



# Carburants alternatifs : quels moyens pour quelles ambitions ?

## Recherches & Documents

N°01/2024

**Annabelle Livet**

Chargée de recherche, Fondation pour la recherche stratégique

Février 2024

[www.frstrategie.org](http://www.frstrategie.org)

**FONDATION**  
*pour la* **RECHERCHE**  
**STRATÉGIQUE**

Fondation pour la Recherche Stratégique (FRS)

55 rue Raspail 92300 Levallois-Perret

Fondation reconnue d'utilité publique par décret du 26 février 1993

Directeur de la publication : Bruno Racine

ISSN : 2273 - 4644

© FRS 2024 — tous droits réservés

*Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L.122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration sous réserve de préciser le nom et la qualité de l'auteur et la source de la citation, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.*

# SOMMAIRE

<b>CARBURANTS ALTERNATIFS : QUELS MOYENS POUR QUELLES AMBITIONS ?</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
<b>1. MARCHE ET TECHNOLOGIES : ETAT DES LIEUX</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1. Des évolutions complexes du marché mondial de l'énergie</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2. Spécificités des technologies de carburants alternatifs</b> .....	<b>12</b>
1.2.1. Les biocarburants.....	12
1.2.2. Les carburants de synthèse.....	14
<b>1.3. Quelles politiques en faveur des carburants alternatifs ?</b> .....	<b>16</b>
<b>2. LES PRINCIPALES VARIABLES D'UNE TRANSITION ENERGETIQUE VERS LES CARBURANTS ALTERNATIFS</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1. La question technologique</b> .....	<b>20</b>
2.1.1. Enjeux de consommation et de production des carburants alternatifs .....	20
2.1.2. Enjeux de maîtrise technologique .....	21
<b>2.2. La question de la disponibilité des énergies vertes</b> .....	<b>22</b>
2.2.1. Disponibilité des surfaces .....	22
2.2.2. La disponibilité des ressources .....	24
<b>2.3. La question normative</b> .....	<b>27</b>
<b>3. QUELLE SECURITE D'APPROVISIONNEMENT POUR LES CARBURANTS ALTERNATIFS ?</b> <b>EXPLORATION DE TROIS LEVIERS</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1. Rationaliser la demande : un impératif</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2. Garantir un volume de production dédié grâce à la planification ?</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3. Vers une ère XtL ou pluri-carburant ?</b> .....	<b>32</b>
<b>3.4. Quel lien civilo-militaire ?</b> .....	<b>33</b>
<b>CONCLUSION : DES DEFIS AMBITIEUX... ET DES OPPORTUNITES</b> .....	<b>35</b>

## FIGURES

<b>FIGURE N° 1 : ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> MONDIALES PROVENANT DU TRANSPORT PAR TYPE DE TRANSPORT DANS LE SCENARIO NET ZERO (NZE), 2000-2030 .....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURE N° 2 : CONSOMMATION MONDIALE DE PETROLE EN 2022 (TWH).....</b>	<b>10</b>
<b>FIGURE N° 3 : PRIX DU PETROLE BRUT VS. CONSOMMATION DE PETROLE (USD/M3 VS.M3/JOUR).....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURE N° 4 : PRINCIPALES FILIERES FRANÇAISES DE BIOCARBURANTS .....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURE N° 5 : PRINCIPALES VOIES DE SYNTHÈSE DES E-FUELS .....</b>	<b>15</b>
<b>FIGURE N° 6 : DETAIL D'UN SYSTEME DE PRODUCTION DE CARBURANT DE SYNTHÈSE PAR PROCÈDE FISCHER-TROPSCH ET LE RECOURS AU CAPTAGE DU DIOXYDE DE CARBONE DANS L'AIR (DAC)15</b>	
<b>FIGURE N° 7 : REPARTITION DE LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS PAR PAYS (%) EN 2020.....</b>	<b>17</b>
<b>FIGURE N° 8 : REPARTITION DU NOMBRE DE PROJET PTL PAR PAYS (CERCLE INTERIEUR) ET LES ANNONCES DE PRODUCTION DE CARBURANT DE SYNTHÈSE (TONNE) ENTRE 2024 ET 2026 (CERCLE EXTERIEUR) .....</b>	<b>17</b>
<b>TABLEAU N° 1 : OBJECTIFS DE DECARBONATION ESTIMÉS POUR LE SECTEUR AÉRIEN PAR INCORPORATION DE CARBURANT ALTERNATIF DANS L'UE EN 2023.....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURE N° 9 : ACADEMIE DES TECHNOLOGIES 2014 .....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURE N° 10 : STRUCTURE DE LA CONSOMMATION MONDIALE DE BIOCARBURANTS EN 2020 .....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURE N° 11 : CONDITIONS DE PRECARITE SAISONNIERE EN EAU EN EUROPE.....</b>	<b>25</b>
<b>TABLEAU N° 2 : QUEL AVENIR POUR LES BIOCARBURANTS AERONAUTIQUES ? .....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURE N° 12 : SCHEMA GENERAL DE L'APPROVISIONNEMENT DE PARIS – CHARLES DE GAULLE EN BIOCARBURANT AERONAUTIQUES.....</b>	<b>32</b>

