'expansion agricole s'effectue principalement aux dépens des forêts, avec environ 80 % des nouvelles surfaces agricoles tropicales créées entre 1980 et 2000 issues de déforestation⁸¹. Ainsi, la surface forestière est en déclin, y compris depuis les années 2000⁸². Pourtant, les forêts jouent un rôle écologique crucial, notamment en séquestrant le dioxyde de carbone d'origine anthropique, stopper et inverser cette dynamique de déforestation est indispensable si nous décidons de réduire la concentration de gaz à effet dans l'atmosphère.

Pour libérer des surfaces agricoles pour la production de biomasse énergétique, la réorganisation des paysages agricoles s'avère essentielle. Le changement des habitudes alimentaires, notamment par la réduction de la consommation de viande, permettrait de libérer des terres agricoles actuellement utilisées par les animaux ou pour l'alimentation animale⁸³. Toutefois, cette approche introduit une concurrence potentielle entre cultures énergétiques et alimentaires, d'où la nécessité de réglementations rigoureuses.

B. Compétition pour l'utilisation de la biomasse

Une fois produite, la biomasse peut être utilisée soit directement en tant que matière, soit dans des procédés de transformation industrielle, soit pour la valorisation énergétique. L'utilisation de la biomasse en tant que matière permet le stockage durable des atomes de carbone. En effet, le CO₂ capté lors de la croissance des arbres reste alors figé à long terme dans le bois.

À l'heure actuelle, une part importante de la biomasse récoltée (plus de la moitié en France⁸⁴) est utilisée dans le secteur agricole, notamment pour la fertilisation des sols via le retour au sol des résidus organiques, l'alimentation animale et le paillage. Ces usages traditionnels jouent un rôle clé dans la durabilité des systèmes agraires. La biomasse est également valorisée dans d'autres secteurs d'activité, contribuant à une transition vers des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement :

⁸⁰ FAOSTAT Analytical Brief 71 - Land statistics and indicators 2000–2021

⁸¹ H. K. Gibbs et al. (2010) - Les forêts tropicales étaient les sources premières de nouvelles zones agricoles dans les années 1980 et 1990.

⁸² FAO. 2021. Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 : Rapport principal

⁸³ The Shift Project (2024) - Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère

⁸⁴ SGPE (2024) - Bouclage biomasse : enjeux et orientations

- **La chimie verte**, qui remplace les matières premières issues du pétrole par des composés d'origine biologique, afin de produire des plastiques, solvants, lubrifiants ou encore produits cosmétiques.
- **Le secteur du bâtiment**, qui utilise des matériaux biosourcés comme des isolants naturels, des panneaux de construction ou des textiles techniques fabriqués à partir de fibres végétales.
- **L'industrie textile**, qui développe des vêtements et tissus à partir de fibres naturelles ou régénérées, telles que le chanvre, le lin, le bambou ou encore la viscose d'origine biosourcée.
- **La cosmétique et la pharmacie**, qui favorisent des formulations composées d'ingrédients végétaux, notamment les huiles végétales.

En France, afin de prévenir de potentiels conflits d'usage, une hiérarchie des usages a été proposée lors du Grenelle de l'Environnement et reprise dans la Stratégie Nationale de développement durable (SNDD). Cette hiérarchie est la suivante : Alimentation, puis biofertilisants (retour au sol), puis matériaux, puis molécules (chimie), puis valorisation énergétique.⁸⁵

C. Compétition entre filières énergétiques

Enfin, une concurrence croissante s'observe entre les différentes filières de valorisation énergétique de la biomasse. Depuis toujours, et encore aujourd'hui, la biomasse est largement utilisée pour produire de l'énergie, principalement par combustion. De manière schématique, la valorisation énergétique de la biomasse s'articule autour de trois principaux types de d'énergie :

- La chaleur
- L'électricité
- La force motrice de déplacement

Il est important de noter que certains de ces usages peuvent se substituer les uns aux autres : par exemple, on peut produire de la chaleur à partir d'électricité ou générer de l'électricité en utilisant des biocarburants ou du gaz. Toutefois, chaque transformation énergétique induit une dissipation d'énergie, ce qui réduit le rendement final. Pour cette raison, il est essentiel d'atteindre l'usage ou le vecteur énergétique souhaité de la manière la plus directe possible afin de minimiser les pertes. Le schéma ci-dessous récapitule les différentes concurrences d'utilisation énergétique de la biomasse.

⁸⁵ [Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse](#)

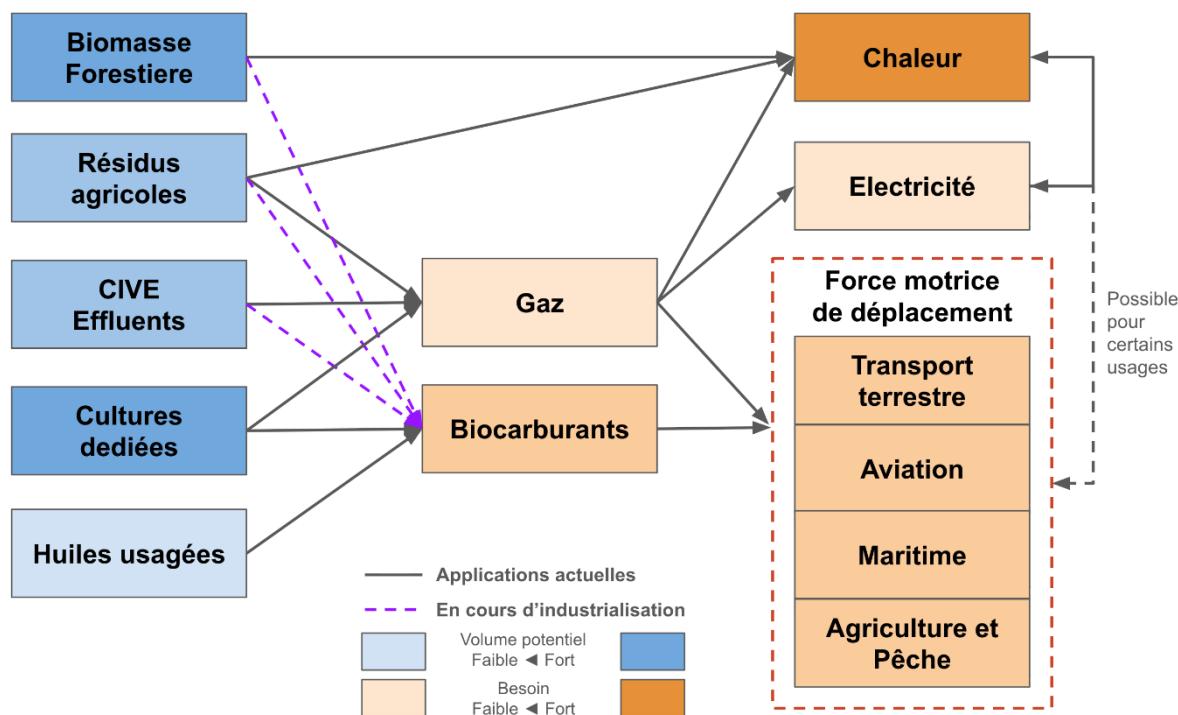


Figure 2.2 : Schéma illustrant les concurrences entre usages énergétiques pour la valorisation de la biomasse (hors déchets municipaux)

En France, la notion de hiérarchisation des usages vertueux de la biomasse a été rappelée dans la Programmation Pluriannuelle de l’Énergie (PPE) dont la dernière version a été mise en consultation en mars 2025⁸⁶, et qui ordonne les usages prioritaires dans cet ordre, les sous-catégories n’étant pas ordonnées entre elles :

- 1. Usages non énergétiques, prioritaires sur les usages énergétiques : alimentation humaine et animale, fertilité des sols, puits de carbone et usages matière.**
- 2. Usages énergétiques à considérer en priorité : industrie (chaleur haute température et non énergétique), réseaux de chaleur, consommations énergétiques de l’agriculture et de la filière forêt-bois, engins lourds de chantiers**
- 3. Usages énergétiques à développer raisonnablement et sous conditions : trafic aérien (domestique et international), soutes maritimes, transports (poids lourds, bus, car, transports fluvial et ferroviaire, transports véhicules légers), industrie autres usages, résidentiel et tertiaire (biomasse solide pour chauffage et ECS performants), outre-mer (Mayotte, Guyane, Corse)**
- 4. Usages énergétiques dont le développement est à modérer : production d’électricité, chauffage et ECS non performants, cuisson**

Dans les paragraphes suivants, nous présentons trois vecteurs énergétiques d’origine organique afin de mettre en lumière les dynamiques de concurrence entre ces usages et les arbitrages qu’elles impliquent : la biomasse solide, le biogaz et l’électricité issue de la biomasse.

⁸⁶ [Projet de PPE n°3 soumis à la consultation \(2025\)](#)

Biomasse solide

Aujourd’hui encore, la biomasse énergie dite solide reste la principale source d’énergie renouvelable à l’échelle mondiale⁸⁷, et demeure, dans certaines régions, la seule forme d’énergie accessible. La biomasse solide traditionnelle, qui représente environ un tiers de la biomasse solide consommée dans le monde⁸⁸, correspond à la combustion directe de bois, de résidus agricoles ou de végétation, principalement à des fins domestiques comme la cuisson ou le chauffage. Cette pratique pose des enjeux sanitaires et environnementaux majeurs, en raison des particules fines émises par la combustion incomplète, responsables de troubles respiratoires et cardiovasculaires. L’AIE, à travers son groupe de travail Clean Fuel, souligne la nécessité d’adopter des solutions de cuisson plus propres, notamment dans les pays en développement. La bioénergie solide dite « moderne », qui regroupe les granulés, les plaquettes forestières et autres produits issus de résidus, constitue la principale composante de la biomasse solide. Elle offre une réponse plus efficace et moins polluante aux besoins de chaleur que la biomasse traditionnelle.

Un basculement majeur est attendu d’ici 2050, avec une forte réduction de l’usage traditionnel de la biomasse solide, jusqu’à sa disparition complète selon le scénario *Net Zero Emissions* de l’AIE. Cette transition nécessitera de compenser les besoins en chaleur par des solutions telles que le gaz ou l’électricité, et permettrait par ailleurs de libérer des volumes supplémentaires de biomasse.

Biogaz

Un autre moyen de répondre aux besoins en chaleur et en cuisson est le gaz. À l’échelle mondiale, ses quatre principaux usages sont, par ordre d’importance : le résidentiel, l’industrie, la production d’électricité et le secteur tertiaire. Or, une part importante de la consommation résidentielle et tertiaire est dédiée au chauffage, qui pourrait être, là où les infrastructures le permettent, assuré par des pompes à chaleur électriques : elles sont efficaces sur le plan énergétique et peuvent être alimentées par de l’électricité bas-carbone. Le gaz est également utilisé pour la cuisson des aliments et reste préférable à la biomasse solide traditionnelle. Cependant, cet usage peut, lui aussi, être électrifié dans de nombreuses situations.

La filière biogaz, en plein essor ces dernières années, permet de valoriser des déchets organiques, des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), des effluents d’élevage ainsi que des boues d’épuration. Elle intègre une faible proportion de matière lignocellulosique (moins de 5 % de la matière utilisée en France en 2020)⁸⁹ afin d’optimiser le rendement énergétique. Les matières premières utilisées pour la méthanisation varient selon les régions : les cultures agricoles dominent en Europe, les déjections animales en Chine, et les déchets municipaux aux États-Unis.⁹⁰

La production de gaz à partir de biomasse renouvelable requiert des volumes importants de ressources pour répondre à la demande actuelle, soulevant ainsi la question de l’allocation optimale de cette biomasse. À ce jour, seuls 1 EJ/an de gaz proviennent de la méthanisation de la biomasse, contre 145 EJ issus de sources fossiles. Dans une trajectoire de transition

⁸⁷ [IEA - World Energy Outlook](#)

⁸⁸ [IEA - World Energy Outlook](#)

⁸⁹ D’après l’ADEME repris ici [Senat](#)

⁹⁰ [IEA - World Energy Outlook](#)

vers des sources bas-carbone, une réduction drastique du recours aux gaz, y compris renouvelables, s'impose.

Le biogaz peut répondre à des besoins industriels spécifiques difficiles à électrifier, notamment ceux requérant de hautes températures ou un usage du gaz comme intrant chimique. Aussi, les centrales au biogaz, pilotables, sont utiles pour équilibrer un mix électrique fortement renouvelable. Par ailleurs, certaines matières premières comme les effluents ou végétaux qualifiés d'humides (restes alimentaires, herbes...) se prêtent mieux à la production de biogaz qu'à celle de biocarburants, ce qui permettrait de couvrir ces besoins ciblés.

Électricité issue de la biomasse

Aujourd'hui, la production d'électricité à partir de la biomasse s'élève à environ 2,5 EJ par an, représentant près de 2,4 % de la production mondiale d'électricité. Bien que cette part demeure relativement faible, elle trouve une pertinence particulière dans trois contextes clés. Premièrement, la biomasse, ressource locale et accessible, permet aux régions isolées de produire de l'électricité pour des besoins essentiels, de l'éclairage aux services numériques. Deuxièmement, la cogénération, qui associe production de chaleur et d'électricité à partir d'une même source de combustion (biogaz ou biomasse), permet d'optimiser significativement le rendement énergétique global. Enfin, dans un système électrique fortement renouvelable et peu doté en hydroélectricité, les centrales à biomasse, à la fois décarbonées et pilotables, peuvent jouer un rôle crucial pour assurer l'équilibre du réseau lors des périodes de tension.

Dans un monde en pleine électrification, la production issue de la biomasse pourrait tripler d'ici 2050, atteignant entre 6 et 10 EJ.⁹¹ Toutefois, la production d'électricité par combustion de biomasse, bien que renouvelable, reste plus émissive que d'autres sources à moindre impact environnemental, qui lui sont donc préférables. Il serait donc pertinent de réservier la filière biomasse aux usages précédemment identifiés, en veillant à réorienter les ressources disponibles vers ces applications prioritaires, là où leur efficacité énergétique et leur utilité systémique sont les plus élevées.

⁹¹ [IEA - World Energy Outlook](#)

IV. Demandes en carburants

L'ensemble des secteurs de la mobilité se tourne vers les biocarburants comme levier de transition à court terme pour les usages difficilement électrifiables. L'approche privilégiée consiste à reproduire les carburants fossiles actuels à partir de biomasse, afin de maintenir la compatibilité avec les moteurs thermiques existants. En parallèle, se développent des technologies de production de carburants de synthèse à partir d'électricité bas carbone et de captage de CO₂ : pour l'aviation, il s'agit des procédés de type e-SAF détaillés en première partie.

De plus, certains secteurs explorent des technologies de rupture (hydrogène, batteries solides, propulsion électrique avancée), qui restent aujourd'hui à un stade de maturité insuffisant pour un déploiement massif. Même à moyen terme, ces technologies ne sont pas en mesure de remplacer une majorité des flottes mondiales en circulation, notamment de navires et d'aéronefs, en raison de leur lenteur du renouvellement. Les solutions de décarbonation les plus prometteuses en termes de volume sont souvent celles qui présentent les freins techniques, économiques ou logistiques les plus importants. Leur faible maturité technologique et les contraintes liées au renouvellement des flottes les éloignent encore d'une mise en œuvre industrielle concrète à grande échelle. Ce décalage souligne l'importance de concilier ambition technologique et réalisme industriel. Dans ce contexte, nous adoptons une posture réaliste et prudente, compte tenu de l'ampleur du risque climatique encouru si ces technologies venaient à prendre du retard dans leur validation et leur déploiement.

Dans ce chapitre, nous évaluerons la demande en biocarburants pour différents secteurs : le maritime, le transport terrestre lourd et léger, l'agriculture et l'aérien, en termes d'énergie finale, c'est-à-dire d'énergie contenue dans le carburant utilisé, quelle qu'en soit l'origine.

A. Aérien

En 2023, la demande énergétique du transport aérien s'élevait à environ 13 EJ⁹², avec un approvisionnement en énergie encore très majoritairement fossile, les SAF ne représentant qu'environ 0,2 % de la consommation mondiale de carburant d'aviation⁹³. En 2024, environ 1 million de tonnes de SAF ont été produites, représentant 0,3 % d'une consommation mondiale de kérosène avoisinant les 330 millions de tonnes.⁹⁴



Transition énergétique du secteur aérien

Comme évoqué en introduction, quatre leviers principaux ont été identifiés par l'industrie au cours des quinze dernières années pour amorcer la transition énergétique du transport aérien : les gains en efficacité énergétique des avions, les améliorations opérationnelles, les technologies de rupture et les carburants dits « alternatifs », auxquels s'ajoutent les mesures de compensation carbone. Ces options étant connues, la question est de savoir quel est leur

⁹² [IEA - World Energy Outlook](#)

⁹³ [ICAO](#) - Voir aussi : [IATA](#): 0.5 Mt SAF rapportés à la consommation de kérosène mondiale en 2023, soit 92 milliards de gallons, d'après IATA Industry Statistics.

⁹⁴ [ATAG](#)

potentiel combiné de décarbonation, sous quelles conditions de ressources et de déploiement industriel, et si des mesures supplémentaires de maîtrise de la demande seront nécessaires.

Perspective à l'horizon 2050

Selon l'OACI, même dans les scénarios les plus ambitieux, l'amélioration moyenne de l'efficacité énergétique des avions et de leurs opérations ne dépasse pas 1,5 % par an⁹⁵ entre 2015 et 2050. Les technologies de rupture comme l'hydrogène ou l'électricité resteront marginales d'ici 2050 en raison de nombreux obstacles, faisant des carburants alternatifs la solution centrale pour décarboner l'aviation.

D'une manière générale, le volume de kérosène requis en 2050 dépend donc essentiellement des projections de niveau de trafic. Celles de l'industrie sont extrêmement optimistes, Boeing et Airbus tablant sur une croissance du nombre de passagers.kilomètres de plus de 3,5% par an⁹⁶. Le scénario collectif du secteur, publié par l'Air Transport Action Group (ATAG) en 2021, est à peine inférieur, à 3,2% de croissance par an⁹⁷. L'Agence Internationale de l'Énergie considère, quant à elle, une croissance annuelle du trafic aérien de 3%⁹⁸ dans son scénario "Stated Policies", et d'à peine un peu plus de 2% dans son scénario Net-Zero-by-2050, qui respecte une trajectoire globale de 1.5°C.⁹⁹

En fine, la consommation totale de kérosène en 2050 varie entre 312 Mt selon l'AIE dans son scénario NZE, 494 Mt selon l'ATAG et 544 Millions de tonnes selon l'IATA¹⁰⁰, soit une fourchette comprise entre 14 et 24 EJ. Une fois la contribution des compensations carbone prise en compte par ces différents scénarios, l'atteinte de l'objectif net-zéro implique l'usage de SAF à hauteur de 247 M, 445 Mt et 509 Mt respectivement (soit 10,5 EJ, 19 EJ et 22 EJ), ce qui montre à quel point les niveaux de trafic influencent directement les efforts à faire en termes de décarbonation.

L'ensemble des projections considérant une part significative d'e-SAF en 2050, les volumes de bioSAF à mobiliser à cet horizon sont compris dans une fourchette de 116 Mt (AIE-NZE) à 191 Mt (ATAG-S2) et 305 Mt (IATA), soit entre 5 et 13 EJ.

B. Maritime



Aujourd'hui, le transport maritime assure l'essentiel du transport mondial de matières premières et de marchandises.¹⁰¹ Moins de 10 % du transport maritime concerne des passagers, tandis qu'environ 30 % de la masse transportée est constituée de produits pétroliers.¹⁰² Les navires de pêche ne sont pas comptabilisés ici ; ils seront inclus dans l'estimation des secteurs agricoles et de la pêche.

Actuellement, la consommation énergétique du secteur maritime est d'environ 250 Mtep, soit 11 EJ.¹⁰³ La majorité des navires fonctionne au MGO (Marine Gas Oil), un carburant fossile chimiquement proche du diesel. Une fraction croissante de la flotte fonctionne au GNL (Gaz

⁹⁵ [ICAO](#)

⁹⁶ Voir [Airbus Global Market Forecast](#) et [Boeing Commercial Market Outlook](#)

⁹⁷ Voir [Aviation Benefits - Waypoint 2050](#)

⁹⁸ [IEA - World Energy Outlook](#)

⁹⁹ [IEA - World Energy Outlook](#)

¹⁰⁰ Voir [IATA](#)

¹⁰¹ 70% d'après [Carbone 4](#)

¹⁰² [UNCTAD/RMT/2023 \(Overview\)](#)

¹⁰³ [IEA - World Energy Outlook](#) + DNV (2024) Maritime Forecast to 2050

Naturel Liquéfié), bien que cela représente encore une faible part : seulement 600 navires sur 100 000, soit 0,6 % de la flotte mondiale.¹⁰⁴

Transition énergétique du secteur maritime

Le secteur maritime cherche à réduire ses émissions en améliorant l'efficacité énergétique des navires, en limitant leur vitesse, et en favorisant la connexion électrique à quai pour éviter l'usage de carburants fossiles lors des escales. Des technologies complémentaires, comme l'assistance vérique, pourraient permettre jusqu'à 20 % d'économie de carburant,¹⁰⁵ mais ces gains restent insuffisants face à la croissance attendue du trafic, qui devrait au moins doubler d'ici 2050.¹⁰⁶ Une part majeure de la décarbonation repose donc sur la substitution progressive des carburants utilisés par des alternatives plus durables.

L'option la plus rapide en termes de déploiement à court terme repose sur l'utilisation de bio-MGO, un carburant proche du biodiesel, compatible avec les moteurs actuels et ne nécessitant aucune modification de la flotte. La production de bio-MGO nécessite de la biomasse huileuse, la même matière première que pour le biodiesel routier et la filière HEFA pour l'aviation.

En seconde option, le secteur envisage le recours au **bio-méthane** et au **bio-méthanol**, produits à partir de biomasse variée (cultures lignocellulosiques, déchets agricoles, etc.). Le méthane (GNL) est déjà utilisé dans certains moteurs, ce qui n'est pas encore le cas du méthanol, dont les technologies d'usage restent en développement. Aujourd'hui, de nombreux projets visent à synthétiser le méthanol à partir de CO₂ capté dans l'atmosphère et d'hydrogène, donnant ainsi naissance à ce que l'on appelle l'**e-méthanol**. Il est probable que cette voie devienne l'option privilégiée par le maritime pour les prochaines décennies, venant concurrencer économiquement la filière MtJ, qui permet de produire du SAF à partir de méthanol mais nécessite une étape de raffinage supplémentaire.

Enfin, **l'ammoniac** et **l'hydrogène** sont souvent évoqués comme alternatives, mais leur adoption nécessite encore des développements importants. L'ammoniac soulève de nombreux défis techniques, notamment en matière de sécurité (toxicité, corrosion), de conception de navires adaptés et de traitement des émissions de NOx (polluants) et de N₂O (puissant gaz à effet de serre). Quant à l'hydrogène, il est encore rarement produit par des procédés bas-carbone. Son utilisation comme carburant reste limitée par sa faible densité énergétique volumique, qui exige des réservoirs plus volumineux, par des contraintes de stockage cryogénique, et par des risques accrus de fuites et d'explosions. Ces deux dernières options représentent moins de 2% des navires commandés en 2024.¹⁰⁷ Elles sont encore au stade de prototype (TRL entre 5 et 7¹⁰⁸) et ne devraient pas achever leur phase de R&D avant 2030. Étant donné un rythme de renouvellement de flotte comparable à celui du secteur aérien, soit tous les 20 à 30 ans, et des délais de construction avoisinant deux ans, il semble peu réaliste d'envisager une part significative de navires équipés de ces nouveaux types de moteurs d'ici 2050.

Il existe donc plusieurs options de substitution énergétique, mais toutes ces solutions ne pourront probablement pas être poursuivies simultanément, car elles nécessitent des

¹⁰⁴ [Gaz-mobilité - Maritime : le GNL représente plus de 2 % de la flotte mondiale](#)

¹⁰⁵ [GICAN - Feuille de route décarbonation du secteur maritime](#)

¹⁰⁶ Combinaison des projections 2019 qui annonçaient un triplement d'ici 2050 ici : [Global freight demand to triple by 2050](#) et d'un rapport plus récent (2023) qui annonçait un doublement ici : [ITF Transport Outlook 2023: Summary](#)

¹⁰⁷ [ifpenergiesnouvelles](#)

¹⁰⁸ [Fincantieri et Alfa Laval to supply first systems for ammonia-fueled ships by end 2025](#)

infrastructures spécifiques. Les choix technologiques définitifs n'ayant pas encore été arrêtés, cette incertitude constitue un frein majeur aux investissements.

Perspectives à l'horizon 2050

Les gains d'efficacité attendus dans le transport maritime ne suffiront pas à compenser la forte croissance prévue du trafic d'ici 2050.¹⁰⁹ Même en tenant compte des efforts de substitution énergétique, la demande énergétique du secteur devrait continuer à croître au cours des 25 prochaines années, pour atteindre environ 14 EJ.¹¹⁰

Selon les scénarios établis par Det Norske Veritas (DNV), spécialiste de l'évaluation et de la gestion des risques pour divers secteurs industriels dont le maritime, les sources d'énergie alternatives seront mobilisées à des degrés divers. Deux ressources apparaissent systématiquement comme limitantes : l'électricité décarbonée (pour les carburants de synthèse, e-fuels) et la biomasse durable (pour les biocarburants comme le bio-MGO, le bio-LNG ou le bio-méthanol).

Dans l'ensemble des scénarios présentés dans le *Maritime Forecast to 2050* du DNV, les carburants liquides (hors GNL et méthanol), qu'ils soient fossiles, d'origine biologique ou de synthèse, resteront majoritaires, couvrant au moins les trois quarts de la demande énergétique du secteur maritime. Les technologies de rupture avancées n'étant pas encore testées et validées, on peut raisonnablement estimer que la demande annuelle en carburant liquide du secteur maritime pourrait se situer entre 6 et 11 EJ avec entre 3 et 6 EJ en 2050 de biocarburants. Pour le trajet jusqu'à 2050, tous les scénarios intègrent une étape intermédiaire autour de 2040 avec une consommation de biomasse équivalente à environ 50 Mtep (soit 2 EJ).

C. Poids lourds

Le transport routier, en particulier le transport de fret, constitue un pilier essentiel de la logistique mondiale. Il représente environ 22 % des tonnes-kilomètres à l'échelle mondiale (une tonne de marchandise transportée sur une distance d'un kilomètre)¹¹¹, et il est responsable d'environ 66 % des émissions de CO₂ liées au transport de marchandises, contre presque 25 % pour le transport maritime. Les poids lourds utilisent majoritairement du diesel en raison de ses avantages en termes d'autonomie, de puissance et de flexibilité d'utilisation. En 2023, la consommation énergétique du transport routier de marchandises est estimée à 28 EJ¹¹², soit près de trois fois celle du transport maritime. Les biocarburants représentaient 1,7 EJ de cette consommation, soit environ 6%.



Transition énergétique du secteur des transports terrestres lourds

La transition du secteur repose sur plusieurs leviers technologiques :

- **L'électrification** est particulièrement adaptée aux segments à itinéraires courts et fixes, tels que les bus urbains et les camions de distribution. Cependant, des limitations en termes d'autonomie, de temps de recharge et de poids des batteries freinent encore son déploiement sur les longues distances. Cette option prend de

¹⁰⁹ DNV (2024) *Maritime Forecast to 2050*

¹¹⁰ IEA - *World Energy Outlook* et DNV (2024) *Maritime Forecast to 2050*

¹¹¹ Carbone 4

¹¹² IEA - *World Energy Outlook*

l'envergure en Chine, où 10 % des nouveaux véhicules lourds sont électriques, contre un peu plus de 2,3 % en Europe¹¹³. Mais pour que cette option soit climatiquement intéressante, il faut que le mix énergétique régional soit relativement bas en carbone, ce qui n'est pas encore toujours le cas dans un monde où 61 % de l'électricité est encore produite à partir de sources fossiles.¹¹⁴

- **Les biocarburants** compatibles avec les moteurs thermiques existants représentent une solution applicable à court terme, notamment via les mandats d'incorporation obligatoires dans de nombreux pays. En 2023 cependant, ces carburants représentaient moins de 5 % du mix énergétique mondial des transports routiers lourds et légers.¹¹⁵
- **Le gaz**, qu'il provienne de sources fossiles ou de la méthanisation de la biomasse, constitue également une option énergétique plausible pour le transport routier de marchandises. À ce jour, il ne représente que 2,8 % du mix énergétique mondial de ce secteur.¹¹⁶
- **L'hydrogène** sous forme de pile à combustible pour des camions à longue distance, permet de conserver autonomie et flexibilité mais reste, et restera a priori, très minoritaire car relativement cher et dépendant du développement d'une filière d'hydrogène vert qui peine à se structurer à grande échelle.

Dans certaines régions, les politiques poussent fortement à la transition vers des énergies à faible intensité carbone. La commission européenne a imposé des objectifs de réduction des émissions de CO₂ pour les camions neufs : -45 % à partir de 2030, -65 % à partir de 2035 et -90% à partir de 2040, par rapport aux niveaux de 2019.¹¹⁷ En Californie, certaines flottes devront être totalement électrifiées, ce qui laisse à penser que, dans certaines régions, l'électrification jouera un rôle central, tandis que d'autres seront plus intéressées par l'utilisation de biocarburants.¹¹⁸

Perspectives à l'horizon 2050

La consommation énergétique du transport routier lourd restera probablement élevée, en raison de la croissance du fret mondial et des limitations technologiques des alternatives pour transporter des marchandises. Certaines régions devraient connaître une augmentation particulièrement marquée des volumes de fret d'ici 2050, comme le prévoient l'OCDE et l'ITF en 2015, avec notamment une hausse de +700 % anticipée en Afrique et +400% en Asie, un fret principalement assuré par camion en raison du manque d'alternatives. Ces prévisions ont été revues à la baisse dans le cadre de l'alignement sur les objectifs climatiques. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, la consommation énergétique du transport lourd en 2050 se situera entre 23 EJ (scénario NZE) et 40 EJ (scénario STEPS).

Dans les feuilles de route, la distinction principale se fait entre les véhicules thermiques (appelés ICE pour Internal Combustion Engine) et les véhicules électriques ou à hydrogène (appelés ZEV pour Zero Emission Vehicles). L'origine des carburants dans la catégorie ICE est rarement mentionnée, bien qu'il soit souvent souligné que tous les carburants liquides ne se valent pas en termes de critères environnementaux ; il convient également de rappeler que

¹¹³ [Zero-Emission Commercial Vehicles: The Time Is Now](#) et [Chine : Les camions électriques représentent désormais 10% des ventes de poids lourds en 2024](#)

¹¹⁴ [Ember energy](#)

¹¹⁵ [IFPEN : Tableau de bord des biocarburants](#)

¹¹⁶ [IFPEN : Tableau de bord des biocarburants](#)

¹¹⁷ [Commission Européenne](#)

¹¹⁸ [Zero-Emission Commercial Vehicles: The Time Is Now](#)

l'électrification du transport routier n'est pas nécessairement bénéfique du point de vue climatique. Cela dépend fortement de l'intensité carbone du mix électrique - donc de sa composition - et de la charge supplémentaire induite sur le réseau électrique dans la région étudiée.

Même s'il est probable que la part des véhicules à moteur thermique (ICE) diminue, elle pourrait néanmoins rester importante en 2050, en raison de la lenteur du renouvellement du parc de poids lourds, chaque véhicule restant entre 10 et 15 ans en service, ce qui limite la vitesse de déploiement des nouvelles technologies. Dans le scénario Momentum de l'*International Council on Clean Transportation* (ICCT), la part des véhicules à zéro émission (ZEV) atteint 37 % à cet horizon.¹¹⁹ Le reste du parc sera donc composé de véhicules à moteur thermique (ICE), alimentés par des carburants d'origine fossile, biologique ou synthétique. Cette estimation contraste avec certaines prévisions moins réalistes, comme celle du WEF, qui envisage un mix énergétique du routier composé à 90 % de véhicules électriques et à hydrogène.¹²⁰

En 2050, la consommation annuelle de carburant pourrait ainsi être estimée entre 19 et 33 EJ, soit une réduction d'environ 25 % de la demande grâce à l'électrification partielle du parc.¹²¹ On suppose qu'un quart de cette consommation proviendra de biocarburants,¹²² un objectif ambitieux comparé aux 5,6 % actuellement observés dans le secteur routier. Cela correspondrait à une demande de biocarburants comprise entre 5 et 8 EJ en 2050.

Toutes ces transformations ne se feront pas de manière uniforme : l'électrification progressera rapidement dans les pays développés tandis que l'hydrogène pourrait nécessiter une ou deux décennies supplémentaires pour atteindre une échelle significative.

D. Véhicules légers

Le transport léger présente des similitudes avec le secteur des poids lourds, à la différence près que les trajets sont généralement plus courts, souvent quotidiens donc plus nombreux, et que les charges transportées sont naturellement plus légères. En 2023, cette catégorie a consommé 47 EJ d'énergie primaire,¹²³ soit près du double de la consommation énergétique des transports lourds. La consommation actuelle de biocarburants, toutes catégories confondues (légers et lourds), repose essentiellement sur des biocarburants de première génération et représentait moins de 5% en 2022.¹²⁴



Transition énergétique du secteur des transports terrestres légers

Le parc automobile mondial gagne légèrement en efficacité énergétique, malgré une augmentation annuelle d'environ 0,8 % de la masse moyenne des véhicules vendus depuis 2010. Le principal levier technique mis en avant pour réduire les émissions est la substitution énergétique, avec le remplacement progressif des véhicules thermiques par des véhicules électriques (ICE et ZEV), comme cela a été expliqué pour les poids lourds, mais avec une transition ici plus rapide. Cette électrification du parc paraît particulièrement pertinente dans

¹¹⁹ https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/01/ID-260-%E2%80%93-Vision-2050-update_report_final.pdf

¹²⁰ http://reports.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Industry_Tracker_2024_Trucking.pdf

¹²¹ Avec une différence de rendement énergétique de 1 pour 3 entre l'électrique et le thermique, on calcule le nombre d'unités d'énergie à répartir entre ICE et ZEV à partir de la fourchette de 23 à 40 EJ.

¹²² [Biofuels to make up 6% of road transport by 2030: IEA](#) et [Biofuels for transport in 2050](#)

¹²³ [IEA - World Energy Outlook](#)

¹²⁴ [IFPEN : Tableau de bord des biocarburants](#)

les régions où le mix électrique est relativement peu carboné. Elle s'accompagne de réglementations de plus en plus strictes, notamment l'interdiction de la vente de véhicules thermiques à partir de 2035 dans certaines zones, avec l'objectif de remplacer la majorité du parc d'ici 2050, compte tenu du rythme de renouvellement moyen estimé à 15 ans.

Cependant, le levier le plus efficace en termes d'impact environnemental reste le report modal. Celui-ci favorise l'usage de modes de transport partagés (covoiturage, transports en commun) ou à faible empreinte carbone, comme les véhicules à propulsion humaine ou légère (vélos, trottinettes, marche à pied, etc.). Cette tendance émergente nécessite toutefois le développement d'infrastructures adaptées pour être pleinement viable.

Perspective à l'horizon 2050

D'après l'Agence Internationale de l'Energie, la demande en énergie du secteur des transports terrestres légers est difficile à anticiper, avec une large fourchette allant de 18 EJ dans le scénario NZE à 43 EJ dans le scénario STEPS. Selon l'ICCT, 69 % des véhicules légers seront des ZEV (véhicules zéro émission), soit une part deux fois plus importante que celle des poids lourds.¹²⁵ En considérant qu'un véhicule électrique consomme environ trois fois moins d'énergie qu'un véhicule thermique pour parcourir la même distance, la demande en carburants pour les véhicules légers resterait comprise entre 10 et 25 EJ. Ainsi, l'électrification d'une partie des véhicules légers permettrait une économie d'environ 45 % de l'énergie nécessaire sous forme de carburants. En supposant que les biocarburants représentent 25 % du mix énergétique thermique, ils contribueraient pour 2,5 à 6 EJ.¹²⁶

E. Agriculture et pêche

L'enjeu de la décarbonation des secteurs de l'agriculture et de la pêche est lié à leurs importants besoins en puissance, soit environ 10 EJ d'énergie finale¹²⁷ consommés en 2022. Dans nos estimations, nous partons du principe que les besoins énergétiques en 2050 resteront proches de 10 EJ. Sur ce total, environ 8 EJ devront encore être couverts par des carburants liquides. En effet, bien que des alternatives aux moteurs fonctionnant aux carburants liquides, comme les tracteurs et bateaux électriques ou alimentés au gaz, soient apparues depuis moins d'une décennie, elles restent aujourd'hui principalement limitées aux équipements de faible puissance. Par ailleurs, le renouvellement du parc de machines agricoles, dont la durée de vie dépasse fréquemment 15 ans, ainsi que la diffusion de nouvelles pratiques, sont freinés par une forte inertie, due notamment à l'hétérogénéité des systèmes agricoles à travers le monde. Ces éléments laissent penser qu'une généralisation des technologies sans carburant liquide à l'échelle mondiale d'ici 2050 restera difficile. Dans l'idéal, la demande résultante en carburant serait entièrement couverte par des biocarburants, en partant du principe que ce secteur, chargé de la production de biomasse, devrait être triplement prioritaire dans son usage :



- D'abord, parce qu'il s'agit d'un secteur essentiel, puisqu'il nourrit la planète.
- Ensuite, parce que c'est ce secteur qui devra adapter ses pratiques pour produire la biomasse nécessaire aux autres secteurs.

¹²⁵ [Vision 2050](#)

¹²⁶ Même logique que pour les poids lourds

¹²⁷ [IEA Statistics](#)

- Enfin, d'un point de vue logistique, il est préférable d'utiliser directement la biomasse sur les exploitations. À l'inverse, acheminer de l'électricité vers des fermes isolées est logistiquement complexe.

F. Synthèse de l'évolution de la demande mondiale en carburants

Secteurs	Énergie finale annuelle (2020 - 2025)	Demande annuelle de biocarburants (2020-2025)	Croissance de l'usage d'ici 2050	Gains maximaux d'efficacité & substitutions énergétiques	Énergie finale annuelle en 2050 (NZE - STEPS)	Demande en carburants en 2050
Aérien	13 EJ	<1 EJ	+3% par an	-1,5% par an	14-24 EJ	14-24 EJ
Maritime	11 EJ	<1 EJ	+3% par an	-2% par an	8-14 EJ	6-11 EJ
Routier PL ¹²⁸	28 EJ	1,5 EJ ¹²⁹	+3% par an	-2% par an	23-40 EJ	19-33 EJ
Routier VL	47 EJ	2,5 EJ	+2% par an	-5% par an	18-43 EJ	10-24 EJ
Agriculture et pêche	10 EJ	<1 EJ	0%	-0,5% par an	10 EJ	8 EJ

Tableau 2.2 : Synthèse de l'évolution de la demande mondiale en carburants

¹²⁸ PL pour Poids Lourds – VL pour Véhicules Légers

¹²⁹ [IEA](#)

V. Comparaison des volumes potentiels de biocarburants

A. Hypothèses

- Nous considérons les données de la section “Ressource” (section 2 de cette partie) pour les estimations de matières premières en énergie primaire. Ces dernières sont ensuite converties en énergie finale à l'aide des rendements énergétiques utilisés pour la conversion (énergie primaire → énergie finale), tels que présentés en partie 1. Les consommations retenues sont celles indiquées dans les deux sections précédentes, à partir des données de l'IEA WEO 2024, selon les prévisions à l'horizon 2050 du scénario STEPS.
- Nous considérons qu'en 2050, il restera au moins 25 EJ de bioénergie solide d'origine forestière qui serviront à des usages domestiques traditionnels, notamment dans les régions isolées. La valeur de 25 EJ est en réalité très conservatrice : elle correspond à la consommation de biomasse forestière en 1860, à une époque où la population mondiale n'atteignait pas 1,25 milliard d'habitants.¹³⁰ Aujourd'hui, plus du double (2,6 milliards) de personnes dépendent encore de la biomasse pour la cuisson de leurs aliments, soulignant la persistance des besoins de cette ressource dans de nombreux contextes.¹³¹ Le chiffre de 25 EJ est par ailleurs utilisé dans le rapport de l'ETC.
- Dans cette estimation, les effluents d'élevage, les déchets municipaux solides ainsi que les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) ne sont pas considérés comme valorisés sous forme de biocarburants liquides, car ils sont plus adaptés à la filière de méthanisation, tant du point de vue du rendement énergétique que de la capacité à assurer un retour au sol sous forme de digestat.
- Toute autre biomasse énergie disponible est exclusivement dédiée à la production de biocarburants liquides, excluant donc totalement la production directe ou indirecte de chaleur ou d'électricité. Bien qu'irréaliste (actuellement les biocarburants liquides ne représentent que 10 % des usages mondiaux de la biomasse énergie), cette hypothèse permet d'analyser théoriquement un scénario reposant de manière excessive sur l'utilisation de la biomasse énergétique comme carburant pour les transports.

¹³⁰ Consommation mondiale d'énergie 1800-2000 : les résultats

¹³¹ Cooking fuels: population with primary reliance on polluting fuels and technologies for cooking (in millions)

B. Résultats

Mise en perspective des potentiels de bioénergies et des besoins des principaux secteurs concernés (en EJ/an)

Ces estimations ne tiennent pas compte des effets du changement climatique sur les cultures végétales et privilégient de manière excessive la production de biocarburants dans l'arbitrage des ressources en biomasse énergie

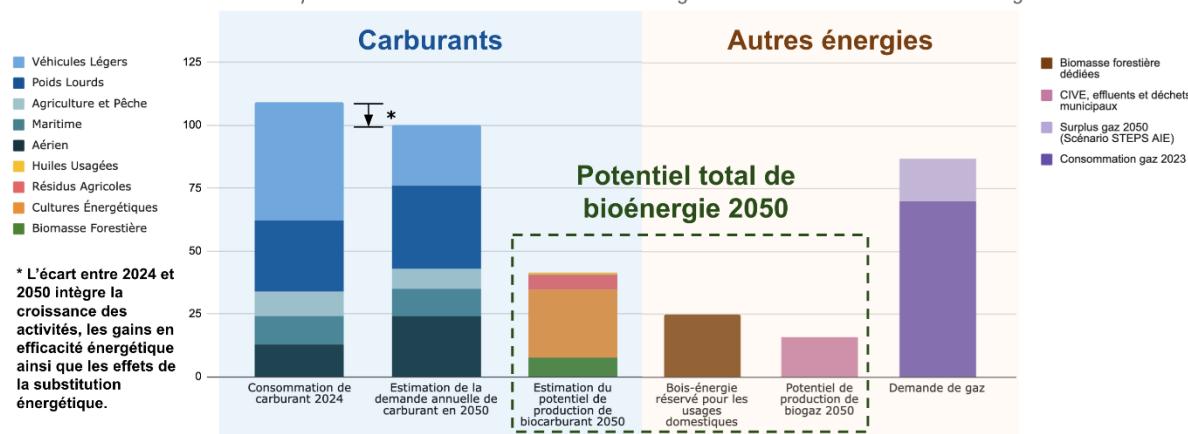


Figure 2.3 : Comparaison de la demande en carburant (secteurs aérien, maritime, routier, agricole) et des quantités d'énergie valorisables à partir de la biomasse à l'échelle mondiale

Avec ces hypothèses optimistes, le potentiel maximal en biocarburants liquides pourrait atteindre entre 40 et 45 EJ/an en 2050, dont un maximum de 4 EJ proviendrait de la transformation d'huiles, seule technologie aujourd'hui développée à l'échelle industrielle pour la fabrication de SAF. Environ un tiers de ce potentiel, entre 12 et 16 EJ, proviendrait de matières premières avancées résiduelles, telles que définies dans l'annexe IX de la directive RED¹³². Les biomasses non retenues (cultures intermédiaires, effluents, déchets municipaux) pourraient, quant à elles, générer environ 16 EJ de biogaz, soit l'équivalent de 15 % de la production mondiale actuelle de gaz naturel.

C. Analyse et points de vigilance sur les biocarburants

Le potentiel identifié de production de biocarburants liquides, estimé entre 40 et 45 EJ/an, couvre moins de 40 % des besoins énergétiques projetés pour les secteurs jugés critiques : aviation, transport maritime, transport routier et agriculture. Ce potentiel est nettement supérieur aux 11 EJ prévus dans le scénario « Net Zero Emissions » (NZE) de l'AIE à l'horizon 2050, en raison d'une focalisation volontaire sur les biocarburants dans notre analyse, laissant de côté les autres usages de la biomasse énergie.

Bien que la demande en carburants liquides soit légèrement inférieure en 2050 par rapport à 2025, la demande énergétique des secteurs continue d'augmenter, comme c'est le cas dans le scénario STEPS de l'AIE. Cela implique que, même en tirant pleinement parti du potentiel en biocarburants estimé ici, des quantités importantes d'électricité devront être mobilisées, en complément, ainsi que des efforts majeurs en matière de substitution technologique.

¹³² Les matières résiduelles prises en compte sont la biomasse forestière (largement considérée comme compatible avec la certification RED), les résidus agricoles et les huiles usagées. Un ajout arbitraire de 1 % de cultures énergétiques est effectué pour tenir compte des surfaces dégradées.

Il est également important de souligner que les estimations de demande en carburants présentées ici ne reposent sur aucun scénario de sobriété d'usage. Sans réduction significative des usages, il ne sera tout simplement pas possible de disposer de suffisamment de biomasse pour remplacer les carburants fossiles à l'échelle nécessaire.