# Carburants alternatifs : quels moyens pour quelles ambitions ?

---

## Introduction

La décarbonation d'une société revient à transformer structurellement tous les secteurs, du niveau de la production de l'énergie aux équipements la consommant en passant par le système de distribution.

À ce jour, le transport reste le deuxième secteur mondial d'émissions de CO<sub>2</sub> après celui de la production de l'énergie. Plus précisément, le transport routier est de loin le plus gros émetteur de gaz à effet de serre, représentant 73 % des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur du transport et près de 12 % des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) mondiales. Les transports maritime et aérien représentent chacun 1 % des émissions totales avec des niveaux d'émissions relativement similaires jusqu'en 2014. Depuis, l'augmentation des émissions de l'aviation s'est intensifiée de près de 2 % par an<sup>1</sup> – contribuant à près de 13 % des émissions de CO<sub>2</sub> du transport mondial. La vitesse d'augmentation des émissions de l'aviation dépasse désormais la vitesse des émissions carbone du secteur maritime, qui se situent autour de + 0,85 % par an<sup>2</sup>.

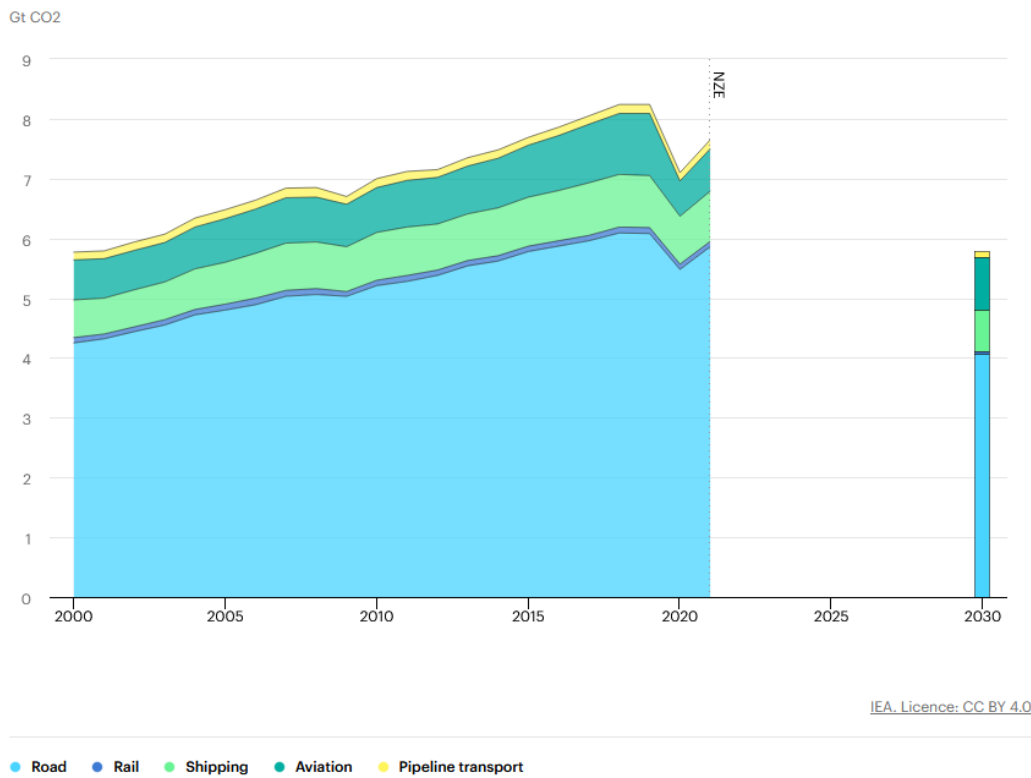
Si la crise sanitaire liée à la pandémie de Covid-19 avait provoqué une chute d'environ 15 % des émissions carbone mondiales émises par le secteur du transport, celles-ci reviennent progressivement au niveau pré-Covid. La cause principale reste la très grande dépendance – à hauteur de 91 % – des moyens de transport aux hydrocarbures. En outre, l'augmentation constante du recours aux moyens de transport dans le monde entraîne à elle seule une croissance annuelle de 5 % des flux aériens commerciaux.