Un autre angle d'analyse consiste à évaluer l'effort électrique requis pour compenser l'écart entre le potentiel de production de biocarburants, estimé à 42 EJ par an, et la demande mondiale en carburants liquides, avoisinant les 100 EJ par an. Pour combler ce déficit de 58 EJ par des carburants de synthèse, il faudrait mobiliser plus de 16 000 TWh d'électricité, ce qui représente près de la moitié de la production électrique mondiale actuelle.¹³³

À elle seule, la demande du secteur aérien en 2050 représenterait au minimum l'équivalent de l'ensemble des biocarburants pouvant être produits à partir de biomasse résiduelle, environ 14 EJ. Or, d'autres secteurs souhaitent également se décarboner en recourant à cette ressource, dont l'empreinte environnementale est bien plus faible que celle de la biomasse cultivée. Dans ce contexte, la seule biomasse résiduelle ne pourra pas suffire à remplacer le kérósène fossile utilisé dans l'aviation.

Ainsi, une répartition sélective et stratégique des ressources des biocarburants devra s'accompagner du développement d'autres options de décarbonation, comme l'électrification et la production de carburants de synthèse, ainsi que de mesure de modération de la demande, dans les secteurs qui le permettent. Dans ce travail et dans la plupart des autres analyses, les hypothèses concernant les gisements de biomasse apparaissent optimistes et négligent les contraintes réelles de récupération, de logistique et d'industrialisation. Or, la valorisation de la biomasse repose sur des enjeux très locaux. Adopter une perspective globale, en considérant la biomasse comme une ressource homogène pouvant simplement être répartie et allouée partiellement à l'aviation, pose problème. Une telle approche pourrait entraîner un détournement de biomasse provenant de régions où l'utilisation de l'avion est faible voire inexistante, au détriment d'usages locaux pertinents. À l'inverse, certaines régions, comme les territoires insulaires, dépendent fortement des biocarburants pour l'aviation ou le transport maritime tout en disposant elles-mêmes de ressources biomasse très limitées. Ainsi, nous encourageons une répartition juste et adaptée au contexte des ressources, tout en réduisant au maximum les importations, car la localisation exacte des émissions de dioxyde de carbone a peu d'importance face à la portée mondiale de leurs effets climatiques.

Ce constat est souvent mis en regard avec l'intérêt géopolitique associé à la production locale de biocarburants : produire des carburants à partir de biomasse locale renforcerait l'autonomie stratégique. Cependant, en adoptant une vision à l'échelle européenne, les limites de cette stratégie deviennent évidentes : les ressources en biomasse sont désormais restreintes, en raison de forêts exploitées depuis des siècles et de terres agricoles déjà intensément utilisées. Par conséquent, une politique extensive de biocarburants en Europe entraînerait nécessairement une dépendance accrue aux importations issues de régions tropicales riches en biomasse, reproduisant ainsi certains déséquilibres de souveraineté que l'on cherchait initialement à éviter, et diminuant la capacité de contrôle sur les critères de durabilité des produits.

¹³³ Calculé à partir d'un besoin en électricité/carburant de 275 TWh d'électricité pour 1 EJ de carburant de synthèse.

Conclusion

Les différents gisements de biomasse sont trop limités en volume pour permettre une décarbonation complète de toutes les mobilités.

Tout d'abord, les végétaux jouent un rôle central dans le système climatique et constituent le principal potentiel en volume et en « maturité » d'émissions négatives, indispensable pour tendre vers la neutralité carbone. La demande de matières issues de la biomasse est très élevée, et l'usage énergétique se situe en dernière position dans la pyramide des priorités, comme le montre notre classification des concurrences pour la biomasse en trois niveaux :

- Compétition pour les surfaces agricoles, avec une priorité pour l'alimentation humaine et la reforestation.
- Compétition pour l'utilisation de la biomasse non alimentaire, avec une priorité aux usages qui conservent le carbone sous forme solide (bâtiment, textile, chimie).
- Compétition entre filières énergétiques pour la chaleur, l'électricité ou la mobilité.

Il existe cinq grandes catégories de gisements, toutes limitées en volume, susceptibles d'alimenter les aéronefs une fois transformées en hydrocarbures (bois, cultures dédiées, CIVE, résidus agricoles, huiles usagées). Pour chacune de ces catégories, nous avons comparé des estimations afin d'évaluer les potentiels à l'horizon 2050. Cependant, les projections actuelles de production de biomasse ignorent souvent les impacts du changement climatique, rendant l'avenir incertain et probablement moins favorable que prévu.

De plus, pour atteindre les volumes projetés dans les études, chaque gisement identifié nécessite l'activation de leviers spécifiques, tels que la libération ou la création de surfaces cultivables (cultures dédiées), la réorientation des usages énergétiques actuels de la biomasse (en particulier le bois-énergie), ainsi que l'optimisation logistique pour la collecte (huiles usagées, résidus agricoles et CIVE). Ces leviers impliquent à la fois des évolutions sectorielles et culturelles. Par exemple, la réduction de la consommation de viande dans nos régimes alimentaires permettrait de libérer des terres aujourd'hui destinées à l'élevage ou à l'alimentation animale, et de les consacrer à des cultures lignocellulosiques dédiées à l'énergie. De même, réduire le recours à la combustion directe de bois pour le chauffage ou la cuisson contribuerait à rediriger cette ressource vers d'autres usages.

Cependant, même après la mise en œuvre de ces leviers, rien ne garantit que l'utilisation de ces ressources de biomasse entraîne une réduction significative des émissions de CO₂. En effet, certaines ressources (huiles usagées, résidus agricoles et une partie de la biomasse forestière) sont peu émissives, en partie parce qu'elles proviennent de résidus, mais elles représentent moins de la moitié du potentiel total. À l'inverse, d'autres ressources nécessitent une production spécifique et dédiée et sont plus émettrices de CO₂ (notamment les cultures énergétiques).

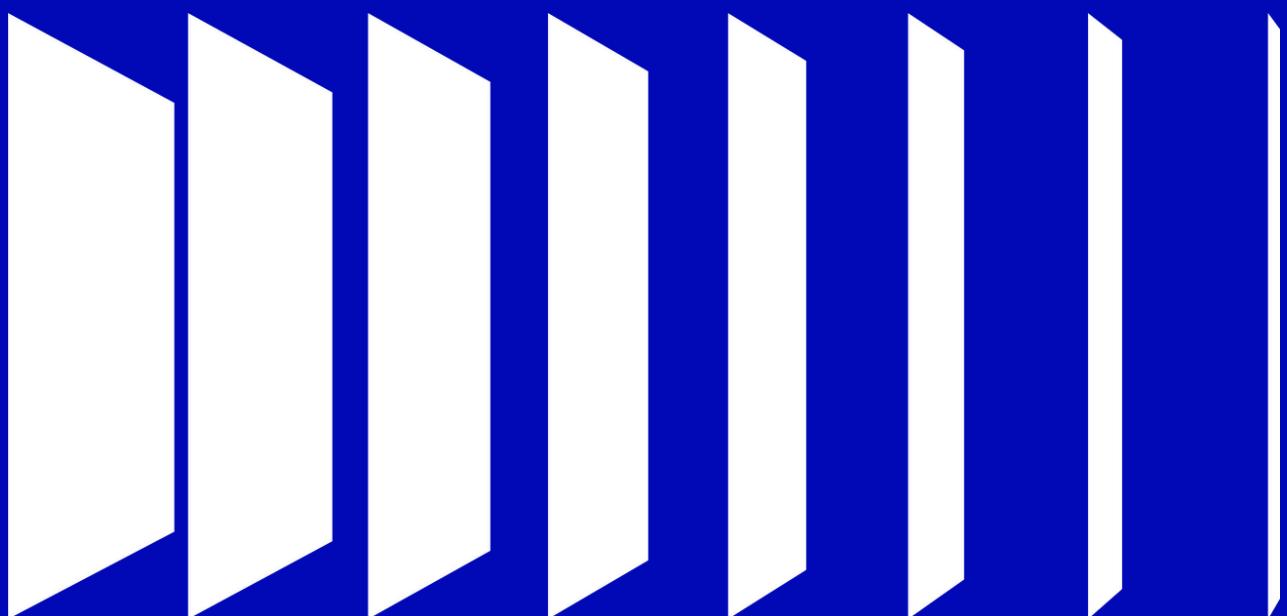
Il est également important de considérer d'autres critères de durabilité, notamment la préservation de la biodiversité, la consommation d'eau, l'usage de pesticides, le changement d'usage des sols, etc., dont la vérification rigoureuse nécessite la mise en place de systèmes de contrôle dédiés.

Partie 3 -

Quelle contribution des

e-SAF pour sortir du

kérosène fossile ?



I. Des limites différentes de celles des biocarburants

A. Gisements de CO₂

Le carbone qui compose les e-SAF est issu du captage de CO₂, soit en sortie d'usine, soit directement dans l'atmosphère, où sa faible concentration le rend plus coûteux à exploiter. Cependant, le gisement des émissions industrielles fossiles va se raréfier avec la décarbonation de ces secteurs, tandis que les sources de carbone biogénique resteront limitées par la disponibilité de biomasse durable.

Ainsi, **la capture directe dans l'air ambiant doit nécessairement être développée**, pour accéder à une ressource en carbone sans réelle limite physique. Le surcoût énergétique qu'elle engendre, de l'ordre de 10 à 30%, pourra être compensé par les gains en efficacité des procédés de production : la demande en électricité par tonne de carburant produite devrait ainsi rester stable d'ici à 2050.

B. Usage d'hydrogène

L'autre composant principal des e-SAF est la molécule d'hydrogène, dont la production doit être sobre en carbone pour que le carburant final bénéficie d'un faible indice d'émission. Utiliser de l'hydrogène dit bleu, généré par reformage de méthane et capture/stockage du carbone, ne ferait pas de sens, puisqu'il s'agit ensuite de le recombiner avec des molécules de CO₂ capté, et que par ailleurs, ce procédé ne permettrait pas de s'affranchir de la dépendance au gaz. Ainsi, l'hydrogène constitutif des e-SAF doit-il provenir de l'électrolyse de l'eau, qui va induire l'essentiel de la consommation d'électricité bas-carbone dont l'aviation aura besoin pour diminuer son empreinte climatique.

De tels volumes d'électricité, dont les ordres de grandeur sont fournis au §2.a., peuvent entrer en compétition avec les besoins de nombreux autres secteurs, dont l'électrification directe ou indirecte est au cœur de la transition énergétique globale. En revanche, ce n'est sans doute pas le cas de l'hydrogène bas-carbone en tant que tel, dont la production sera souvent réalisée sur les sites même de sa consommation, comme c'est le cas pour le raffinage ou l'industrie. En outre, les capacités de fabrication d'électrolyseurs dépassant aujourd'hui les besoins d'installation des projets annoncés, les investissements dans la filière e-SAF devraient au contraire participer à consolider leur marché et à baisser globalement les coûts.

C. Ressources métalliques

Consommateurs de métaux et notamment de cuivre, les panneaux photovoltaïques actuels en requièrent environ 5 kg par kW de puissance installée.¹³⁴ En considérant que ce taux ne progresse pas, et un facteur de charge de l'ordre de 15%, il faudrait **50 Mt Cu d'ici à 2050 pour générer annuellement 15 000 TWhe** d'électricité solaire, nécessaires pour la production d'un mix de 100% e-SAF photovoltaïque, dans une perspective de très forte croissance du trafic mondial.

¹³⁴ [Copper in photovoltaic power systems](#) et [Copper.org](#)

Selon les scénarios STEPS et APS de l'AIE,¹³⁵ un doublement de la demande annuelle de cuivre, actuellement d'environ 25 Mt Cu au niveau mondial, est projeté à l'horizon 2050, pour un total cumulé de près de 1 milliard de tonnes sur 25 ans. Ainsi, la demande de cuivre pour produire des e-SAF ne représenterait, dans un scénario extrême, qu'un peu plus d'une année de consommation mondiale, soit **5% du total sur la période 2025-2050**.

Dans les scénarios ambitieux, quoique moins extrêmes, développés dans la partie 5, le besoin total en cuivre pour la production de 4000 TWh électriques dédiés aux e-SAF s'élèverait à environ 13 Mt, soit **1,3% des quantités totales de cuivre** produites sur la période 2025-2050.

Même si des tensions pourraient apparaître dans un contexte de forte augmentation de la consommation de métaux, en particulier de cuivre compte-tenu de ses réserves géologiques,¹³⁶ **l'enjeu de sa consommation pour des besoins liés au secteur aérien ne semble donc pas très critique**. De plus, il existe des **possibilités de substitution**, notamment par **l'aluminium**, moyennant un relatif surcoût énergétique.

Plus précisément, si l'on considère que 15 à 20 MWh d'électricité sont requis pour produire une tonne d'aluminium,¹³⁷ et qu'il faut une masse 2 fois moindre d'aluminium que de cuivre,¹³⁸ la production des panneaux solaires nécessaires à la génération de 4000 à 15000 TWh d'électricité pour l'aérien requerrait de 97-130 TWh à 375-500 TWh pour 6,5 à 25 Mt d'aluminium. Avec une durée de vie de 25 ans, la **surconsommation d'énergie** pour l'obtention de l'aluminium substituant le cuivre dans les panneaux solaires, correspondrait alors à **0,1 à 0,13% de l'électricité qu'ils produisent au long de leur vie**.

Du point de vue des gisements en ressources métalliques, il n'y a donc pas de limites physiques au développement des e-SAF, dans les ordres de grandeur considérés ici.

D. Consommation d'eau

La production d'une tonne de e-SAF nécessite **entre 6 et 7 tonnes d'eau**, principalement pour générer l'hydrogène qui le compose. Ainsi, un projet visant à produire 70 à 80 kt d'e-SAF par an, soit 1% de la consommation française actuelle de kérosène, impliquerait une consommation annuelle de l'ordre de 500 000 t d'eau.

Si de tels prélèvements peuvent poser des problèmes dans des régions déjà sujettes à des tensions hydriques,¹³⁹ il est néanmoins possible d'envisager des productions d'e-SAF dans les zones situées à proximité d'un littoral, dans la mesure où la désalinisation n'engendre qu'un surcoût énergétique marginal par rapport au reste du procédé.¹⁴⁰

D'une manière générale, **la production de e-SAF consomme entre 100 et 500 fois moins d'eau que celle de volumes équivalents de bioSAF**, et ne devrait pas engendrer de risques de tensions majeurs sur cette ressource.

¹³⁵ IEA

¹³⁶ Réserves géologiques mondiales de cuivre estimées en 2020 par l'United States Geological Survey (USGS) à **870 Mt**, soit du même ordre de grandeur que le besoin total de consommation à horizon 2050 dans les scénarios STEPS et APS de l'AIE

¹³⁷ 19,4 MWh (70 GJ) : [weforum](#) / 14,8 MWh : [Reuters](#) / 17 MWh : [pmc](#)

¹³⁸ « Weight about as half as copper » [Shapes](#)

¹³⁹ Voir la projection en 2040 des zones mondiales de stress hydrique sur le [World Resources Institute](#)

¹⁴⁰ L'électrolyse de l'eau requiert 50-55 kWh d'électricité et 9 kg d'eau par kg d'H2. La désalinisation demande jusqu'à 0,0046 kWh par litre d'eau, soit 0,0414 kWh par kg d'hydrogène [We Forum](#)

E. Surface au sol

De même, **la production de e-SAF nécessite une emprise au sol 40 à 100 moindre que celle des bioSAF**. Pour alimenter la totalité de l'aviation française en e-SAF, soit entre 7 et 8 Mt de kérósène par an, il faudrait donc 700 à 800 km² de panneaux solaires, c'est-à-dire un carré de 25 à 30 km de côté. Il s'agit en soi d'une surface conséquente, mais à relativiser au regard de la superficie française, de plus de 600 000 km²

Culture / Système	Procédé	Rendement surfacique (t SAF/km ² /an)
Colza	HEFA	180
Betterave sucrière	AtJ	245
Miscanthus	BtL	180
Peuplier (5 ans)	BtL	120
Pin maritime (20 ans)	BtL	90
Miscanthus + panneaux solaires	PBtL	400
Panneaux solaires	PtL	10 000

Tableau 3.1 : Rendements surfaciques en production de SAF selon les cultures, procédés et systèmes énergétiques

II. Consommation d'électricité

A. Ordres de grandeur à l'échelle française, européenne et mondiale

Les ordres de grandeur de la consommation d'électricité à consacrer en 2050 à la production de e-SAF varient en fonction des échelles et des scénarios considérés :

- France :
 - Pour 100% e-SAF (7-8 Mt) : **200-250 TWhe**
 - Pour un mix de bioSAF, e-SAF et pétrole : **~100 TWhe** en ordre de grandeur dans les feuilles de route publiées
- Union Européenne :
 - Pour 100% e-SAF (50-60 Mt) : **1500-1800 TWhe**
 - Pour un mix de bioSAF, e-SAF et pétrole : **600-700 TWhe** en ordre de grandeur dans les feuilles de route publiées
- Monde :
 - 100% e-SAF (500 Mt) : **~15 000 TWhe**
 - Pour un mix de bioSAF, e-SAF et pétrole : **6000-8000 TWhe** en ordre de grandeur dans les feuilles de route publiées soit environ **10% de l'électricité bas-carbone produite à cet horizon de temps dans le scénario NZE** de l'Agence Internationale de l'Énergie.

Si la totalité du kérosène consommé actuellement devait être remplacée par du e-SAF, il faudrait y consacrer environ **10 000 TWhe**.

B. Limites “dures” (physiques) vs. “molles” (sociétales)

D'une manière générale, on peut considérer que le déploiement et l'exploitation à grande échelle de capacités d'électricité renouvelable de type solaire ou éolien **ne se heurte pas à des limites physiques “dures”, contrairement aux bio-énergies comme les bioSAF**, qui nécessitent des surfaces et des volumes d'eau supérieurs de plusieurs ordres de grandeur aux filières e-SAF (voir plus haut), et **contribuent à aggraver le dépassement de limites planétaires critiques**.

Même si l'usage de certains métaux pose un risque de dépendance géo-stratégique indéniable,¹⁴¹ il existe des pistes de solutions, comme le développement de filières locales, le recyclage ou la substitution. Dans ce sens, les limites auxquelles est confronté le développement massif de la filière e-SAF peuvent être qualifiées de **“molles”**, car elles sont essentiellement de **nature industrielle, financière et politique**, c'est-à-dire de nature humaine, et ne mettent pas en péril la viabilité de notre planète.

¹⁴¹ [IEA \(2025\), Global Critical Minerals Outlook 2025.](#)

III. Points de vigilance e-SAF

A. Origine du CO₂

L'origine du carbone constitutif des carburants est un facteur primordial de leur durabilité. De ce point de vue, la filière e-SAF présente l'intérêt de pouvoir sélectionner la source de captage de carbone, qui peut être fossile, biogénique ou atmosphérique. Comme indiqué au §1. a, les émissions concentrées en CO₂ fossile ou biogénique sont moins coûteuses à exploiter que le carbone atmosphérique, mais il est important de rappeler les points de vigilance suivants :

- **Les gisements de carbone d'origine biogénique sont limités** par la disponibilité de la biomasse durable, et peuvent contribuer à augmenter la pression sur cette ressource sensible ;
- **L'usage de carbone fossile ne peut pas être considéré comme climatiquement neutre**, car il est, in fine, émis dans l'atmosphère, même si la ressource a été utilisée deux fois : une première fois par l'usine émettrice, et une seconde fois pour la production de e-SAF. C'est pourquoi le facteur d'émission calculé pour les scénarios développés dans la Partie 5, considère un partage à 50/50 des émissions négatives liées à la capture du CO₂ fossile entre le secteur aérien (qui l'utilise) et l'industrie concernée (qui l'a émis et capté).

En tout état de cause, la filière des e-SAF dont le carbone est d'origine fossile n'est pas compatible d'un objectif global de net-zéro émissions, qui implique que l'industrie capte et stocke ses propres émissions de CO₂ fossile, afin éviter d'émettre du carbone supplémentaire dans l'atmosphère, et que les e-SAF soient produits uniquement à partir de carbone biogénique ou atmosphérique, pour clore le cycle du carbone.

B. Intensité carbone de l'électricité

L'intensité carbone de l'électricité utilisée pour la production de e-SAF est l'autre élément déterminant du facteur d'émission final. La carte d'identité des e-SAF proposée en Partie 1 rappelle que le seuil de **128 gCO₂/kWh électrique** ne doit pas être franchi pour rester en-deçà de l'intensité carbone du kérósène fossile, soit 89 gCO₂/MJ (environ 3,84 tCO₂ par tonne de fuel). Pour obtenir un bilan largement inférieur, il faut même recourir exclusivement à des sources d'électricité bas carbone, comme l'éolien, l'hydraulique ou le nucléaire, dont l'empreinte se situe autour de 10 gCO₂/kWh. À noter que l'usage de photovoltaïque produit en Chine, avec une intensité estimée à 43 gCO₂/kWh,¹⁴² élève déjà le bilan des e-SAF à 30,8 gCO₂/MJ, soit une réduction d'environ 65 % par rapport au kérósène fossile.¹⁴³

C. Risque de dérive sur l'électricité consommée

Comme vu précédemment, la production d'e-SAF nécessite des sources d'électricité bas carbone, pour obtenir des performances climatiques bien meilleures que celles du kérósène

¹⁴² La base carbone de l'[ADEME](#) donne une valeur de 43,9 gCO₂éq par kWh d'électricité produit par un panneau fabriqué en Chine

¹⁴³ Depuis 2020, les directives européennes imposent que les carburants renouvelables présentent une réduction d'au moins 65% des émissions de GES par rapport au carburants fossiles. Cf 5. Régulations et certifications

fossile. Or, certaines de ces capacités sont par nature intermittentes, ce qui pose un défi technologique pour le fonctionnement de certains types d'électrolyseurs. Par ailleurs, pour mieux amortir leurs coûts d'investissement, ils sont souvent exploités avec un facteur de charge élevé, dans un régime relativement stable.

Cette contrainte peut conduire à **connecter les installations au réseau électrique**, afin de compenser l'intermittence des sources locales. Une telle configuration ne garantit plus l'usage exclusif d'une électricité décarbonée : selon le moment de la journée ou de l'année, l'électricité issue du réseau peut être partiellement produite par des centrales exploitant des combustibles fossiles, activées en tant que capacités marginales pour répondre à la demande. À titre d'exemple, un e-SAF produit à partir d'électricité issue de gaz naturel, avec une intensité carbone d'environ **500 gCO₂/kWh**, présenterait un bilan carbone jusqu'à **quatre fois supérieur à celui du kérosène fossile**.

Il est alors essentiel que les électrolyseurs soient capables de s'effacer lors des pics de consommation, pour **éviter de recourir à une électricité fortement émettrice** qui est, par ailleurs, plus chère que l'électricité renouvelable. Ainsi, ils contribueront également à une meilleure intégration des sources intermittentes, en apportant une flexibilité de la demande pour stabiliser le réseau.

D. Émissions évitées par kWh d'électricité bas-carbone

Une même quantité d'électricité permet de réduire un volume supérieur d'émissions si elle est utilisée pour alimenter des véhicules en électrification directe (par exemple des véhicules routiers à batterie), **plutôt que dans le cas où elle est mobilisée pour un carburant complexe** (tel que les e-SAF, ou e-fuels plus largement), qui engendre d'importantes pertes énergétiques via son procédé de production et sa combustion.

À titre d'exemple, la consommation de **1 MWh d'électricité** permet de parcourir :

- 5 000 km en voiture électrique¹⁴⁴
- 1 400 km par passager en avion volant avec du e-SAF¹⁴⁵
- 750 km en voiture avec e-fuels¹⁴⁶

L'enjeu est bien que l'aérien ne consomme pas d'électricité au détriment d'autres secteurs qui en feraient un usage plus efficace, mais qu'elle participe à déployer des capacités additionnelles, afin d'accélérer sa propre décarbonation en parallèle de celle des autres.¹⁴⁷

¹⁴⁴ 5000 km à 20 kWh/100km

¹⁴⁵ 1400 km à 3,0 L/pax/100km, avec 0,8 kg/L et 30 kWh/kg

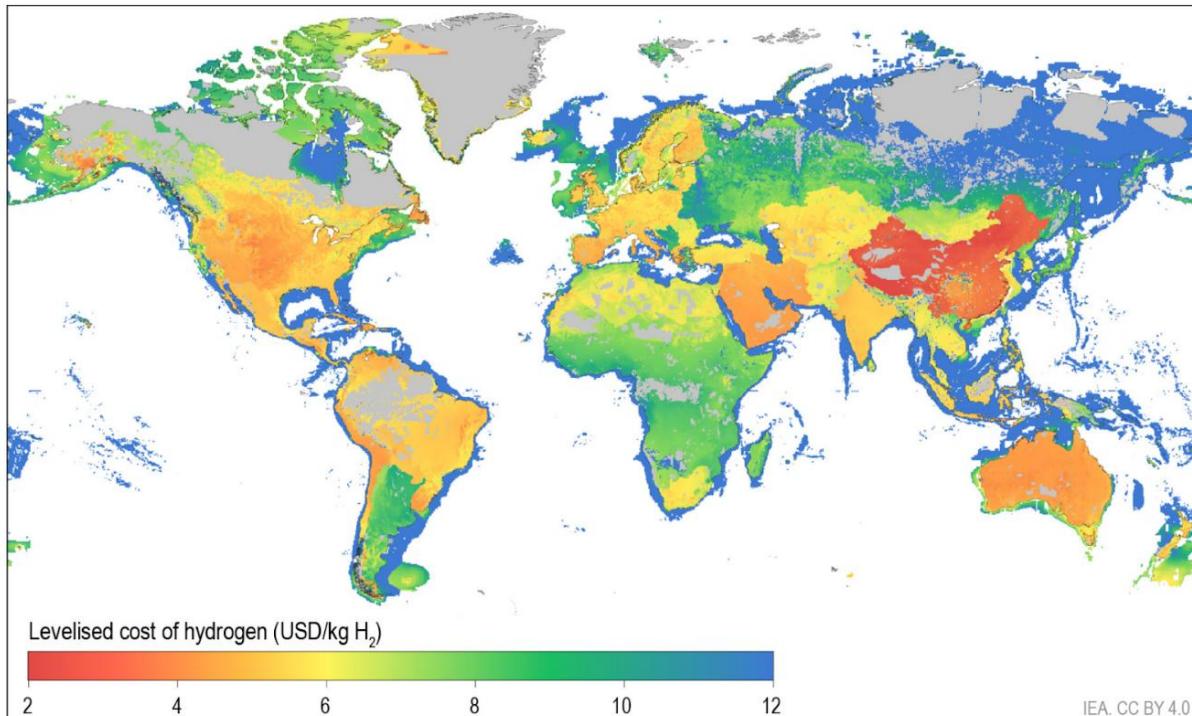
¹⁴⁶ 750 km à 6,0 L/100km, avec 0,75 kg/L et 30 kWh/kg

¹⁴⁷ Cf. scénario sur les e-bioSAF et e-SAF additionnels

IV. Des importations sous contraintes

A. Facteurs géographiques propices à la production d'e-SAF

Ce sont essentiellement leurs **caractéristiques météorologiques et topographiques, lorsqu'elles sont favorables à l'éolien et au solaire**, qui rendent certaines géographies et certains pays du monde plus attractifs que d'autres pour la production de e-SAF, dont l'essentiel du coût de production est lié à la consommation d'électricité, notamment pour la production de l'hydrogène.



Notes: Assuming optimal oversizing of the renewable plant in each location to minimise the levelised cost of hydrogen production. Solar PV CAPEX is USD 400-1 250/kW, Onshore Wind CAPEX is USD 950-2 300/kW, Offshore Wind CAPEX is USD 1 720-4 850/kW. The cost of capital is assumed to be between 6-20% across different locations in this map. Water cost is not included. More details on the cost of producing low-emissions hydrogen using different technologies and in different regions can be found in the new [Hydrogen Tracker](#) available on the IEA website.

Source: Analysis by Jülich Systems Analysis at Forschungszentrum Jülich using the [ETHOS model suite](#).

Figure 3.1 : Coûts estimés pour la production d'hydrogène à base d'électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité solaire et éolienne, dans les différentes régions du monde, à l'horizon 2030 (source : Global Hydrogen Review 2025, Agence Internationale de l'Énergie, Scénario Stated Policies)

B. Des capacités incertaines

Ainsi que nous l'avons vu au §2. a, et comme ce sera illustré ci-après,¹⁴⁸ l'ordre de grandeur du besoin en électricité pour l'ensemble des carburants de l'aviation civile commerciale est susceptible d'avoisiner, en 2050, un volume de 8000 TWh, dont près de 6000 TWh pour les e-SAF (le reste étant consacré à la production des e-bioSAF), et ce malgré des hypothèses technologiques – d'efficacité des avions et des procédés de production des carburants – très optimistes.

¹⁴⁸ Voir le scénario "e-bioSAF et e-SAF additionnels" dans la partie Monde

Dans le cas où une part substantielle des volumes de e-SAF proviennent d'importations (par exemple entre 50 et 70%), et même si l'on considère que les e-bioSAF sont produits localement, il faudrait que quelques pays puissent consacrer de l'ordre de **3000 à 4000 TWh d'électricité à la production d'e-SAF dédiés à l'exportation**.

Entre 2020 et 2025, parmi les régions bénéficiant des plus hauts taux d'ensoleillement et de vent au monde, plusieurs pays tels que le **Chili**,¹⁴⁹ le **Maroc**,¹⁵⁰ l'**Arabie Saoudite**¹⁵¹ ou encore l'**Australie**,¹⁵² ont annoncé se positionner comme potentiels futurs exportateurs d'e-fuels.

Or, ces différents pays produisent actuellement un volume total d'électricité quatre fois inférieur au besoin estimé,¹⁵³ et d'origine encore **principalement fossile**. Il faudrait donc qu'ils déplient d'importantes capacités renouvelables, en premier lieu pour remplacer leur consommation fossile, puis pour alimenter leur propre développement. Puis, il s'agirait d'y ajouter l'équivalent de 4 fois leur production totale actuelle - ceci uniquement pour l'exportation d'e-SAF - sans parler du marché des e-fuels du maritime, des quelques projets pour l'automobile ou des opportunités concernant la production d'acier par hydrogène, l'alimentation des centres de données et de serveurs, ou d'autres applications encore.

Considérant l'ensemble des nouveaux besoins à satisfaire en termes d'électricité décarbonée, et bien qu'il soit envisageable que d'autres pays à fort potentiel en renouvelables rejoignent cette liste, la **piste des importations depuis des pays actuellement peu électrifiés devrait être envisagée avec beaucoup de précautions**.

C. Grands pays exportateurs

De plus grands pays, tels que la **Chine**, les **Etats-Unis**, l'**Inde** ou le **Brésil**, pourraient aussi se positionner comme de futurs producteurs d'e-SAF. Cependant, leurs propres besoins en termes de consommation domestique, notamment tirés par la taille de leurs populations respectives, posent la question de la **disponibilité - ou non - d'un surplus de production**.

En particulier, la **Chine** et les **Etats-Unis** détiennent actuellement les plus importantes capacités électriques, qui permettent de produire près de **10 000 et 5 000 TWh** respectivement,¹⁵⁴ et sont les deux puissances économiques ayant annoncé le **plus grand nombre de projets e-SAF, après l'Europe**.¹⁵⁵

¹⁴⁹ [Projet en cours de HIF Global, d'exporter des e-fuels depuis le Chili, à destination de l'Europe](#)

¹⁵⁰ [Annonce de HIF Global, lors d'une conférence sur les e-carburants](#)

¹⁵¹ [Memorandum of Understanding \(MoU\) en Arabie Saoudite pour la production et exportation d'e-SAF](#)

¹⁵² [Article dans le Camberra Times, sur le potentiel de l'Australie pour devenir une "superpuissance" de l'exportation d'e-fuels](#)

¹⁵³ Chili (2023) : 90 TWh, dont 27% de fossiles / Maroc (2023) : 44 TWh de production électrique, dont 75% de fossiles / Arabie Saoudite (2023) : 445 TWh, dont plus de 99% de fossiles / Australie (2023) : 275 TWh, dont 66 % de fossiles /Source : [Energy Statistics Data Browser de l'Agence Internationale de l'Energie](#)

¹⁵⁴ [Energy Statistics Data Browser de l'Agence Internationale de l'Energie](#)

¹⁵⁵ 53 projets e-SAF en Europe, 36 en Asie (principalement en Chine) et 17 en Amérique du Nord (principalement aux Etats-Unis puis au Canada) - [Mapping par Sia Partners et le Bureau français des e-fuels, slide 16 \(Avril 2025\)](#)

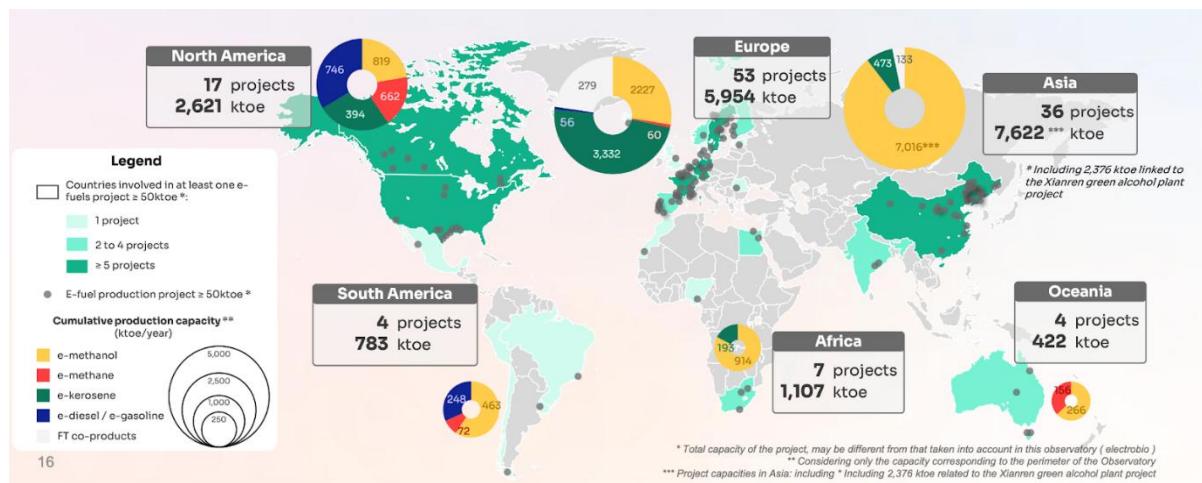


Figure 3.2 : Cartographie des projets e-fuels, basée sur les annonces >= 50ktoe (source : Bureau Français des e-fuels)

Cependant, dans ces deux pays aussi, la production électrique demeure encore principalement fossile, à hauteur d'environ 60%. Pour y substituer de l'électricité bas-carbone, il faudrait d'abord déployer des capacités à hauteur de 9 000 TWh de production annuelle, auxquelles devront s'ajouter, dans les prochaines décennies, celles qui permettront à ces deux pays de se positionner sur de nouveaux marchés fortement consommateurs d'électricité, tels que l'intelligence artificielle, et qui leur serviront à décarboner leurs grandes industries et leurs larges parcs routiers.

Ainsi, en Chine et aux Etats-Unis comme dans d'autres grands pays, la capacité de produire des e-fuels, à la fois pour l'aérien, le maritime et le militaire, sera probablement contrainte par les autres besoins en électricité décarbonée, et il n'est pas garanti que ces grandes puissances économiques puissent se positionner comme exportateurs de quantités notables de e-SAF vers des régions comme l'Europe ou le reste du monde.

D. Souveraineté et balance commerciale

À l'échelle de l'Union Européenne, les importations de produits énergétiques représentent de l'ordre de 400 milliards d'euros chaque année,¹⁵⁶ contre moins de 2 milliards d'euros d'exportations de biocarburants liquides.¹⁵⁷

Les SAF produits en Europe ont le potentiel de réduire ce déficit, puisqu'ils représentent une alternative à la consommation de pétrole. Cependant, ils peuvent aussi aggraver la balance commerciale, dans le cas où des quantités non-négligeables soient importées. En effet, leur coût étant bien plus élevé que celui du kérosène d'origine fossile, une même quantité de carburant importée conduirait à une facture d'autant plus importante.

¹⁵⁶ EU imports on energy products, 2021-2025 - Eurostat

¹⁵⁷ EU imports €14.6 billion in green energy products

E. Sous-mandats ReFuel EU et enjeux du déploiement d'une filière européenne

Compte-tenu des contraintes et des limites identifiées plus haut pour l'importation en provenance des Etats-Unis, de la Chine ou de pays émergents, **l'atteinte des sous-mandats e-SAF de la réglementation ReFuel pose un enjeu de souveraineté prégnant pour l'Union Européenne**, tant d'un point de vue géopolitique que vis-à-vis de la balance commerciale des Etats Membres.

En conséquence, **le développement de filières européennes de production de e-SAF est un objectif stratégique**, qui nécessite le respect et le renforcement du cadre réglementaire actuel, afin de garantir un niveau de stabilité et des conditions financières suffisants pour maturer les technologies et déployer des capacités e-SAF à l'échelle industrielle, tout en respectant les critères de durabilité européens.

Conclusion

La production des carburants d'aviation de type e-SAF peine à se matérialiser, essentiellement à cause de son **coût**, lié à la forte consommation énergétique qu'elle nécessite. Pourtant, **les avantages de cette filière sont indéniables**, notamment parce qu'elle permet de s'affranchir des limites dures auxquelles sont confrontées les biocarburants, qui nécessitent des surfaces utiles bien plus importantes et pèsent directement sur des limites planétaires déjà franchies.

Cela dit, il faut s'assurer que les sources d'électricité utilisées par les unités de production soient réellement décarbonées - avec une attention particulière lorsque les électrolyseurs sont connectés à des réseaux électriques - et que les besoins de l'aviation ne préemptent pas ceux de secteurs qui en feraient un usage plus efficace, enfin que la ressource en carbone soit, à terme, d'origine non-fossile. Dans ces conditions, **le facteur d'émission des e-SAF sera particulièrement attractif** pour contribuer à la diminution de l'empreinte climatique du secteur aérien.

A l'échelle globale, permettre la maturation de ces technologies et stimuler le déploiement commercial de ces procédés, tout en réduisant leur surcoût par rapport au kérosène fossile et à certains bioSAF, nécessite le **développement et/ou renforcement de cadres réglementaires nationaux clairs et ambitieux**, qui donne une visibilité suffisante pour inciter les investisseurs à s'engager.

Au niveau de la France et de l'Europe, il faudra également trouver les moyens de favoriser l'émergence de productions locales, non seulement pour compenser les futures contraintes qui ne manqueront pas de peser sur les importations de e-SAF, mais aussi pour **réduire le déficit commercial actuel** liées aux énergies fossiles, et **renforcer notre souveraineté énergétique**, qui constitue un enjeu de plus en plus stratégique.

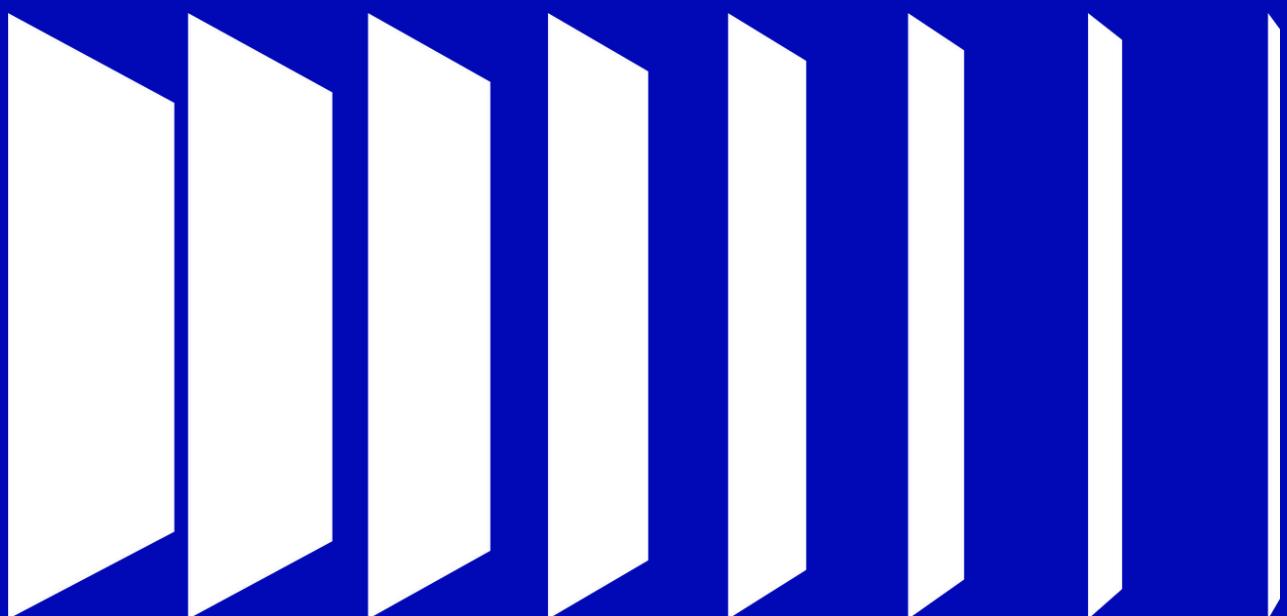
En définitive, le déploiement des e-SAF repose donc moins sur la faisabilité technologique, aujourd'hui démontrée, que sur les conditions de leur mise en œuvre à grande échelle : **disponibilité d'électricité bas-carbone, optimisation du rendement des installations, et cohérence des cadres réglementaires**.

Partie 4 -

Quels scénarios de

décarbonation de

l'aviation mondiale ?



I. Préambule

A. Différentes options de décarbonation

Pour se décarboner, le secteur de l'aviation dispose, selon les termes de l'OACI,¹⁵⁸ d'un "panier de mesures" comprenant :

- L'évolution des technologies des avions, et les gains d'efficacité qu'elles permettent
- L'amélioration des opérations en vol et au sol, y compris en termes de gestion du trafic aérien et de fonctionnement des aéroports
- Les carburants d'aviation durable, ou SAF (Sustainable Aviation Fuels)
- Les mesures dites économiques, consistant à appliquer un prix aux émissions de carbone de l'aviation pour financer des réductions dans d'autres secteurs

Chacune de ces mesures est caractérisée par des technologies, un potentiel de déploiement et des limites propres, qu'il convient de prendre en compte lorsque l'on développe des scénarios de décarbonation qui les articulent. En particulier :

- Le §4d de la Partie 2 du présent rapport rappelle que l'objectif OACI de 2% en termes de gains annuels d'efficacité énergétique des avions et de leurs opérations, ne sera probablement pas atteint d'ici 2050. Les scénarios proposés par l'industrie¹⁵⁹ tablent plutôt sur un chiffre de l'ordre de -1.5% par an de consommation de carburant par passager.kilomètre, en considérant le délai de développement des solutions technologiques, et leur temps de déploiement dans les flottes ;
- Les Parties 1 et 2 du présent rapport détaillent les principales filières de production de carburants durables pour l'aviation, le niveau de maturité de leurs procédés et leurs contraintes en termes de ressources, y compris les concurrences d'usage avec d'autres secteurs. En pratique, la plupart des scénarios de décarbonation de l'aviation supposent le développement des filières bioSAF de type HEFA, ATJ, et Bio-FT, ainsi que celui de la filière e-SAF, auxquelles on peut ajouter la voie e-bioSAF, décrite en Partie 1-2d. Les scénarios diffèrent ensuite dans leur estimation des gisements de ressources, selon le degré de prise en compte de critères explicites de durabilité et la répartition de ces ressources entre les différents secteurs

Ainsi, le développement de nos propres scénarios de décarbonation de l'aviation nous permet d'évaluer dans quelle mesure, et à quelles conditions, le déploiement des filières SAF est susceptible de compléter les mesures d'amélioration énergétique, pour permettre à l'aviation d'atteindre - ou non - ses objectifs de réduction d'émissions CO₂, et de rester compatible - ou non - de budgets carbone respectant des trajectoires climatiques globales qui limitent en 2100 la hausse de la température mondiale bien en-dessous de 2°C (conformément à l'Accord de Paris), avec des budgets carbone à 1.5°C ou 1.7°C par rapport aux valeurs préindustrielles.

¹⁵⁸ Voir par exemple un [extrait du Rapport Environnement 2019](#) de l'OACI

¹⁵⁹ Voir par exemple le rapport WayPoint 2050 de l'ATAG

B. Scénarios de référence et méthodologie

Développer des scénarios de décarbonation suppose le choix d'hypothèses variées, et l'évaluation de nombreux paramètres, pour lesquels il n'existe pas toujours de consensus - sinon, le futur serait déjà écrit... Il est toutefois important de regrouper des éléments cohérents entre eux, pour qu'ils forment des futurs plausibles et puissent aider aux prises de décision, dans un contexte de fortes incertitudes, où chaque scénario correspond ainsi à la description d'un chemin que nous pourrions suivre.

Aussi, nous avons fait le choix d'utiliser des sources reconnues par l'industrie aéronautique (CORSIA, ATAG) ainsi que les gouvernements (GIEC, AIE), afin que nos conclusions ne puissent pas être remises en cause par d'éventuels questionnements sur nos hypothèses de départ. Les chemins que nous traçons sont des créations Aéro Décarbo sur base de données issues des instances internationales de référence.

Scénarios de référence utilisés :

Pour ce qui concerne les paramètres propres au secteur de l'aviation, à savoir l'évolution du trafic et celui des consommations de kérosène (impliquant des niveaux d'efficacité technologique), nous avons choisi de nous référer aux scénarios publiés en 2021 par l'ATAG dans le document *WayPoint 2050*. En effet, ces scénarios ont été développés par et pour le secteur de l'aviation, et en constituent donc la feuille de route de référence. Notre objectif est d'en évaluer les implications, et donc la faisabilité, en matière de déploiement des carburants alternatifs durables. Plus précisément, nos calculs se basent sur le scénario ATAG S2, dans lequel :

- La croissance du trafic mondial se situe à un niveau de 3,1% par an, bien que certaines projections du secteur puissent être plus agressives¹⁶⁰
- Les hypothèses technologiques sont très (voire désormais trop) ambitieuses, avec notamment des moteurs de type Open Rotor en 2030 (alors que l'agenda industriel évoque désormais 2035¹⁶¹), et de nouvelles configurations d'avions à fuselage intégré, dites Blended Wing Body, entrant en service vers 2035-2040 (alors qu'aucun projet n'est pourtant référencé à ce jour chez Airbus ou Boeing pour attester du déploiement à grande échelle d'une telle d'innovation¹⁶²). Ces hypothèses conduisent à des gains d'efficacité annuels allant jusqu'à 1,7%/an, soit au-delà du scénario Iceman (et ses 1,61%/an) du rapport *Pouvoir Voler en 2050* d'Aéro Décarbo et du Shift Project (2021), sans toutefois atteindre le scénario Maverick (assumé en 2021 comme encore plus ambitieux que les scénarios optimistes du secteur, avec 2,14%/an)
- Dans ce contexte, la consommation totale de carburant par l'aviation commerciale, à l'échelle mondiale, passe d'un peu plus de 300 millions de tonnes en 2025 à presque 500 millions de tonnes en 2050

Pour ce qui concerne les volumes d'énergie bas carbone, nous nous référons aux scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), publiés dans les versions successives du rapport

¹⁶⁰ Voir les projections de marché de [Boeing](#) ou de [Airbus](#)

¹⁶¹ [Usine nouvelle](#)

¹⁶² L'évocation du BWB (Blended Wing Body) par Airbus, dans le cadre du programme ZEROe sur l'avion hydrogène, a été plusieurs fois rappelée comme un concept auquel l'avionneur réfléchit, mais qui ne serait pas déployée pas à court-terme, la prochaine génération demeurant sur un fuselage traditionnel - [Flight global](#)

World Energy Outlook,¹⁶³ et qui sont probablement parmi les plus connus en matière d'analyses prospectives du secteur de l'énergie. Bien que jugés trop optimistes par certaines ONG, ces scénarios sont reconnus par de nombreux acteurs gouvernementaux et industriels, et servent de référence scientifique pour la validation d'objectifs climatiques par l'organisme SBTi.¹⁶⁴ En particulier, nous utilisons le scénario Net-Zero-by-2050 de l'AIE, complètement mis à jour en 2021,¹⁶⁵ pour déterminer les quantités de SAF - jugées现实的, même si certainement ambitieuses - dont l'aviation pourrait bénéficier pour se décarboner, tout en permettant aux autres secteurs de faire de même, dans une trajectoire globale qui respecte la limite de 1.5°C de réchauffement moyen en 2100 :

- En termes de biomasse, l'AIE considère des critères de durabilité qui limitent le potentiel global à 100 EJ en 2050, avec essentiellement des déchets et résidus, mais sans donner de précisions explicites sur le respect de contraintes telles que les taux de retour de biomasse au sol ou les infrastructures de collecte. Compte tenu des besoins en bio-énergie de l'ensemble des secteurs, le volume de Bio-SAF dans ce scénario dépasse un peu les 100 millions de tonnes en 2050, soit environ ~10% du potentiel total de 100 EJ tous secteurs confondus (compte tenu du rendement de conversion en carburants liquides)
- En termes de carburants synthétiques de type e-SAF, le scénario AIE-NZE projette 130 millions de tonnes en 2050, correspondant à une consommation d'électricité de l'ordre de 4 000 TWh à l'échelle mondiale, soit environ 5% de l'électricité d'origine renouvelable et nucléaire à cet horizon de temps (le NZE montant jusqu'à 80 000 TWh d'électricité bas carbone en 2050), mais l'équivalent d'une fois et demi la production électrique totale actuelle des pays de l'Union Européenne (tous moyens de production confondus)

Le choix de deux scénarios de référence très ambitieux (ATAG S2 et AIE-NZE) renforce ainsi la validité de nos conclusions, dans la mesure où des hypothèses moins favorables, notamment en termes d'efficacité énergétique du transport aérien ou de disponibilité des SAF, conduiraient à des résultats plus contraignants pour le secteur aérien.¹⁶⁶

Méthodologie globale :

Notre scénario de base combine donc les projections de trafic aérien et d'améliorations technologiques proposées par les acteurs de l'industrie (scénario ATAG S2, nous donnant un besoin d'environ 500 Mt de carburants pour l'aviation en 2050), avec des quantités supposées现实的 - bien qu'ambitieuses - de SAF mobilisées par le scénario intersectoriel AIE-NZE, aboutissant à une capacité de presque 250 Mt de SAF en 2050.

Celles-ci restant ainsi très inférieures aux volumes considérés par le scénario ATAG-S2 (presque 450 Mt de SAF en 2050, soit un taux d'incorporation de 90%), elles ne suffisent pas à réduire les émissions de l'aviation au niveau attendu par les feuilles de route du secteur, qui tablent sur une croissance du trafic aérien bien supérieure à celle de l'aviation dans le scénario AIE-NZE.

¹⁶³ IEA - [World Energy Outlook](#)

¹⁶⁴ [Science Based targets Initiative](#)

¹⁶⁵ [IEA NZE](#)

¹⁶⁶ Voir annexe "Sensibilité des scénarios à l'ambition des hypothèses"

Sur cette base, quatre chemins sont explorés pour permettre à l'aviation de réduire ses émissions de carbone au niveau des ambitions affichées dans ses propres feuilles de route :

- L'affaiblissement des critères de durabilité, dans l'idée d'augmenter les gisements éligibles, et donc les volumes de SAF disponibles pour l'aviation. Cependant, cette dégradation des critères environnementaux s'accompagne d'une diminution du potentiel moyen de décarbonation des SAF et engendre également d'autres tensions (par exemple sur les sols, l'eau ou la biodiversité). Le sujet ici est donc celui du potentiel réel de décarbonation des différentes filières, puis des limites planétaires (au-delà du simple changement climatique)
- La priorisation de l'aviation dans l'accès aux ressources bas-carbone, au détriment des autres secteurs. En jouant ici sur l'arbitrage intersectoriel, nous nous confrontons aux sujets de Merit Order, ou d'optimisation des ressources, par exemple en tCO₂ évitée par quantité d'électricité bas-carbone allouée
- L'investissement massif dans des capacités électriques additionnelles, pour permettre la production de suffisamment d'e-SAF et e-bioSAF afin de combler l'écart entre les projections de l'AIE et les besoins estimés par l'ATAG
- La modération du trafic aérien, après optimisation des leviers technologiques (usage notamment de filières e-bioSAF), afin de faire boucler notre modélisation, en ramenant la quantité totale de carburants consommés au niveau des capacités de production. Ce scénario se subdivise ensuite en 2 variations, selon que l'on s'inscrit dans un budget 1.5°C ou 1.7°C

Ainsi, sans tout non plus dévoiler en amont de nos conclusions, cet exercice de scénarisation permet d'identifier deux grands écueils à éviter (la baisse des critères de durabilité et la préemption des ressources énergétiques) bien qu'il s'agisse de propositions sérieuses, que nous pouvons observer dans les discussions au sein du secteur aérien, puis deux pistes de solutions (investir massivement dans les capacités énergétiques bas-carbone et maîtriser le trafic) qui permettraient d'assurer un équilibre entre le niveau de trafic aérien, les volumes d'énergie à produire pour assurer sa décarbonation, et le respect de critères de durabilité permettant une réelle pérennité.

C. Facteurs d'émissions considérés

Le calcul des facteurs d'émissions relatives aux différentes filières SAF est un exercice complexe, qui dépend souvent de paramètres locaux spécifiques aux conditions de production, et dont les résultats peuvent susciter débat, notamment lorsque l'on cherche à évaluer les effets indirects de changement d'usage des sols (ILUC : Indirect Land Use Change).

Toujours dans la perspective de baser nos scénarios sur des chiffres officiels et reconnus, nous avons choisi de nous référer aux valeurs par défaut publiées par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), dans le cadre du mécanisme CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation).¹⁶⁷

Pour chacun des types de bioSAF (HEFA, AtJ et Bio-FT), nous avons classé les différentes filières mentionnées par l'OACI en deux catégories, dont nous avons calculé la moyenne en termes d'intensité carbone, ILUC compris :

¹⁶⁷ Voir le document OACI, CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels, 10/2024

- Les bioSAF dits “OK”, c'est-à-dire supposés répondre à des critères de durabilité robustes, pour lesquels nous avons retenu toutes les filières basées sur des déchets et résidus, ainsi que sur des cultures implantées sur des surfaces dégradées ou marginales, à ILUC négatif (i.e. où l'on considère que la culture de la plante améliore l'usage du sol et le stockage de carbone)
- Les bioSAF dits “NOK” (“Not OK”), plus susceptibles d'engendrer des conflits d'usage avec l'agriculture pour l'alimentation et/ou des dégradations environnementales, ayant recours à des cultures dédiées sur des surfaces arables

Il en résulte les facteurs d'émission suivants, exprimés en gCO2e/MJ :

	bioSAF HEFA OK	bioSAF HEFA NOK	bioSAF AtJ OK	bioSAF AtJ NOK	bioSAF FT OK	bioSAF FT NOK
Intensité carbone du fuel	22.7 gCO2e/MJ	60.5 gCO2e/MJ	27.3 gCO2e/MJ	55.5 gCO2e/MJ	4.2 gCO2e/MJ	15.6 gCO2e/MJ
Dont ILUC	-6.2 gCO2e/MJ	22.5 gCO2e/MJ	-7.4 gCO2e/MJ	16.2 gCO2e/MJ	-4.2 gCO2e/MJ	3.4 gCO2e/MJ

Tableau 4.1 : Facteurs d'émission

Concernant les fuels synthétiques à base d'hydrogène, ou e-SAF, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

- Une consommation de 30 kWh d'électricité pour produire 1 kg de e-SAF, selon les chiffres du référentiel ISAE Supaéro, qui diminue jusqu'à 25 kWh en 2050 (proche de l'optimum de 23 kWh/kg évalué par l'Académie des Technologies), grâce à l'amélioration de l'efficacité des électrolyseurs et à l'optimisation du procédé.¹⁶⁸ Des valeurs qui ne concernent que la consommation d'électricité allouée au e-SAF, et non celle considérée pour ses co-produits. La valeur donnée par l'Académie de Technologies est ainsi de 37 kWh/kg, avec un ratio de 1 kg d'e-SAF pour 0,67 kg de co-produits (e-diesel en l'occurrence). Nous considérons alors $37/1,67 = 22$ kWh pour le kg d'e-SAF, et les 15 kWh restants pour les 670g de co-produits (e-diesel)
- L'électricité utilisée est renouvelable ou nucléaire, d'une intensité carbone moyenne considérée à 20 gCO2e/kWhe. Ceci pour la situation de base, puis les e-SAF de catégorie “WORSE” fait l'hypothèse d'un mix électrique seulement à moitié décarboné,¹⁶⁹ illustrant la possibilité qu'une part de l'électricité ne provienne pas de capacités renouvelables ou nucléaires
- S'agissant du CO₂ utilisé en tant qu'intrant pour la production d'e-SAF, la catégorie “OK” ne fait appel qu'à du captage biogénique ou atmosphérique, alors que la catégorie “NOK” s'autorise un CO₂ d'origine fossile. Afin d'illustrer le fait que ce CO₂

¹⁶⁸ Rendement considéré à 40% pour la production d'e-SAF dans le cas de l'utilisation d'un CO₂ industriel, soit 30 kWh/kg (Référentiel Aviation et Climat, ISAE-SUPAERO, 2022, page 114) et situation optimale à 37 MWh pour produire 1 tonne d'e-SAF et 0,67 tonne d'e-diesel (La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables, Académie des Technologies, 2023, page 52)

¹⁶⁹ 50% d'électricité à 20 gCO2e/kWh (renouvelable/nucléaire) et 50% d'électricité à 600 gCO2e/kWh (fossile, en considérant un mix utilisant pour 2/3 du gaz à 400 gCO2e/kWh et pour 1/3 du charbon à 1000 gCO2e/kWh), soit un mix moyen à 310 gCO2e/kWh.

n'est pas neutre pour le climat, nous considérons que l'émission négative associée à sa capture est partagée à 50/50 entre le secteur aérien (qui l'utilise) et l'industrie concernée (qui l'a émis et capté). La consommation d'électricité de cette filière e-SAF "NOK" est donc plus faible que celle d'une filière impliquant la capture de carbone atmosphérique (cette capture étant évaluée à 6 kWh/kg e-SAF en 2025 et 5 kWh/kg e-SAF en 2050), mais ne peut équilibrer qu'à hauteur de 50% les émissions de CO₂ de la combustion avec celles de cette capture en amont

Enfin, le facteur d'émission de la filière e-bioSAF (PBtL) se base sur les ratios de consommation en termes de biomasse par rapport à des bioSAF (1 / 2.1), et en termes d'électricité par rapport à des e-SAF (1 / 2.6), déduits du rapport *Five Years to Chart a New Future for Aviation* de l'Université de Cambridge.¹⁷⁰

Le tableau suivant récapitule les hypothèses principales et les valeurs résultantes des facteurs d'émissions des fuels synthétiques :

	e-SAF OK	e-SAF NOK	e-SAF WORSE	e-bioSAF
Consommation d'électricité	30 kWh/kg 2025 25 kWh/kg 2050	24 kWh/kg 2025 20 kWh/kg 2050	30 kWh/kg 2025 25 kWh/kg 2050	11 kWh/kg 2025 9.5 kWh/kg 2050
Intensité carbone de l'électricité	20 gCO ₂ e/kWh	20 gCO ₂ e/kWh	310 gCO ₂ e/kWh (50% à 20 g CO ₂ e/kWh et 50% à 600 gCO ₂ e/kWh)	20 gCO ₂ e/kWh
Origine du CO₂	Capture atmosphérique	Capture industrielle fossile	Capture atmosphérique	Biomasse (~2 fois moins que pour Bio-SAF)
Intensité carbone du fuel	14 gCO ₂ e/MJ en 2025 12 gCO ₂ e/MJ en 2050	56 gCO ₂ e/MJ en 2025 54 gCO ₂ e/MJ en 2050	215 gCO ₂ e/MJ en 2025 180 gCO ₂ e/MJ en 2050	18 gCO ₂ e/MJ en 2025 11 gCO ₂ e/MJ en 2050

Tableau 4.2 : Hypothèses principales e-SAF

D. Budgets carbone

Pour pouvoir évaluer la contribution du secteur aérien au réchauffement climatique - hors effets non-CO₂ - il est nécessaire de comparer le budget carbone qu'il consomme, c'est à dire la somme des émissions de CO₂ qu'il génère sur une période donnée, par rapport aux budgets carbone globaux, qui correspondent aux quantités pouvant encore être émises par l'humanité, tout en restant sous une limite maximale de hausse de la température moyenne du globe en 2100, par exemple 1.5°C ou 1.7°C, en ligne avec l'Accord de Paris sur le Climat (à savoir

¹⁷⁰ Aviation impact Accelerator, voir Key fact 3

maintenir les températures “nettement en-dessous de 2°C” et donc viser pour cela 1.5°C ou 1.7°C).¹⁷¹

En effet, le CO₂ est un gaz à effet de serre à longue durée de vie, qui s’accumule dans l’atmosphère : une tonne émise aujourd’hui mettra environ 100 ans à être absorbée à environ 60% par les sols et les océans, puis il faudra encore environ 1000 ans pour que 20% additionnels soient dissous dans les océans, les dernières molécules pouvant mettre plus de 100 000 ans à disparaître.¹⁷² Dans cette mesure, bien que de nombreux scénarios se focalisent sur les niveaux d’émissions à atteindre en 2050, c’est bien leur cumul au fil des années qui détermine l’impact réel sur le climat.

Le Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat (GIEC) détermine de manière scientifique les budgets carbone anthropogéniques pour différentes trajectoires climatiques. Depuis la publication du 1er volet du 6ème rapport en 2021 (WG1 AR6), une mise à jour a été publiée par Forster et al.¹⁷³ (Tous secteurs confondus).

Décider de la manière de répartir ces budgets carbone entre les différents pays ou les différents secteurs d’activité est une question éminemment politique, qu’il convient d’aborder de manière démocratique. Néanmoins, si l’on souhaite comprendre les implications pour l’aviation de respecter un budget carbone “cible”, on peut imaginer lui allouer une fraction du budget anthropogénique global, par exemple sur la base de la part des émissions du secteur aérien en 2018, soit 2,6% des émissions globales (hors effets non-CO₂) - c’est ce que l’on appelle une allocation de type “grandfathering” - ou bien une part supérieure, en arguant qu’il s’agit d’un secteur plus difficile à décarboner que d’autres, dans le temps impari.

Ainsi, nous proposons de considérer que, dans le cadre d’un scénario très contraint respectant l’objectif 1.5°C, l’aérien ait la possibilité de consommer une part égale au double du pourcentage actuel de ses émissions, soit 5,2% du budget carbone 1.5°C global, ramenée à 3,9% dans un scénario un peu plus souple respectant 1.7°C.

Il est vrai que d’autres scénarios envisagent des volumes de budget carbone plus importants pour l’aviation, en mettant en avant le nombre plus faible d’options technologiques par rapport à d’autres secteurs. Il faut pourtant noter que la difficulté de la décarbonation de l’aérien vient davantage de ses perspectives de croissance que de la disponibilité de solutions : l’articulation des mesures d’efficacité énergétique et le déploiement de SAF permettrait en effet de diminuer ses émissions de façon significative si la croissance du trafic était plus modérée que dans les prévisions du secteur.

À titre de comparaison, les analystes tablent souvent sur une diminution de la taille du parc automobile, avec moins de voitures électriques à l’horizon 2050 qu’il y a actuellement de voitures thermiques, à l’échelle française, et peut-être une légère croissance dans le reste du monde. Si, comme l’aviation, le secteur routier envisageait une multiplication par près de 2,5 à échelle mondiale en 25 ans, l’usage de ces quelques 3 milliards de voitures en 2050 serait alors très certainement difficile à décarboner, par exemple pour des questions de matières premières (cuivre notamment). Ainsi, il pourrait aussi être légitime d’accorder au secteur

¹⁷¹ Voir l’Article 2 de l’Accord de Paris : [French Paris Agreement](#)

¹⁷² Voir le graphique du GIEC : [GIEC](#)

¹⁷³ Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence - Piers M. Forster et al.

automobile un budget carbone, ou un budget en ressources, plusieurs fois supérieur à sa part actuelle dans les émissions mondiales.

D'autres arguments, tels que l'utilité sociale des usages, pourraient être convoqués pour décider de l'allocation des budgets carbone entre les différents secteurs. Considérant que près de 90% de la population mondiale ne prend pas l'avion (sur une année type¹⁷⁴), et que l'essentiel du trafic concerne des voyages de vacances ou de visites amicales et familiales, à la différence du routier qui adresse surtout les besoins du quotidien, il pourrait être convenu que la part du budget carbone allouée à l'aérien soit moindre que celle de ses émissions actuelles.

Le choix des budgets carbone de référence pour l'aviation, synthétisé dans le tableau suivant, est donc un compromis qui tient compte du fait qu'effectivement, l'aérien dispose d'un éventail de solution techniques de décarbonation un peu plus restreint et plus coûteux que d'autres secteurs, mais que son utilité sociale ne justifie pas des proportions plus élevées.

	Objectif 1,5°C en 2100 (avec 50% de chances)	Objectif 1,7°C en 2100 (avec 67% de chances)
Budget carbone global à partir de janvier 2025 (Forster et al.)	130 Gt CO ₂	390 Gt CO ₂
Part allouée au secteur aérien	5,2% (2 fois la part des émissions actuelles)	3,9% (1 fois et demi la part des émissions actuelles)
Budget carbone aérien à partir de janvier 2025	6,76 GtCO₂	15,21 GtCO₂

Tableau 4.3 : Budgets carbone

¹⁷⁴ Sur l'année 2018, seule 11% de la population mondiale a pris l'avion, parmi lesquels 1% a émis la moitié des émissions de l'aviation commerciale de passagers, et 10% l'autre moitié - [The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change](#)

II. Scénario de base : annonces du secteur et gisements SAF estimés par l'AIE

A. Méthodologie - Scénario de base

Comme indiqué au §1.a, le scénario de base combine les quantités totales de carburants issus du scénario industriel ATAG S2, avec les quantités de bioSAF et de e-SAF mobilisées dans le scénario NZE de l'Agence Internationale de l'Energie. Tous les SAF de ce scénario sont réputés être durables. On leur applique donc les facteurs d'émissions des filières qualifiées "OK" du tableau §1.c.

Dans la mesure où ce scénario n'atteint pas la neutralité carbone en 2050, il est intéressant de le prolonger jusqu'en 2070, voire 2100, pour illustrer l'augmentation du budget carbone consommé sur cette période.

Pour cela :

- Le trafic et la consommation totale de carburants sont prolongés de manière linéaire à partir du scénario ATAG S2, avec des taux d'évolution identiques à ceux de la période 2045-50. Ainsi, le nombre de passagers.km augmente de l'ordre de 500 milliards par an, soit une croissance annuelle moyenne de 2,1% et un total de $31,6 \cdot 10^{12}$ RPK en 2070 puis $47,5 \cdot 10^{12}$ RPK en 2100. La consommation de carburants augmente de 494 Mt en 2050 jusqu'à 604 Mt en 2070 et 768 Mt en 2100, avec une efficacité qui continue de s'améliorer, de 19 g/RPK (consommation en gramme de carburant par passager.km)¹⁷⁵ en 2050, à 15,4 g/RPK en 2070 et 13 g/RPK en 2100, soit une diminution moyenne de 0,75%/an sur 50 ans
- Nous considérons que l'exploitation des gisements de biomasse durable atteint son maximum en 2050 avec 116 Mt de bioSAF, puis se stabilise après 2050, ce qui reste une hypothèse optimiste compte-tenu des impacts que le changement climatique est susceptible d'avoir sur les écosystèmes agricoles et forestiers
- En revanche, les capacités de production d'électricité n'étant pas confrontées à des limites physiques dures, leur augmentation est extrapolée de manière linéaire après 2050, sur la base de 200 TWhe/an.¹⁷⁶ Ainsi, les volumes de e-SAF passent de 131 Mt en 2050 à 292 Mt en 2070 et 532 Mt en 2100, si l'on considère que l'efficacité énergétique de leur production reste stable à 25 MWhe/t (expliqué précédemment comme étant l'optimum vers lequel nous espérons tendre)
- Sur cette base, les quantités résiduelles de kérosène fossile passent de 247 Mt en 2050 (50% du mix carburants) à 195 Mt en 2070 (32% du mix carburants) et 120 Mt en 2100 (15% du mix carburants)

¹⁷⁵ Émissions obtenues en divisant le total CO2 par le nombre de passagers.km, après avoir retranché la part du fret dans les émissions de l'aviation commerciale (part considérée constante à 17% des émissions de l'ensemble du secteur aérien contre 71% pour les émissions liées au transports de passagers de l'aviation commerciale (les 12% restants étant le militaire à 8% et l'aviation privée à 4%) - chiffres datant de l'année 2018 : [The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change](#)

¹⁷⁶ L'évolution des consommations d'électricité du secteur aérien, soit 2300 TWhe en 2045 et 3300 TWhe en 2050, est déduite des volumes de e-SAF du scénario IEA-NZE, et de l'efficacité énergétique de leur procédé de production précisée au §1.c.

Scénario de base	Niveau de trafic	Consommation moyenne	Conso. tot. carburants	Quantité bioSAF	Quantité e-SAF	Conso. élec. e-SAF
Horizon 2050	21,0 x10 ¹² RPK	19 g/RPK (1,5 L/pax/100km)	494 Mt	116 Mt	131 Mt	3300 TWh
Horizon 2070	31,6 x10 ¹² RPK	15,4 g/RPK (1,2 L/pax/100km)	604 Mt	116 Mt	292 Mt	7300 TWh
Horizon 2100	47,5 x10 ¹² RPK	13 g/RPK (1,0 L/pax/100km)	768 Mt	116 Mt	532 Mt	13300 TWh

Tableau 4.4 : Consommation de carburant Horizon 2050, 2070 et 2100

B. Résultats - Scénario de base

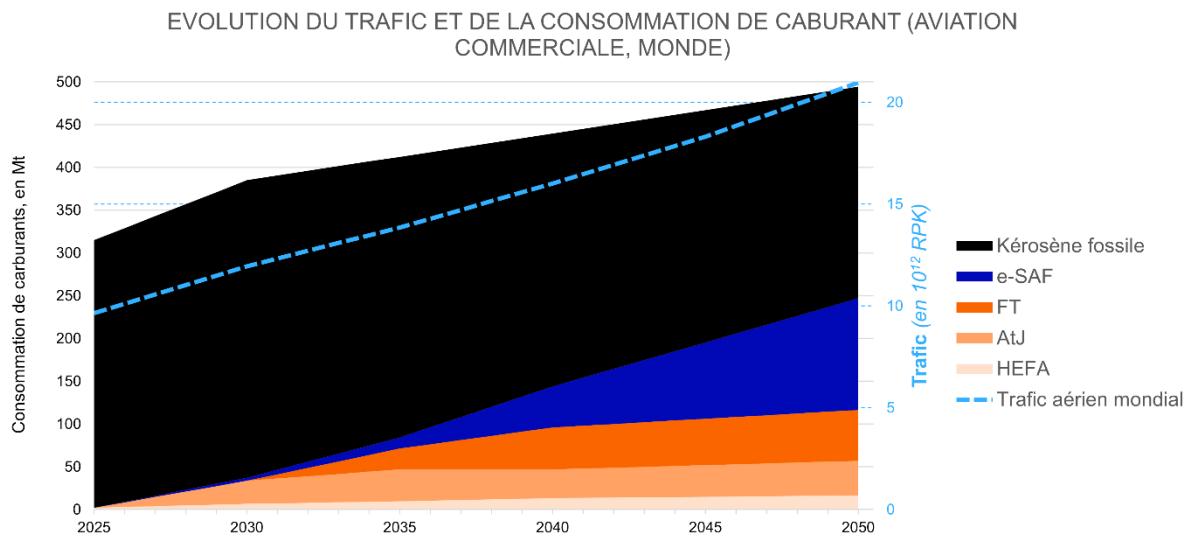


Figure 4.1 (1) : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario de base (annonces secteur aérien, en termes de trafic et de consommation totale de kérosène, estimations SAF de l'AIE)

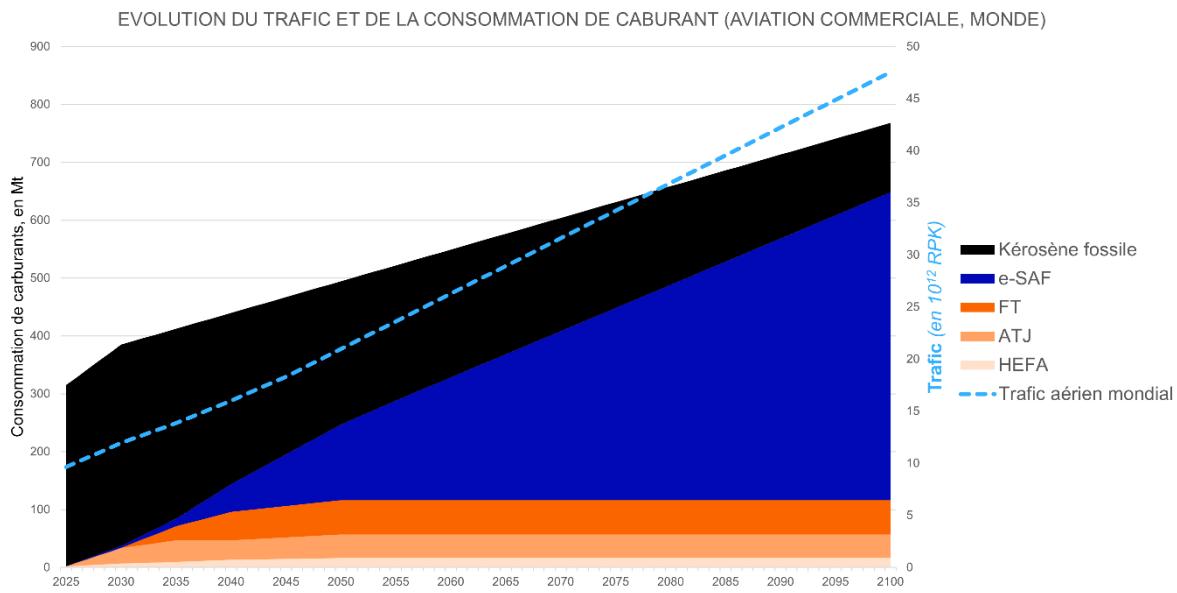


Figure 4.1 (2) : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario de base, prolongé jusqu'en 2070 puis 2100

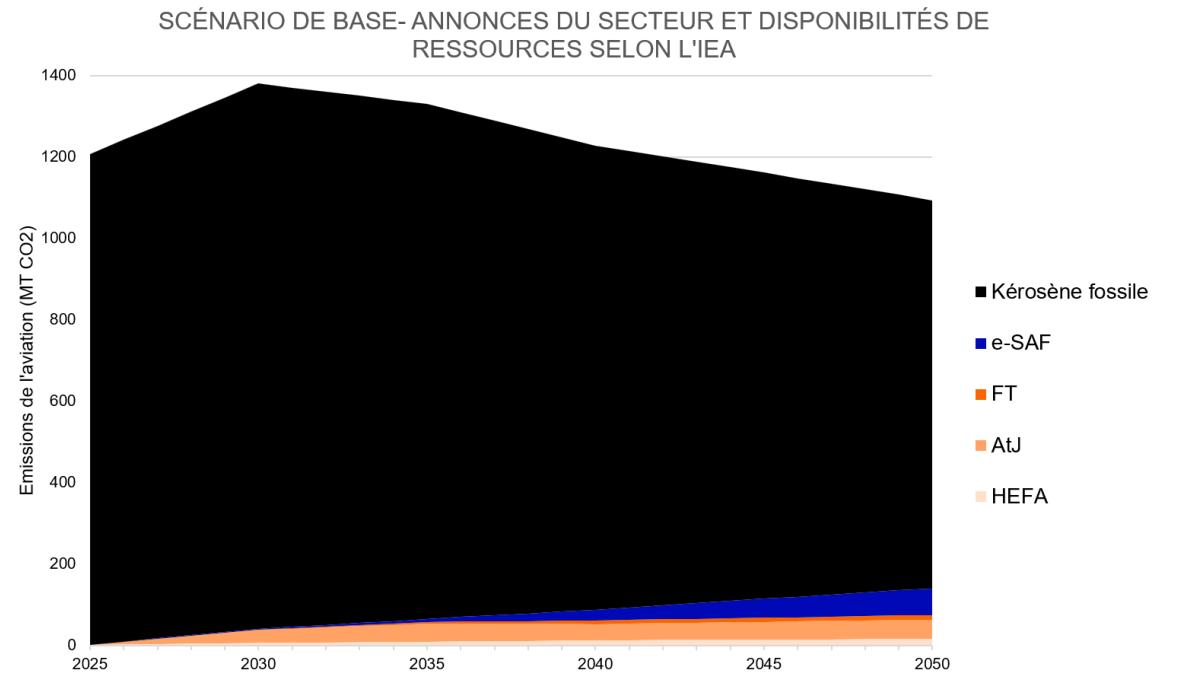


Figure 4.2 (1) : Évolution des émissions de CO₂ induites par la consommation des différents carburants - Scénario de base (annonces secteur en termes de trafic et de consommation totale de kérone, estimations SAF de l'AIE)

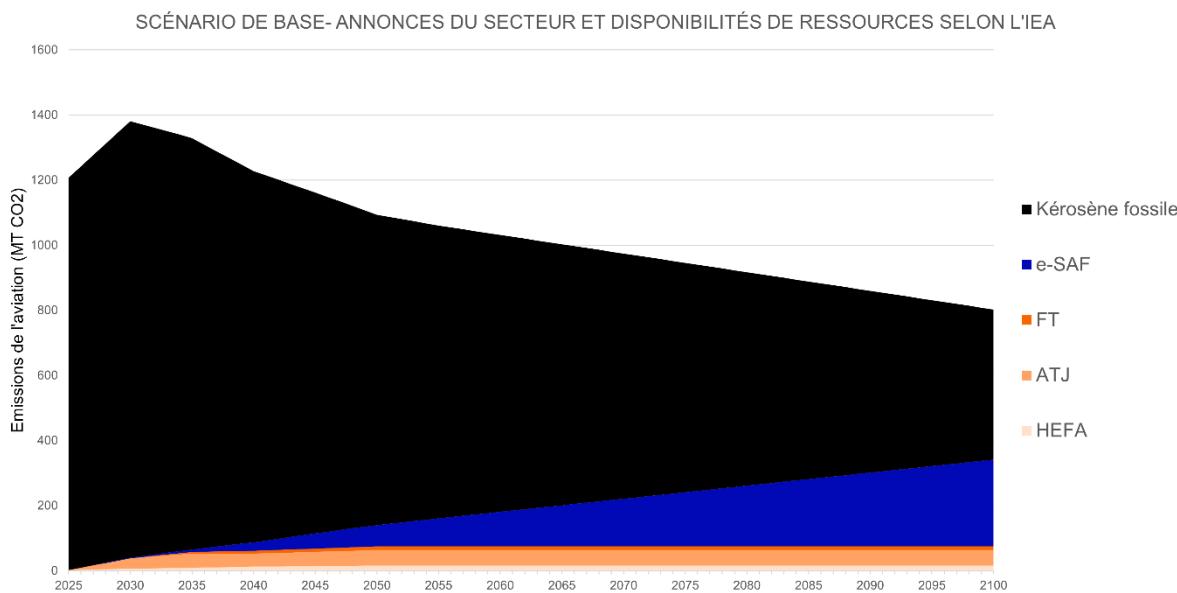


Figure 4.2 (2) : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario de base, prolongé jusqu'en 2070 puis 2100

C. Analyses - Scénario de base

L'augmentation du trafic est si forte qu'elle surcompense complètement les gains d'efficacité obtenus par l'amélioration des performances technologiques et opérationnelles. Au global, la consommation de carburants augmente de plus de 50% entre 2025 et 2050.

Malgré un développement ambitieux des filières de bioSAF et e-SAF, celles-ci ne parviennent à couvrir que la moitié du besoin en carburants à horizon 2050.

La consommation de kérosène fossile ne baisse ainsi que de 20% (de 313 Mt pour un total de 315 Mt en 2025, à 247 Mt pour un total de 494 Mt en 2050).

Au global, entre cette faible baisse de la consommation de kérosène et le fait que les SAF ont des émissions faibles mais non nulles, les rejets de CO₂ du secteur aérien ne diminuent pas. Ils atteignent en 2030 un seuil 14% plus élevé que celui de 2025, puis descendent en 2050 à un niveau à peine 9% inférieur à leur point de départ. Sur la période 2025-2050, la moyenne des émissions annuelles est supérieure de 3% au niveau de 2025.

Le budget carbone consommé par l'aviation est ainsi de 32,4 GtCO₂ entre 2025 et 2050, soit bien au-delà des budgets 1.5°C et 1.7°C (respectivement 6,7 et 15,2 GtCO₂), avec de fortes perspectives de croissance après 2050, puisqu'à cet horizon de temps, le net-zéro est encore très loin d'être atteint, alors que le trafic continue d'augmenter.

Ainsi, sur la période 2050-70, le budget consommé progresse de 63%, atteignant 53 GtCO₂, soit plus de 3 fois le budget compatible d'un objectif 1.7°C. Le secteur n'est par ailleurs toujours pas neutre en carbone, les émissions annuelles s'établissant à près de 1 GtCO₂ en 2070, soit à peine 20% de moins que le point de départ en 2025, principalement à cause d'une consommation de kérosène fossile qui n'a, entre 2025 et 2070, pas même diminué de moitié, passant seulement de 315 à 195 Mt.

En se projetant encore plus loin, le budget consommé continue d'augmenter d'environ 1 GtCO₂ par an, ceci malgré les capacités électriques déployées pour les e-SAF (7300 TWh/an, un

niveau particulièrement ambitieux, voir le scénario “e-bioSAF et e-SAF additionnels”). Entre 2025 et 2100, l’aviation consomme 80 GtCO₂, soit 50% de plus que le budget 2025-2070, ou plus de 5 fois le budget alloué pour un objectif de 1.7°C.

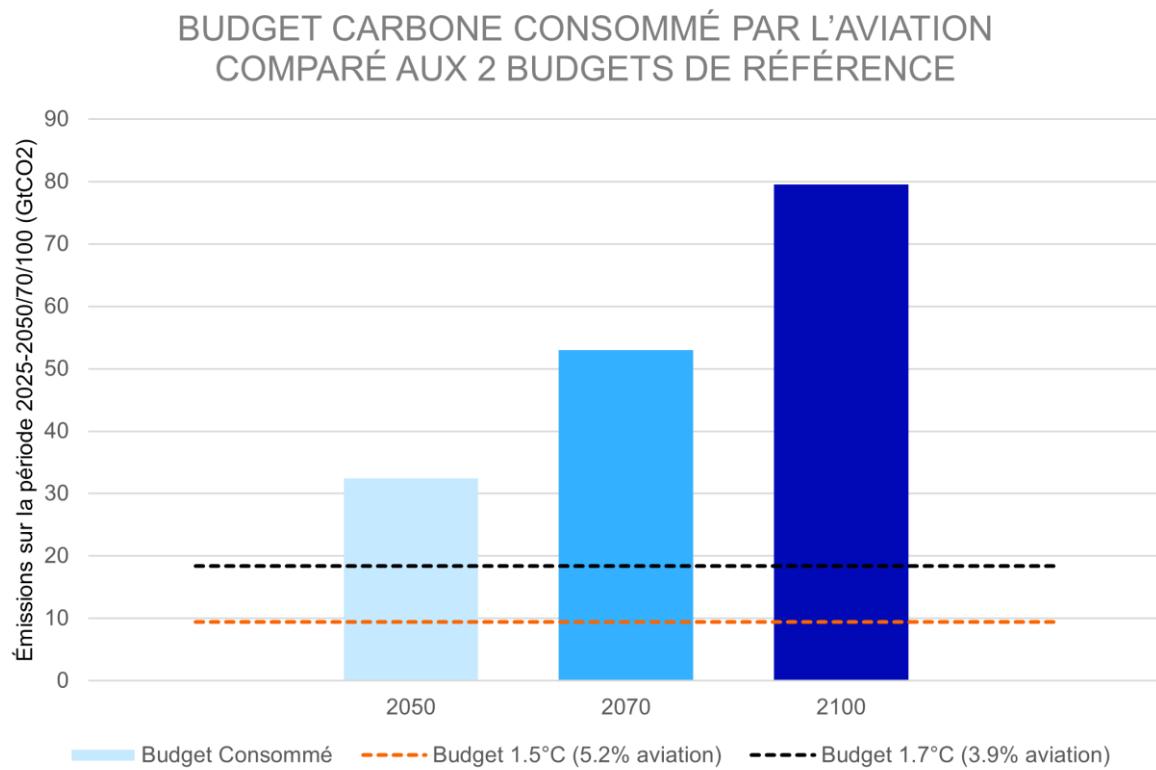


Figure 4.3 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C, 1.7°C, et le scénario SSP2-4.5 de l’AR6 du GIEC en 2021 (2.7°C en 2100, avec allocation de type “grandfathering”, soit 2,6% du budget accordé à l’aviation commerciale de passagers) - Scénario de base (annonces secteur, estimations AIE, jusqu’à 2050, 2070 et 2100)

D. Conclusions - Scénario de base

Si l'on considère les estimations de gisements en SAF données par l'Agence Internationale de l'Énergie, la croissance du trafic aérien telle qu'espérée par le secteur empêche toute baisse suffisante des émissions de CO₂ de l'aviation, et nous projette même sur un niveau de réchauffement de près de 3°C à l'horizon 2100.

Pour répondre à cette incompatibilité entre croissance du trafic et respect d'un budget carbone permettant de tenir l'Accord de Paris, nous esquissons 4 scénarios alternatifs :

- Recourir à des filières à la durabilité dégradée, pour augmenter la quantité totale de SAF et ainsi combler l'écart entre les projections de l'AIE et besoins annoncés par le secteur aérien
- Modifier l'arbitrage intersectoriel, pour accorder parmi les secteurs des transports une part plus importante des ressources énergétiques décarbonées à l'aviation commerciale
- Utiliser des e-bioSAF et e-SAF additionnels, pour optimiser l'usage de la biomasse et compléter les besoins avec des capacités d'e-SAF, qui ne sont pas limitées par les contraintes de durabilité de la biomasse, et dont nous calculons le besoin en électricité bas-carbone

Modérer le trafic, pour ajuster le niveau de croissance de l'aérien aux quantités de carburants déployées par l'AIE dans son scénario NZE, ainsi qu'au respect des budgets carbone.

III. Scénario alternatif : recours à des SAF à la durabilité dégradée

A. Méthodologie - Scénario SAF à la durabilité dégradée

Pour augmenter la quantité totale de SAF utilisables par le secteur, l'idée est ici de diminuer les critères de durabilité, pour inclure un spectre plus large de ressources. En d'autres termes, nous choisissons ici de détériorer la durabilité des SAF, pour en maximiser la quantité.

Nous reprenons ainsi les précédentes estimations de l'AIE en termes de gisements de bioSAF produits à partir de terres marginales, déchets, résidus et co-produits, appelés bioSAF "OK", et complétons avec des biocarburants réalisés à partir de cultures dédiées et intermédiaires, appelés bioSAF "NOK", pour atteindre les quantités requises par le scénario ATAG S2 du secteur aérien.

Pour les e-SAF nous reprenons aussi les précédentes estimations de l'AIE, que nous appelons e-SAF "OK", et complétons avec des carburants de synthèse produits soit à partir d'un CO₂ d'origine fossile, soit avec une électricité d'origine en partie fossile. Nous appelons ces e-SAF respectivement "NOK" et "NOK Worse" et les utilisons pour compléter le mix jusqu'aux quantités requises par le scénario ATAG S2.

Pour ce scénario, les parts de e-SAF "NOK" et "NOK Worse" sont supposées identiques : 61 Mt d'e-SAF "NOK" et 61 Mt d'e-SAF "NOK Worse" en 2050. Il s'agit d'une hypothèse qu'il est possible de faire varier, l'idée de ce scénario étant avant tout de comparer l'impact de ces différentes filières.

Les hypothèses de calcul des facteurs d'émissions sont détaillées au §1.c pour les différentes filières de Bio-SAF et e-SAF "OK", "NOK", et "NOK Worse".

B. Résultats - Scénario SAF à la durabilité dégradée

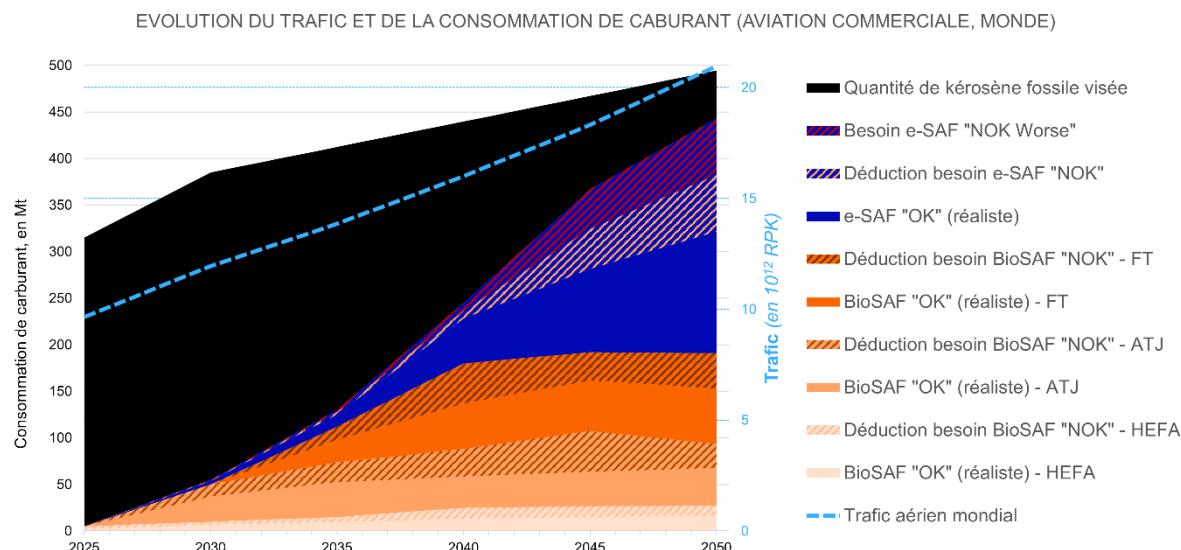


Figure 4.4 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario filières dégradées (bioSAF "NOK", e-SAF "NOK" & e-SAF "NOK Worse")

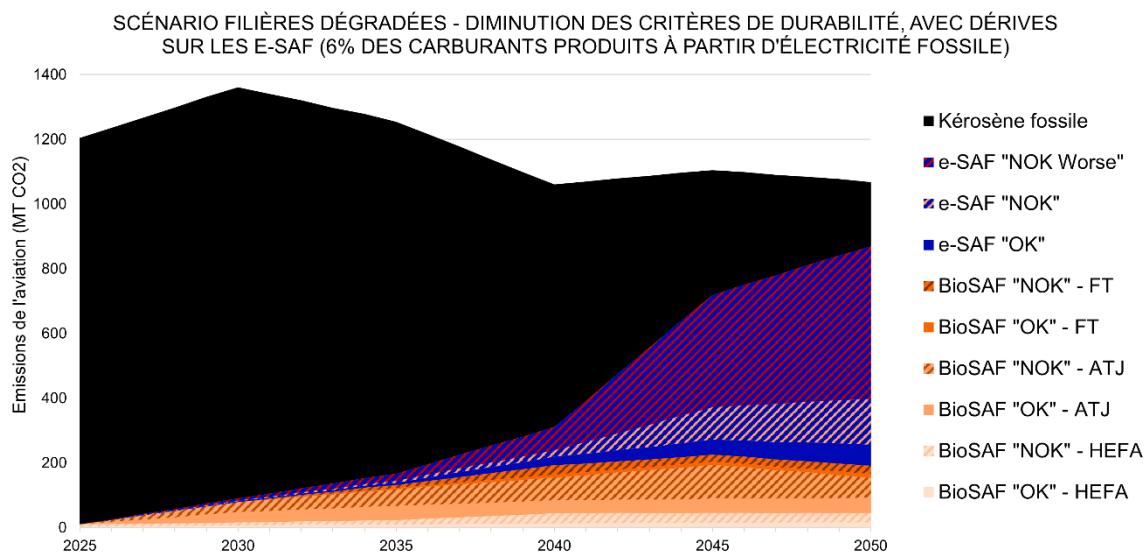


Figure 4.5 : Évolution des émissions de CO₂ induites par la consommation des différents carburants - Scénario filières dégradées (bioSAF "NOK", e-SAF "NOK" & e-SAF "NOK Worse")

C. Analyses - Scénario SAF à la durabilité dégradée

L'ajout de filières supplémentaires (bioSAF "NOK", e-SAF "NOK" et e-SAF "NOK Worse") permet d'augmenter la quantité totale de carburants alternatifs et ainsi de diminuer la consommation de kérosène fossile. En 2050, il ne reste plus que 51 Mt de kérosène (contre 310 Mt en 2025), conformément à ce qui est prévu de base dans le scénario ATAG S2 (soit 90% de SAF).