---

<sup>1</sup> Fact Sheet – Climate Change, [Conférence des Nations unies pour le transport durable](#), 15 octobre 2021, Pékin.

<sup>2</sup> Ces mesures ne concernent pas les autres composants polluants présents dans les carburants tels que les aromatiques (oxydes nitriques, NOx) ou le soufre (dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>). Rapport final : *Updates analysis of the non-CO<sub>2</sub> climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30 (4)*, [Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne](#) (EASA), septembre 2020.

**Figure n° 1 : ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> MONDIALES PROVENANT DU TRANSPORT PAR TYPE DE TRANSPORT DANS LE SCENARIO NET ZERO (NZE), 2000-2030**



Source : [Agence Internationale de l'Énergie](#) (AIE), 22 septembre 2022

Les politiques énergétiques actuelles misent sur l'électrification des petits moyens de transport (véhicules terrestres). Les autres branches du transport (poids lourds, aviation, maritime) sont plus difficilement électrifiables en raison, notamment, d'enjeux techniques pour les batteries actuelles<sup>3</sup>. D'autres pistes sont donc explorées pour ces moyens de transport, à commencer par l'usage de carburants alternatifs – non entièrement issus des hydrocarbures – mais dérivés de matières organiques (biocarburants ou *biofuels*) ou produits à partir d'électricité et d'hydrogène (carburants de synthèse ou *e-fuels*).

Aussi bien dans le cas de l'électrification que dans celui des carburants alternatifs, l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement doit être adaptée, des modes de production aux engins consommateurs, en passant par les méthodes de distribution de ces carburants. Les infrastructures électriques (bornes de rechargement par exemple) commencent à se développer mais celles des carburants alternatifs (production, stations de rechargement, etc.) ne sont pas encore visibles, entre autres par manque de maturité technologique.

<sup>3</sup> Celles-ci ne possédant pas, par exemple, l'intensité énergétique requise, ni la durée d'utilisation nécessaire pour des longs courriers. D'autres enjeux liés aux questions de poids ou encore de fiabilité peuvent s'ajouter à cette problématique.

# 1. Marché et technologies : état des lieux

## 1.1. Des évolutions complexes du marché mondial de l'énergie

Aujourd'hui encore, 80 % des besoins énergétiques mondiaux sont couverts par les énergies fossiles. La demande énergétique mondiale est fortement influencée par la Chine, qui est à l'origine d'environ 55 % de l'augmentation de la demande énergétique mondiale depuis 2012 et 85 % des émissions de CO<sub>2</sub> sur cette même période<sup>4</sup>. On observe cependant une tendance à une relative stagnation de la demande énergétique dans les économies avancées alors que les économies émergentes voient leurs besoins énergétiques augmenter (voire exploser) en raison d'un essor économique et démographique, et d'un développement de leur tissu industriel, qui se traduit notamment par un recours plus massif aux moyens de transport carbonés<sup>5</sup>.