Les filières bioSAF "NOK" et e-SAF "NOK" ayant un bilan carbone plus faible que celui du kérosène, elles permettent un début de baisse des émissions de CO₂, en 2035-40, par rapport au scénario de base, bien que cette tendance reste insuffisante pour tendre vers une neutralité carbone à horizon 2050.

Cependant à partir de 2040 les émissions repartent légèrement à la hausse, à cause de l'incorporation de plus en plus forte d'e-SAF "NOK Worse".

Ces carburants demeurent minoritaires (12% du mix total en 2050) et n'utilisent que pour moitié une électricité fossile, mais couvrent pourtant près de la moitié des émissions du secteur en 2050, ceci à cause de leur intensité carbone, plus de 2 fois supérieure à celle du pétrole (et 4 fois dans le cas d'un mix électrique entièrement fossile).

Sur la période 2025-2050, la moyenne des émissions n'est ainsi inférieure que de 2% au niveau de 2025, soit une baisse marginale au regard des enjeux de décarbonation du secteur.

Le budget carbone consommé par l'aviation est de 30,7 GtCO₂, soit 2 Gt de moins que le scénario de base mais toujours 15 Gt de plus que le plus grand des 2 budgets considérés, avec encore une perspective de consommation du budget après 2050 puisque la condition net-zéro émission n'est toujours pas atteinte.

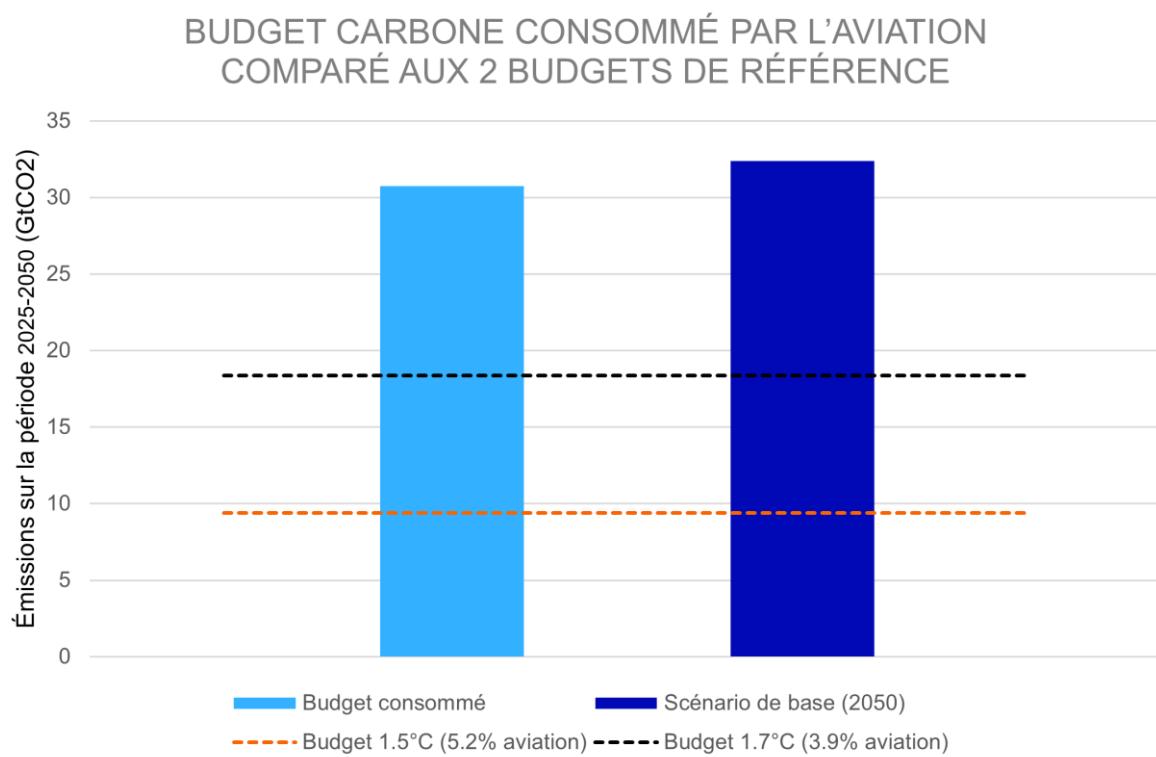


Figure 4.6 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C et 1.7°C - Scénario filières dégradées (bioSAF “NOK”, e-SAF “NOK” & e-SAF “NOK Worse”)

D. Conclusions - Scénario SAF à la durabilité dégradée

Si le développement de carburants alternatifs est globalement à encourager, les dérives que cela peut engendrer, tant en matière de biomasse non durable que d'usage d'électricité non décarbonée, sont en mesure à complètement ruiner les efforts de décarbonation, en ramenant quasiment les émissions en 2050 au niveau de 2025.

Sur la biomasse, c'est un point que nous avons déjà évoqué dans les précédentes parties, et qui dans certains cas est connu du grand public, sur par exemple l'impact nocif de carburants réalisés à partir d'huile de palme, ou le bilan carbone en moyenne pire que le pétrole pour les biocarburants 1G utilisés dans l'automobile.¹⁷⁷ Des impacts environnementaux qui ne se limitent ensuite pas au changement climatique, le gros sujet de l'usage de la biomasse, et notamment des cultures dédiées, étant leur implication dans le dépassement de 4 des 7 limites planétaires actuellement franchies. La dégradation des critères de durabilité sur les bioSAF aurait ainsi de lourdes répercussions environnementales, bien au-delà du sujet du carbone.

Quant à l'électricité, si les impacts environnementaux peuvent être moins prégnants, il faut rappeler que la sensibilité à l'intensité carbone de l'électricité utilisée est très forte (dû au caractère très énergivore des e-SAF). Un mix à moitié fossile nous donne ainsi un bilan 2 fois supérieur à celui du pétrole, et cela monte 4 voire à 8 fois dans le cas d'un mix entièrement fossile (de l'ordre de 4 fois plus dans un mix 100% gaz, à 8 fois plus dans un mix 100% charbon). Le branchement d'électrolyseurs et usines e-SAF sur le réseau électrique pose ainsi de sérieuses questions de pertinence de ces e-SAF en fonction du contenu du réseau. Sans

¹⁷⁷ T&E - Les biocarburants émettent globalement plus de CO₂ que les carburants fossiles qu'ils remplacent

réelle garantie qu'aucun fossile, ou presque, ne sera injecté dans le réseau, il est tout à fait probable que les e-SAF ainsi produits résultent en un bilan pire que celui du pétrole.

Pour baisser suffisamment les émissions de l'aérien, il est donc crucial de restreindre la consommation de SAF à des filières réellement durables et correctement dimensionnées, pour éviter le risque de dérives à même de les rendre contre-productives sur le plan des émissions de gaz à effet de serre et d'autres impacts environnementaux.

Il est alors difficile d'estimer les gisements de SAF véritablement pérennes, et du niveau auquel on souhaite placer les différents curseurs, c'est pourquoi nos scénarios à échelle mondiale se basent sur les chiffres de l'Agence Internationale de l'Énergie, dont le scénario NZE suppose un déploiement déjà très ambitieux de carburants réellement durables, tant bioSAF qu'e-SAF.

IV. Scénario alternatif : modification de l'arbitrage

A. Méthodologie - Scénario modification arbitrage

Le deuxième chemin que nous explorons, pour pallier le fait de ne pas avoir assez de carburants alternatifs pour alimenter la demande du secteur aérien, consiste à prioriser l'allocation de ressources énergétiques pour l'aviation, au détriment d'autres secteurs.

Concernant la biomasse, l'hypothèse est d'en modifier l'affectation entre l'aérien et le maritime. L'aérien diminue sa consommation de pétrole en remplaçant une plus grande part par des biocarburants, au détriment du secteur maritime, pour lequel le manque de biocarburants est comblé par une plus grande consommation de pétrole.

Pour l'électricité bas-carbone, une possibilité est que l'aérien puisse produire davantage d'e-SAF (en l'occurrence, des e-SAF "OK", pour ce scénario et les suivants), grâce à un approvisionnement suffisant en électricité bas-carbone, obtenu au détriment du secteur routier, déplaçant la contrainte de ressources sur les automobiles et poids-lourds (ayant besoin d'électricité pour s'électrifier).

Dans la mesure où ces segments sont soumis à des obligations réglementaires sur l'évolution des motorisations dans les ventes de véhicules, nous considérons que le routier reste sur une trajectoire de forte électrification de ses usages, mais va consommer moins d'électricité bas-carbone et plus d'électricité fossile, dans une logique de quantité définie d'électricité bas-carbone (ensuite allouée selon les secteurs) et de ressources fossiles non-limitantes dans les ordres de grandeur considérés ici.

Une autre approche consisterait à considérer qu'en réponse à ce manque d'électricité bas-carbone, des projets additionnels de production renouvelable ou nucléaire seraient déployés pour répondre à cette demande. Cependant, dans la considération que nous ne pouvons prédire la façon dont les acteurs économiques réagiront, nous avons choisi de ne pas trancher et de décomposer cela en 2 chemins distincts. Cette autre approche sera ainsi précisément le scénario suivant, intitulé "e-SAF additionnels".

Le présent scénario ("Modification arbitrage") considère que la taille du gâteau reste inchangée et que ce sont les parts allouées aux différents secteurs qui varient, là où le scénario "e-SAF additionnels" vient changer la taille du gâteau.

Par souci de simplification, les facteurs d'émissions utilisés sont similaires pour le maritime et l'aérien, concernant les carburants à partir de biomasse et de pétrole. Les émissions additionnelles du secteur routier sont calculées en considérant que la quantité d'électricité bas-carbone prélevée pour l'aviation (20 gCO2e/kWh) est remplacée par une électricité fossile (600 gCO2e/kWh, dans l'hypothèse d'un approvisionnement pour 2/3 à partir de gaz à 400 gCO2/kWh et pour 1/3 de charbon à 1000 gCO2/kWh).

Dans les résultats, les secteurs maritime et routier n'apparaissent pas sur la fig. 8, qui illustre uniquement les carburants pour l'aviation commerciale, mais sont comptabilisés dans la fig. 9, au travers des surplus d'émissions engendrés dans ces 2 secteurs voisins à l'aérien.

B. Résultats - Scénario modification arbitrage

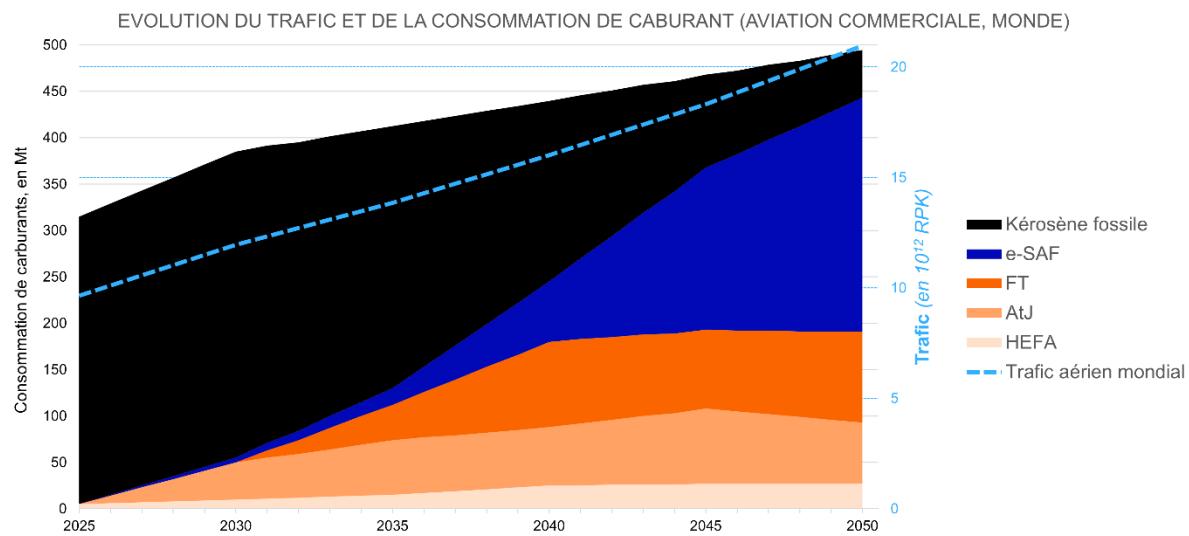


Figure 4.7 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario modification arbitrages (biomasse prise au maritime et électricité au routier)

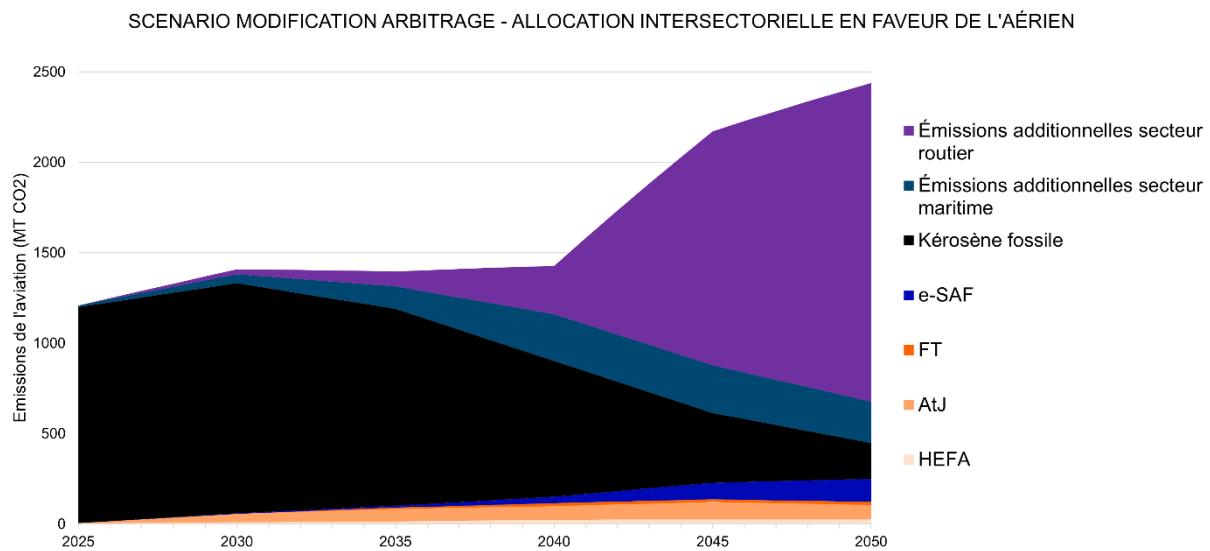


Figure 4.8 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario modification arbitrages (biomasse prise au maritime et électricité au routier)

C. Analyses - Scénario modification arbitrage

Si l'on fait abstraction des impacts engendrés dans le maritime et le routier, la baisse des émissions de l'aviation commerciale est conséquente : de 1199 MtCO2e en 2025 à 447 MtCO2e en 2050, avec une moyenne sur la période 2025-2050 de 966 MtCO2e, soit seulement 20% de moins que le niveau de 2025; cela ne suffit pas pour être compatible d'un budget 1.7°C (3,9%) et encore moins 1.5°C (5,2%), même si les émissions de l'aviation sont, dans ce scénario, bien moindres que dans le scénario de base ou le scénario "Recours à des SAF à la durabilité dégradée" (§3).

Cependant, l'éléphant dans la pièce est qu'ici les émissions engendrées dans les deux autres secteurs viennent complètement contrebalancer ces gains.

En effet, dans le maritime, l'usage d'une tonne de biomasse évite environ autant de pétrole que dans l'aérien. Nous observons donc un phénomène de **vases communicants** : en arbitrant la biomasse d'un secteur vers l'autre, on augmente d'autant les émissions côté maritime qu'on ne les baisse côté aérien (**-1 tCO2e d'un côté, +1 tCO2e de l'autre**).

Pire, dans le routier, **l'impact est démultiplié par l'écart de rendement entre une électrification directe et l'usage de e-carburants**.

Avec les e-SAF, un kWh d'électricité bas-carbone permet d'éviter 134 gCO2, contre 580 gCO2 pour un kWh d'électricité bas-carbone permettant de remplacer une électricité fossile dans un véhicule électrique, et 817 gCO2 pour un kWh d'électricité bas-carbone remplaçant l'utilisation de pétrole dans un véhicule thermique.¹⁷⁸

Cet écart d'efficacité, en termes de CO2 évité par kWh d'électricité bas-carbone mobilisée, d'un facteur 4 comparé à une électricité fossile et 6 comparé à une motorisation essence, explique l'augmentation très significative de la quantité d'émissions engendrées dans le routier.

Au global, le budget carbone consommé sur le seul périmètre de l'aviation commerciale n'est plus que de **25,1 GtCO2**, mais en ajoutant les émissions supplémentaires induites dans le maritime et le routier, le total monte à **45,2 GtCO2**, soit près de 13 Gt de plus que le scénario de base.

¹⁷⁸ Dans l'aviation, il faut 25 kWh pour produire 1kg de e-SAF (valeur optimiste posée en hypothèse pour 2050), et donc éviter la consommation d'un kg de kérosène fossile. En comptant 20 gCO2e/kWh pour l'électricité et 3,84 kgCO2e/kg pour le kérosène, on émet 500gCO2e en consommant un kilo de e-SAF, au lieu de 3,84 kgCO2e pour un kilo de kérosène fossile. Ainsi, 25 kWh d'électricité bas-carbone ont permis d'éviter une émission de 3,34 kgCO2e, soit **134 gCO2e / kWh d'électricité**.

Dans le routier maintenant, en remplaçant une électricité fossile à 600 gCO2e/kWh par une électricité bas-carbone à 20 gCO2e/kWh, ce sont **580 gCO2e / kWh d'électricité** qui sont évités, soit plus de 4 fois plus. Et l'écart serait plus fort encore en comparant la substitution de kérosène fossile par du e-SAF, à la substitution d'un véhicule routier thermique par un véhicule électrique. En effet, un véhicule électrique émet 400 gCO2e/100 km (considérant qu'il consomme 20 kWh/100 km, en incluant les pertes en ligne et lors de la charge, et une électricité à 20 gCO2e/kWh) alors qu'un véhicule thermique émet 16,74 kgCO2e/100 km (pour une consommation de 6 L/100 km et un facteur d'émissions de 2,79 kgCO2e/L). Substituer une consommation de pétrole par une électrification directe avec de l'électricité bas-carbone permet ainsi d'éviter **817 gCO2e / kWh d'électricité**, soit 6 fois plus qu'avec le recours à des e-carburants.

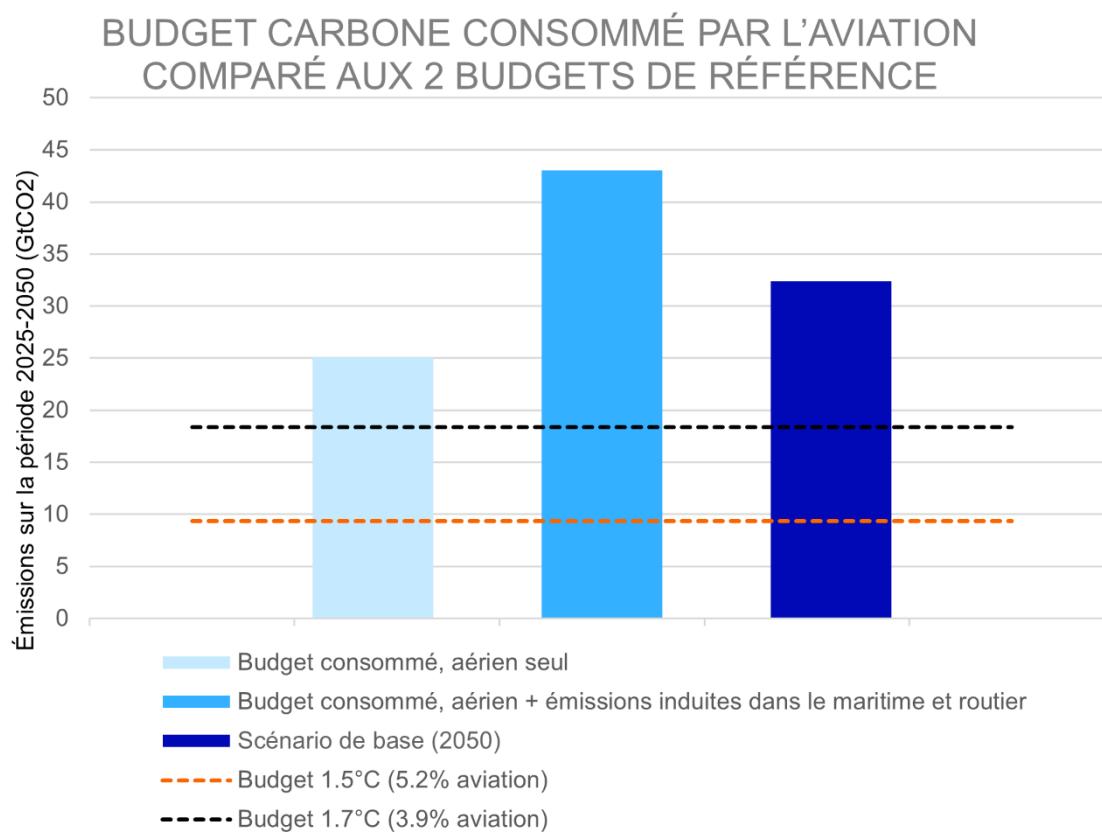


Figure 4.9 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C, 1.7°C et les émissions du scénario de base (en s'arrêtant à 2050) - Scénario modification arbitrages (biomasse prise au maritime et électricité au routier)

D. Conclusions - Scénario modification arbitrage

Bien qu'il puisse être tentant de suggérer un arbitrage de ressources énergétiques en faveur de l'aviation pour en accélérer la décarbonation, **le phénomène de vases communicants et les écarts de rendements** avec d'autres secteurs ne permettraient pas une baisse globale des émissions, voire conduiraient à leur augmentation.

C'est pourquoi il est nécessaire que l'aérien puisse tenir une **trajectoire de décarbonation qui ne se fasse pas au détriment d'autres secteurs**.

Ces écarts de rendement, et donc d'efficacité pour réduire les émissions de CO₂, conduit à la notion de **“Merit Order”**. Comme développé dans l'annexe dédiée (“Evolution dans le temps du Merit Order et des concurrences entre l'aérien et les autres secteurs”), les analyses peuvent varier selon l'évolution de la situation énergétique et de la demande dans les autres secteurs. Il y aura ainsi très certainement des situations où il sera pertinent d'encourager, en France notamment, le déploiement des e-SAF. Cependant le schéma de base est que ces carburants ne doivent pas préempter les ressources pouvant être allouées à une électrification directe, sous crainte de sous-optimisation de la trajectoire de décarbonation intersectorielle, voire d'effets contre-productifs.

Pour pallier ce sujet de prédation de ressources réservées à des usages arrivant plus tôt dans le Merit Order, il existe une solution : déployer des **capacités additionnelles d'électricité bas-carbone**.

V. Scénario alternatif : e-bioSAF & e-SAF additionnels

A. Méthodologie - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels

Ce troisième scénario alternatif introduit tout d'abord une optimisation des gisements de biomasse durable, en mettant en œuvre la filière e-bioSAF. Grâce à un apport d'hydrogène, et donc d'électricité (de l'ordre d'une dizaine de MWh par tonne d'e-bioSAF), tout le carbone constitutif de la biomasse peut être converti en biocarburant, permettant de plus que doubler la quantité produite par rapport à un bioSAF traditionnel, pour un même apport de biomasse. Dans ce scénario, les e-bioSAF sont produits avec la biomasse précédemment utilisée pour produire les BioSAF AtJ et Bio-FT du scénario de référence, et l'électricité est retranchée à la production de e-SAF de ce même scénario, afin de respecter les volumes de ressources affectées à l'aviation dans le scénario NZE de l'Agence Internationale de l'Energie.

L'écart résiduel, entre la nouvelle quantité de SAF (supérieure à celle du scénario de référence grâce à l'optimisation de la ressource en biomasse) et les besoins prévus dans le scénario ATAG S2 (correspondant aux ambitions du secteur de l'aviation en termes de croissance de trafic), est ensuite comblé par des e-SAF additionnels, dont l'augmentation de production ne se heurte pas aux limites physiques de la biomasse durable, mais à des limites "molles".¹⁷⁹ Nous calculons ensuite le besoin en électricité, à partir des hypothèses résumées dans le tableau ci-dessous.

Besoin en électricité (MWh/t)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
e-bioSAF	11,5	11,2	10,8	10,4	10,0	9,6
e-SAF	30	29	28	27	26	25

Tableau 4.5 : Hypothèses sur les besoins en électricité pour produire les e-bioSAF et e-SAF, de 2025 à 2050¹⁸⁰

Le facteur d'émission des e-bioSAF est ensuite calculé à partir des quantités de biomasse utilisées, en ajoutant le bilan carbone de l'électricité consommée, les autres facteurs d'émissions étant identiques aux scénarios précédents.

¹⁷⁹ Voir §2.c de la partie 3

¹⁸⁰ Hypothèse de 30 MWh/t en 2025 et 25 MWh/t en 2050 pour les e-SAF reprise des parties précédentes et basées notamment sur les rapports de l'ISAE-SUPAERO (09/2021) et l'Académie des Technologies (03/2023). Ratio ensuite entre les besoins pour les e-SAF et e-bioSAF calculé à partir de la Key Fact 3 du chapitre 4 de l'[AIA \(Aviation Impact Accelerator, University of Cambridge, 09/2024\)](#), donnant des besoins en électricité respectivement de 31 et 81 EJ pour les e-bioSAF et e-SAF, après sélectivité et pour remplacer l'ensemble des besoin du secteur aérien à échelle mondiale en 2050. Le besoin électrique pour les e-bioSAF est ainsi 2,6 fois plus faible que pour les e-SAF, donnant les valeurs allant de 11,5 à 9,5 comparativement à celles des e-SAF allant de 30 à 25

Facteurs d'émissions (gCO2e/MJ)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
HEFA	23	23	23	23	23	23
ATJ	27	27	27	27	27	27
FT	4	4	4	4	4	4
e-bioSAF	18	18	14	11	11	11
e-SAF	14	13	13	13	12	12
Kérosène	89	89	89	89	89	89

Tableau 4.6 : Évolution des facteurs d'émissions pour les différentes filières

B. Résultats - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels

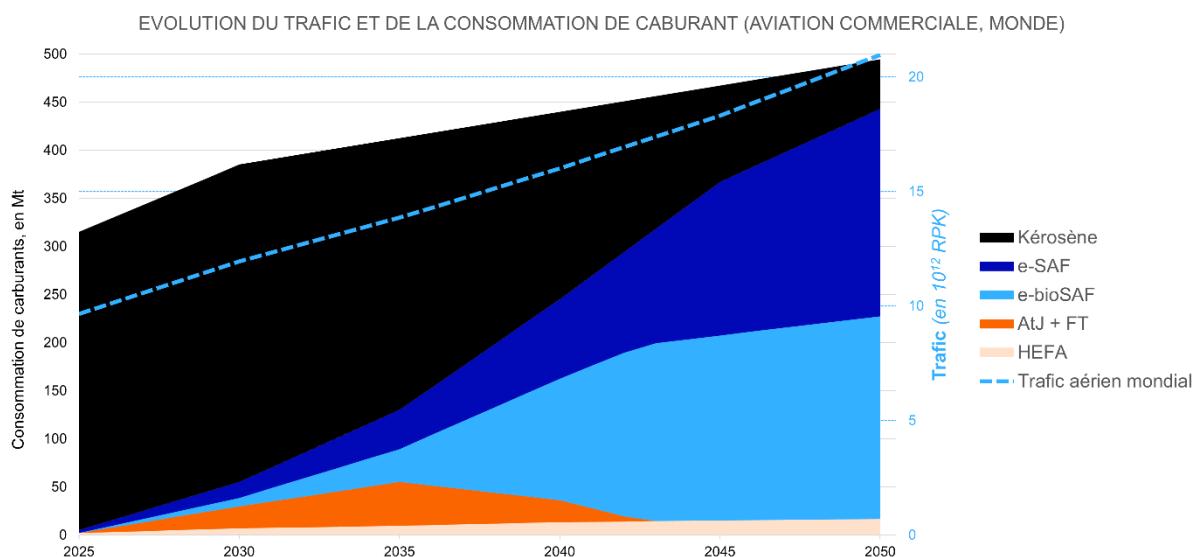


Figure 4.10 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et FT puis besoins restants complétés en e-SAF)

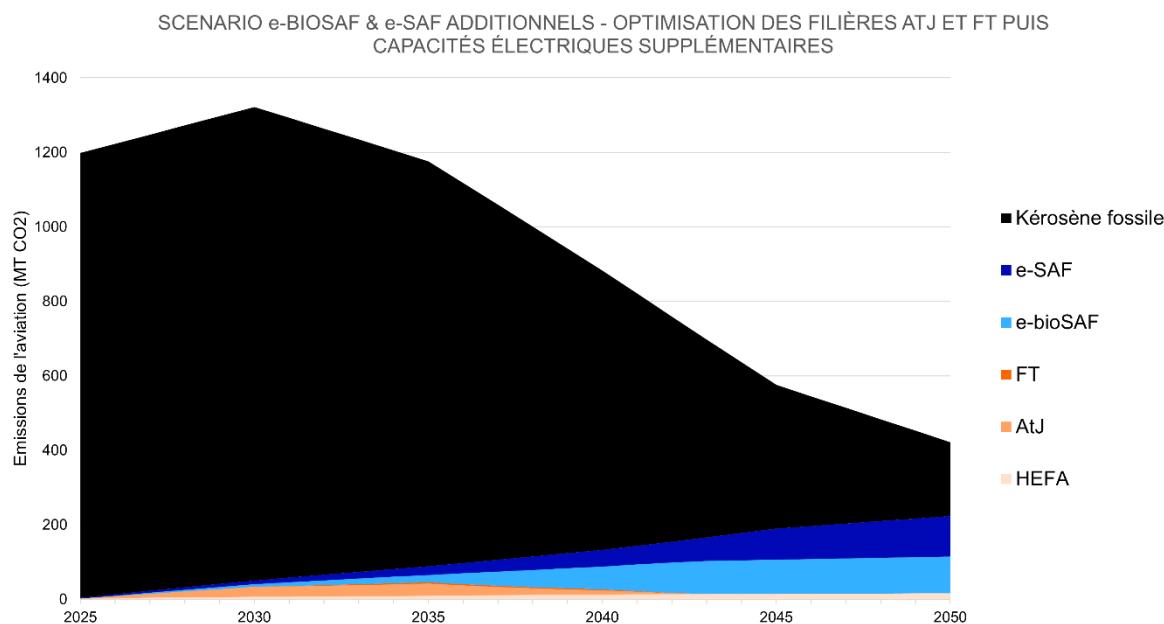


Figure 4.11 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et FT puis besoins restants complétés en e-SAF)

C. Analyses - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels

Entre 2025 et 2050, les émissions baissent de 65%, passant de 1198 à 421 MtCO2e. Sur la période 2025-2050, malgré une hausse à 1322 MtCO2e en 2030, la moyenne s'établit à 948 MtCO2e, soit 21% de moins que le seuil de départ. C'est légèrement mieux que le scénario précédent lorsqu'on considérait uniquement le périmètre de l'aviation commerciale, et ce sans préempter cette fois les ressources nécessaires à d'autres secteurs.

La raison de cette légère amélioration est le recours aux e-bioSAF. Pourtant absents des scénarios ATAG S2 et AIE NZE, ils permettent d'augmenter la quantité de SAF de 247 à 278 Mt en 2050, pour un même apport en biomasse et en électricité.

Le deuxième atout de ce scénario est le recours à des e-SAF additionnels, pour une quantité de 165 Mt en 2050. Le besoin d'électricité bas-carbone de l'aérien augmente ainsi logiquement : d'un niveau déjà impressionnant de 3275 TWh en 2050 dans le scénario de base (131 Mt à 25 TWh/Mt), la consommation passe ici à 7420 TWh (211 Mt à 9,5 TWh/Mt pour les e-bioSAF et 216 Mt à 25 TWh/Mt pour les e-SAF).

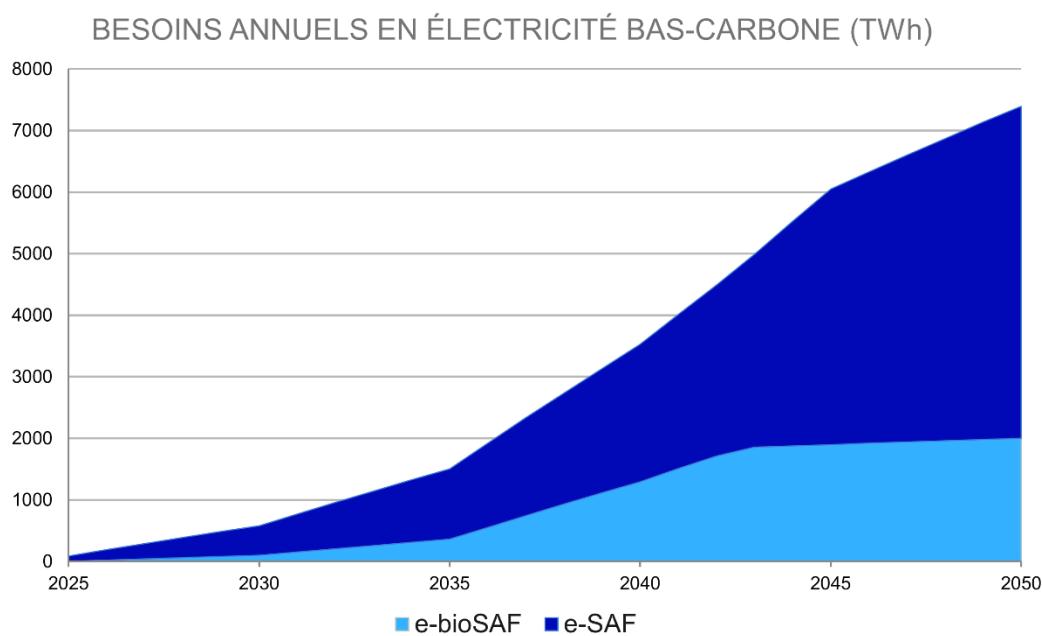


Figure 4.12 : Capacités électriques bas-carbone nécessaires - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et Bio-FT puis besoins restants complétés en e-SAF)

Si l'on considère une courbe encore un peu plus ambitieuse, pour atteindre 100% de SAF en 2050, le besoin additionnel d'e-SAF passe alors de 165 à 216 Mt et la consommation totale d'électricité bas carbone de l'aviation atteint cette fois 8700 TWh en 2050.

Un besoin conséquent, mais qui reste inférieur aux résultats d'autres modélisations dans la littérature, pouvant aller au-delà de 10 000 TWh. En effet, sans l'optimisation des e-bioSAF, qui pour rappel permettent de gagner 31 Mt de SAF en 2050, le besoin en électricité serait supérieur de 775 TWh, atteignant près de 9500 TWh. Et si l'hypothèse de rendement énergétique des e-SAF est revue à la baisse (notre valeur de 25 MWh/t en 2050 pouvant être critiquée comme trop ambitieuse), avec par exemple une valeur à 30 MWh/t, alors le besoin total atteint plus de 11 300 TWh.

11 300 TWh correspond à peu de choses près à la totalité de la production électrique bas-carbone mondiale de 2022 (2700 TWh nucléaire, 4500 TWh hydraulique, 3400 TWh éolien et photovoltaïque, puis 800 TWh de biocarburants et autres sources), ou presque 15% de l'électricité bas carbone projetée en 2050 par le scénario NZE de l'Agence Internationale de l'Énergie, pourtant ultra-optimiste dans le rythme de déploiement qu'il considère pour les renouvelables.¹⁸¹

En revenant à l'hypothèse de 10% de kérosène en 2050 et 7500 TWh d'électricité, le budget carbone consommé par l'aviation atteint 24,6 GtCO₂ sur la période 2025-2050, contre 22,7 GtCO₂ pour la variation à 0% de kérosène en 2050 (et 8700 TWh d'électricité).

Cet écart relativement faible s'explique par le fait que les e-SAF se déploient à grande échelle assez tardivement dans la feuille de route, et ont donc un effet moindre sur le cumul des émissions de CO₂. Cela permet de rappeler un point essentiel : pour tenir plus facilement le budget carbone, il faut amorcer le plus tôt possible (i.e. dès 2025-35) une baisse significative des émissions.

¹⁸¹ AIE - Energy Statistics Data Browser - World, electricity generation

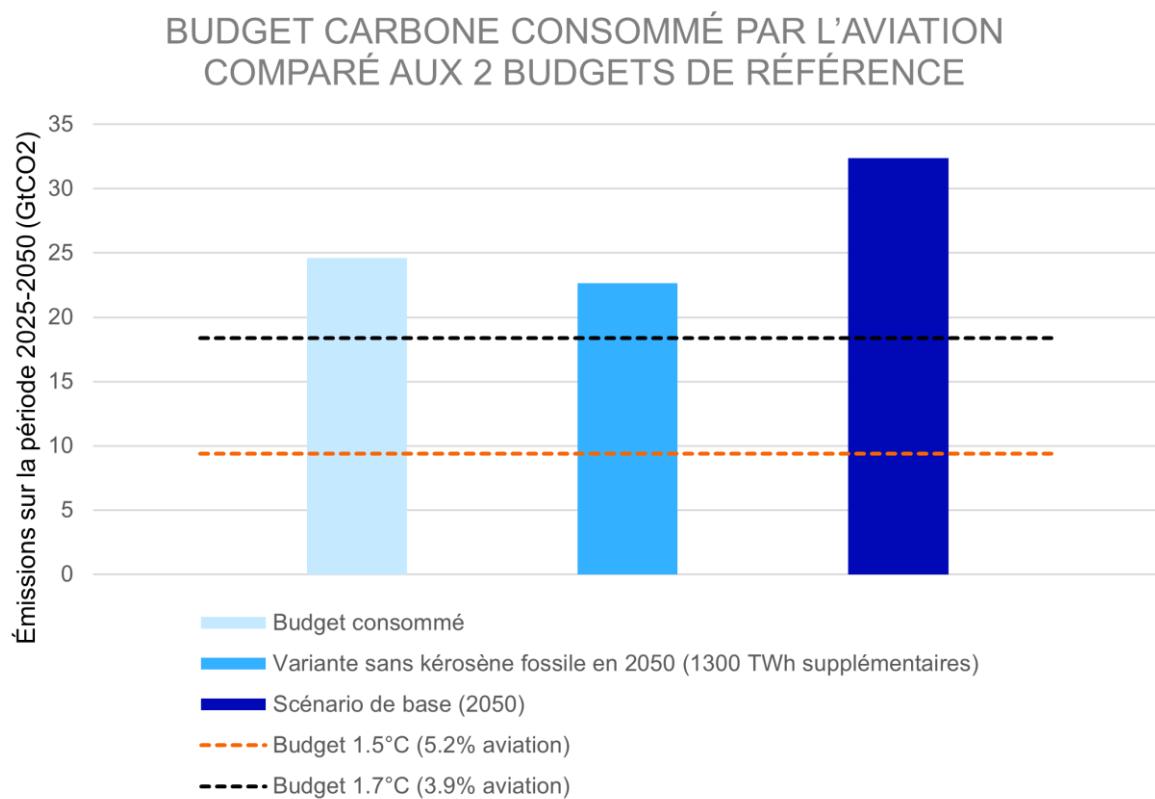


Figure 4.13 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C et 1.7°C - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et FT puis besoins restants complétés en e-SAF)

D. Conclusions - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels

Dans ce scénario, le recours à de très grandes quantités d'électricité pour produire des carburants synthétiques de type e-SAF et e-bioSAF, permet une baisse importante des émissions du secteur aérien sur la période 2040-2050, se rapprochant d'un budget 1.7°C (bien que cela le dépasse tout de même). Cependant, pour éviter une concurrence contre-productive avec les autres secteurs, telle qu'illustrée dans le scénario précédent, il faut rappeler que nous parlons ici de capacités additionnelles, c'est-à-dire de moyens de production d'électricité bas-carbone à déployer en plus des capacités prévues pour l'ensemble des secteurs. Comme indiqué plus haut, ce besoin est chiffré entre 7500 TWh et presque 9000 TWh en 2050, soit trois fois ce que le scénario AIE-NZE, déjà extrêmement optimiste, considère pour le secteur aérien.

Par ailleurs, il faut noter que les projets de production d'e-SAF sont encore très peu nombreux, et aucun d'une taille industrielle, principalement à cause des coûts élevés de ces carburants, et de leur faible maturité technologique - notamment les briques de capture du CO₂ dans l'atmosphère ou l'intégration globale, au point qu'il existe des incertitudes quant au fait de tenir le sous-mandat fixé par ReFuel EU pour 2030, de 1,2% d'e-SAF pour les vols au départ de l'UE. Dans un scénario de décarbonation ambitieux, qui préserve à la fois la croissance du trafic prévue par les industriels, et le potentiel de biomasse durable nécessaire à tous les secteurs, la courbe de déploiement des e-SAF et e-bioSAF est vertigineuse, pour passer en l'espace d'une décennie d'une production presque anecdotique à une solution industrielle majeure, et même de très grande échelle.

VI. Scénario alternatif : modération du trafic

A. Méthodologie - Scénario modération trafic (1.5°C)

La dernière option consiste à ajuster le niveau du trafic pour tenir les contraintes de budget carbone pour l'aviation, tout en se limitant aux quantités de SAF de notre scénario de base (issues du scénario IEA-NZE), optimisées par le recours à la filière e-bioSAF - qui permet de gagner jusqu'à 31 Mt en 2050. Dans le scénario de modération de trafic compatible avec l'objectif 1.5°C, il est convenu que la totalité du carburant d'aviation soit durable à partir de 2050.

Par définition, un budget carbone se calcule en additionnant les émissions de CO₂ sur une période donnée, et il ne se stabilise qu'à l'atteinte de la neutralité carbone. À l'échelle globale, la neutralité carbone est définie comme l'équilibre entre les émissions d'origine humaine et les retraits de gaz à effet de serre de l'atmosphère, par l'homme ou de son fait. Pour le secteur de l'énergie au sens large (ensemble des activités impliquant la combustion d'énergies fossiles), le scénario NZE de l'AIE quantifie les émissions nettes de CO₂, ainsi que les volumes de carbone retirés de l'atmosphère par des dispositifs technologiques, tels que le DACC (Direct Air Carbone Capture), ou la Bioénergie avec Captage et Séquestration du carbone (BECCS) :

Emissions (MtCO ₂)	2010	2021	2022	2030	2035	2040	2050
Total CO ₂ (net)	32 877	36 589	36 930	24 030	13 375	6 471	0
Total CO ₂ removals	0	-2	-2	-234	-632	-995	-1710

Tableau 4.7 : Quantités de CDR (Carbon Dioxide Removals) dans le scénario NZE de l'AIE (version actualisée de 2023)¹⁸²

Pour être neutre en carbone dès 2050, l'aviation doit compenser les émissions résiduelles de production des SAF, qui s'élèvent, selon notre scénario optimisé avec des e-bioSAF, à 140 MtCO₂ en 2050, soit **8% des compensations carbone** projetées à cet horizon. Ce volume est cohérent avec les hypothèses de l'ATAG, qui mobilisent 135, 155 et 115 MtCO₂ de compensation en 2050, respectivement pour ses scénarios S1, S2 et S3, afin d'atteindre la neutralité carbone.¹⁸³ Tout au long du scénario de modération de trafic, un pourcentage similaire de 8% de CDRs est alloué à l'aviation.

Enfin, connaissant les quantités annuelles de SAF et de compensations carbone, une courbe d'évolution du trafic est définie de manière à respecter les deux critères suivants : **neutralité carbone atteinte à la fin de la trajectoire** (en l'occurrence 2050 pour le scénario compatible avec l'objectif 1.5°C) et **respect du budget carbone alloué au secteur aérien**.

¹⁸² AIE, NZE (version actualisée de 2023) - Table A.4: World CO₂ emissions

¹⁸³ ATAG, Waypoint 2050 (09/2021)

Scénario	Budget total		Part allouée à l'aérien	Budget pour l'aérien	% SAF en 2050	Neutralité carbone	DACC/BECCS à neutralité
1.5°C	1,5°C (50%)	130 GtCO2	5,2% ¹⁸⁴	6,76 GtCO2	100%	2050	140 MtCO2 (8,2% total DACC/BECCS)

B. Résultats - Scénario modération trafic (1.5°C)

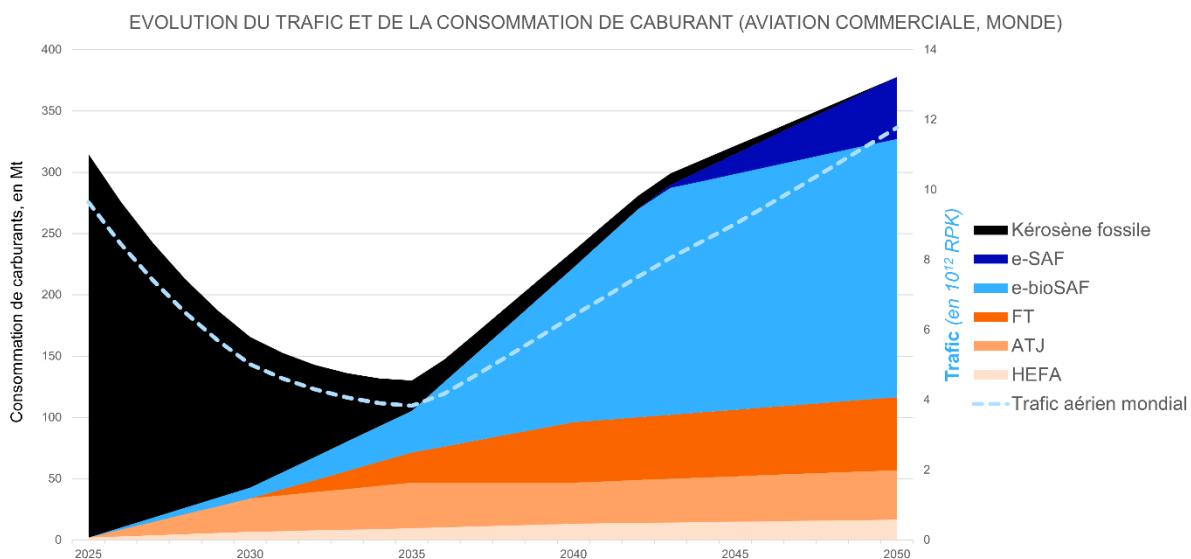


Figure 4.14 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario modération trafic 1,5°C (5,2% du budget alloué à l'aérien)

¹⁸⁴ Voir §1.d

ÉVOLUTION DES EMISSIONS CO2 (AVIATION COMMERCIALE, MONDE)

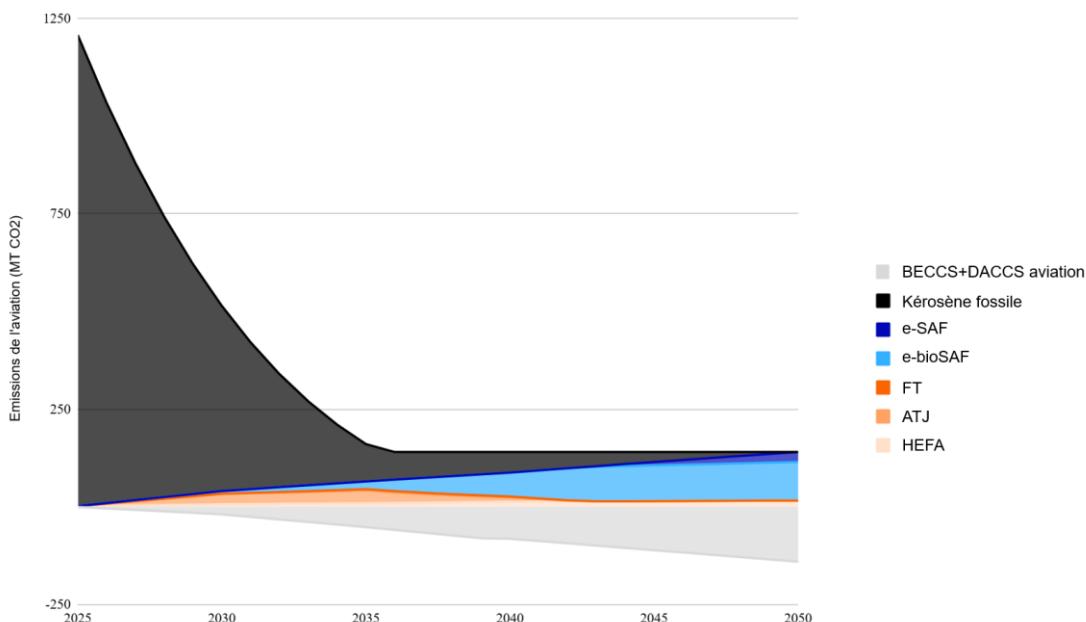


Figure 4.15 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario modération trafic 1,5°C (5,2% du budget alloué à l'aérien)

C. Méthodologie - Scénario modération trafic (1,7°C)

Si la contrainte en température globale est légèrement assouplie à 1,7°C, mais que le secteur aérien ne se voit attribuer qu'une fois et demi la part de ses émissions actuelles,¹⁸⁵ soit 3,9% du budget carbone résiduel, alors il dispose d'environ trois fois plus d'émissions cumulées que dans le scénario compatible 1,5°C. Cela permet de **reculer l'objectif de 100% SAF et de neutralité carbone à 2055**. En prolongeant de manière linéaire l'augmentation des capacités électriques allouées aux e-SAF et e-bioSAF, ainsi que le déploiement des capacités de CDR, tout en stabilisant les quantités de bioSAF, on aboutit en 2055 à 161 MtCO2 d'émissions résiduelles compensées.

Scénario	Budget total		Part allouée à l'aérien	Budget pour l'aérien	% SAF en 2050	Neutralité carbone	DACC/BECCS à neutralité
1,7°C	1,7°C (67%)	390 GtCO2	3,9% (1 part et demi)	15,21 GtCO2	91,5%	2055	161 MtCO2 (7,8% total DACC/BECCS)

En 2050, le taux de SAF atteint 91,5%, soit proche de ce que le scénario ATAG S2 cherchait à atteindre à cet horizon de temps (90% de SAF).

¹⁸⁵ Voir §1d

D. Résultats - Scénario modération trafic (1.7°C)

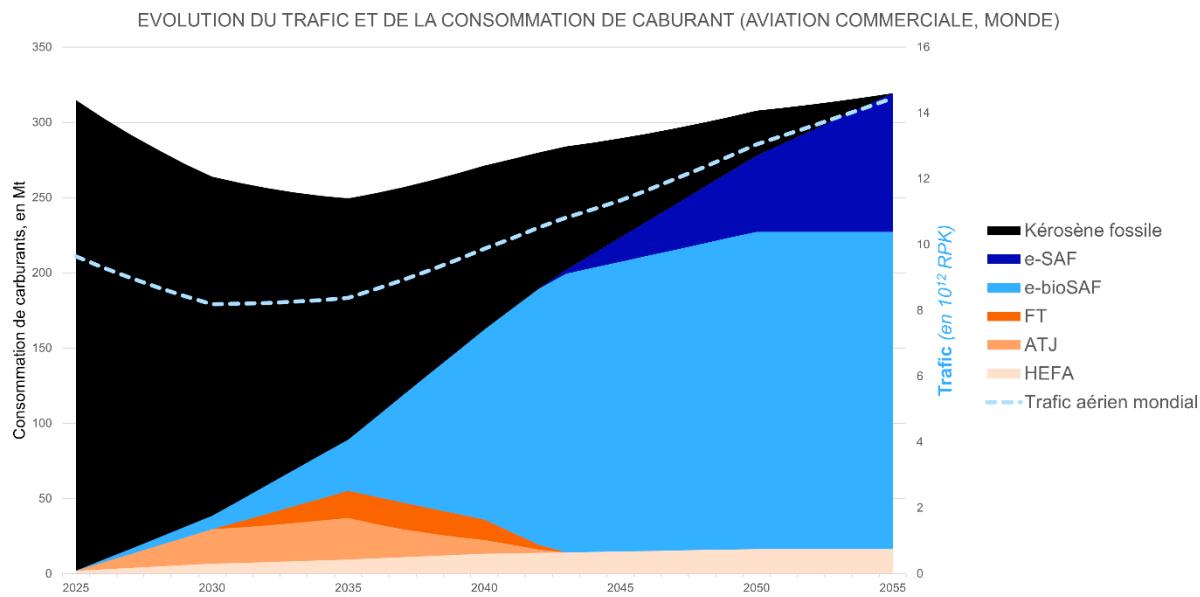


Figure 4.16 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario modération trafic 1,7°C (3,9% du budget alloué à l'aérien)

ÉVOLUTION DES EMISSIONS CO2 (AVIATION COMMERCIALE, MONDE)

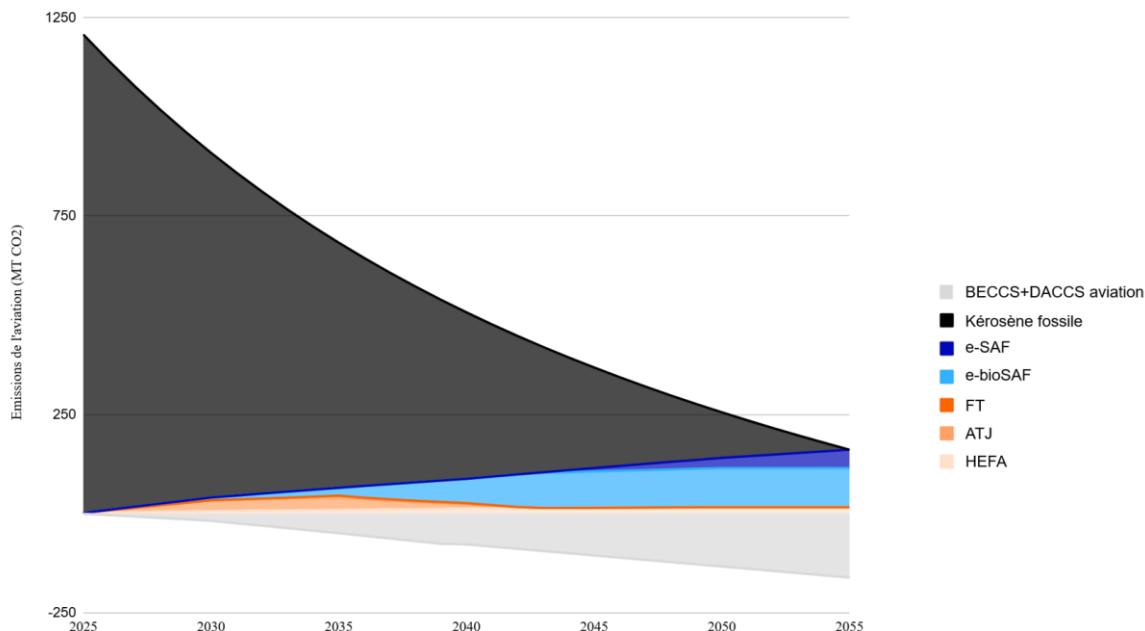


Figure 4.17 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario modération trafic 1,7°C (3,9% du budget alloué à l'aérien)

E. Analyses - Scénarios modération trafic (1.5°C et 1.7°C)

Pour s'aligner avec un budget carbone limité, le trafic aérien doit d'abord décroître de manière très significative, notamment dans un scénario compatible avec l'objectif 1.5°C, avant de pouvoir à nouveau augmenter, lorsque les volumes de SAF permettent sa décarbonation

effective - et ce, même en prenant des hypothèses avantageuses d'optimisation des volumes de carburant avec les e-bioSAF, et de compensations carbone dédiées à l'aviation :

Scénario	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Point le plus bas	Point le plus haut
1.5°C	-	-48%	-60%	-33%	-6%	+23%	-60% (2035)	+23% (2050)
1.7°C	-	-15%	-12%	-3%	+14%	+35%	-17% (2030)	+34% (2050)

Tableau 4.8 : Évolution du niveau de trafic, par rapport au point de départ en 2025 (correspondant à $9,6 \cdot 10^{12}$ RPK), pour les scénarios 1.5°C et 1.7°C

Scénario	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Point le plus bas	Point le plus haut
1.5°C	9,6	5,0	3,8	6,4	9,0	11,8	3,8 (2035)	11,8 (2050)
1.7°C	9,6	8,2	8,4	9,9	11,3	13,0	8,2 (2030)	13,0 (2050)

Tableau 4.9 : Évolution du niveau de trafic pour les scénarios 1.5°C et 1.7°C, exprimé en 10^{12} RPK (Revenue Passengers Kilometers)

En divisant le nombre de RPK (Revenue Passengers Kilometers) par la taille de la population mondiale, on obtient un ordre de grandeur pour le nombre moyen de kilomètres que chaque personne peut parcourir chaque année en avion :

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Population mondiale ¹⁸⁶	8,1 Md	8,4 Md	8,7 Md	9,0 Md	9,3 Md	9,6 Md
1.5°C	1185 km	597 km	440 km	712 km	970 km	1227 km
1.7°C	1185 km	975 km	963 km	1097 km	1220 km	1359 km

Tableau 4.10 : Évolution du niveau de trafic pour les scénarios 1.5°C et 1.7°C, exprimé en km par an et par personne (dans l'hypothèse d'une répartition homogène du trafic aérien mondial)

Si chaque personne dans le monde voyageait environ 1000 km par an en avion :

- Prendre l'avion 1 fois dans l'année reviendrait à ne faire que des trajets de 500 km, tels que des Paris-Toulouse, qu'il est en général possible d'effectuer en train ;
- Un aller-retour Paris-New York pourrait s'effectuer tous les 12 ans (près de 6000 km aller simple), ou un aller-retour Paris-Tokyo tous les 20 ans (près de 10 000 km aller simple).

¹⁸⁶ [Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies](#) - interpolation linéaire entre les valeurs fournies pour 2025 et 2050

Toujours en considérant que chaque personne dans le monde a un accès identique aux voyages aériens, un trafic de 21×10^{12} RPK (tel que le projette le secteur aérien en 2050), soit une multiplication par près de 2,5 par rapport à la période pré-covid, ne correspond qu'à 2188 kilomètres par an et par personne, avec une population mondiale de 9,6 milliards d'habitants. Dans ce cas, il faudrait attendre près de 6 ans pour se permettre un aller-retour Paris–New York, ou envisager une destination plus proche, comme un aller-retour Paris-Barcelone annuel.

Ainsi, la question de la sobriété aérienne se pose-t-elle à la fois pour des enjeux climatiques, mais aussi pour des enjeux d'équité sociale dans la répartition de son usage.

La sobriété est plus efficace à court-terme

Pour respecter un budget carbone 1,5°C, avec une allocation de 5,2% du budget total à l'aviation commerciale, l'effort de modération est drastique. Entre 2025 et 2035, le trafic doit diminuer de 60%, soit une chute presque aussi vertigineuse que celle observée lors de la crise du COVID¹⁸⁷, bien qu'elle soit ici étalée sur une plus longue période.

Cela permet de stabiliser la consommation de kérosène fossile à moins de 20 Mt/an dès 2036, contre 313 Mt en 2025 : une diminution de près de 95%, nécessaire pour quasiment stopper les émissions de CO₂ du secteur.

Cette courbe creusée, bien que compliquée à implémenter en pratique, notamment à cause de l'inertie des politiques publiques et des modèles économiques et industriels, s'observe davantage dans un contexte de crise qu'en situation nominale. Cependant, une telle cassure dans la tendance d'évolution du trafic est nécessaire pour ne pas dépasser les budgets carbone : parce que les vols actuels sont bien plus émissifs que ne devraient l'être ceux de 2040 ou 2050, c'est bel et bien maintenant qu'il faut modérer le trafic, pour diminuer le plus possible les émissions tant que le kérosène fossile constitue l'essentiel du carburant de l'aviation. Dès lors qu'on s'intéresse à la sobriété, il ressort que c'est à court-terme qu'elle est la plus efficace.

Scénario	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1.5°C	101 gCO ₂ /pax.km	83 gCO ₂ /pax.km	34 gCO ₂ /pax.km	18 gCO ₂ /pax.km	13 gCO ₂ /pax.km	10 gCO ₂ /pax.km
1.7°C	101 gCO ₂ /pax.km	90 gCO ₂ /pax.km	66 gCO ₂ /pax.km	41 gCO ₂ /pax.km	26 gCO ₂ /pax.km	16 gCO ₂ /pax.km

Tableau 4.11 : Évolution des émissions unitaires des vols - et donc des émissions évitées par vol retiré - dans les scénarios 1.5°C et 1.7°C

Pas de croissance sans SAF

Après cette phase de sobriété, le trafic peut reprendre progressivement, au fur et à mesure du déploiement des SAF et de l'optimisation permise par les e-bioSAF. Le scénario NZE de l'Agence Internationale de l'Énergie montre un point d'infexion autour de 2040, quand les productions de SAF se concrétisent à plus grande échelle, passant de 80 Mt en 2035 à 149

¹⁸⁷ [Communiqué de l'IATA du 03 février 2021, sur les chiffres de trafic aérien durant le covid en 2020](#)

Mt en 2040, puis 209 Mt en 2045. Le trafic retrouve dans le scénario 1.5°C son niveau de 2025 en 2046, soit $9,6 \times 10^{12}$ RPK, puis le dépasse même de 23% en 2050, avec $11,8 \times 10^{12}$ RPK.

En d'autres termes, vouloir que l'aérien respecte des budgets carbone contraints implique que sa croissance soit indexée sur la disponibilité des SAF. En attendant leur déploiement effectif, il paraît clair que les projets d'extensions d'aéroports - qui plus est dans des pays comme la France où le trafic aérien est déjà plus développé que dans le reste du monde - devraient être mis en pause, à minima pour 10 ou 20 ans.

1000 km/an correspond à 2 tours du monde dans une vie

Parler en kilomètres parcourus en avion par année et par personne peut s'avérer un exercice clivant. Toutefois, l'usage de l'avion est très hétérogène, selon les pays et classes sociales, aussi une même valeur moyenne paraîtra gigantesque pour certains (plusieurs fois le tour de la Terre) et liberticide pour d'autres (seulement quelques vols par vie).

Pourtant il y a ici un beau message à transmettre : si nous régulons le niveau du trafic, tout en déployant de fortes capacités de SAF (véritablement bas-carbone et respectant l'ensemble des critères de durabilité), il est possible d'envisager une aviation sans pétrole, qui retrouve (puis dépasse potentiellement) les niveaux de trafic actuels, permettant à chaque personne sur Terre de faire environ 2 fois dans sa vie le tour de la planète en avion.

Bien qu'il s'agisse d'une vision optimiste, dans la mesure où les hypothèses sous-jacentes sont particulièrement ambitieuses,¹⁸⁸ elle permet d'illustrer ce vers quoi nous pourrions tendre, pour inscrire l'aviation de manière durable dans une ère post-pétrole qui respecte l'Accord de Paris, et où l'usage de l'avion, s'il reste un luxe auquel on ne recourt pas tous les ans, continue tout de même de perdurer. Une vision pour que l'aviation puisse incarner durablement ce moyen "d'aider à créer et à préserver entre les nations et les peuples du monde l'amitié et la compréhension".¹⁸⁹

¹⁸⁸ Pour rappel, les gains d'efficacité sont issus du scénario S2 de l'ATAG ; les gisements SAF sourcés du scénario NZE de l'AIE ont été optimisés avec des e-bioSAF; aucune inertie n'a été prise en compte lors de l'ajustement du niveau du trafic à échelle mondiale dès 2026

¹⁸⁹ Extrait de la Convention de Chicago relative à l'aviation civile internationale, 1944



Figure 4.18 : Carte des destinations atteignables depuis Paris avec un volume total de vols en avion équitablement réparti

F. Conclusions - Scénarios de modération de trafic (1.5°C et 1.7°C)

La présente section modélise des scénarios d'évolution de l'aviation commerciale, qui mobilisent des leviers technologiques (efficacité, SAF) et sociétaux (modération du trafic), permettant de respecter des budgets carbone compatibles avec les objectifs globaux de 1.5°C ou 1.7°C à l'horizon 2100.

Dans le scénario 1.5°C, le trafic aérien diminue d'environ 60% à moyen terme, avant de remonter dès 2036 pour atteindre en 2050 un niveau supérieur de 23% à celui de 2025, soit l'équivalent d'une croissance annuelle de 0,8% sur 25 ans.

Dans le scénario 1.7°C, le trafic baisse de moins de 20%, et atteint en 2050 un niveau supérieur de 34% au trafic de 2025, soit l'équivalent de 1,2% sur 25 ans.

Aucun scénario respectant un budget carbone aligné avec l'objectif de 2°C en 2100 n'a été présenté, dans la mesure où les hypothèses utilisées, issues des scénarios de l'industrie, sont si optimistes (cf. section §1b) qu'elles paraissent difficilement concrétisables, et conduiraient certainement à dépasser le seuil de 2°C. Or l'objet de l'Accord de Paris est bien de maintenir des températures "nettement en-dessous de 2°C", et non de jouer avec ce seuil, quitte à le dépasser.

Par ailleurs, l'exercice de scénarisation montre qu'il ne s'agit pas d'opposer entre elles les différentes options de décarbonation, qu'elles soient technologiques ou de modération. Au contraire, tous les leviers doivent être pleinement mobilisés, y compris des options encore peu étudiées (comme les e-bioSAF), afin de permettre, à terme, de voler sans kérosène fossile.

En attendant le déploiement massif des filières de carburants durables, le trafic ne doit pas augmenter, voire plus ou moins fortement diminuer, selon le scénario 1.5°C ou 1.7°C. Cela signifie notamment que, dans les pays riches tels que la France, les extensions d'aéroports ne doivent pas se concrétiser. A défaut, les volumes de carburants durables ne feront que

s'ajouter à ceux du kérosène fossile au lieu de s'y substituer, et les budgets carbone contraints ne seront pas tenus.

L'usage de l'avion est un luxe, tant du point de vue financier que climatique, et il le restera pour de longues décennies. Il est pourtant possible que chacun puisse y accéder, en étant à la fois raisonnables dans l'usage, et ambitieux dans le déploiement effectif de capacités énergétiques. C'est ainsi que pourrait se matérialiser la vision d'une aviation s'inscrivant dans l'Accord de Paris, affranchie du pétrole et permettant à chacun de faire le tour de la Terre.

Conclusion

Mettre en regard les ambitions de croissance du trafic aérien, affichées par les industriels du secteur, avec les projections de volumes de SAF du scénario le plus ambitieux de l'Agence Internationale de l'Énergie, aboutit à un **scénario de référence dans lequel les émissions de l'aviation ne baissent quasiment pas à l'horizon 2050**, et représentent, sur la période 2025-2050, déjà 8% du budget carbone total d'une trajectoire compatible avec une hausse globale des températures de 1.7°C.

Ainsi, pour décarboner de tels niveaux de trafic, faut-il trouver des solutions qui permettent de produire davantage de SAF que les quantités, déjà optimistes, envisagées par L'Agence Internationale de l'Énergie. Pour cela, les acteurs du secteur aérien proposent diverses pistes, dont certaines auraient plutôt tendance à agraver les impacts environnementaux :

- L'affaiblissement des critères de durabilité des SAF engendre des tensions sur les sols, l'eau ou la biodiversité, sans permettre aux émissions CO₂ du secteur aérien de significativement diminuer ;
- La priorisation au détriment des autres secteurs dans l'accès aux ressources bas-carbone, peut conduire à une augmentation des émissions globales, à cause des écarts de rendements énergétiques entre les solutions de décarbonation de l'aérien et, par exemple, l'électrification du routier ;
- L'investissement massif dans des capacités électriques additionnelles peut permettre la production de suffisamment d'e-SAF et d'e-bioSAF pour couvrir à terme les besoins en carburant du secteur aérien, à condition de mobiliser des moyens considérables.

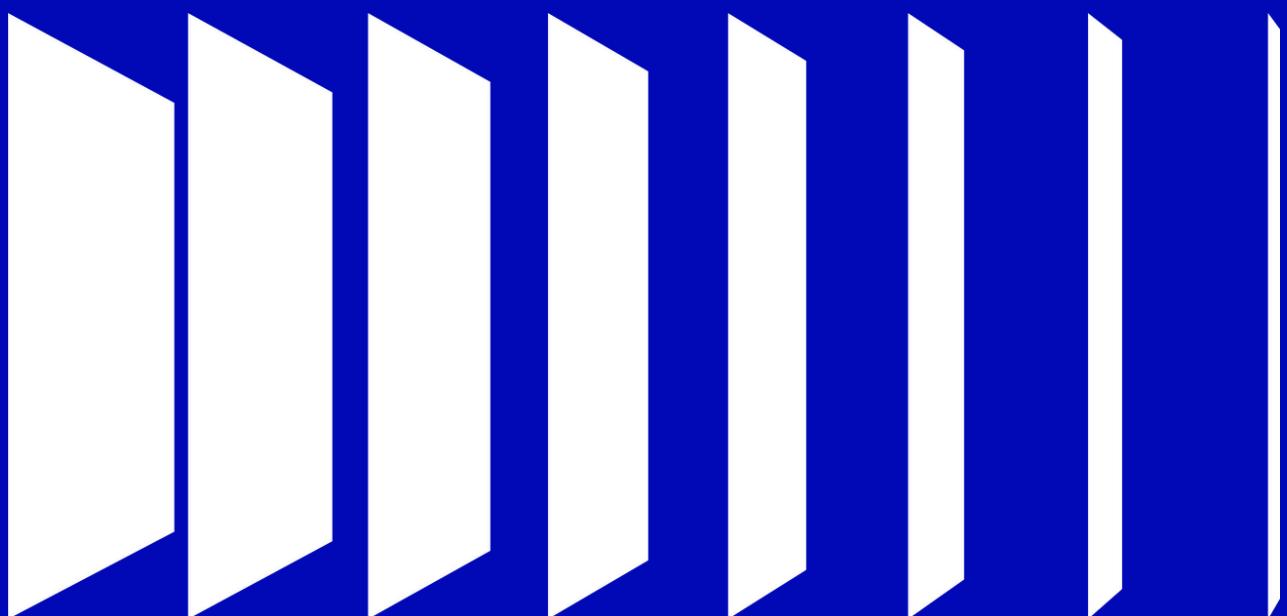
Il apparaît donc que la modération du trafic constitue un levier incontournable de sa décarbonation. Grâce aux gains d'efficacité et à l'incorporation progressive des SAF, les vols en 2040 ou 2050 devraient être bien moins émissifs que ne le sont ceux d'aujourd'hui. Par conséquent, c'est bel et bien maintenant qu'il faut limiter l'activité aérienne, pour diminuer le plus possible les émissions tant que le kérosène fossile constitue l'essentiel du carburant. Afin de rester compatible avec un budget carbone limitant l'augmentation de la température moyenne à 1,7 °C, même avec une allocation favorable au secteur aérien, **le trafic mondial devrait diminuer d'au moins 15 % d'ici cinq ans**, ce qui correspondrait à un retour transitoire aux niveaux observés dans les années 2010. Après cette phase de sobriété, le trafic pourrait reprendre progressivement, au fur et à mesure du déploiement des SAF et si les conflits d'usages (biomasse, électricité) sont arbitrés.

Partie 5 -

Quel approvisionnement

énergétique pour

l'aviation française ?



I. Approvisionnement en carburants liquides

Dans cette partie, les volumes d'énergie seront exprimés en térawatt-heures (TWh) et en million de tonnes équivalent pétrole (Mtep). À titre indicatif, 1 EJ (1e+18 J) équivaut à 277 TWh. Les quantités de carburants (kérosène, pétrole etc) sont exprimées en tonnes. Une tonne de kérosène, et donc de SAF, correspond à 43,15 GJ d'énergie soit 12 MWh.

En 2024, la France a consommé pour tous les usages plus de 708 TWh (61 Mtep) de produits fossiles raffinés hors biocarburants et soutes internationales, dont seulement 10 TWh extraits nationalement. Ainsi, la quasi-totalité du kérosène utilisé provient de pétrole brut importé, principalement d'Afrique subsaharienne (21 %), d'Afrique du Nord (18 %), d'Amérique du Nord et du Moyen-Orient (17 % chacun).¹⁹⁰

En ne retenant que la part dédiée au transport (456 TWh¹⁹¹ soit les 2 tiers de la consommation totale de produits pétroliers) et en y ajoutant les carburants pour les soutes (44 TWh, environ 8 % de la consommation totale de carburants de transport) ainsi que le gazole non routier utilisé dans l'agriculture et la pêche qui n'est pas compté dans la catégorie "transport" (3,4 Mtep, soit 40 TWh¹⁹² en 2024, valeur très stable depuis 2012), on obtient un total d'environ 540 TWh (46,4 Mtep) de carburants fossiles liquides. Dans cette partie, c'est cette quantité qu'il nous intéresse de substituer par des sources non fossiles, avec l'objectif de réduire les émissions nationales de CO₂.

À ce total, il convient d'ajouter la consommation actuelle de biocarburants, qui s'élève à 42 TWh¹⁹³ (40 TWh pour le routier, 2 TWh pour l'aérien). Ceux-ci proviennent à 83%¹⁹⁴ (35 TWh) de cultures également destinées à l'alimentation humaine et animale : colza, huile de palme et soja pour la production de biogazole, ainsi que maïs, blé et betterave pour les bioessences.¹⁹⁵ L'article 26 de la directive RED encadre la production de biocarburants issus de cultures alimentaires, en limitant leur part à 7 % de la consommation énergétique totale du secteur des transports.¹⁹⁶ La consommation énergétique des transports s'établit légèrement au-dessus de 510 TWh en 2024¹⁹⁷ donc le seuil des 7% qui correspond à 35 TWh est atteint. Il n'est donc légalement plus possible de consommer davantage de biocarburants issus de cultures alimentaires en France.

L'objectif de cette étude à l'échelle nationale est d'estimer les demandes en carburants liquides dans les différents secteurs du transport, ainsi que leurs évolutions dans le temps, en prenant en compte les possibilités de substitution énergétique, les gains d'efficacité et les perspectives de croissance. Nous passerons ainsi en revue les différents secteurs susceptibles d'avoir recours aux carburants alternatifs d'ici 2050, à savoir, dans un premier temps, l'aérien, puis le maritime, le routier, et enfin l'agriculture. Les considérations générales relatives aux transitions énergétiques mondiales de ces secteurs ont été abordées précédemment dans la partie 2.

¹⁹⁰ [Statistiques développement durable](#)

¹⁹¹ [Statistiques développement durable - consommation par secteur](#)

¹⁹² [Statistiques développement durable - consommation par secteur](#)

¹⁹³ [Statistiques développement durable - consommation par secteur](#)

¹⁹⁴ [Statistiques développement durable - biocarburants](#)

¹⁹⁵ [Statistiques développement durable - biocarburants](#)

¹⁹⁶ [Sénat](#)

¹⁹⁷ [Statistiques développement durable](#)

L'objectif est de présenter les fourchettes de demandes en volume, en matières premières et en électricité telles que définies par les différents groupements industriels.

A. Aérien

Pour l'ensemble des vols intérieurs et internationaux au départ d'un aéroport situé en France, le secteur aérien a consommé plus de 7 Mt de kérosène en 2024,¹⁹⁸ soit l'équivalent de 85 TWh. Cette demande énergétique est du même ordre de grandeur que celle observée en 2019, avant la crise du COVID. D'ailleurs, le secteur a retrouvé en 2024 un niveau de trafic proche de celui d'avant la pandémie.¹⁹⁹ La production de bio-kérosène, essentiellement issue du procédé HEFA à partir d'huiles végétales, représente environ 1 TWh, soit moins de 2 % de la quantité de carburant consommée par le secteur.

À l'échelle européenne, Eurocontrol table désormais sur une croissance comprise entre 1 % et 1,6 %. Selon la *Feuille de route de décarbonation de l'aérien*²⁰⁰, publié en 2023 par le Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS), le secteur aérien anticipe une croissance annuelle du trafic de 1,1 % en passagers-kilomètres (PKM), ce qui représenterait environ 30 % d'augmentation d'ici 2050. Par ailleurs, une amélioration optimiste de l'efficacité énergétique des avions, entre 0,9 et 1,2% par an est envisagée sur cette période (de l'ordre de 20 à 25 % au total). À l'horizon 2050, les besoins énergétiques du secteur aérien devraient donc augmenter de l'ordre de 5 à 10 %.

Il convient de rappeler que le secteur aéronautique ne connaîtra pas de transformation majeure en matière d'énergie d'ici 2050 : ni l'hydrogène ni l'électrique ne devraient jouer un rôle significatif. Ainsi, les carburants resteront la principale source d'énergie pour le fonctionnement du secteur.

Pour estimer les demandes du secteur, nous nous appuyons sur le scénario "Action" de la feuille de route du GIFAS, dans lequel il est prévu qu'en 2050, 40 % des carburants consommés soient d'origine biologique. Ce scénario implique des besoins d'environ 15 Mt de biomasse sèche et 80 TWh d'électricité.

B. Maritime

La consommation énergétique attribuée au secteur maritime atteint 27,7 TWh en 2023,²⁰¹ dont 1,2 TWh proviennent de sources biologiques telles que le biodiesel ou le bioGNL. Dans le cadre de sa feuille de route pour la décarbonation du secteur maritime, le Groupement des Industries de Construction et Activités Navales (GICAN) a élaboré plusieurs scénarios prospectifs, dont le scénario S3 qui sert de référence ici.²⁰²

Le scénario S3 prévoit une augmentation de la demande énergétique totale de 35 % d'ici 2050. Cette augmentation résulte de la combinaison entre une croissance du trafic maritime estimée à +3 % par an, des gains d'efficacité énergétique de l'ordre de 60% et une électrification de 10% du besoin énergétique. Les gains d'efficacité proviennent à parts égales de la réduction de la vitesse des navires et d'améliorations technologiques.

¹⁹⁸ Calculé à partir des conjonctures énergétiques trimestrielles [Statistiques développement durable](#).

¹⁹⁹ [Ecologie.gouv](#)

²⁰⁰ [GIFAS - FDR Décarbonation secteur aérien](#)

²⁰¹ [GICAN](#)

²⁰² [GICAN](#)

Concernant les combustibles gazeux, le GNL fossile sera progressivement remplacé par du bioGNL puis par du e-GNL. Aujourd'hui, seulement 1 % de la flotte mondiale fonctionne au GNL. Une projection optimiste, tenant compte d'un rythme de renouvellement moyen de la flotte maritime estimé à 25 ans, pourrait porter cette part à environ 15 % de la flotte française en 2050. Le développement du méthanol sera plus tardif en raison du manque actuel d'infrastructures et de navires adaptés. L'électrification des navires restera quant à elle limitée à moins de 10 %, principalement en raison des contraintes techniques et opérationnelles affectant les navires de grande taille.

Ainsi, la demande totale en carburants liquides atteindra approximativement 40 TWh en 2050, avec une contribution des biocarburants représentant environ 8 TWh d'après la feuille de route. Un point d'étape intermédiaire est fixé à 13 TWh d'énergie issue des biocarburants en 2040. Le développement des e-carburants destinés au secteur maritime, notamment le e-méthanol et l'ammoniac, devrait entraîner une augmentation significative de la consommation électrique en amont estimée à 36,6 TWh dès 2040 et qui devrait atteindre 73,4 TWh en 2050.²⁰³

C. Routier

La consommation de carburant du secteur routier en France s'élevait à 470 TWh en 2024, dont 40 TWh de biocarburants.²⁰⁴ Selon la Stratégie Nationale Bas-Carbone, le secteur routier doit diminuer de 30% l'utilisation de combustibles fossiles en 2030 par rapport à 2012 avec 10% d'énergie finale provenant de sources renouvelables.²⁰⁵ En 2050, c'est une diminution de 70% par rapport à 2012 qui est attendue.

1) Poids lourds

Les véhicules dits « lourds », comprenant les poids lourds, les autocars, les autobus, les véhicules utilitaires légers ainsi que les engins de chantier, représentaient une consommation énergétique estimée à 200 TWh.²⁰⁶

Selon la feuille de route de décarbonation de la filière,²⁰⁷ l'électrification et le recours au gaz naturel véhicule (GNV) constituent les principales solutions envisagées pour substituer les carburants fossiles dans le transport routier lourd. L'hydrogène, quant à lui, devrait rester marginal, avec une estimation jugée très optimiste pour les acteurs du secteur inférieure à 10 % des nouvelles immatriculations en 2035.

La flotte de véhicules électriques, ainsi que celle fonctionnant au GNV, devrait représenter environ 45 % du parc en 2035, pour devenir majoritaire à l'horizon 2050 selon la feuille de route. Par ailleurs, la part des véhicules thermiques dans le parc des poids lourds devrait être inférieure à 30 % en 2050.²⁰⁸ Malgré une croissance anticipée de 20 % du nombre total de kilomètres parcourus par l'ensemble des poids lourds d'ici 2050, la demande énergétique en carburants fossiles devrait diminuer considérablement, pour atteindre approximativement 70 TWh à cette date.²⁰⁹

²⁰³ [GICAN](#)

²⁰⁴ SDES Chiffres clés des transports - Édition 2025 et SGPE - [Bouclage biomasse : enjeux et orientations](#)

²⁰⁵ [SNBC Fiche transports](#)

²⁰⁶ [Statistiques développement durable](#)

²⁰⁷ [Feuille de route de décarbonation des véhicules lourds](#)

²⁰⁸ [Projection transports SNBC 2](#)

²⁰⁹ [Feuille de route de décarbonation des véhicules lourds](#)

2) Véhicules légers

Au 1er janvier 2023, on comptait environ 1,5 million de voitures électriques en circulation en France, contre 39 millions de véhicules thermiques qui représentaient encore plus de 50 % de la consommation nationale de carburants, soit environ 270 TWh.²¹⁰ L'électrification complète du parc automobile est envisagée à l'horizon 2050, ce qui justifie la réglementation prévoyant l'interdiction de la vente de véhicules thermiques neufs à partir de 2035 puis un renouvellement progressif du parc.²¹¹ Cependant, il est raisonnable d'estimer qu'en 2035, les besoins en carburants resteront significatifs, représentant encore près de la moitié de la consommation actuelle.²¹² En termes de taille du parc, nous considérerons qu'il restera stable, se situant à mi-chemin entre les projections du secteur, qui tablent sur une croissance annuelle de 1 %, et celles du Shift Project, qui préconisent une diminution de 40 % d'ici 2050.

En résumé, et en tenant compte des hypothèses précédemment évoquées, la part de carburant dédiée au secteur routier devrait fortement diminuer d'ici 2050, pour atteindre environ 70 TWh, tous segments confondus (poids lourds et véhicules légers). Un point d'étape sensible est attendu en 2035, avec une demande estimée à près de 255 TWh, marquant un pic de tension liée à la transition vers l'électrique. Cette pression devrait progressivement s'atténuer avec le déclin des voitures thermiques individuelles.

D. Agriculture et pêche

Le secteur agricole est souvent peu pris en compte dans les analyses liées à la consommation de carburant, car l'énergie utilisée par les machines agricoles est généralement comptabilisée séparément de celle des transports. Pourtant, l'agriculture dépend fortement des carburants. D'un autre côté, ce secteur joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement en biocarburants, notamment à travers la production locale d'huiles végétales destinées au biodiesel, et de sucres utilisés pour la fabrication d'éthanol, une filière moins développée en France.

En termes de consommation, les machines agricoles utilisaient environ 30 TWh de gazole non routier en 2021, répartis sur près de 1,5 million de machines agricoles.²¹³ Bien que des tracteurs fonctionnant au gaz naturel véhicule (GNV) et à l'électricité soient disponibles sur le marché depuis environ 2020, leur part reste encore marginale. En ajoutant le carburant marin utilisé pour la pêche, on obtient une consommation totale d'environ 40 TWh.²¹⁴

En reprenant les hypothèses de scénarisation proposées par l'équipe agriculture du Shift Project,²¹⁵ on peut envisager, d'ici 2050, une conversion progressive du parc dans laquelle un tiers des machines passerait à l'électrique et un autre tiers au GNV, une estimation ambitieuse au regard des rythmes actuels de renouvellement des tracteurs, de l'ordre de 20 ans. En supposant que ces substitutions concernent principalement les segments à faible puissance, donc à plus faible consommation énergétique, la demande en carburant liquide du secteur pourrait ainsi être réduite de moitié, atteignant environ 15 TWh. Étant donné que l'agriculture

²¹⁰ Chiffres clés transports

²¹¹ Ecologie.gouv.

²¹² IFAP

²¹³ INSEE

²¹⁴ Statistiques développement durable

²¹⁵ Rapport complet agricole

constitue le premier maillon de la chaîne de production, nous pouvons supposer que 100 % de cette énergie sera d'origine biologique.

E. Synthèse de l'évolution de la demande française en carburants

Les estimations de demande en carburant liquides des différents secteurs des transports et agriculture sont donnés en TWh dans le graphe ci-dessous :

Secteurs	Énergie finale annuelle (2020-2025)	Demande annuelle de biocarburants (2020-2025)	Croissance de l'usage d'ici 2050	Gains d'efficacité & substitutions énergétiques	Demande carburants liquides 2050
Aérien	85	1	+30%	-20/25%	90
Maritime	28	1	+110%	-65%	40
Poids lourds	200	19	+20%	-70%	70
Véhicules légers	270	20	0%	-100%	0
Agriculture et pêche	40	0	0%	-50%	20

Tableau 5.1 : Synthèse de l'évolution de la demande française en carburants

En additionnant les différentes demandes en carburant liquide projetées pour 2050, on obtient un total supérieur à 220 TWh, l'aérien représentant la principale demande. Cette quantité devra être répartie entre les carburants fossiles, les biocarburants et les carburants de synthèse.

II. Gisements CO₂

Le développement à grande échelle des carburants de synthèse (e-SAF pour ceux dédiés à l'aviation) repose notamment sur la disponibilité de CO₂ nécessaire à leur synthèse. Pour que ce carburant ait une faible intensité carbone et soit considéré comme valorisable en carburant de synthèse par la réglementation européenne, ce CO₂ doit provenir d'un captage biogénique ou atmosphérique. Toutefois, la directive européenne RED permet jusqu'en 2041 l'usage de CO₂ fossile, qui peut être capté directement à la sortie des cheminées des installations industrielles les plus émettrices, permettant ainsi la valorisation de flux carbonés déjà existants en attendant leur décarbonation à la source.²¹⁶ Nous nous concentrerons ici sur les gisements accessibles par captage et valorisation du carbone CCU (Carbon Capture and Utilization) de CO₂ d'origine fossile ou biogénique, le gisement atmosphérique (DAC) étant illimité.

A. Gisement de CO₂ fossile capté en sortie de sites industriels

Les principales filières industrielles à l'origine d'importantes émissions de carbone, actuellement d'origine fossile, sont :

- La sidérurgie et la métallurgie
- Les cimenteries
- La chimie et la pétrochimie
- La production d'engrais agricoles

Dans ces filières, deux types distincts d'émissions de CO₂ sont à considérer :

- Les émissions de procédé : issues directement de réactions chimiques intrinsèques aux activités industrielles, telles que la réduction du minerai de fer, la décarbonatation du calcaire, ou encore la synthèse de l'ammoniac. Ces émissions ne peuvent être réduites qu'en limitant l'activité industrielle elle-même ou en changeant le procédé en lui-même
- Les émissions énergétiques : liées aux besoins en chaleur et énergie, aujourd'hui majoritairement satisfaits par des combustibles fossiles, mais pouvant être substituées à terme par des sources énergétiques non-fossiles.

En moyenne, les émissions de procédé et énergétiques représentent chacune la moitié des émissions totales, sauf pour la sidérurgie et la production d'engrais, où environ deux tiers proviennent des procédés industriels contre un tiers pour la production de chaleur. Dans le cadre de la production d'e-SAF, seules les émissions énergétiques provenant de sources biogéniques pourront être considérées neutres en émissions additionnelles de CO₂ à partir de 2041, conformément à la directive européenne RED. D'ici là, une partie importante des installations aura substitué ses sources d'énergie fossile par des alternatives telles que l'hydrogène ou la bioénergie.