Côté offre énergétique, les évolutions de la production d'hydrocarbures sont en passe de retrouver leur niveau pré-Covid, mais la part des investissements dans les projets et technologies hydrocarbures tend à reculer, laissant présager, selon l'Agence Internationale de l'Énergie, l'atteinte d'un pic de production d'hydrocarbures en 2030<sup>6</sup>. Ceci s'explique par une concentration croissante des investissements dans les technologies bas-carbone sous l'orientation de politiques publiques visant à soutenir cette dynamique (à l'instar de l'*Inflation Reduction Act* aux États-Unis, du *Green Deal* ainsi que du *NetZero Industry Act* au niveau de l'Union européenne ou encore de l'ensemble des mesures de promotion des énergies bas-carbone en Chine). Les efforts en matière de décarbonation s'articulant autour de l'électrification des sociétés, la fracture entre les investissements pour des projets en lien avec les énergies fossiles et ceux s'inscrivant dans les technologies bas-carbone reposant sur l'électricité (hydrogène inclus) devient plus visible.

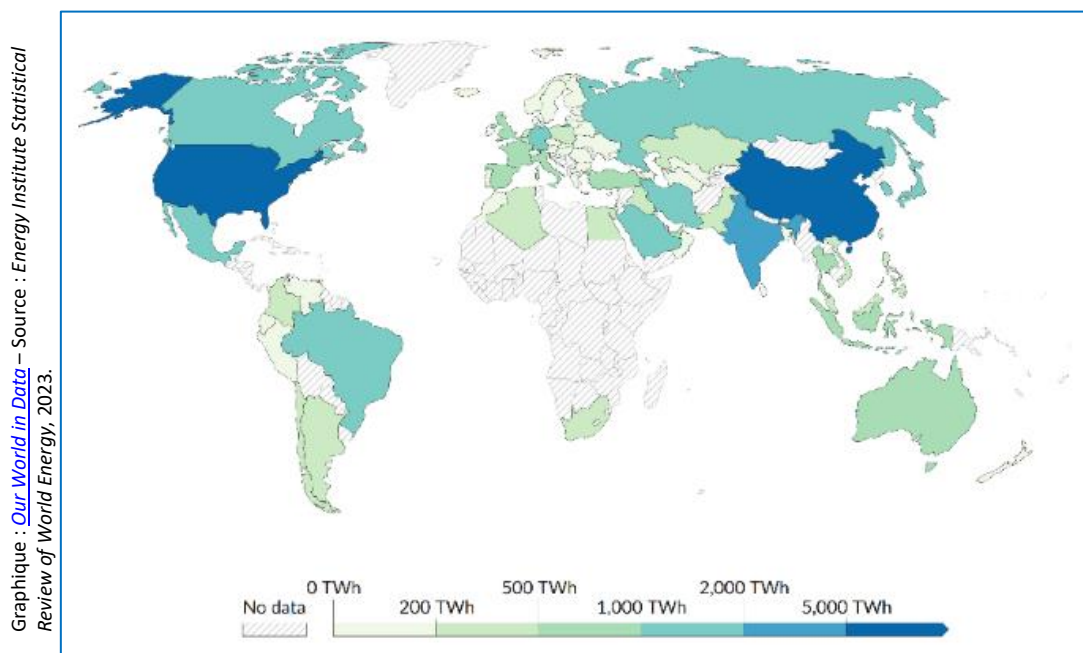
---

<sup>4</sup> *Energy Outlook 2023*, [Agence Internationale de l'Énergie](#), octobre 2023, pp. 31-36.

<sup>5</sup> *Ibid.*, pp. 93-95.

<sup>6</sup> *Ibid.*, pp. 26-30 ; pp. 80-86.

**Figure n° 2 : CONSOMMATION MONDIALE DE PETROLE EN 2022 (TWh)**



L'évolution mondiale actuelle de la demande et de l'offre énergétique souligne le regain de la dimension géopolitique de l'énergie. Les récents événements ont provoqué des bouleversements structurels des flux énergétiques. L'embargo sur les importations de produits énergétiques russes ainsi que les discussions politiques au sein de l'OPEP+ expliquent la volatilité des prix des énergies fossiles<sup>7</sup>. Un deuxième effet structurel de l'embargo européen *REPowerEU* concerne la route des flux d'approvisionnement en énergie (gaz, pétrole et charbon). Les voies terrestres (*pipelines*) de la Russie vers l'ouest de l'Europe étant fortement réduites, les transits de produits énergétiques passent désormais par les voies maritimes, qui répondent à d'autres logiques commerciales, notamment pour le gaz<sup>8</sup>. Cette tension sur le marché mondial des hydrocarbures a permis, dans un premier temps, de confirmer – voire renforcer – la dynamique d'investissements politiques et financiers dans les énergies bas-carbone<sup>9</sup>.