En 2023, les cinq hauts-fourneaux de Dunkerque et Fos-sur-Mer représentaient près de 40 % des émissions des 50 sites industriels les plus émetteurs en France.²¹⁷ Leur fermeture partielle et la réduction prévue des émissions rendront ce gisement marginal et inexploitable pour la

²¹⁶ Official Journal of the European Union

²¹⁷ RAC : 50 sites industriels les plus émetteurs de CO₂

production de carburant de synthèse d'ici 15 ans. De plus, les unités de sidérurgie, de métallurgie, tout comme celles de synthèse d'engrais, adopteront a priori l'hydrogène vert, dont l'usage ne génère pas d'émission directe de CO₂. En excluant ces installations, on dénombre 37 sites industriels émettant chacun plus de 150 kt de CO₂ par an. Dans notre étude on étudie les sources ayant justement un volume d'émission supérieur à 150 kt (ce qui donnerait au maximum 50 kt de SAF), les usines d'e-SAF devant être avoir un minimum de production pour être rentable. Ces installations représentent actuellement un gisement total de 15 Mt/an de CO₂. Environ 7 Mt/an, correspondant à leurs besoins énergétiques, pourraient être valorisées pour produire des carburants de synthèse si une transition vers des sources biogéniques est engagée d'ici 2041.

B. Gisement de CO₂ biogénique

Les émissions actuelles de CO₂ biogénique proviennent principalement des secteurs suivants :

- L'industrie papetière
- Les réseaux de chaleur et de froid
- La production d'électricité
- Le traitement et l'élimination des déchets (incinération et stockage)

D'ici 2050, d'autres sources viendront s'ajouter à ces émissions, notamment la méthanisation et la pyrogazéification. Toutefois, pour justifier la mise en place d'une unité de production d'e-SAF, qui nécessite des infrastructures logistiques lourdes, un volume minimal de CO₂ est requis. Ce critère exclut de fait la majorité des unités de méthanisation et de pyrogazéification, souvent de petite taille.

Les installations de traitement de déchets sont également écartées : les déchets biologiques seront vraisemblablement orientés vers d'autres usages, et les déchets ménagers non organiques ne produiront pas de CO₂ biogénique.

L'industrie papetière, pour sa part, envisage de réduire sa consommation de bois-énergie en électrifiant ses besoins en chaleur. En 2021, elle a émis 2 Mt de CO₂ biogénique sur 82 usines.²¹⁸ La majorité des unités émettent donc individuellement moins de 150 kt de CO₂ par an. En l'absence de données précises, on peut estimer qu'un maximum d'environ 1 Mt CO₂, réparti sur un plus 6 sites émettant plus de 150 kt de CO₂/an, pourrait être capté pour produire des e-SAF.

Concernant les chaudières biomasse, le total des émissions peut être évalué à environ 5 Mt de CO₂/an²¹⁹ pour 145 unités.²²⁰ Parmi celles-ci, seules 14 ont une puissance supérieure à 10 MW.²²¹ Pour dimensionner une usine d'e-SAF, il faudrait une puissance proche de 100 MW, (le projet Désir d'e-SAF transforme le CO₂ d'une chaudière de 180 MW qui émet environ 300 kt de CO₂). On peut donc estimer, sans données précises, qu'un maximum d'environ 2 Mt de CO₂, réparti sur une dizaine de sites, pourrait être valorisé en e-SAF.

²¹⁸ [ADEME](#)

²¹⁹ Scénario B ici : [Club CO₂](#)

²²⁰ [Bilan chaufferies biomasse](#)

²²¹ [Bilan chaufferies biomasse](#)

C. Synthèse des gisements de CO₂ mobilisables

En additionnant les gisements de CO₂ biogénique mobilisables à moyen terme, on obtient un volume total d'environ 10 Mt de CO₂ par an, pouvant être capté et valorisé via des procédés de type CCU pour la production d'e-SAF. Ce volume est cohérent avec les projections de l'ADEME dans les scénarios S2 et S3 de l'étude Transitions 2050, qui anticipent entre 11 et 16 Mt de CO₂ biogénique émis par des installations dépassant les 200 kt annuels à l'horizon 2050. La valorisation de ces 10 Mt de CO₂, pour produire 3,3 Mt d'e-SAF, requiert de l'ordre de 100 TWh d'électricité.²²²

Au-delà de ces sources biogéniques, le captage de CO₂ atmosphérique (DAC) restera également mobilisable après 2041 pour la fabrication d'e-SAF. Les progrès attendus dans les technologies de captage direct pourraient permettre de valoriser ce gisement à un coût plus compétitif, avec une consommation électrique comparable à celle des systèmes e-SAF CCU prévus pour les années 2030. Ainsi, les ressources en CO₂ ne semblent pas constituer un facteur limitant, puisque la filière e-SAF DAC pourra exploiter un gisement illimité de CO₂ atmosphérique, moyennant une dépense électrique légèrement supérieure à celle du CCU.²²³

²²² En considérant 30 TWh/Mt e-SAF avec 3 tCO₂/t e-SAF

²²³ En considérant de l'ordre de 2 MWh d'électricité par tonne de CO₂ captée, soit un peu plus de 6 MWh par tonne d'e-SAF produit, cela alourdit la consommation pour la production des e-SAF d'environ 25% par rapport à un procédé sans DAC

III. Gisements en biomasse pour les biocarburants

Pour parler des volumes de biomasse, on utilise classiquement l'unité millions de tonnes de matière sèche (Mt MS). En France, environ 335 Mt MS de biomasse sont prélevées chaque année dont seulement 18 Mt MS sert à nourrir la population.²²⁴ Environ un tiers de cette biomasse (105 Mt MS) est retournée aux sols afin de préserver leur fertilité. Parmi le reste, en mettant de côté les exportations, 36 Mt MS sont utilisées à des fins énergétiques, tandis que 9 Mt MS, essentiellement importée, est destinée à la production de biomatériaux. Le diagramme de Sankey ci-dessous permet de visualiser la répartition de ces flux.

Cartographie des flux actuels de biomasse (en MtMS)

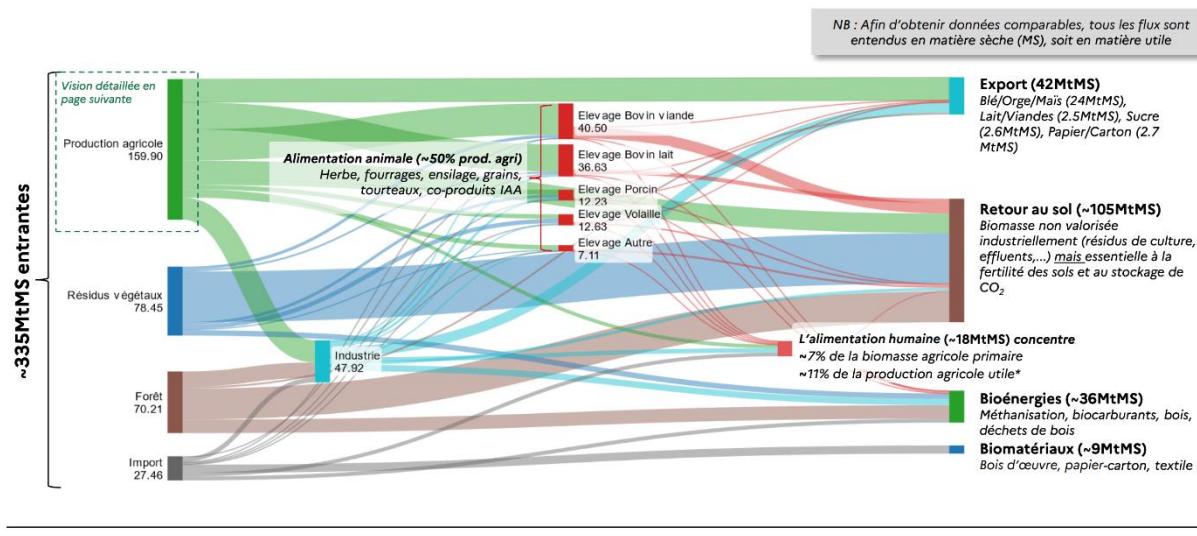


Figure 5.1 : Diagramme de Sankey des flux de biomasse en France (SGPE - Bouclage biomasse : enjeux et orientations - Juillet 2024)

La consommation de bioénergie, c'est-à-dire l'énergie produite à partir de biomasse, représentait environ 180 TWh dans le mix énergétique français en 2024, répartis entre le bois-énergie (plus de 120 TWh), le biogaz (12 TWh) et les biocarburants (environ 42 TWh).²²⁵ Ce chiffre appelé à croître dans tous les scénarios de décarbonation à l'horizon 2050, jusqu'à 244 TWh selon le PTEF (+35 %), et même 382 TWh dans le scénario ADEME S3 (+115 %), une évolution largement portée par la montée en puissance de la méthanisation de la biomasse agricole.²²⁶

Dans les paragraphes suivants, l'estimation de volumes crédibles de biomasse en France, est basée sur plusieurs rapports de référence, notamment :

- La scénarisation de l'ADEME dans son rapport "Transition(s) 2050", où les enjeux liés aux bioénergies et aux biocarburants sont analysés en détail.

²²⁴ [Info.gouv](#)

²²⁵ [Statistiques développement durable](#)

²²⁶ Comprendre 2050

- Le travail approfondi de France Stratégie intitulé “ Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel ?”, avec une orientation plus marquée vers les préoccupations agricoles et écosystémiques.
- Le rapport “Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère” (2024) du Shift Project, notamment à travers son scénario misant sur une augmentation des cultures à des fins énergétiques
- L’approche plus optimiste de Solagro, qui mobilise ses scénarios Afterres 2050 pour estimer les disponibilités en biomasse.
- La présentation du SGPE (Secrétariat général à la planification écologique) sur le “Bouclage biomasse : enjeux et orientations”.
- La Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 3) qui planifie la réduction des émissions du pays pour respecter l’accord de Paris et atteindre la neutralité carbone à l’horizon 2050

A. Matière première pour les voies HEFA et AtJ

1) Biocarburants première génération

En France, la consommation de biocarburants de première génération s’élevait à 40 TWh (biodiesel et bioéthanol) en 2024.²²⁷ Comme mentionné au début de cette partie 4, la limite de production de biocarburants issus de cultures alimentaires, fixée à 7 % par l’article 26 de la directive RED, est déjà atteinte avec ce niveau de consommation. Par ailleurs, la moitié de ces biocarburants (19 TWh) est importée ou produite à partir de matières premières importées d’Europe ou d’autres régions du monde.²²⁸ Le principal enjeu est donc de produire sur le sol français l’intégralité de la matière première nécessaire à la fabrication des biocarburants, qu’il s’agisse de la filière biodiesel ou de la filière bioéthanol. Ce gisement n’est pas compatible avec la réglementation ReFuelEU Aviation, car il entre en concurrence avec l’alimentation humaine et animale. Destiné au parc automobile, qui devrait en avoir besoin jusqu’en 2050, ce carburant ne pourra donc pas être mobilisé par le secteur aérien.

2) Huiles usagées

La seule matière première utilisable pour la production, en dehors des matières lignocellulosiques, est l’huile usagée. Aujourd’hui, la valorisation énergétique des huiles usagées sous forme de carburant liquide est estimée à environ 2 TWh.²²⁹ La consommation d’huiles en France ne devrait pas augmenter de manière significative d’ici 2050, mais une optimisation des réseaux de collecte reste envisageable. Actuellement, environ 0,25 Mt d’huiles usagées sont collectées chaque année.²³⁰ En supposant un maximum de 0,5 Mt d’huiles usagées et de graisses animales valorisables, cela correspondrait à près de 5 TWh de biocarburants, une hypothèse très optimiste au regard de l’estimation de 1 TWh proposée par Solagro et de 2,5 TWh dans la Feuille de route du GIFAS.

²²⁷ Transitions 2050 p.477 + slides SGPE

²²⁸ Transitions 2050 p.477 + slides SGPE

²²⁹ SGPE / Transitions 2050 ADEME

²³⁰ Ecologie.gouv

B. Matière première pour les voies BtL et PBtL

Pour estimer les volumes envisageables de biomasse lignocellulosique, on analyse quatre catégories de matières premières, présentées dans l'ordre suivant, en commençant par celles autorisées dans la directive RED actuelle :

- Résidus agricoles
- CIVE (cultures intermédiaires à vocation énergétique)
- Cultures lignocellulosique dédiées
- Biomasse forestière
- Déchets bois

1) Résidus agricoles

Différentes études sur le potentiel des résidus agricoles en France (Solagro, France Stratégie, ADEME et ONRB) fournissent des fourchettes très hétérogènes, comme le montrent les comparaisons présentées en annexe du rapport Solagro, ainsi qu'en annexe du rapport *Utilisation des résidus de culture en méthanisation* de l'ADEME.²³¹ Une première synthèse a permis d'évaluer entre 6 et 14 MtMS de résidus agricoles mobilisables pour la méthanisation.

La majorité de ce volume devrait être utilisée pour la méthanisation. En effet, avec près de 2000 installations recensées en 2023, produisant environ 24 TWh de biogaz,²³² la méthanisation se développe intensément en France, et ce chiffre pourrait potentiellement doubler au cours de la prochaine décennie. Bien que les installations de biogaz utilisent des effluents d'élevage et des résidus organiques, elles mobilisent aussi des matières lignocellulosiques, créant une concurrence avec la filière des biocarburants. La multiplication des méthaniseurs réduit la biomasse disponible localement, obligeant les projets de biocarburants à élargir leur rayon de collecte et à supporter des coûts plus élevés.

Cette concurrence est particulièrement forte sur les résidus agricoles et les CIVE, car les filières biogaz permettent un retour au sol des nutriments, contrairement aux filières biocarburants. Ces deux matières premières sont directement prélevées sur des terres arables qui ont besoin de ces nutriments pour le prochain cycle de culture. Par conséquent, la méthanisation sera prioritaire pour ces ressources.

Dans une hypothèse très optimiste pour les filières biocarburants, on peut considérer que la moitié du volume mobilisable pour la méthanisation pourrait être redirigée vers la production de biocarburants. Cela donnerait une fourchette de 3 à 7 MtMS pour les résidus agricoles. Cependant, pour préserver la fertilité des sols, il est recommandé de prélever trois fois moins de matière si elle est transformée en biocarburant plutôt qu'en biogaz, en laissant les deux tiers sur place (cf partie 2). Après cet ajustement, la fourchette de résidus agricoles mobilisables pour la filière biocarburant se réduit donc à 1-3 MtMS. Avec un rendement massique de 20 % pour la filière BtL, cela correspond à une production énergétique estimée entre 2,5 et 7,5 TWh. Cette estimation est cohérente avec les données de la SNBC 3 qui évoquent 2,2 Mt MS de résidus agricoles.

²³¹ ADEME

²³² SDES

Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE)

Les CIVE pourraient se développer significativement sur le territoire français grâce à leurs avantages agronomiques et écologiques, particulièrement intéressants pour relever les défis des secteurs agricole et énergétique. Les estimations les plus optimistes, comme celle de Solagro, indiquent que 20 MtMS de CIVE pourraient être valorisées en méthanisation à l'horizon 2050, contre seulement 1,5 MtMS actuellement. Des estimations plus prudentes, comme le scénario A de France Stratégie, proposent un potentiel de 12 MtMS.

En considérant un rendement optimiste de 5 tMS/ha, la surface des parcelles intégrant les CIVE dans leur rotation agricole représenterait alors plus de 10% de la SAU pour atteindre ces potentiels. Cependant, comme la valorisation des CIVE en biocarburant n'est pas intéressante d'un point de vue agronomique, nous nous limiterons à une surface déjà ambitieuse de 1 % de la SAU, ce qui reste supérieur à la surface actuelle de l'ensemble des CIVE. La production équivalente mobilisable pour la méthanisation serait alors inférieure à 2 MtMS. Comme pour les résidus agricoles, ce chiffre doit être divisé par trois pour obtenir une estimation du volume valorisable en biocarburants par rapport à un prélèvement destiné à la méthanisation, soit environ 0,7 MtMS, correspondant à 1,7 TWh de biocarburant.

Cultures dédiées de biomasse lignocellulosique

L'estimation de ce potentiel repose sur une synthèse des données du Shift Project et de l'ADEME :

- Le Shift Project envisage l'implantation de 1,5 million d'hectares de miscanthus, soit 5,5 % de la Surface Agricole Utile (SAU).
- L'ADEME, dans son scénario très optimiste S3, identifie 1,1 million d'hectares disponibles, soit environ 4 % de la SAU.

Nous retenons ici une fourchette comprise entre 3 % et 5 % de la SAU, avec un rendement moyen estimé à 15 tonnes de matière sèche (tMS) par hectare.²³³ Cela nous donne un potentiel de valorisation par la voie BtL, avec un rendement massique de 20 %, compris entre 28 et 48 TWh. Ce potentiel important reste difficile à mettre en œuvre, car il nécessite de libérer des surfaces agricoles actuellement utilisées pour des cultures alimentaires. Le principal levier pour y parvenir consiste à dégager des terres aujourd'hui consacrées aux animaux ou à leur alimentation et, par conséquent, à réduire la consommation de viande au sein de la population française, un sujet controversé dans l'opinion publique. Cette production, cultivée sur des surfaces en concurrence avec l'alimentation, ne répond pas totalement aux critères de ReFuelEU Aviation ni à l'annexe IX de la directive RED, qui considère comme éligibles les sols fortement dégradés ou pollués, présentant une faible valeur en biodiversité, et ayant été durablement salinisés, gravement érodés ou fortement appauvris en matière organique.²³⁴ Un calcul rapide, basé sur les données Géorisques des sites et sols potentiellement pollués, donne une estimation inférieure à 2 000 hectares de sols dégradés en France, soit environ 2 % de la surface potentielle estimée pour cultiver de la biomasse lignocellulosique.²³⁵ Ainsi, seules 2 Mt MS/an pourront être valorisées en bioSAF en 2050.

²³³ Hypothèse moyenne tirée de cet article : [MDPI](#)

²³⁴ [Official Journal of the European Union](#)

²³⁵ [Georisques.gouv](#)

Biomasse forestière

En regroupant les parcelles forestières privées et en gérant différemment les forêts françaises, l'IGN et le FCBA prévoient de pouvoir récolter davantage de bois dans les décennies à venir.²³⁶ Cependant, la production biologique a reculé de 0,5 % par an entre 2013 et 2023,²³⁷ ce qui signifie que moins de bois est produit chaque année. Parallèlement, la mortalité des arbres, qui a déjà augmenté de 125 % au cours de la dernière décennie,²³⁸ devrait encore progresser, en grande partie à cause des conséquences directes ou indirectes du changement climatique. Le flux de bois est resté positif entre les périodes 2005-2013 et 2015-2023, c'est-à-dire que la forêt française produit plus de bois qu'elle n'en perd à cause de la mortalité et des prélevements. Cependant, ce flux a été divisé par deux entre ces deux périodes, ce qui signifie que deux fois moins de bois a été "gagné" par la forêt. Il faut noter que si moins de bois est produit, moins de carbone est séquestré, ce qui met en péril les objectifs nationaux de séquestration. Une séquestration plus faible implique une moindre compensation, donc une nécessité accrue de réduire les émissions.

Le secteur UTCATF (Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêt), appelé AFOLU (Agriculture, Forêt et Autres Utilisations des Terres) dans les rapports du GIEC, est le seul en France à présenter un bilan carbone net négatif. Il reflète la capacité des forêts à séquestrer le carbone grâce à la photosynthèse. Chaque année, ce stockage est intégré dans les inventaires nationaux. On observe d'ailleurs dans ses chiffres le phénomène évoqué ci-dessus : ce bilan était en hausse jusqu'à la fin des années 2000, avec un pic à -45 Mt CO₂e en 2008. Cette valeur a ensuite diminué jusqu'à -35 Mt CO₂e en 2015, avant de chuter fortement pour atteindre -18,5 Mt CO₂e en 2022.²³⁹

Lorsque des arbres sont abattus et que le carbone stocké est libéré dans l'atmosphère, par exemple lors de l'utilisation en bioSAF, une émission différée vient compenser le carbone précédemment enregistré dans le bilan UTCATF/AFOLU d'une année antérieure. Cette dynamique rend la comptabilité carbone forestière particulièrement complexe. Le cycle de croissance des arbres s'étend sur plusieurs décennies, tandis que les émissions liées à la coupe se produisent immédiatement. À l'inverse, la biomasse annuelle est moins problématique : son cycle carbone est rapide, ce qui limite les émissions différées et contribue à stabiliser le stock de carbone.

Au vu des éléments présentés ci-dessus, nous faisons l'hypothèse que le volume de biomasse forestière consacré à la production d'énergie en France restera globalement stable dans les décennies à venir, pour deux raisons principales :

- Ne pas se réjouir de l'augmentation du bois mort : une hausse des volumes liés à la mortalité des arbres ne doit pas être considérée comme une ressource supplémentaire, mais comme un signal alarmant de dégradation des forêts et de déséquilibre du cycle du carbone.
- Préserver la ressource pour d'autres usages stratégiques : il est essentiel de réservier une part de la ressource forestière pour le stockage du carbone, le bois d'œuvre et le bois d'industrie, dont les demandes sont en forte croissance. Dans la construction, la consommation de bois pour les charpentes pourrait tripler entre

²³⁶ [IGN](#)

²³⁷ [Observatoire.foret.gouv](#)

²³⁸ Inventaire forestier IGN – édition 2025

²³⁹ [Statistiques développement durable](#)

2015 et 2035.²⁴⁰ Les secteurs de l'ameublement et de l'emballage (papier, carton, bioplastiques) connaissent également une hausse marquée de la demande, bien qu'ils ne représentent encore que moins de 15 % des volumes prélevés. Ces usages sont prioritaires par rapport au bois-énergie.

Aujourd'hui, environ 40 millions de mètres cubes de bois et de résidus de l'industrie du bois, soit environ 20 millions de tonnes de matière sèche, sont consacrés à la production d'énergie en France.²⁴¹ Près de la moitié de ce bois-énergie provient de l'auto-exploitation de bois-bûches, qui constitue la principale source de chauffage pour plus de 10 % des 30 millions de foyers français.²⁴² Cette autoconsommation représente plus de 10 Mt MS par an et n'est pas certifiée conforme à RED. L'autre moitié est certifiée RED et correspond à la fraction susceptible d'être utilisée par l'aviation selon la réglementation ReFuel EU Aviation. Son utilisation actuelle se répartit entre deux grands usages :

- Environ 7,5 Mt MS sont consacrées à la production de chaleur commerciale, notamment sous forme de granulés ou de plaquettes forestières, via les réseaux de chaleur.
- Près de 2,5 Mt MS servent à la production d'électricité, notamment dans des régions non connectées au réseau national, comme certains territoires ou départements d'outre-mer.

Ainsi, nous estimons qu'environ 10 millions de tonnes de matière sèche par an de biomasse forestière pourront être mobilisées jusqu'en 2050, à répartir entre la production de chaleur, l'électricité et la production de biocarburants. De nombreux projets industriels (sidérurgie, métallurgie, cimenteries, pétrochimie...) devront passer d'une chaleur "fossile" à une chaleur électrique ou biogénique. La demande en chaleur industrielle ne devrait donc pas diminuer d'ici 2050. L'électricité n'est pas prioritaire pour la valorisation énergétique de la biomasse, même si elle peut contribuer à compenser l'intermittence de l'éolien et du solaire, car sa production reste modulable selon les besoins.

La part maximale des 10 Mt MS qui peut être valorisée en biocarburant correspond donc à la fraction dédiée à l'électricité, qui représente aujourd'hui un quart de ces 10 Mt MS. Nous retenons une fourchette entre 2 et 3 Mt MS pour le potentiel de biocarburant issu de la forêt, ce qui constitue une part avantageuse pour la filière biocarburant. À titre de comparaison, la SNBC considère que seulement 1 % de la biomasse forestière récoltée (soit 0,3 Mt MS) sera valorisée en biocarburant.

2) Déchets de bois

Nous les séparons de la biomasse forestière dans ce cas d'étude sur la France car nous avons plus de visibilité sur leur potentiel : les déchets de bois devraient constituer entre 7 et 9 Mt MS par an d'ici 2050.²⁴³ Pour répartir ce volume, nous nous basons sur la répartition de la SNBC 3, qui alloue 30 % à la valorisation énergétique. Puis, comme pour la biomasse forestière, nous prenons un quart de ce volume pour les biocarburants, soit moins de 1 Mt MS. Il est important de souligner que la valorisation de ces déchets, divers en essences et traitements, engendre des difficultés techniques, notamment au niveau de l'étape de pyrolyse.

²⁴⁰ [Codifab](#)

²⁴¹ [Stratégie.gouv](#)

²⁴² SDES

²⁴³ [Fibois](#)

C. Synthèse

Toutes les estimations présentées dans cette partie sont optimistes et ne tiennent que partiellement en compte les effets difficilement estimables du changement climatique sur les végétaux.

Matière première	Ressources dédiées à l'énergie 2025	Potentiel maximal biocarburant en 2050	Potentiel mobilisable pour la production de SAF en 2050	Tendance avec transition agricole ²⁴⁴	Tendance changement climatique
Culture dédiés biocarburant 1G		42 TWh	0 TWh		
Huiles usagées et graisses animales	0,3 Mt	5 TWh	0,5 Mt		
Résidus agricoles	<1 Mt MS	7,5 TWh	3 Mt MS	↘ Plus de matière organique laissée sur place	↘ Baisse productivité moyenne
CIVE lignocellulosique	0,7 Mt MS en méthanisation ²⁴⁵	0,7 TWh	1 Mt MS	↗ Couverture du sol et fertilisation	↘ Disponibilités en eau
Cultures dédiées lignocellulosique	<1 Mt MS	38 TWh dont 5 TWh compatibles avec RED	2 Mt MS	↗ Libération surface avec la baisse des cheptels	↘ Disponibilités en eau
Biomasse forestière Compatible RED II	20 Mt MS pour l'ensemble du bois-énergie ²⁴⁶	7,5 TWh	3 Mt MS	↗ Haies agricoles et reforestation	↗ Augmentation mortalité des arbres

²⁴⁴ Tendances tirées du rapport agriculture du Shift Project 2024

²⁴⁵ SNBC 3

²⁴⁶ Agreste 2023 - Enquête annuelle dans les branches exploitation forestière et scierie : L'ensemble du bois-énergie compatible avec RED prises en compte ici

Matière première	Ressources dédiées à l'énergie 2025	Potentiel maximal biocarburant en 2050	Potentiel mobilisable pour la production de SAF en 2050	Tendance avec transition agricole ²⁴⁴	Tendance changement climatique
Hors bois-énergie					↓ Production biologique
Déchets de bois	2,3 Mt MS	2 TWh	1 Mt MS		

Tableau 5.2 : Synthèse des estimations des matières premières mobilisables pour la valorisation en biocarburants

Au total, nous considérons une quantité totale de matière lignocellulosique valorisable en biocarburant de 10 Mt MS, cohérente avec les estimations d'autres acteurs (SNBC, ADEME, GIFAS).

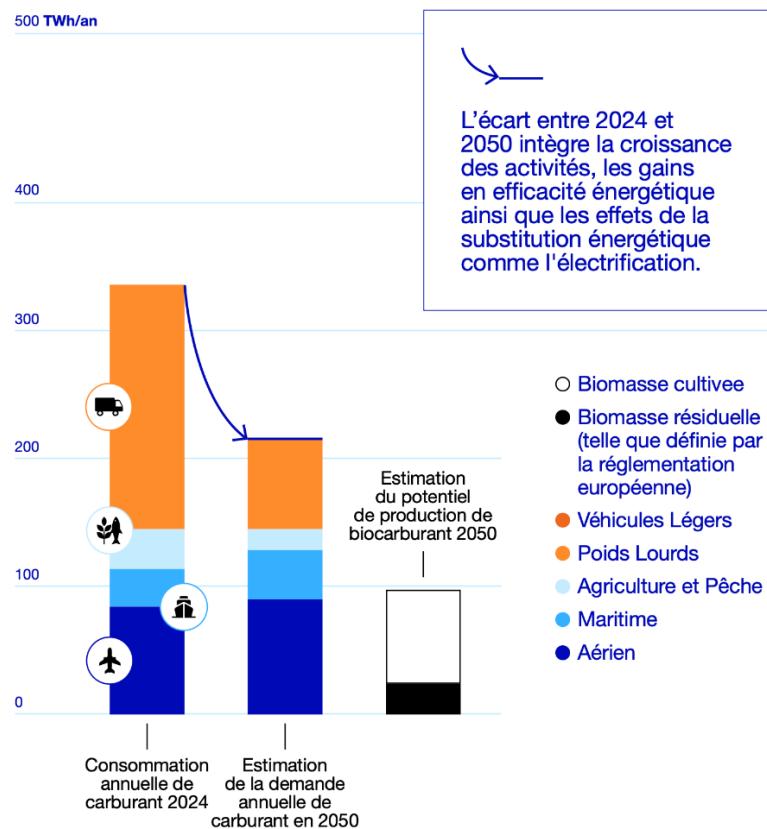


Figure 5.2 : Comparaison de la demande en carburant (secteurs aérien, maritime, routier, agricole) et des quantités d'énergie valorisables à partir de la biomasse à l'échelle française

IV. Capacités de production ou d'importation d'e-SAF

Dans cette partie, nous essayons d'évaluer le potentiel d'électricité bas-carbone qui pourrait être alloué à la production de SAF en France. D'après les scénarios de la feuille de route française co-publiée par le GIFAS et la FNAM, la demande en électricité pour le secteur aérien est estimée à 91 TWh.²⁴⁷

A. Comparaison avec les scénarios de 2021 de RTE

Dans le scénario de référence du rapport *Futurs énergétiques 2050*, publié par RTE fin 2021, la consommation totale d'électricité en France est estimée à 645 TWh en 2050, tous secteurs confondus. Cela représente une hausse d'environ 43 % par rapport au niveau actuel, estimé à environ 450 TWh en 2025. Dans ces projections, près d'un cinquième de la consommation totale d'électricité est allouée aux transports, selon les variations considérées par RTE :

- Trajectoire de référence : 645 TWh tous secteurs confondus, dont 99 TWh pour l'électrification des transports et 50 TWh pour la production d'hydrogène (dont 18,5 TWh vont ensuite aux transports). Total donc de 118 TWh d'électricité pour les transports (18% de la production française en 2050)
- Variante sobriété : 555 TWh tous secteurs confondus, dont 77 TWh pour l'électrification des transports et 47 TWh pour la production d'hydrogène (dont 18,5 TWh vont ensuite aux transports). Total de 96 TWh d'électricité pour les transports (17% de la production française en 2050)
- Réindustrialisation profonde : 752 TWh tous secteurs confondus, dont 99 TWh pour l'électrification des transports et 87 TWh pour la production d'hydrogène (dont 18,5 TWh vont ensuite aux transports). Total de 118 TWh d'électricité pour les transports (16% de la production française en 2050)

Dans *Futurs énergétiques 2050*, RTE n'alloue pas d'électricité aux SAF, qui sont tout simplement absents de la trajectoire. Le rapport a été publié en 2021 et lors des phases de consultations en 2019-2020, le secteur aérien (et idem pour le secteur maritime) n'a pas demandé à intégrer d'e-fuels, la stratégie de ces secteurs étant alors de miser essentiellement sur des biocarburants.

RTE a depuis sorti son *Bilan prévisionnel* à horizon 2035, dans lequel 15 TWh d'électricité sont consacrés à l'aérien. Ce besoin a été calculé pour respecter le sous-mandat e-SAF de la réglementation ReFuel EU (5% d'e-SAF pour les vols au départ de l'Union Européenne, à partir de 2035), dans l'hypothèse d'un trafic en légère croissance et donc d'une consommation totale de carburants à peu près stable.²⁴⁸

Dans le cas où la production électrique ne dépasserait pas les niveaux anticipés par RTE dans son rapport de 2021, cela demanderait de prendre ces 15 TWh à d'autres secteurs. Cela correspondrait alors par exemple à la consommation annuelle de près de 7 millions de voitures

²⁴⁷ Moyenne des 3 scénarios de la feuille de route : 56,9 TWh (11,4 domestique + 45,5 départs à l'international), 112,9 TWh (20,5 domestique + 92,4 départs à l'international) et 103,0 TWh (19,1 domestique + 83,9 départs à l'international), pour uniquement les carburants du secteur aérien, sans compter les co-produits

²⁴⁸ 5% d'environ 7 Mt, à un peu plus de 40 TWh/Mt d'e-SAF, co-produits compris, requiert effectivement de l'ordre de 15 TWh

électriques.²⁴⁹ Pour monter ensuite à 91 TWh, cela demanderait de multiplier ce montant par 6 en l'espace de 15 ans. L'aérien consommerait alors plus d'électricité que l'ensemble du parc de voitures, alors qu'il s'agit actuellement d'un plus petit secteur, consommant 3 à 4 fois moins de pétrole que l'automobile.

B. Produire plus d'électricité en France ?

Une première possibilité est de considérer une plus grande production d'électricité en France, pour alimenter ces usages qui n'avaient pas été comptabilisés lors de l'exercice de 2021. En misant sur une accélération plus forte des filières renouvelables et nucléaires, et dans l'hypothèse d'un prolongement au-delà de 60 ans des centrales nucléaires vieillissantes, il serait possible de produire davantage d'électricité sur le territoire français.

Cependant les ordres de grandeur peuvent vite devenir impressionnantes : pour ajouter 91 TWh d'électricité, sans entrer en concurrence avec la consommation prévue pour les autres secteurs, cela correspond à près de 15 réacteurs nucléaires actuels, produisant chacun de l'ordre de 6-7 TWh par an.

Un montant auquel il faut rajouter les besoins des autres secteurs qui soit n'avaient pas non plus été comptés dans la publication RTE de 2021, soit ont depuis revu à la hausse l'estimation de leurs besoins. On peut alors citer le maritime, dans la même situation que l'aérien vis-à-vis des e-carburants, ou le numérique, qui avec l'essor massif de l'IA revoit fortement à la hausse ses estimations de consommation électrique. Ainsi, si on accorde à l'aérien cette mise à jour des scénarios pour y intégrer plus d'électricité, il faut également faire l'exercice pour les autres pans de l'économie, et alors l'ordre de grandeur du besoin de production en France en 2050 avoisinerait probablement les 800 ou 1000 TWh d'électricité.

C. Reposer sur des importations ?

Une autre possibilité consisterait à importer des e-SAF depuis d'autres régions du monde. Une option techniquement possible, les e-SAF se transportant aussi bien que les carburants actuels à base de pétrole, et potentiellement intéressante sur le plan économique, d'autres régions du monde (Maroc, Arabie Saoudite, Chili, Australie, etc.) pouvant être à même de produire des e-SAF pour un coût de revient plus faible qu'en France, principalement grâce une électricité solaire ou éolienne très compétitive. Cependant, cela soulève d'importantes questions :

- En termes de **souveraineté énergétique** : il n'y aurait alors pas de gain par rapport au pétrole actuellement importé, alors qu'il s'agissait précisément d'un des intérêts des SAF, que de pouvoir être produits localement
- En termes de **balance commerciale** : les SAF, et plus particulièrement les e-SAF, coûtant sensiblement plus cher que le kérosène fossile, l'importation d'une même quantité de carburants ferait grandement croître le déficit commercial de la France
- En termes de **concurrence pour accéder à ces carburants** : si la France se met à recourir massivement aux importations, malgré un territoire avantageux en termes de potentiel renouvelable et le recours à l'électricité nucléaire, alors que penser de la situation d'autres pays, qui chercheront aussi à s'approvisionner ?

²⁴⁹ Hypothèse d'une consommation well-to-wheel en 2050 de 15 kWh/100km et de 15 000 km/an. 1 million de voitures électriques consommerait ainsi 2,25 TWh/an

V. Contraintes de production et projets en cours

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux unités de transformation afin de mieux comprendre les contraintes et les risques qui leur sont associés. Nous évoquerons les nombreux projets de SAF en cours de structuration, même s'ils ne sont pas tous amenés à se concrétiser : sur 165 projets annoncés par le secteur au cours des douze dernières années, seuls 36 ont effectivement été réalisés.²⁵⁰

A. e-SAF

Depuis les premières annonces d'usines d'e-SAF après la crise du COVID, la voie Fischer-Tropsch (FT) semblait être privilégiée par rapport à la voie Methanol-to-Jet (MtJ). Cette préférence s'expliquait à l'époque par deux arguments principaux : d'une part, la certification ASTM déjà obtenue pour la filière FT, et d'autre part, une maturité technologique perçue comme plus avancée que celle des autres procédés. Ces deux avantages sont désormais relativisés, tandis que les atouts de la voie MtJ s'affirment. Celle-ci se distingue par son intérêt économique, grâce à la production intermédiaire de méthanol, commercialisable sur les marchés, et par sa flexibilité opérationnelle, la séparation en deux étapes permettant d'adapter la consommation électrique et de valoriser les périodes de faible coût ou de surplus d'énergie renouvelable.

Les projets en développement présentent de fortes similitudes, permettant de dresser le profil type d'un projet e-SAF de la prochaine décennie :

- Localisation : à proximité d'une source de CO₂ biogénique (ou appelée à le devenir d'ici 2041) et d'une ressource en eau suffisante et sécurisée. Théoriquement, ces installations devraient également être proches d'un site de production d'énergie renouvelable, mais elles sont raccordées au réseau électrique, peu carboné en France.
- Capacité typique : environ 80 000 tonnes d'e-SAF et 20 000 tonnes de naphta par an, soit une sélectivité annoncée de 80 %.
- Intrants principaux : de 200 000 à 300 000 tonnes de CO₂ et environ 3 TWh d'électricité (avec un besoin énergétique aux alentours de 35 MWh par tonne d'e-SAF produite).

²⁵⁰ [Reuters - Aviation Sustainability](#)

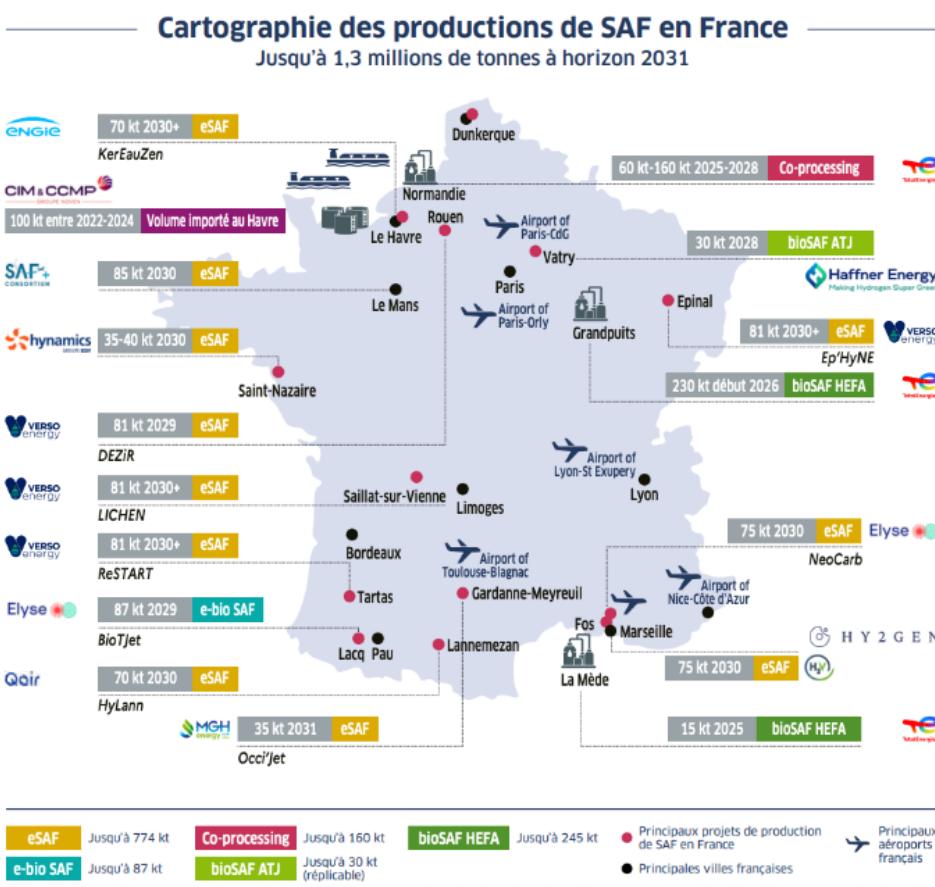


Figure 5.3 : Cartographie des productions de SAF en France (Contrat stratégique de filière 2024-2027 : Volet SAF)

Depuis le COVID, la France voit émerger plusieurs projets industriels de e-SAF, dont la cartographie tirée du rapport du Contrat stratégique de filière 2024-2027 SAF est présenté ci-contre :

- Le projet DéZIR, prévu pour 2029, prévoit la capture de 350 kt de CO₂ issues d'une chaudière biomasse pour produire 81 000 tonnes de e-SAF par la voie Methanol-to-Jet. Il nécessiterait 2,9 TWh d'électricité. L'ambition du porteur du projet, Verso Energy, est de dupliquer cette technologie à l'horizon 2030 à travers trois autres initiatives (ReSTart, Ephyne, et Lichen) exploitant le CO₂ biogénique issu de l'industrie du papier (production de cellulose, de papier recyclé et de pâte à papier).
- Le projet H4, prévu à Fos-sur-Mer pour 2029, s'appuie aussi sur la technologie MtJ pour produire 75 kt de kérosène synthétique par an en plus de 210 kt d'e-méthanol et 44 kt d'hydrogène. Il utilisera 240 kt de CO₂ captées dans la zone industrielle locale, et mobilisera environ 5,1 TWh d'électricité.
- Le projet KerEAUzen,²⁵¹ attendu pour 2027, vise une production ambitieuse de 80 kt de kérosène synthétique par an, à partir de CO₂ capté dans les industries du bassin de la Seine vers le Havre. Il prévoit de valoriser 250 kt de CO₂ biogénique via le procédé Fischer-Tropsch. Les besoins en ressources ne sont pas publiés.

²⁵¹ [Librairie ADEME](#)

- Le projet Take Kair²⁵² en Loire-Atlantique prévoit, d'ici 2030, une production annuelle de 37,5 kilotonnes de e-SAF-FT à partir de CO₂ biogénique capté dans une cimenterie voisine. Cette dernière, l'une des plus émettrices de France avec 800 000 tonnes de CO₂ par an, s'inscrit dans une dynamique de transition : elle sera alimentée en chaleur par une chaufferie biomasse et dotée d'un système de traçabilité du carbone biogénique. Le CO₂ issu du processus industriel devra quant à lui être enfoui. Le projet nécessite plus de 1,7 TWh/an d'électricité bas-carbone ainsi que 220 000 m³/an d'eau pour l'électrolyse, auxquels s'ajoutent 1,6 million de m³/an d'eau pour le refroidissement.

B. HEFA

La voie HEFA est déjà mature sur le plan industriel et tous les sites de production de SAF actuellement opérationnels en Europe reposent sur cette technologie.

En France, au moins cinq sites sont prévus d'ici 2030 :

- Esso - Port-Jérôme : 160 kt de carburants, dont un maximum de 144 kt de SAF
- Total - La Mède : 500 kt de SAF prévues en 2028
- Total - Gonfreville : 40 kt de SAF
- Total - Grandpuits : 285 kt de SAF prévues en 2027 (suspendu)
- Haffner - Paris-Vatry : entre 30 kt et 90 kt de SAF en 2030

Cela porte le total à un peu plus d'un million de tonnes de SAF via la voie HEFA à l'horizon 2030, soit environ 15 % de la consommation actuelle de kérosène en France.

Pour produire le volume de kérosène HEFA annoncé d'ici 2030, et en supposant un rendement de 85 % et une sélectivité de 60 % en kérosène,²⁵³ il faudrait environ 2 millions de tonnes d'huile, c'est-à-dire la totalité des ressources françaises (cultures dédiées comprises). Le gisement disponible pour la voie HEFA serait ainsi saturé à l'horizon 2030 par les cinq unités déjà prévues, rendant inutile la construction de nouvelles usines sur le territoire hexagonal, sauf à considérer des importations d'huile. Un enjeu majeur pour les prochaines années sera d'abord de garantir la certification des matières premières utilisées, puis de veiller à ce qu'une part significative de ces ressources soit produite localement.

Les cinq unités de production annoncées en France sont assez hétérogènes en termes de taille, allant d'un facteur 1 à 10. Il s'agit en général de raffineries existantes reconvertis pour produire des SAF à partir d'huiles. On observe en moyenne un délai de 3 à 5 ans entre l'annonce d'un projet et sa mise en service opérationnelle. Les échecs ou retards dans la construction relèvent davantage de choix stratégiques et économiques que de problèmes de faisabilité technique, comme en témoigne l'exemple du projet de Grandpuits, récemment suspendu.

C. AtJ

Peu de projets AtJ sont aujourd'hui annoncés en Europe, cette filière étant jugée moins performante, tant en rendement énergétique qu'en réduction du CO₂, que les voies BtL et

²⁵² Take Kair concertation

²⁵³ cf tableau de synthèse partie 1

PBtL, qui lui sont préférées pour la valorisation des mêmes matières premières. De plus, la conversion du bioéthanol en SAF demeure technologiquement immature, et de nombreux projets ont échoué au cours des quinze dernières années.²⁵⁴ Cette option pourrait néanmoins émerger à l'horizon 2040, pour réorienter le bioéthanol routier vers le bioSAF.

En France, on compte aujourd'hui une quinzaine de sites de production de bioéthanol, surtout pour les carburants routiers.²⁵⁵ Il s'agit généralement d'unités de taille moyenne, produisant entre 50 kt et 100 kt par an, à partir de 200 kt à 300 kt de cultures spécifiques (maïs, blé, betterave), collectées dans un rayon inférieur à 100 km. Ces raffineries produisent un volume équivalent à la totalité du gisement des ressources nationales. Une partie de la matière première étant actuellement importée, l'enjeu principal consiste à remplacer ces importations par des productions locales.

D. BtL et PBtL

Le procédé Fischer-Tropsch, qui transforme le syngas en kérosène, est aujourd'hui bien maîtrisé et déjà commercialisé, alors que la gazéification de biomasse en syngas reste un défi technique majeur. Les projets existants ou annoncés restent limités : moins d'une dizaine à l'échelle européenne avec des capacités de production variant généralement entre 50 et 150 kt de SAF par an. Selon l'Agence internationale de l'Énergie, il est optimiste de considérer que 50 % de ces projets aboutissent effectivement.²⁵⁶

Selon les annonces analysées, les unités de production FT seraient de taille similaire à celles de bioéthanol, avec un volume de biomasse entrante compris entre 200 et 500 kt/an. Cette taille est cohérente avec les rayons de collecte envisagés entre 100 et 400 km, indiquant que ces raffineries doivent être situées dans des régions présentant une certaine densité agricole et/ou forestière. Au-delà d'un rayon de collecte de 500 km, les calculs d'émissions changent selon la directive RED,²⁵⁷ rendant les bilans carbone et économiques moins favorables.

Le projet E-Cho d'Elyse Energy à Lacq, annoncé en 2023 avec un objectif de production de 87 kt de SAF dès 2028²⁵⁸ est le seul projet français qui utilise la matière lignocellulosique pour la production de SAF. Le procédé retenu est la voie PBtL, qui permet de valoriser l'ensemble de la biomasse grâce à l'apport d'hydrogène, une approche intéressante en France où l'on bénéficie d'électricité bas-carbone, d'eau et, dans une certaine mesure, de bois géré durablement.

Cette unité produira 72 kt d'hydrogène par an, à partir de 4,6 millions de m³ d'eau et d'une puissance électrique de 460 MW, soit une consommation d'environ 3,5 TWh par an. Cette consommation électrique équivaut à 58 kWh par kilogramme d'hydrogène, ce qui est réaliste. La production des 87 kt de SAF nécessite 70% de la production annuelle de cette unité, donc on peut estimer que la demande en électricité dépasserait 2,5 TWh/an.

Il est prévu une consommation annuelle de 300 kt de bois sec, soit environ 500 kt de bois brut, collectés dans un rayon de 400 km. Les porteurs du projet estiment que l'approvisionnement en matière première reposera sur trois types de sources, mobilisées en volumes équivalents : la biomasse forestière issue de déchets et de résidus de coupe, les déchets de meubles et les

²⁵⁴ [Reuters - Aviation Sustainability](#)

²⁵⁵ [Planetoscope.com](#)

²⁵⁶ Webinaire IEA Task 39

²⁵⁷ Directive RED (UE) 2018/2001, Annexe VI page L328/172

²⁵⁸ [Debatpublic.fr](#)

résidus agricoles. De l'autre côté, les citoyens sont inquiets qu'une partie de ce flux provienne de bois issu de coupes rases, ce qui est interdit par la réglementation et constituerait une dégradation évidente des critères de durabilité.

La disponibilité en biomasse devient ici un facteur limitant en cas de généralisation de ce type de projets sur le territoire français. La problématique n'est alors plus uniquement technologique ou énergétique, mais avant tout territoriale : comment garantir des volumes suffisants de biomasse sans dépasser les quantités localement mobilisables ?

E. Risques et points de vigilance

Effets du climat

L'un des principaux risques susceptibles de limiter les volumes produits après la mise en service d'un site de SAF est lié aux effets du changement climatique, appelés à s'intensifier dans les années à venir. Au-delà des aléas affectant l'approvisionnement en biomasse durable (sécheresses, inondations, épisodes de grêle intense), la production d'hydrogène, nécessaire aux filières HEFA, et surtout aux voies FT+H₂ (PBtL ou e-bioSAF) ainsi qu'aux e-SAF, repose sur la disponibilité d'eau douce et d'électricité bas-carbone. Or, en période de sécheresse, certaines régions peuvent faire l'objet de restrictions d'usage de l'eau, comme c'est régulièrement le cas dans le sud de la France, où se situe notamment la raffinerie de La Mède. Par ailleurs, l'accès à une électricité bas-carbone peut également être fragilisé lors des épisodes de fortes chaleurs ou de stress hydrique, en raison de la baisse des facteurs de charge des centrales nucléaires et hydroélectriques.

Logistique et stockage des matières premières

La récupération et la logistique des ressources pour la production de biocarburants posent des défis étroitement liés à leur densité énergétique. Ainsi, les huiles usagées, bien que dispersées à l'origine, peuvent être transportées sur de longues distances une fois collectées en quantité suffisante, ce qui explique l'existence d'un marché mondial d'import-export. Les matières végétales destinées aux filières BtL et AtJ, en raison de leur faible densité énergétique, ne sont pas rentables à transporter. Cela souligne l'importance de localiser les usines à proximité des sources de matières premières, le rayon de collecte maximal dans RED étant fixé à 500 km. Un défi supplémentaire apparaît dans les régions agricoles où la méthanisation se développe rapidement. En effet, le rayon de collecte autour des méthaniseurs est d'environ 30 km, ce qui favorise leur implantation et limite l'accès des matières premières aux filières SAF, dont le rayon de collecte est beaucoup plus étendu (environ 300 km). Cela crée des zones de disponibilité fragmentées, réduisant le potentiel global de collecte.

Un autre risque logistique, identifié par l'Agence Internationale de l'Energie²⁵⁹, concerne le stockage des matières premières végétales. En Europe, leur production saisonnière impose un stockage prolongé, nécessitant des infrastructures adaptées pour éviter toute dégradation. Des conditions inadéquates peuvent en effet entraîner des pertes de rendement, dues à l'altération des matières premières. De plus, une gestion inefficace du stockage peut provoquer des pénuries, perturbant la production de SAF et compromettant la continuité industrielle.

²⁵⁹ IEA Webinar Task 39 : [Youtube](#)

Sécurité industrielle

Les molécules manipulées dans les projets SAF sont souvent complexes, ce qui fait de la sécurité industrielle un enjeu crucial. La sécurité des électrolyseurs est particulièrement sous-estimée, comme le montre le projet E-Cho, où il est prévu d'implanter l'électrolyseur à proximité immédiate d'habitations et d'une route très fréquentée.

Retards carbonés

Des retards dans la construction d'infrastructures de production de SAF, ainsi que des interruptions de fonctionnement, entraînent une baisse de l'approvisionnement des aéroports et, par conséquent, une augmentation des émissions de CO₂ du secteur. Il est important de rappeler que tout retard dans l'action se traduit par un surcroît d'effort nécessaire par la suite. D'un point de vue industriel, manquer des échéances clés revient à entamer dès aujourd'hui le budget carbone alloué à l'aviation, un surcoût climatique qu'il faudra compenser ultérieurement.

VI. Transition énergétique de l'aérien français

La capacité nationale de production de SAF dépend principalement des volumes de biomasse, physiquement limités, et de l'électricité pouvant être orientée vers le secteur aérien. L'objectif de cette partie est de présenter un certain nombre de matrices présentant les conséquences des choix d'allocations en biomasse et en électricité sur différents indicateurs tels que les volumes de SAF, les émissions de CO₂ ou l'évolution du trafic. Il permettra au lecteur de se figurer les écarts éventuels entre les consommations de kérosène et nos potentiels de production de SAF sur le territoire français.

A. Hypothèses d'approvisionnement

1) Biomasse disponible à l'horizon 2050

L'approvisionnement en biomasse en 2050 repose sur les volumes estimés précédemment et sur les contraintes réglementaires européennes, en particulier celles issues de la réglementation ReFuelEU Aviation. Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- 0,5 Mt d'huiles usagées
- 10 Mt de matière sèche (Mt MS) de biomasse lignocellulosique compatible ReFuel EU, correspondant à une estimation haute issue des estimations compilées précédemment (résidus forestiers et agricoles, déchets de bois et cultures sur surfaces dégradées) à répartir avec les autres secteurs ayant besoin de carburants liquides
- Absence totale de cultures dédiées, celles-ci étant incompatibles avec ReFuelEU et réservées aux usages routiers (véhicules légers et lourds)
- Absence d'importations, tant de matières premières que de SAF, l'analyse étant conduite dans une logique strictement domestique.

2) Disponibilité électrique pour le secteur aérien

Dans son scénario de référence issu du rapport Futurs énergétiques 2050,²⁶⁰ publié fin 2021, RTE anticipe une consommation électrique nationale de 645 TWh en 2050, tous secteurs confondus. Sur ce total, environ 100 TWh seraient alloués au secteur des transports, principalement pour répondre aux besoins liés à l'électrification du parc automobile. Dans ce scénario, les besoins en carburants liquides de l'aérien et du maritime ne sont pas pris en compte et sont donc considérés comme nuls en termes de consommation électrique.

De son côté, dans sa feuille de route,²⁶¹ le GIFAS estime les besoins du secteur aérien à environ 90 TWh, un niveau très ambitieux, supérieur à la production actuelle cumulée de l'éolien et du solaire en France, évaluée à environ 70 TWh selon le bilan électrique 2024 de RTE.²⁶²

Le volume d'électricité effectivement disponible pour le secteur aérien à l'horizon 2050 dépendra de plusieurs facteurs structurants :

- Le développement des capacités de production d'énergies renouvelables, en particulier solaire et éolienne.

²⁶⁰ RTE France

²⁶¹ Ecologie.gouv

²⁶² Synthèse RTE

- L'évolution du parc nucléaire, dont une partie des centrales devrait être arrêtée au cours de la prochaine décennie (14 arrêts prévus entre 2029 et 2035²⁶³), tandis qu'une autre partie pourrait être prolongée jusqu'à 60 ans et que 14 nouveaux réacteurs sont envisagés dans le cadre de la relance nucléaire.²⁶⁴
- La réussite de l'électrification du parc routier léger, attendue autour de 2035, qui conditionnera fortement la répartition des usages de l'électricité entre les différents secteurs.

Ces incertitudes rendent la disponibilité future d'électricité pour le secteur aérien étroitement dépendante des choix industriels, énergétiques et politiques des prochaines décennies. Dans ce contexte, nous retiendrons une fourchette de consommation électrique volontairement large, comprise entre 0 et 110 TWh, en ayant conscience que la borne haute de 110 TWh correspond à une estimation particulièrement optimiste, voire utopique.

3) Dynamique d'approvisionnement entre 2025 et 2050

En 2025 et 2030, la France est supposée se limiter au strict respect des obligations réglementaires du règlement ReFuel EU Aviation, soit respectivement 2 % puis 6 % de SAF, sans dépassement. En 2030, une unité PBtL implantée dans le Sud-Ouest produit environ 90 kt/an de kérosène à partir de 300 kt de biomasse forestière sèche, pour une consommation électrique d'environ 2,5 TWh. Par ailleurs, 100 kt d'e-SAF sont produits, mobilisant environ 5 TWh d'électricité, soit un total de 8 TWh dédiés à la production de SAF en 2030.

À l'horizon 2050, la trajectoire de déploiement repose sur une montée en puissance linéaire entre 2030 et la cible finale, tant pour l'électricité que pour la biomasse lignocellulosique. Cette hypothèse, volontairement optimiste par rapport à des trajectoires fondées sur des progressions annuelles, vise à explorer le potentiel maximal du système dans un cadre contraint.

4) Hypothèses de rendement et de consommation électrique des filières SAF

Aujourd'hui, la quasi-totalité des projets de production d'e-SAF captent le CO₂ émis dans les fumées des grandes installations industrielles, où sa concentration est environ cent fois plus élevée que dans l'atmosphère. Pour la production de SAF, il est bientôt obligatoire en Europe que ce CO₂ provienne de sources non fossiles. À mesure que ces gisements de fumées se raréfieront avec la décarbonation de ces secteurs, la capture directe dans l'air ambiant deviendra nécessaire, ce qui augmentera la consommation électrique de 20 %. Les gains liés à l'amélioration des procédés devraient toutefois compenser cette dépense supplémentaire : nous considérons ainsi que la demande en électricité par tonne de carburant produite resterait globalement stable, autour de 30 MWh_e par tonne de SAF d'ici 2050.

Pour la conversion de la biomasse lignocellulosique, nous retenons un rendement massique de 45 %, assorti d'un besoin électrique additionnel de 10 MWh_e par tonne de SAF pour la voie PBtL, qui constitue la filière privilégiée afin de maximiser la production totale de SAF.

5) Évolution du trafic aérien et de l'efficacité énergétique

Afin d'estimer les volumes de kérosène fossile restant à importer pour compléter la production nationale de SAF, la demande totale en carburants liquides du secteur aérien est

²⁶³ Sénat

²⁶⁴ Relance nucléaire France

évaluée en combinant des hypothèses de gains d'efficacité énergétique et d'évolution du trafic aérien.

- Gains d'efficacité énergétique : un gain moyen de 1 % par an est retenu, correspondant à une réduction cumulée de 22,2 % entre 2025 et 2050. Cette hypothèse est plus prudente que celles retenues dans certains scénarios mondiaux, la flotte française étant déjà composée d'aéronefs relativement récents et performants. À titre de comparaison, les scénarios S1 et S2 du CORAC²⁶⁵ prévoient des gains de 20 % pour le régional, 30 % pour le court et moyen-courrier, et 20 % pour le long-courrier.
- Croissance du trafic aérien : une croissance annuelle tendancielle de 1,1 % par an est retenue. Les premières versions du rapport Pouvoir voler en 2050²⁶⁶ envisageaient une croissance de 4 % par an, tandis que le secteur s'accordait historiquement sur une croissance minimale de 2 %. Ces hypothèses ont été revues à la baisse à la suite de la crise sanitaire liée au COVID-19. À l'échelle européenne, Eurocontrol projette désormais une croissance comprise entre 1 % et 1,6 %.²⁶⁷ La feuille de route du GIFAS²⁶⁸ retient une valeur centrale de 1,1 %, reprise ici. Cette croissance reste faible au regard des taux observés récemment (14,2 % en 2023²⁶⁹ et 3,6 % en 2024²⁷⁰).

B. Un approvisionnement en biomasse complexe

Pour mobiliser les 10 Mt MS de biomasse lignocellulosique disponibles en France, il serait nécessaire de déployer sur le territoire national environ une trentaine d'usines de type E CHO (usine PBtL dans le Sud-Ouest évoquée précédemment), qui mobilise déjà un périmètre d'approvisionnement légal couvrant l'ensemble du quart sud-ouest de la France (zone bleue), une région pourtant riche en activités forestières et agricoles.

Par ailleurs, la biomasse forestière constitue une matière première présente dans un nombre limité de régions (zones orange) et de plus en plus exposée aux effets du changement climatique. Dans ce contexte, la majeure partie de la biomasse conforme à la réglementation européenne devra provenir du secteur agricole. Or, sa disponibilité restera très limitée dans les zones sèches (zones rayées), où la croissance des végétaux est réduite, ainsi que dans les régions montagneuses (zones rayées), où les conditions de culture et les contraintes logistiques sont particulièrement complexes.

²⁶⁵ CORAC

²⁶⁶ [Pouvoir voler en 2050](#)

²⁶⁷ [Eurocontrol](#)

²⁶⁸ [Ecologie.gouv](#)

²⁶⁹ [Résultat d'activité des aéroports français 2023](#)

²⁷⁰ [Résultats d'activité des aéroports français 2024](#)

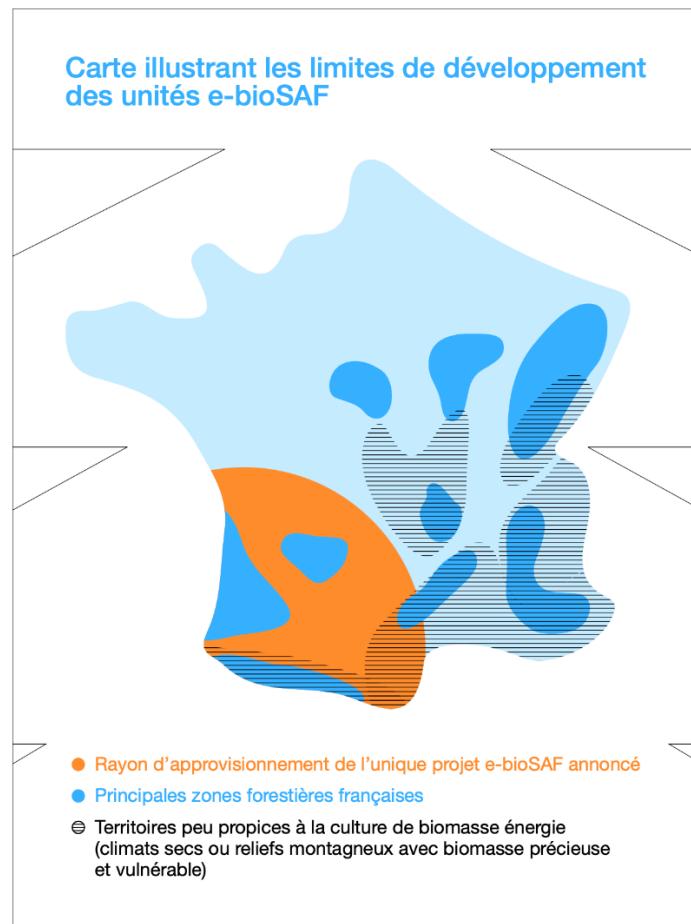


Figure 5.4 : Carte illustrant les limites de développement des unités e-bioSAF

Le casse-tête consistant à positionner trente cercles bleus dans l'espace libre est impossible. Au regard de l'ensemble de ces contraintes, l'implantation d'une trentaine d'usines supplémentaires dans l'espace restant apparaît donc très ambitieuse, tant du point de vue logistique qu'environnemental et économique.

C. Capacité de production potentielle

La matrice ci-dessous représente les volumes de SAF susceptibles d'être produits en France à l'horizon 2050, en fonction de deux hypothèses structurantes :

- La quantité d'électricité dédiée à la production de SAF
- La part de la biomasse résiduelle qui est effectivement convertie en SAF

Biomasse	Électricité					
	10 TWh	30 TWh	50 TWh	70 TWh	90 TWh	110 TWh
0%	0,3 Mt	1,0 Mt	1,7 Mt	2,3 Mt	3,0 Mt	3,7 Mt
15%	0,8 Mt	1,5 Mt	2,1 Mt	2,8 Mt	3,5 Mt	4,1 Mt
30%	1,3 Mt	2,0 Mt	2,6 Mt	3,3 Mt	4,0 Mt	4,6 Mt
45%	1,8 Mt	2,4 Mt	3,1 Mt	3,8 Mt	4,4 Mt	5,1 Mt
60%	2,2 Mt	2,9 Mt	3,6 Mt	4,2 Mt	4,9 Mt	5,6 Mt

Tableau 5.3 : Matrice des volumes de SAF productibles en France en 2050 en fonction des allocations de biomasse et d'électricité.

Aide à la lecture : En 2050, en décidant d'allouer 45% de l'énergie issue de la biomasse et 70 TWh d'électricité bas-carbone à l'aérien, la France pourrait produire environ 3,8 millions de tonnes de SAF, soit environ la moitié de sa consommation actuelle de kérosène.

Allocation de l'énergie d'origine biologique à l'aviation

Les volumes de bioSAF et e-bioSAF produits sont déterminés selon la relation suivante :

$$V_{\text{bioSAF}} = M_{\text{biomasse}} \times y_m \times X$$

Où :

- M_{biomasse} correspond à la biomasse allouée à la production de carburants liquides (ici un maximum de 10 Mt de matière sèche pour la biomasse lignocellulosique),
- y_m est le rendement massique de conversion de la biomasse en hydrocarbures liquides, dépendant des filières mobilisées (HEFA, PBtL),
- X est la part massique d'hydrocarbures liquides orientée vers la coupe aviation (SAF).

Le raisonnement est illustré dans le schéma ci-dessous. La biomasse allouée aux carburants liquides est d'abord convertie, avec des rendements propres à chaque filière, en hydrocarbures (incluant différentes coupes : naphta, diesel, jet, etc.). C'est à ce stade qu'intervient l'allocation vers l'aviation.

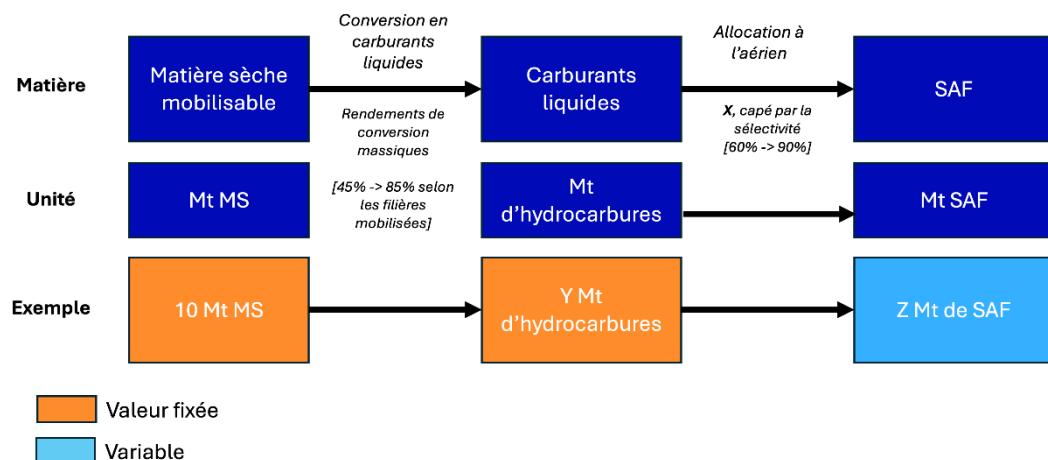


Figure 5.5 - Schéma du principe de répartition de l'énergie issue de la biomasse résiduelle pendant conversion en hydrocarbures

Dans la matrice, la part de l'énergie issue de la biomasse lignocellulosique allouée au secteur aérien est supposée varier entre 0 et 60 %. Cette borne haute correspond à la sélectivité maximale vers le kérosène des procédés thermochimiques de type Fischer–Tropsch (on ne considère ici que la voie PBtL pour convertir la biomasse lignocellulosique). Autrement dit, pour une unité d'énergie contenue dans la biomasse lignocellulosique, il n'est physiquement pas possible de récupérer plus de 60 % sous forme de carburant compatible avec l'aviation.

Par ailleurs, au regard des besoins en carburants liquides des secteurs pour lesquels il n'existe pas d'alternatives technologiques matures (routier, maritime, agriculture et aviation), le transport aérien représente une fraction plus faible que 60% de la demande actuelle (24 %²⁷¹) et future (40 % à l'horizon 2050²⁷²). Il apparaît donc peu probable, d'un point de vue systémique et socio-économique, d'allouer plus de 60 % de cette ressource à l'aviation au détriment d'autres secteurs critiques.

La fourchette 0-60% ne représente donc pas une part de biomasse, mais la part de l'énergie produite à partir des 10 Mt MS de matière sèche de biomasse lignocellulosique qui est utilisé dans l'aviation. On peut aussi considérer que cette allocation résulte de la combinaison du volume de biomasse effectivement mobilisé et de la part de carburants liquides orientée vers l'aviation. Ainsi, si l'ensemble des 10 MtMS est transformé en carburants liquide et que la moitié est destinée au secteur aérien, cela correspond à une répartition de 50 %. En revanche, dans une hypothèse où seules 5 MtMS sont récupérées à des fins énergétiques (plus proche des estimations de la SNBC 3) et où 30 % de cette matière est utilisée pour la propulsion aérienne, la répartition n'est plus que de 15 %.

Dans l'hypothèse d'une croissance de trafic de 1,1% comme annoncé par le secteur, une allocation de 30 TWhe et d'une part de 30% de l'énergie issue de la biomasse lignocellulosique résiduelle allouée au secteur aérien conduirait à une consommation de kérosène fossile majoritaire en 2050 comme le montre l'évolution de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ associé ci-dessous.

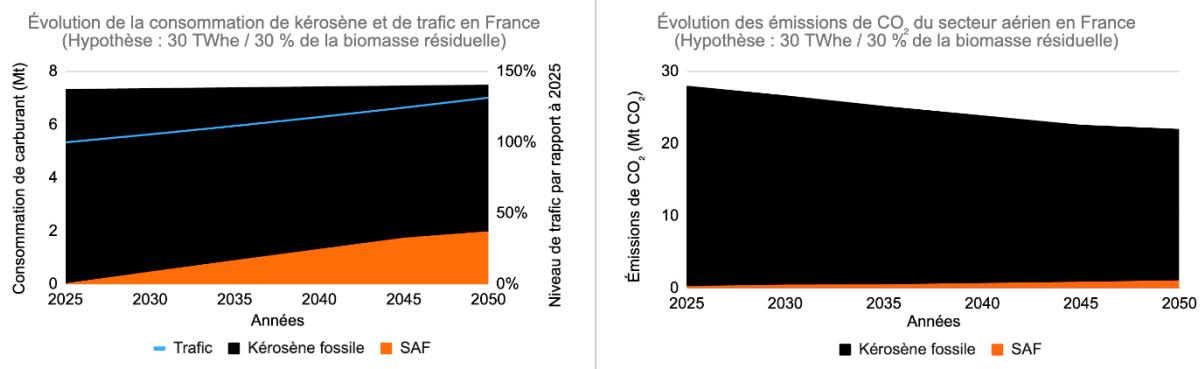


Figure 5.6 : Évolution du carburant aérien (à gauche) et des émissions de CO₂ (à droite) du secteur à l'échelle française, dans l'hypothèse d'une croissance de 1,1 % du secteur et d'une allocation de 30 TWhe et de 30 % de la biomasse résiduelle à l'aviation.

²⁷¹ 85 TWhe sur 353 TWhe

²⁷² 90 TWhe sur 220 TWhe

D. Alignement avec les objectifs réglementaires et climatique

En France, les objectifs liés aux SAF sont à la fois réglementaires, avec le respect des mandats d'incorporation fixés par ReFuel EU Aviation, et climatiques, visant la neutralité carbone en 2050 et en préservant un budget carbone acceptable d'ici là.

Respect des exigences ReFuel EU

En 2050, le règlement ReFuel EU impose que 70 % du carburant utilisé dans les avions soit constitué de SAF. En considérant une croissance annuelle du trafic de 1,1 % et des gains annuels d'efficacité de 1 %, et en partant d'une consommation actuelle de 7,5 Mt, on estime que le volume de carburant aérien atteindra environ 7,7 Mt. Pour se conformer à ReFuel EU, il faudrait donc produire plus de 5,3 Mt de SAF, ce qui n'est atteint que par une combinaison de la matrice présentée ci-dessus (60% des biocarburants compatibles avec ReFuel EU et 110 TWh d'électricité).

La contrainte sur le taux d'incorporation n'a cependant aucune traduction en termes d'empreinte carbone. En effet, elle autorise le secteur à consommer davantage de kérosène fossile s'il parvient à produire plus de SAF. Même s'il est justifié d'encourager l'investissement du secteur par des incitations ciblées, il est essentiel d'associer une contrainte carbone afin de rester en ligne avec les engagements climatiques.

Contribution aux efforts de réduction d'émissions de CO2

À partir des volumes de SAF estimés précédemment, les émissions à l'horizon 2050 ainsi que le cumul des émissions du secteur aérien peuvent être déduits, compte tenu des hypothèses formulées sur les gains d'efficacité énergétique et le trafic aérien.

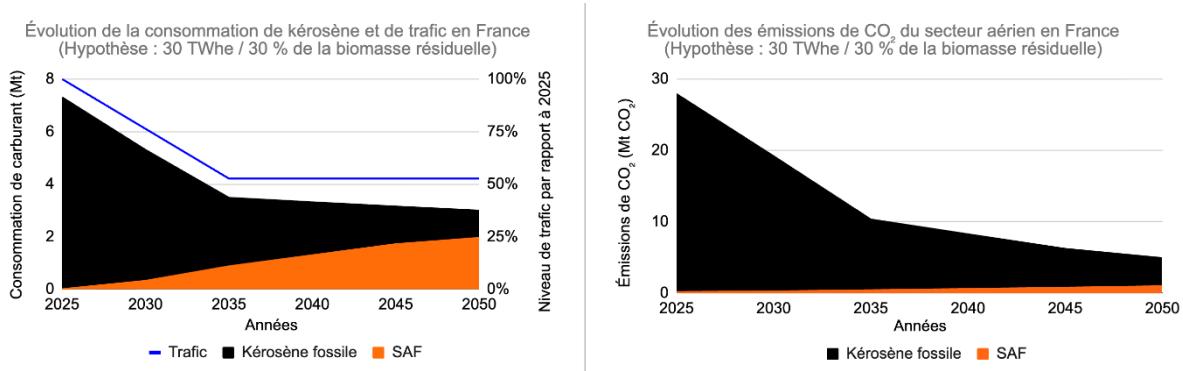


Figure 5.7 : Évolution du carburant aérien (à gauche) et des émissions de CO₂ (à droite) du secteur à l'échelle française, dans l'hypothèse d'un trafic contraint par un budget carbone de 300 Mt, d'une allocation de 30 TWhe et de 30 % de la biomasse résiduelle à l'aviation.

Nous proposons ici des valeurs permettant de comparer les valeurs des matrices aux engagements nationaux de la SNBC 3. La cible d'émissions de la France pour 2050, afin d'atteindre la neutralité carbone, est de 61 Mt CO₂e. L'aviation représentant environ 6,8 % des

émissions nationales en 2024,²⁷³ on peut en déduire une cible d'émissions pour le secteur aérien d'environ 4,15 Mt CO₂e.

Pour le budget carbone, la SNBC 3 fournit des valeurs pour 2025 (376 Mt CO₂e), 2030 (279 Mt CO₂e) et 2050 (61 Mt CO₂e²⁷⁴). En extrapolant ces données, on obtient un objectif de cumul d'émissions d'environ 4,4 Gt CO₂e. En considérant que la part de la France dans les émissions mondiales reste autour de 0,7 % comme c'est le cas aujourd'hui, cet engagement correspond à un cumul d'émissions mondial d'environ 630 Gt CO₂e, c'est-à-dire une ambition à mi-chemin entre une limitation du réchauffement à 1,7 °C (budget de 390 Gt) et 2 °C (budget de 870 Gt). En appliquant la part de 6,8 % correspondant à l'aviation, on obtient **un budget carbone cumulé d'environ 300 Mt CO₂e pour le secteur aérien.**

Avec les projections de trafic du secteur et les hypothèses de gains d'efficacité, les émissions de l'aviation qui sont aujourd'hui de 6,5 Mt CO₂ ne baisseront pas significativement, malgré le développement des SAF. Il faudra donc choisir entre poursuivre la croissance du secteur et respecter les engagements réglementaires et climatiques, à savoir le ReFuel EU et les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

E. Adaptation nécessaire du trafic aérien

Une réglementation européenne imposant des contraintes sur le niveau de trafic

Nous quantifions ici le niveau de trafic aérien compatible avec l'objectif de 70 % de SAF fixé par ReFuel EU. On observe que plus la production de SAF augmente, plus le trafic peut continuer à croître. Mais cela entraîne surtout une consommation accrue de carburant fossile, ce qui est en contradiction avec nos exigences climatiques.

		Électricité		
		30 TWh	70 TWh	110 TWh
Biomasse résiduelle	0%	-76%	-43%	-10%
	30%	-52%	-19%	13%
	60%	-29%	4%	37%

Tableau 5.4 : Matrices illustrant l'évolution nécessaire du trafic pour respecter les taux d'incorporation de SAF mandatés par la réglementation européenne en 2050. En vert, les cas où la croissance est envisageable ; en rouge, là où elle ne l'est pas.

Une responsabilité sectorielle majeure dans les émissions nationales et la crise climatique

Respecter ReFuel EU n'est pas une fin en soi si les émissions du secteur ne diminuent pas au rythme exigé par les engagements de la France pour respecter l'accord de Paris. En reprenant les matrices d'émissions à l'horizon 2050 et les émissions cumulées d'ici là, nous analysons désormais la part du secteur aérien dans les objectifs climatiques. On observe que la responsabilité future de ce secteur dans la contribution de la France à la crise climatique est loin d'être négligeable

²⁷³ Emission aérien 2024 (22,1 Mt) multiplié par 1,2 pour inclure l'amont sur 376 Mt CO₂e (SNBC 3) Ecologie.gouv

²⁷⁴ Ecologie.gouv

		Électricité			Électricité		
		30 TWh	70 TWh	110 TWh	30 TWh	70 TWh	110 TWh
Biomasse résiduelle	0%	15%	14%	13%	0%	42%	35%
	30%	14%	13%	12%	30%	36%	30%
	60%	13%	12%	11%	60%	30%	24%

Tableau 5.5 : Pourcentage de la neutralité carbone et du budget SNBC consommé par l'aviation en 2050 (carburant à gauche, budget SNBC à droite)

Nous cherchons à quantifier le niveau de trafic aérien compatible avec l'atteinte de l'objectif de 4,15 Mt CO₂e, soit 6,8 % du budget carbone alloué par la SNBC 3, en comparaison avec le trafic actuel.

		Électricité		
		30 TWh	70 TWh	110 TWh
Biomasse résiduelle	0%	-65%	-47%	-28%
	30%	-48%	-29%	-11%
	60%	-31%	-12%	7%

Tableau 5.6 : Réduction du trafic nécessaire pour que le secteur aérien ne contribue qu'à 6,8 % des émissions nationales en 2050, selon les choix d'électricité et de biomasse

Une décennie 2030-2040 cruciale pour le respect du budget carbone

Nous réalisons le même exercice sur une moyenne de trafic pour la période 2030-2050, en y intégrant une contrainte de budget carbone. La règle retenue pour faire évoluer le trafic consiste à suivre une dynamique linéaire jusqu'en 2035, puis à stabiliser le niveau de trafic à partir de cette date, jusqu'à ce qu'un volume suffisant de SAF permette une reprise de la croissance selon les estimations disponibles. Le respect du budget de 300 Mt alloué au secteur aérien d'ici 2050 implique, dans tous les cas, un trafic moyen inférieur au niveau actuel, même si certains scénarios prévoient une augmentation du trafic au cours de la décennie 2040-2050. La période 2030-2040 apparaît ainsi comme la décennie de la sobriété, durant laquelle le niveau de voyage en avion doit rester inférieur aux niveaux actuels afin de garantir un budget carbone compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris.

		Électricité		
		30 TWh	70 TWh	110 TWh
Biomasse résiduelle	0%	-56%	-46%	-36%
	30%	-45%	-35%	-24%
	60%	-33%	-23%	-13%

Tableau 5.7 : Réduction moyenne de trafic nécessaire entre 2035 et 2045 pour que le secteur aérien ne contribue qu'à 6,8 % du budget carbone de la SNBC 3, selon les choix en matière d'électricité et de biomasse.

On peut illustrer l'évolution des cumuls de carburant et des émissions de CO₂ en les mettant en regard de la dynamique de trafic correspondant à la contrainte de budget carbone fixée. Cette illustration est réalisée pour deux hypothèses : un cas à 30 TWhe correspondant à 30 % de la biomasse résiduelle, et un cas à 110 TWhe, également basé sur 30 % de la

biomasse résiduelle. On observe que, dans le second cas, le trafic peut recommencer à croître à partir de 2040, sans toutefois retrouver le niveau actuel.

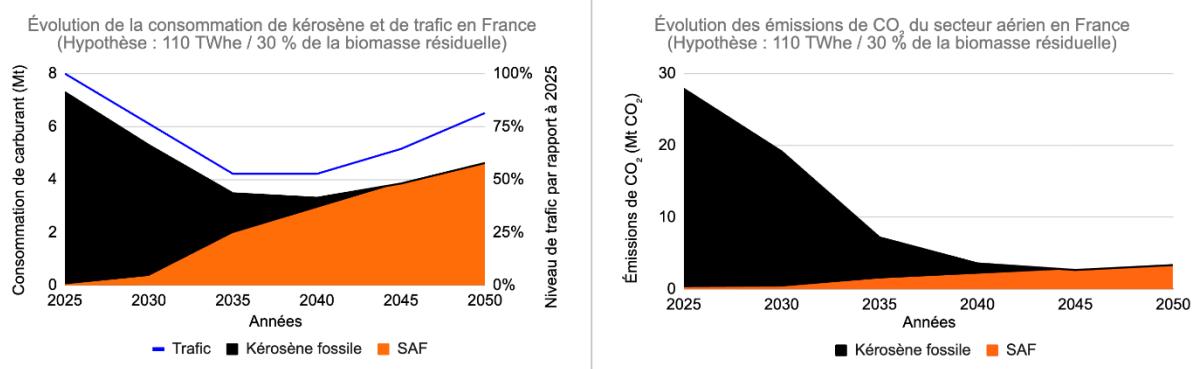


Figure 5.8 - Évolution du carburant aérien (à gauche) et des émissions de CO₂ (à droite) du secteur à l'échelle française, dans l'hypothèse d'un trafic contraint par un budget carbone de 300 Mt, d'une allocation de 110 TWhe et de 30 % de la biomasse résiduelle à l'aviation.

Ces deux modélisations ne sont contraintes ni par ReFuelEU ni par un objectif d'émissions de CO₂ en 2050, ce qui explique que le scénario à 30 TWhe ne respecte ni l'une ni l'autre de ces contraintes : la part de SAF atteint 54 % en 2050 et le secteur émet encore 4,9 Mt de CO₂. À l'inverse, dans le scénario à 110 TWhe, les deux contraintes sont respectées : le secteur aérien opère sans pétrole et les émissions s'élèvent à environ 3,4 Mt de CO₂, mais le niveau de trafic reste inférieur de 20 % à celui d'aujourd'hui, correspondant au niveau observé en France en 2015.

F. Vers une sobriété aérienne organisée

Il est possible d'agir sur le trafic, et il est grand temps que la littérature scientifique se développe, que les expérimentations se multiplient et, surtout, que la puissance publique définisse un cadre clair. Des pistes de mesures existent déjà et peuvent être adaptées à différents contextes. Cela suppose une coopération étroite entre l'industrie, les pouvoirs publics et les citoyens, dans une logique démocratique.

Pour que cette sobriété soit véritablement désirable, il est indispensable d'agir simultanément sur plusieurs leviers : les incitations aux voyages, la demande des consommateurs, l'offre du secteur et les alternatives au voyage aérien.

Même en restant agnostiques quant au chemin précis à emprunter et aux types de mesures à instaurer, des pistes d'action intéressantes, qui devraient être davantage débattues, ont déjà émergé dans divers travaux et dans le rapport Pouvoir voler en 2050, parmi lesquelles :

Pour réduire les incitations aux voyages :

- Mettre fin aux programmes de fidélité
- Limiter la publicité

Pour limiter la demande à l'échelle individuelle :

- Mettre en place des quotas de CO₂ ou kilométriques, à l'échelle des individus ou des entreprises
- Instaurer des taxes sur le kérosène, le CO₂ ou les kilomètres parcourus

Pour encadrer l'offre du nombre de vols :

- Limiter les capacités aéroportuaires
- Supprimer les vols marginaux

Pour encourager les alternatives :

- Développer les trains de nuit, les bus et les liaisons maritimes de moyenne distance
- Faciliter les connexions ferroviaires internationales

Adaptation

Il faut également penser l'adaptation du secteur aéronautique et des secteurs connexes pour rompre avec un paradigme fondé sur la promesse de volumes toujours croissant. Il est nécessaire d'anticiper les risques et d'identifier les moyens de les éviter ou d'en atténuer les conséquences. La première précaution, essentielle pour toute activité économique, est la diversification des activités et la création de nouvelles sources de revenus. Il convient également de prendre en compte les savoir-faire et les personnes directement ou indirectement liées à l'aéronautique, afin d'anticiper une baisse d'activité et d'éventuelles reconversions professionnelles. Enfin, il paraît indispensable d'associer à ces réflexions les autres secteurs concernés, en particulier ceux du secteur du tourisme.

Veiller à un accès juste et équitable

Modérer le trafic ne doit pas pour autant altérer la promesse originelle de l'aviation, qui est d'offrir au plus grand nombre l'opportunité de découvrir de nouveaux horizons terrestres. Pour encourager celles et ceux qui n'ont pas, culturellement, accès à l'aviation, il faut repenser le trafic dans son ensemble. Dans l'Union européenne, 10 % de la population est responsable de 88 % des émissions de CO₂ du secteur²⁷⁵ : il existe donc une marge importante pour une meilleure répartition, permettant à chacun de pouvoir, au moins une fois dans sa vie, découvrir une culture lointaine tout en limitant le nombre total de vols.

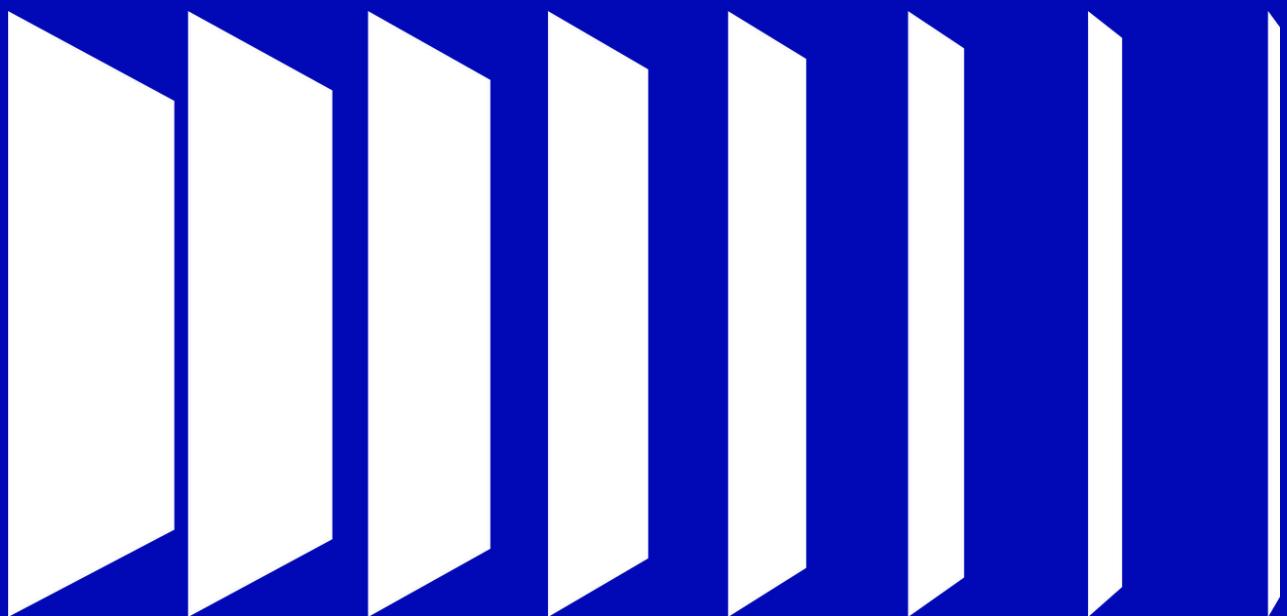
²⁷⁵ The emergence of low-carbon air mobility: dynamics, conflicts of use and energy justice - JB Jarin (Chiffre de 2018)

Conclusion

Au regard de l'ensemble des éléments évoqués dans cette partie, la transition énergétique du secteur aérien français est loin d'être acquise. Elle nécessitera une combinaison complexe de facteurs et de leviers à encourager simultanément. On peut notamment relever l'analyse des projets industriels annoncés, qui met en lumière des contraintes concrètes au niveau logistique, géographique, ainsi que la nécessité d'un alignement de mesures politiques pour développer la filière SAF dans un délai qui semble court au regard de l'urgence climatique. Dans tous les cas, l'analyse des matrices montre que revenir dans les dix prochaines années à un niveau de trafic inférieur est le seul moyen de rester compatible avec les objectifs climatiques, et que les cibles de 2050 nécessitent elles aussi une sobriété.

L'aviation, à l'instar du changement climatique, est un phénomène mondial. Ce qui compte, c'est l'alignement de l'ensemble du secteur avec les objectifs climatiques : si seule la France parvenait à atteindre ses objectifs, l'avenir de notre climat ne serait guère meilleur. Nous examinerons donc dans la partie suivante les stratégies permettant à l'aviation mondiale de voler sans pétrole dans les décennies à venir.

Conclusion



En raison de la complexité du sujet et de la multitude de problématiques qui en découlent, les carburants d'aviation durables (SAF) nous auront donné du fil à retordre pour en saisir pleinement les enjeux. Nous espérons que ce rapport aura permis de mettre en lumière l'existence de réelles lueurs d'espoir quant à la possibilité de substituer, au moins partiellement, les carburants fossiles par des carburants moins émissifs en carbone. Néanmoins, les volumes susceptibles d'être produits à moyen terme ne permettront pas de remplacer une part majoritaire de l'énergie actuellement utilisée dans l'aviation moderne.

La première partie de ce rapport a permis de poser les bases du sujet et d'offrir au lecteur une familiarisation avec les différentes filières ainsi qu'avec le cadre réglementaire. Dans la section consacrée à la biomasse, nous avons passé en revue les préoccupations liées aux matières premières végétales, en les confrontant aux besoins en carburants liquides. Dans la partie sur les e-SAF, les enjeux associés à l'électricité sont abordés, même s'il demeure aujourd'hui plus complexe d'en identifier les contraintes fortes et quantifiables. Les deux dernières sections examinent les aspects liés à la transition énergétique et climatique du secteur, d'abord à l'échelle française, puis à l'échelle mondiale. En France, la granularité des projets et des estimations permet d'être plus précis qu'au niveau planétaire, où sont mises en lumière les stratégies mises en avant par le secteur ainsi que leurs angles morts.

La prochaine décennie sera déterminante pour établir la crédibilité des filières SAF et confirmer la viabilité de leur développement industriel, en France comme à l'international. Elle permettra également de déterminer si le secteur aérien est capable de maîtriser son trafic et de fonctionner de manière socialement et économiquement soutenable, sans dépendre d'une logique de croissance infinie.

Nos derniers mots s'adressent aux salariés du secteur aéronautique, quel que soit leur niveau hiérarchique. Nous leur souhaitons de pouvoir faire progresser dans leurs entreprises les sujets liant l'aviation aux enjeux environnementaux avec lucidité, rigueur et honnêteté intellectuelle. L'avenir de l'ensemble de nos métiers ne sera préservé qu'en parvenant à voler moins, tout en dépendant moins du pétrole.

Auteurs et remerciements

Les auteurs principaux

Timon VICAT-BLANC

Timon Vicat-Blanc est président d'Aéro Décarbo, où il œuvre à l'intégration des enjeux environnementaux dans les secteurs aérien et spatial, à travers des conférences et des actions d'influence. Diplômé de l'ISAE-SUPAERO, il a débuté sa carrière dans l'aérospatial en développant des applications satellitaires dédiées à la protection de l'environnement. Il accompagne aujourd'hui des acteurs publics et privés dans leur adaptation aux grandes transformations contemporaines. Passionné par les airs, il est également pilote de planeur et de parapente.

Loïc BONIFACIO

Loïc Bonifacio est vice-président d'Aéro Décarbo, en charge de la branche aéronautique. Ingénieur automobile de formation, diplômé de l'ESTACA, il étudie cependant depuis 2018 les sujets relatifs à l'aérien, au travers de divers projets étudiants puis associatifs. D'abord orienté sur l'analyse de l'aviation hydrogène, il évolue à partir de 2020 vers la décarbonation du secteur, les stratégies des grands groupes et les questions d'approvisionnement énergétique. Consultant indépendant depuis 2022, après un métier d'analyste au sein de l'industrie automobile, il intervient comme professeur sur la décarbonation des transports auprès des étudiants de l'ESTACA.

Frédérique RIGAL

Frédérique Rigal est ingénieur dans le secteur aéronautique, où elle a occupé plusieurs postes relatifs au développement de systèmes avioniques. Elle est également titulaire d'un mastère spécialisé en développement durable, et travaille depuis plus de dix ans à la compréhension des impacts environnementaux des avions, et à la caractérisation de leurs solutions. En parallèle, Frédérique est engagée dans le milieu associatif de l'éducation populaire et de la protection du climat.

Gaëtan DHOTE

Gaëtan Dhote est fraîchement diplômé de l'ISAE-SUPAERO et cette année, il est ingénieur-élève du Corps des Ponts, des Eaux et des Forêts.

Contributeurs et relecteurs

Yvonne Frouin, Noah Fournier, Florian Sodano, Clément Caudron, Clément Jarossay, Jean-Noël Geist, Jean-Marc Jancovici, Jean-Philippe Hermine, Olivier Del Bucchia, Thomas Robert, Marlène de Bank

Remerciements

Aéro Décarbo et le Shift Project remercient également la relecture par une trentaine de personnes travaillant dans les industries aéronautique et spatiale. L'équipe de rédaction remercie tout particulièrement les autres associations travaillant sur les sujets aérien et énergie pour leur disponibilité et leurs conseils.

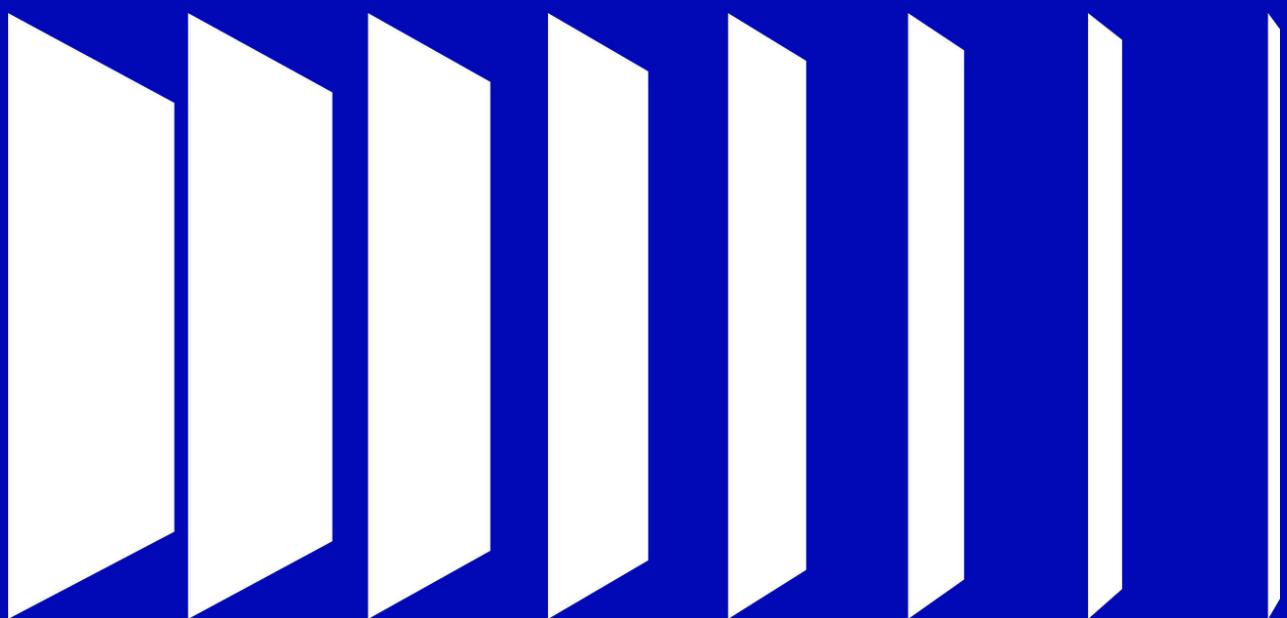
Table des illustrations

Figure 1.1 : Comparaison des émissions associées à la consommation d'un mégajoule (MJ) de kérósène vs SAF HEFA (gCO₂eq) - valeurs CORSIA	20
Figure 1.2 : Schéma des chemins carbone des différents carburants d'aviation	31
Figure 1.3 : Empreinte carbone d'un e-SAF en fonction de l'intensité carbone du mix électrique	32
Figure 1.4 : Schéma synthétique des filières de production de carburants aéronautiques non fossile	34
Figure 1.5 : Comparaison des empreintes carbone des principaux SAF selon la méthodologie CORSIA	36
Tableau 1.1 - Tableau de synthèse (4.G)	38
Figure 1.6 : Schéma des typologies de matières premières de biocarburants	42
Tableau 2.1 : Synthèse des estimations matières premières (2.H)	54
Figure 2.1 : Quantités d'énergie primaire valorisables selon les différents types de matières premières (estimations du rapport, ETC et AIE – hors CIVE)	55
Figure 2.2 : Schéma illustrant les concurrences entre usages énergétiques pour la valorisation de la biomasse (hors déchets municipaux)	58
Tableau 2.2 : Synthèse de l'évolution de la demande mondiale en carburants	68
Figure 2.3 : Comparaison de la demande en carburant (secteurs aérien, maritime, routier, agricole) et des quantités d'énergie valorisables à partir de la biomasse à l'échelle mondiale	70
Tableau 3.1 : Rendements surfaciques en production de SAF selon les cultures, procédés et systèmes énergétiques	76
Figure 3.1 : Coûts estimés pour la production d'hydrogène à base d'électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité solaire et éolienne, dans les différentes régions du monde, à l'horizon 2030 (source : Global Hydrogen Review 2025, Agence Internationale de l'Énergie, Scénario Stated Policies)	80
Figure 3.2 : Cartographie des projets e-fuels, basée sur les annonces >= 50ktoe (source : Bureau Français des e-fuels)	82
Tableau 4.1 : Facteurs d'émission	89
Tableau 4.2 : Hypothèses principales e-SAF	90
Tableau 4.3 : Budgets carbone	92
Tableau 4.4 : Consommation de carburant Horizon 2050, 2070 et 2100	94
Figure 4.1 (1) : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario de base (annonces secteur aérien, en termes de trafic et de consommation totale de kérósène, estimations SAF de l'AIE)	94
Figure 4.1 (2) : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario de base, prolongé jusqu'en 2070 puis 2100	95
Figure 4.2 (2) : Évolution des émissions de CO₂ induites par la consommation des différents carburants - Scénario de base, prolongé jusqu'en 2070 puis 2100	96
Figure 4.3 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C, 1.7°C, et le scénario SSP2-4.5 de l'AR6 du GIEC en 2021 (2.7°C en 2100, avec allocation de type "grandfathering", soit 2,6% du budget accordé à l'aviation commerciale de passagers) - Scénario de base (annonces secteur, estimations AIE, jusqu'à 2050, 2070 et 2100)	97
Figure 4.4 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario filières dégradées (bioSAF "NOK", e-SAF "NOK" & e-SAF "NOK Worse")	99
Figure 4.5 : Évolution des émissions de CO₂ induites par la consommation des différents carburants - Scénario filières dégradées (bioSAF "NOK", e-SAF "NOK" & e-SAF "NOK Worse")	100
Figure 4.6 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C et 1.7°C - Scénario filières dégradées (bioSAF "NOK", e-SAF "NOK" & e-SAF "NOK Worse")	101
Figure 4.7 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario modification arbitrages (biomasse prise au maritime et électricité au routier)	104

Figure 4.8 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario modification arbitrages (biomasse prise au maritime et électricité au routier)	104
Figure 4.9 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C, 1.7°C et les émissions du scénario de base (en s'arrêtant à 2050) - Scénario modification arbitrages (biomasse prise au maritime et électricité au routier)	106
Tableau 4.5 : Hypothèses sur les besoins en électricité pour produire les e-bioSAF et e-SAF, de 2025 à 2050	107
Tableau 4.6 : Évolution des facteurs d'émissions pour les différentes filières	108
Figure 4.10 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et FT puis besoins restants complétés en e-SAF)	108
Figure 4.11 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et FT puis besoins restants complétés en e-SAF)	109
Figure 4.12 : Capacités électriques bas-carbone nécessaires - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et Bio-FT puis besoins restants complétés en e-SAF)	110
Figure 4.13 : Comparaison du budget consommé avec les budgets 1.5°C et 1.7°C - Scénario e-bioSAF & e-SAF additionnels (optimisation filières ATJ et FT puis besoins restants complétés en e-SAF)	111
Tableau 4.7 : Quantités de CDR (Carbon Dioxide Removals) dans le scénario NZE de l'AIE (version actualisée de 2023)	112
Figure 4.14 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario modération trafic 1,5°C (5,2% du budget alloué à l'aérien)	113
Figure 4.15 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario modération trafic 1,5°C (5,2% du budget alloué à l'aérien)	114
Figure 4.16 : Évolution du trafic et de la consommation de carburants - Scénario modération trafic 1,7°C (3,9% du budget alloué à l'aérien)	115
Figure 4.17 : Évolution des émissions de CO2 induites par la consommation des différents carburants - Scénario modération trafic 1,7°C (3,9% du budget alloué à l'aérien)	115
Tableau 4.8 : Évolution du niveau de trafic, par rapport au point de départ en 2025 (correspondant à 9,6.10¹² RPK), pour les scénarios 1.5°C et 1.7°C	116
Tableau 4.9 : Évolution du niveau de trafic pour les scénarios 1.5°C et 1.7°C, exprimé en 10¹² RPK (Revenue Passengers Kilometers)	116
Tableau 4.10 : Évolution du niveau de trafic pour les scénarios 1.5°C et 1.7°C, exprimé en km par an et par personne (dans l'hypothèse d'une répartition homogène du trafic aérien mondial)	116
Tableau 4.11 : Évolution des émissions unitaires des vols - et donc des émissions évitées par vol retiré - dans les scénarios 1.5°C et 1.7°C	117
Figure 4.18 : Carte des destinations atteignables depuis Paris avec un volume total de vols en avion équitablement réparti	119
Tableau 5.1 : Synthèse de l'évolution de la demande française en carburants	126
Figure 5.1 : Diagramme de Sankey des flux de biomasse en France (SGPE - Bouclage biomasse : enjeux et orientations - Juillet 2024)	130
Tableau 5.2 : Synthèse des estimations des matières premières mobilisables pour la valorisation en biocarburants	137
Figure 5.2 : Comparaison de la demande en carburant (secteurs aérien, maritime, routier, agricole) et des quantités d'énergie valorisables à partir de la biomasse à l'échelle française	137
Figure 5.3 : Cartographie des productions de SAF en France (Contrat stratégique de filière 2024-2027 : Volet SAF)	141
Figure 5.4 : Carte illustrant les limites de développement des unités e-bioSAF	149
Tableau 5.3 : Matrice des volumes de SAF productibles en France en 2050 en fonction des allocations de biomasse et d'électricité.	149

Figure 5.5 - Schéma du principe de répartition de l'énergie issue de la biomasse résiduelle pendant conversion en hydrocarbures	150
Figure 5.6 : Évolution du carburant aérien (à gauche) et des émissions de CO ₂ (à droite) du secteur à l'échelle française, dans l'hypothèse d'une croissance de 1,1 % du secteur et d'une allocation de 30 TWhe et de 30 % de la biomasse résiduelle à l'aviation.	151
Figure 5.7 : Évolution du carburant aérien (à gauche) et des émissions de CO ₂ (à droite) du secteur à l'échelle française, dans l'hypothèse d'un trafic contraint par un budget carbone de 300 Mt, d'une allocation de 30 TWhe et de 30 % de la biomasse résiduelle à l'aviation.	152
Tableau 5.4 : Matrices illustrant l'évolution nécessaire du trafic pour respecter les taux d'incorporation de SAF mandatés par la réglementation européenne en 2050. En vert, les cas où la croissance est envisageable ; en rouge, là où elle ne l'est pas.	153
	154
Tableau 5.5 : Pourcentage de la neutralité carbone et du budget SNBC consommé par l'aviation en 2050 (carburant à gauche, budget SNBC à droite)	154
Tableau 5.6 : Réduction du trafic nécessaire pour que le secteur aérien ne contribue qu'à 6,8 % des émissions nationales en 2050, selon les choix d'électricité et de biomasse	154
Tableau 5.7 : Réduction moyenne de trafic nécessaire entre 2035 et 2045 pour que le secteur aérien ne contribue qu'à 6,8 % du budget carbone de la SNBC 3, selon les choix en matière d'électricité et de biomasse.	154
Figure 5.8 - Évolution du carburant aérien (à gauche) et des émissions de CO ₂ (à droite) du secteur à l'échelle française, dans l'hypothèse d'un trafic contraint par un budget carbone de 300 Mt, d'une allocation de 110 TWhe et de 30 % de la biomasse résiduelle à l'aviation.	155
Figure A4.1 : Scénario de base et scénarios alternatifs - Synthèse des mix de carburants	172
Figure A4.2 : Bilan des budgets carbone de l'aviation commerciale	Scénario de base et
scénarios alternatifs – Tous scénarios sauf modération trafic 1.7°C : 2025-2050 – Scénario modération	
trafic 1.7°C : 2025-2055	172
Figure A4.3 : Scénarios et variations - Synthèse des mix de carburants	174

Annexes



Annexe 1 – Ordres de grandeur

A. Quelles quantités de matières premières pour alimenter en SAF un avion reliant Paris à Montréal ?

Un aller simple Paris–Montréal nécessite **180 litres (144 kg) de kérosène par passager** pour parcourir 6 000 km, avec une consommation moyenne de 3 L/100 km/passager. Sans carburant fossile, il faudrait, par passager, selon le type de matière première :

- **Huile usagée** : 170 kg, soit environ 185 litres d'huile usagée
- **Biomasse lignocellulosique sèche** : 720 kg, équivalente à 900 kg de bois de chauffage (facteur de conversion 0,8 pour le bois sec)
- **Culture lignocellulosique annuelle (miscanthus)** : 720 kg -> **Surface nécessaire** : 500 m² (rendement de 15 t/ha)
- **Électricité** : 4 000 kWh (ou 4 MWh), correspondant à un rendement hypothétique de 30 MWh/t de vecteur énergétique

Pour un aller-retour, il suffit de multiplier toutes ces quantités par 2.

B. Quelle distance parcourue avec 1 MWh d'électricité ?

Dans cette annexe, on détaille les calculs de distance pouvant être parcourue avec 1 MWh.

- **Voiture électrique**
 - Consommation : 20 kWh/100 km
 - Énergie disponible : 1 MWh = 1 000 kWh
 - **Distance parcourue** : 5 000 km
- **Avion avec e-SAF (par passager)**
 - Consommation : 3 L/100 km/passager
 - 1 MWh permet de produire environ 1/30 tonne de e-SAF (la production de e-SAF nécessite 30 MWh par tonne), soit ≈ 42 L
 - **Distance parcourue** : 1 400 km
- **Voiture thermique avec e-fuel**
 - Consommation : 6 L/100 km
 - 1 MWh permet de produire environ 1/30 tonne de e-fuel (la production de e-fuel nécessite 30 MWh par tonne), soit ≈ 45 L (densité = 0,745 kg/L)
 - **Distance parcourue** : 750 km

Conclusion

Pour une même énergie de 1 MWh, la mobilité électrique est beaucoup plus efficace que les carburants synthétiques ou l'e-SAF, permettant de parcourir une distance 6 à 7 fois plus longue.

C. Comment maximiser la production de SAF sur une surface donnée ?

Problématique

Dans le contexte français, comment optimiser l'usage d'une surface agricole de 100 hectares (1 km²) pour produire du carburant aérien bas-carbone ? Cette question implique de comparer différentes cultures et procédés de conversion énergétique, en prenant en compte à la fois le rendement énergétique et les contraintes agronomiques et environnementales.

Données de référence

Pour évaluer les différentes options, les données suivantes ont été considérées (les sélectivités sont entre 60 et 70%) :

- **Colza / HEFA**
 - Rendement : 35 q/ha
 - Rendement massique HEFA : 85 %
- **Betterave sucrière / EtJ (Éthanol-to-Jet)**
 - Rendement : 14 t sucre/ha
 - Conversion en éthanol : 0,6 L/kg sucre
 - Pouvoir calorifique inférieur du saccharose : 16,5 MJ/kg
 - Rendement énergie AtJ : 65 % (entre 50 et 75 %)
- **Miscanthus / BtL**
 - Rendement biomasse : 15 tMS/ha
 - Rendement massique BtL : 20 %
- **Miscanthus + solaire / PBtL**
 - Rendement biomasse : 15 tMS/ha
 - Rendement massique PBtL : 45 %
 - Besoins en électricité : 10 MWh/t SAF
 - Panneaux solaires : 300 kWh/an/m²
 - Configuration : 1,5 ha de panneaux + 98,5 ha de miscanthus
- **Panneaux solaires / PtL (Power-to-Liquid)**
 - Production solaire : 300 kWh/m²/an
 - Rendement électrique PtL : 30 MWh/t SAF
- **Peuplier / BtL**
 - Rotation : 5 ans
 - Biomasse totale sur rotation : 5 000 tMS
 - Rendement annuel moyen : 10 tMS/ha/an
- **Pin maritime / BtL**
 - Rotation : 20 ans
 - Biomasse totale sur rotation : 15 000 tMS
 - Rendement annuel moyen : 7,5 tMS/ha/an

Résultats

Culture / Système	Procédé	Rendement surfacique (t SAF/km ² /an)
Colza	HEFA	180
Betterave sucrière	AtJ	245
Miscanthus	BtL	180
Peuplier (5 ans)	BtL	120
Pin maritime (20 ans)	BtL	90
Miscanthus + panneaux solaires	PBtL	400
Panneaux solaires	PtL	10 000

Limites et contraintes

- **Betterave sucrière** : Culture exigeante en eau et intrants, adaptée aux climats tempérés du nord de la France. Elle pose des enjeux environnementaux liés à l'usage de produits phytosanitaires et engrais, notamment les néonicotinoïdes.
- **Colza** : Déjà largement cultivé, le rendement semble plafonner dans plusieurs régions, limitant le potentiel d'amélioration.
- **Miscanthus** : Plante rustique adaptée aux terres marginales. Le rendement dépend fortement du procédé de conversion énergétique.
- **Agrivoltaïsme** : Combinaison de biomasse et énergie solaire, permettant une valorisation optimale de la surface et un double bénéfice économique et énergétique.
- **Cultures arboricoles** : Rotations longues moins productives en termes de carburant par surface mais cruciales pour la biodiversité et les services écosystémiques. Les rotations courtes réduisent l'empreinte écologique mais ne remplacent pas les fonctions écologiques complètes.
- **Panneaux solaires** : Bien que très productifs en termes de SAF via PtL, ils impliquent une artificialisation du sol, peuvent susciter des oppositions locales et restent coûteux à l'installation.

Annexe 2 – Récapitulatif des matières premières biologiques

Matière première	Filière SAF	Considéré conforme pour les SAF par l'UE	Volume actuel pour SAF	Potentiel pour SAF ²⁷⁶	Leviers possible pour mobiliser cette matière première pour la production de SAF
Huiles usagées et graisses animales	HEFA	Oui	Très faible	Très faible	Amélioration de la logistique de collecte
Culture dédiés biocarburant 1G	HEFA/AtJ	Non	Presque inexistant	Nul en Europe car interdit par la réglementation Moyen ailleurs	Réorientation des matières premières dites 1G à la suite de l'électrification et à la sobriété du transport routier.
Culture dédiée lignocellulosique	BtL/PBtL	Oui si cultivée sur des "terres dégradées"	Nul	Faible dans les considérations européennes Élevé dans le Monde si libération de surfaces agricoles	Végétalisation des régimes alimentaires qui entraîne une baisse des cheptels, ce qui libère des surfaces agricoles
Résidus agricoles	BtL/PBtL	Oui	Nul	Moyen	Amélioration de la logistique de collecte
Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) lignocellulosique	BtL/PBtL	Oui	Nul	Moyen si diffusion des pratiques culturales et optimisation logistique	Développement des couverts végétaux dans le cadre de la transition agricole Amélioration de la logistique de collecte
Biomasse forestière	BtL/PBtL	Oui si encadrée	Nul	Faible dans les considérations européennes Élevé à échelle mondiale si substitution du bois-énergie	Développement des haies agricoles dans le cadre de la transition agricole Reforestation à la suite de la libération de surfaces cultivables avec la baisse des cheptels Substitution de l'usage du bois-énergie

²⁷⁶ Comparé à la demande qui avoisine les 100 EJ, nous considérons : Très faible : potentiel inférieur à 1 EJ / Faible : potentiel entre 1 et 5 EJ / Moyen : potentiel entre 5 et 15 EJ / Élevé : potentiel supérieur à 15 EJ

Répartition des potentiels énergétiques :

Huiles usagées : 0,9 EJ → très faible

Cultures dédiées aux biocarburants de 1^{re} génération : 7 EJ (<1 EJ avec la réglementation européenne) → moyen

Cultures lignocellulosiques : 15 EJ, dont moins de 1 EJ sur des surfaces dégradées → élevé (suivant mise en place des leviers)

Résidus agricoles : 6 EJ → moyen

Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) : 8 EJ → moyen (suivant mise en place des leviers)

Biomasse forestière : 20 EJ max, avec un faible pourcentage pris en compte dans la réglementation européenne → élevé (suivant mise en place des leviers)

Annexe 3 – Traduction ANNEXE IX RED (réglementation européenne)

Partie A. Matières premières pour la production de biogaz pour le transport et de biocarburants avancés, dont la contribution aux parts minimales visées aux premier et quatrième tirets de l'article 25, paragraphe 1, peut être considérée comme double de leur contenu énergétique :

- (a) Algues cultivées sur terre dans des bassins ou des photobioréacteurs ;
- (b) Fraction de biomasse des déchets municipaux mélangés, à l'exception des déchets ménagers séparés soumis aux objectifs de recyclage visés au point (a) de l'article 11, paragraphe 2, de la directive 2008/98/CE ;
- (c) Biodéchets, tels que définis au point (4) de l'article 3 de la directive 2008/98/CE, provenant des ménages privés et soumis à la collecte séparée définie au point (11) de l'article 3 de cette directive ;
- (d) Fraction de biomasse des déchets industriels non aptes à être utilisés dans la chaîne alimentaire ou des aliments pour animaux, y compris le matériel provenant de la vente au détail, de la vente en gros, de l'industrie agroalimentaire et de l'industrie de la pêche et de l'aquaculture, à l'exclusion des matières premières énumérées dans la partie B de la présente annexe ;
- (e) Paille ;
- (f) Fumier animal et boues d'épuration ;
- (g) Effluents d'huilerie de palme et régimes de fruits de palme vides ;
- (h) Goudron de colophane ;
- (i) Glycérine brute ;
- (j) Bagasse ;
- (k) Marc de raisin et lies de vin ;
- (l) Coques de noix ;
- (m) Balles ;
- (n) Épis de maïs débarrassés des grains ;
- (o) Fraction de biomasse des déchets et résidus issus de la sylviculture et des industries du bois, à savoir : écorce, branches, éclaircies pré-commerciales, feuilles, aiguilles, cimes d'arbres, sciure, copeaux, liqueur noire, liqueur brune, boues de fibres, lignine et goudron de colophane ;
- (p) Autres matières cellulosiques non alimentaires ;
- (q) Autres matières lignocellulosiques, à l'exception des grumes à scier et des grumes pour placage ;

- (r) Huiles de fusel provenant de la distillation alcoolique ;
- (s) Méthanol brut issu de la pâte kraft provenant de la production de pâte de bois ;
- (t) Cultures intermédiaires, telles que cultures pièges et cultures de couverture, cultivées dans des zones où, en raison d'une courte période végétative, la production de cultures alimentaires et fourragères est limitée à une seule récolte, et à condition que leur utilisation ne provoque pas de demande supplémentaire de terres et que la teneur en matière organique du sol soit maintenue, lorsqu'elles sont utilisées pour la production de biocarburants pour le secteur de l'aviation ;
- (u) Cultures cultivées sur des terres sévèrement dégradées, à l'exception des cultures alimentaires et fourragères, lorsqu'elles sont utilisées pour la production de biocarburants pour le secteur de l'aviation ;
- (v) Cyanobactéries.

Partie B. Matières premières pour la production de biocarburants et de biogaz pour le transport, dont la contribution à la part minimale fixée au premier tiret de l'article 25, paragraphe 1, doit être limitée et peut être considérée comme double de leur contenu énergétique :

- (a) Huiles de cuisson usagées ;
- (b) Graisses animales classées dans les catégories 1 et 2 conformément au règlement (CE) n° 1069/2009 ;
- (c) Cultures endommagées non aptes à être utilisées dans la chaîne alimentaire ou pour l'alimentation animale, à l'exclusion des substances intentionnellement modifiées ou contaminées pour répondre à cette définition ;
- (d) Eaux usées municipales et dérivés autres que les boues d'épuration ;
- (e) Cultures cultivées sur des terres sévèrement dégradées, à l'exception des cultures alimentaires et fourragères et des matières premières énumérées dans la Partie A de la présente annexe, lorsqu'elles ne sont pas utilisées pour la production de biocarburants pour le secteur de l'aviation ;
- (f) Cultures intermédiaires, telles que cultures pièges et cultures de couverture, à l'exception des matières premières énumérées dans la Partie A de la présente annexe, cultivées dans des zones où, en raison d'une courte période végétative, la production de cultures alimentaires et fourragères est limitée à une seule récolte, et à condition que leur utilisation ne provoque pas de demande supplémentaire de terres et que la teneur en matière organique du sol soit maintenue, lorsqu'elles ne sont pas utilisées pour la production de biocarburants pour le secteur de l'aviation.

Annexe 4 – Analyse supplémentaire des scénarios à l'échelle mondiale

Différents mix considérés

Les différents scénarios envisagés dans notre étude font appel à des quantités et des qualités différentes de kérosène ; le scénario de base considère le même volume de trafic et de carburant que les projections de l'industrie aéronautique via l'ATAG, soit 494 Mt en 2050. Cependant, il limite l'usage des SAF aux quantités allouées à l'aviation par l'Agence Internationale de l'Énergie dans son scénario Net-Zero-by-2050, où l'ensemble des secteurs font appel à des ressources décarbonées tout en respectant des critères de durabilité jugés conservateurs par l'AIE, notamment en termes de biomasse. La combinaison de ces deux hypothèses conduit à une proportion d'environ 50% de SAF à l'horizon 2050.

Pour obtenir le même niveau de SAF que dans le scénario de décarbonation ATAG S2, il est possible :

- Soit d'avoir recours à des carburants alternatifs dont le niveau de durabilité serait altéré, pour un volume de presque 200 Mt en 2050,
- Ou bien de prioriser l'accès de l'aviation aux ressources décarbonées par rapport à d'autres secteurs, qui devraient alors avoir recours à de l'énergie fossile,
- Ou encore d'investir dans des capacités additionnelles de production de SAF, notamment e-bioSAF pour optimiser l'usage du carbone biogénique, et e-SAF pour compléter, à hauteur respectivement de ~210 Mt et 165 Mt en 2050.

Les scénarios de modération de trafic, quant à eux, permettent à l'aviation de respecter une part contrainte du budget carbone anthropogénique, en maximisant l'usage du e-bioSAF à ~210 Mt en 2050, et en mobilisant un total de 278 Mt de SAF en 2050 dans le scénario compatible 1.5°C (respectivement 319 Mt de SAF en 2055 pour le scénario compatible 1.7°C) tout en diminuant le volume total de kérosène fossile jusqu'à zéro à cet horizon.

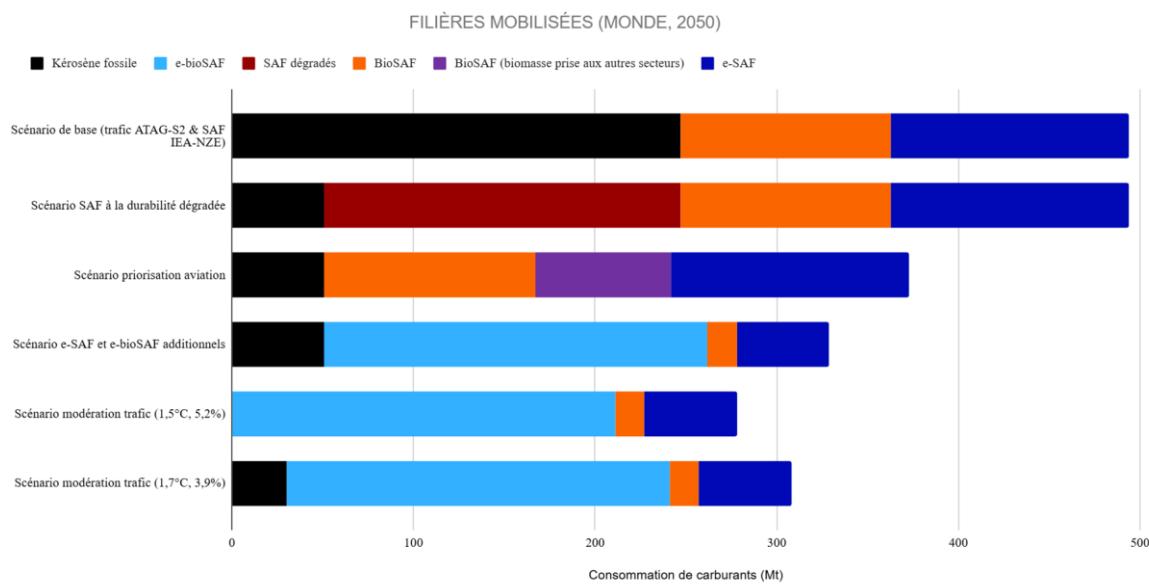


Figure A4.1 : Scénario de base et scénarios alternatifs - Synthèse des mix de carburants

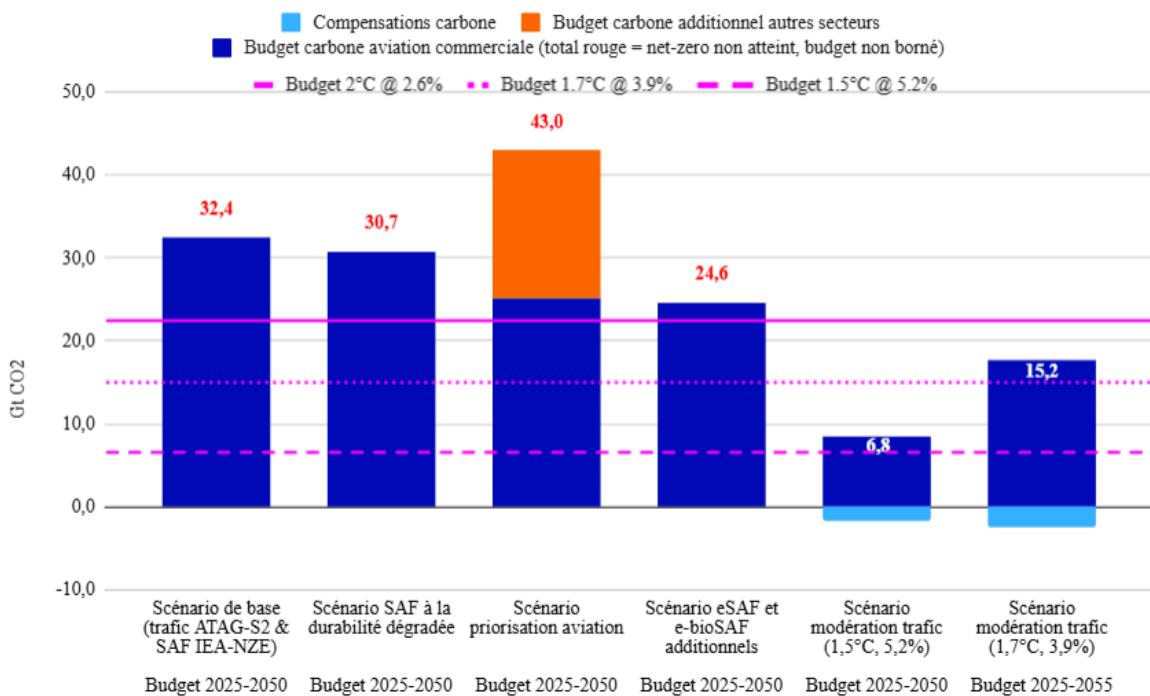


Figure A4.2 : Bilan des budgets carbone de l'aviation commerciale
Scénario de base et scénarios alternatifs – Tous scénarios sauf modération trafic 1,7°C : 2025-2050 – Scénario modération trafic 1,7°C : 2025-2055

Sensibilité à l'ambition des hypothèses

Les différents scénarios envisagés dans notre étude se basent sur les données du scénario ATAG S2 du secteur aérien, en termes de gains d'efficacité. Comme indiqué au §1.d, ces hypothèses paraissent très, voire **trop optimistes, considérant par exemple l'arrivée de moteurs Open Rotor dès 2030.**

Si l'on table sur une amélioration moins ambitieuse de l'efficacité énergétique du parc mondial d'avions de ligne, plafonnée à 1% par an de 2030 à 2050 (contre 1,5% en moyenne dans le scénario ATAG S2) alors, pour une même croissance du trafic, **la consommation de carburants passe en 2050 de 494 Mt à 553 Mt, soit une hausse de 12%.** Entre 2050 et 2100, une forme de saturation des gains d'efficacité est modélisée dans le scénario de base (voir §2.a). En l'accentuant un peu, c'est-à-dire en diminuant les gains d'efficacité annuels jusqu'à 0,3%/an en 2100 (contre 0,4% dans le prolongement initial), la consommation totale de kérosène atteint 975 Mt au lieu de 768 Mt à cet horizon de temps. x d'évolution identiques à ceux de la période 2045-50. :

Dans le scénario de base (§2), **le budget consommé entre 2025 et 2050 augmente de 2 GtCO₂**, atteignant 34,6 GtCO₂ au lieu de 32,4 GtCO₂. La tendance s'amplifie ensuite, puisqu'en 2100, le budget carbone de l'aviation passe de 80 à 110 GtCO₂, soit une hausse de près de 40% liée aux moindres gains d'efficacité

Dans le scénario "e-BioSAF et e-SAF additionnels" (§5), **la variation 100% SAF requiert 22% d'électricité supplémentaire**, passant de 8700 à plus de 10 000 TWh à l'horizon 2050

Dans le scénario contraint en budget carbone (§6), **le trafic en 2050 doit s'établir à 11,7 x10¹² RPK, au lieu de 13 x10¹² RPK** pour rester compatible avec un objectif 1,7°C, soit une perte de 10%

Une deuxième hypothèse, également ambitieuse, peut être questionnée : le déploiement massif **de e-SAF, ayant une intensité carbone presque 90% plus faible que celle du kérosène fossile.** S'il est vrai que ces carburants sont nécessaires à la décarbonation du secteur aérien, il faut néanmoins reconnaître qu'ils sont coûteux, et pourraient ne pas être considérés prioritaires car trop énergivore, ou être produits sans réel bénéfice carbone - une électricité dépassant 128 gCO₂/kWh suffisant à les rendre moins vertueux que du kérosène fossile.

Ainsi, en modélisant dans les scénarios de sensibilité précédents l'absence d'e-SAF à un niveau significatif (ou d'un impact CO₂ globalement du même ordre que celui du pétrole qu'ils sont censés permettre de remplacer) :

Pour le scénario de base, **le budget consommé entre 2025 et 2050 augmente de 4 GtCO₂** (à 38,5 GtCO₂) et **celui en 2100 de 60 GtCO₂ (à près de 170 GtCO₂).** L'aviation **consommerait alors - à elle seule - presque la moitié du budget carbone global (tous secteurs confondus) permettant de rester sous la limite des 1,7°C**

Le scénario "e-BioSAF et e-SAF additionnels" perd tout son sens

Pour le scénario en budget 1,7°C, **le trafic en 2050 n'est plus que de 6,2 x10¹² RPK, soit un tiers de moins que le niveau de 2025, puis continue de descendre, avec 5,5 x10¹² RPK en 2055**

FILIÈRES MOBILISÉES (MONDE, 2050)

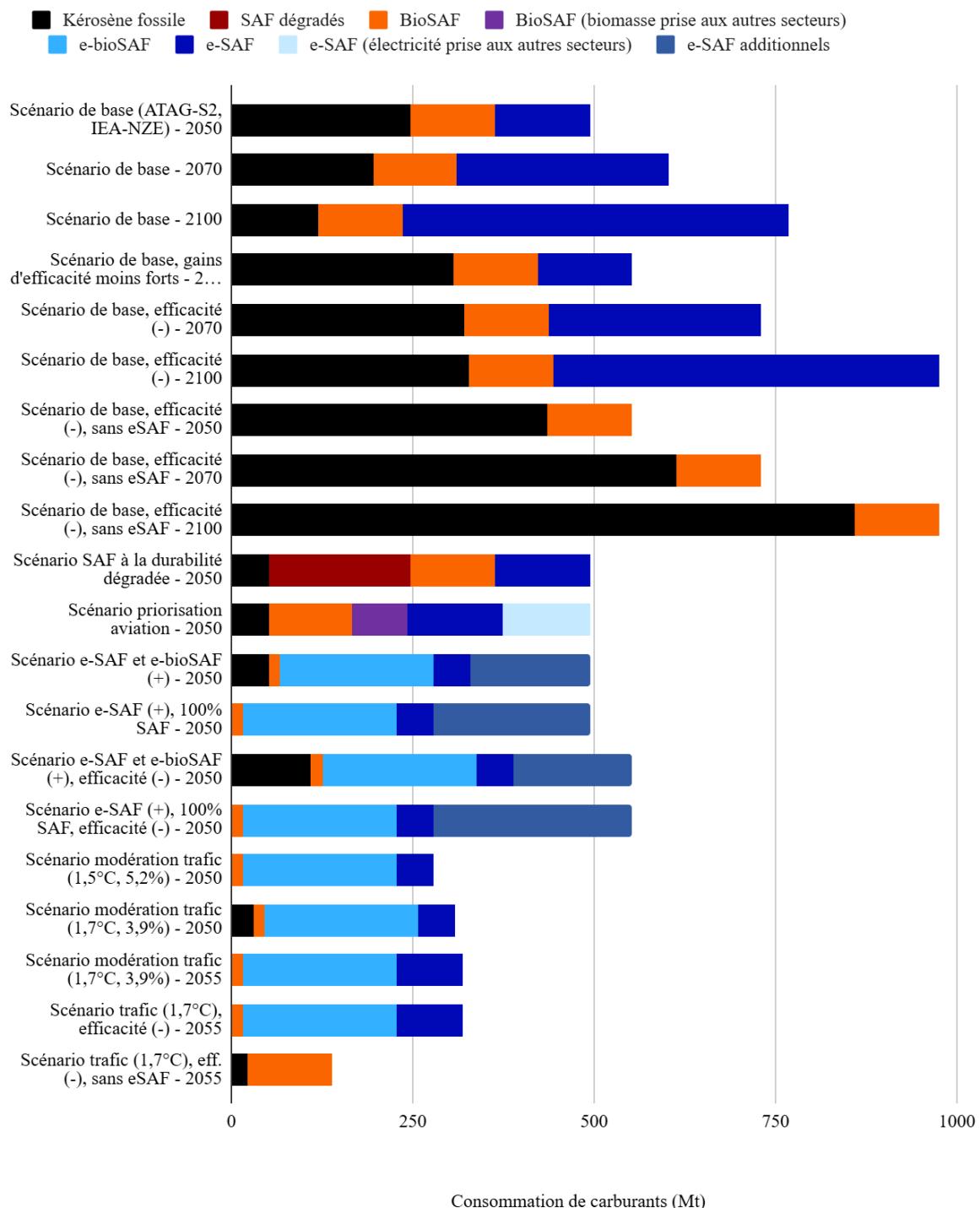


Figure A4.3 : Scénarios et variations - Synthèse des mix de carburants

[Scénarios de base 2050, 2070, 2100]

Malgré des hypothèses extrêmement optimistes sur les gains d'efficacité et déploiement des e-SAF, et la prolongation de ces tendances jusqu'à 2070 et 2100, le secteur aérien ne parvient toujours pas à sortir véritablement du pétrole. La part du kérosène fossile dans le mix n'est alors plus que de 15% en 2100, mais n'a en absolu diminué que de 60% depuis 2025.

[Scénarios de base 2050, 2070, 2100 – Variation efficacité (-)]

En ramenant les gains d'efficacité à un niveau un peu moins ambitieux que celui des scénarios industriels (2,7 L/pax/100km en moyenne en 2050, puis 2,3 L/pax/100km en 2070 et 2,1 L/pax/100km en 2100, au lieu de 2,4, 1,9 et 1,6 L/pax/100km, soit -0,62%/an au lieu de -0,93%/an sur 75 ans), et malgré un déploiement massif des e-SAF, la consommation de kérosène fossile ne parvient pas à diminuer. **Ainsi, une faible variation à la baisse des gains d'efficacité conduit au fait que la consommation de pétrole, au lieu de diminuer de 60% en 75 ans, revient exactement au niveau de 2025.**

[Scénarios de base 2050, 2070, 2100 - Variation efficacité (-) et sans e-SAF]

Dans le cas où le déploiement des e-SAF ne se concrétise pas, la consommation de kérosène fossile ne cesse d'augmenter, et avec elle les émissions annuelles de l'aérien. Dans cette variation, le secteur émet en 2100 plus de 3,3 GtCO₂, soit plus du triple de ses émissions actuelles. **Sans e-SAF, le secteur aérien est voué à rester dépendant au pétrole, et ne pourrait probablement pas se décarboner.**

[Scénario e-bioSAF et e-SAF (+) - Variation 100% SAF, efficacité (-), 2050]

En appliquant au scénario "e-bioSAF et e-SAF additionnels", dans sa version 100% SAF en 2050, les mêmes limitations en termes de gains d'efficacité, le besoin en électricité passe de 8700 TWhe à plus de 10 000 TWhe en 2050. **Si les e-SAF sont nécessaires pour permettre au secteur aérien de sortir du pétrole, ils ne peuvent se passer d'une remise en question de la croissance du trafic, sauf à requérir des besoins en capacités électriques proprement colossaux au regard du temps imparti.**

[Scénarios 1.7°C - Variation efficacité (-), avec et sans e-SAF]

Combiner modération du trafic et déploiement des SAF peut permettre de continuer de voler tout en respectant un budget 1.7°C. Mais cela requiert d'amorcer dès maintenant le déploiement de la filière e-SAF, pour qu'elle atteigne une capacité de production suffisante d'ici 2050. En l'absence de e-SAF, et en considérant que les gisements de bioSAF sont limités, le trafic serait contraint de chuter drastiquement (-43%, à échelle mondiale) pour respecter le budget carbone. **Sans e-SAF, le secteur aérien aurait donc le choix entre rester dépendant au pétrole (et ses émissions de CO₂) ou sacrifier une importante part de son trafic afin de tenir ses objectifs climatiques.**

Aéro Décarbo rassemble des femmes et des hommes salariés, entrepreneurs, retraités, étudiants et passionnés de l'aéronautique et de l'aérospatial autour d'une mission commune : accompagner ces secteurs vers un avenir respectueux des limites planétaires. Avec rigueur scientifique et honnêteté intellectuelle, l'association analyse et encourage la transformation de l'utilisation des airs afin d'assurer la pérennité des industries qui en dépendent.

www.decarbo.org



Nos partenaires

Aéro Décarbo et le Shift Project remercient les partenaires du projet pour leur soutien technique et financier.



The Shift Project est un groupe de réflexion qui vise à éclairer et influencer le débat sur les défis climat-énergie. Nous sommes une association d'intérêt général. Nos membres financeurs sont pour la plupart des entreprises. Guidé par l'exigence de rigueur scientifique et technique, notre regard sur l'économie est avant tout physique et systémique. www.theshiftproject.org

Contacts

Timon Vicat-Blanc
Président Aéro Décarbo
contact@decarbo.org

Ilana Toledano
Responsable communication
ilana.toledano@theshiftproject.org

Graphisme

Jérémy Garcia-Zubialde