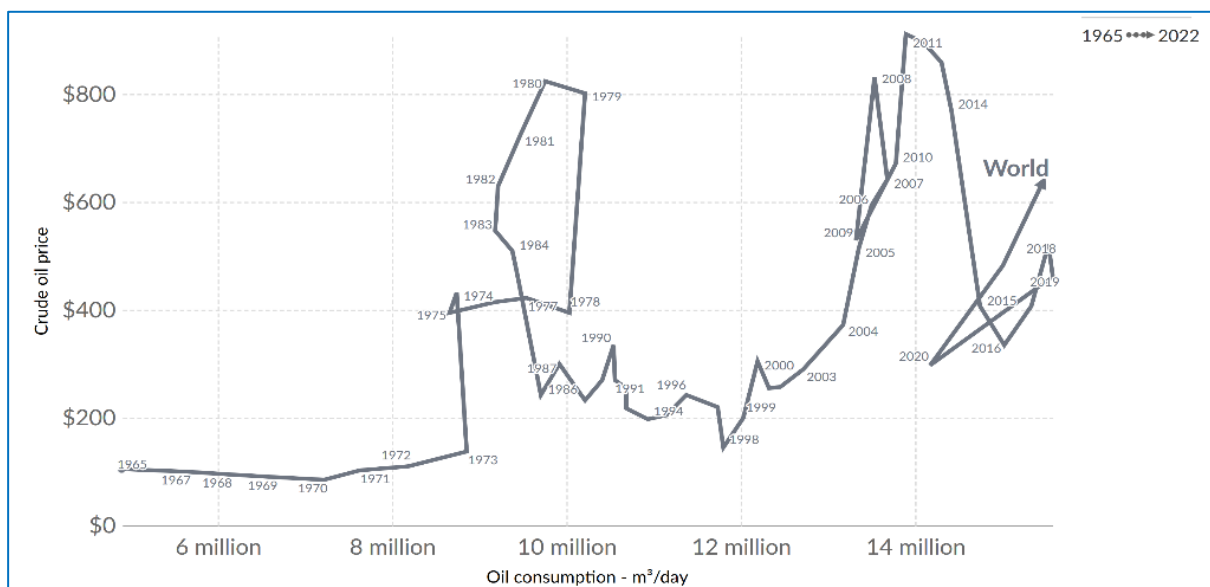
<sup>7</sup> *Oil Market Report*, [Agence Internationale de l'énergie](#) (AIE), 13 octobre 2022, pp. 14-19. Voir aussi Yousef F. Nazer, Andrea Pescatori, *OPEC and the Oil Market*, Fonds Monétaire International, WP/22/183, septembre 2022.

<sup>8</sup> Nicolas Mazzucchi, « La France et l'Europe face à la décontinalisation des flux énergétiques », *Revue Défense nationale*, n° 853, octobre 2022, pp. 19-24. Pour remplacer le gaz naturel provenant de Russie, les pays européens importent désormais du gaz naturel liquéfié (GNL) – qui implique des étapes de conversion du gaz naturel en un état liquéfié pour le transport par méthanier avant de le regazéifier par des stations de conversion onshore ou des stations flottantes temporaires (FSRU). Du fait des étapes de conversion, le prix du GNL est plus élevé que celui du gaz naturel.

<sup>9</sup> *World Energy Outlook 2023*, AIE, octobre 2023, pp. 80-86. Voir également Emmanuel Hache, « La guerre en Ukraine rebat les cartes de la géopolitique de l'énergie », *L'Année stratégique 2023*, Armand Colin, 2022.



**Figure n° 3 : PRIX DU PETROLE BRUT VS. CONSOMMATION DE PETROLE  
(USD/M3 VS.M3/JOUR)**



Graphique : [Our World in Data](#) – Source : *Energy Institute Statistical Review of World Energy* basé sur *S&P Global Platts*, 2023

La crise énergétique résultant du conflit en Ukraine a rappelé aux pays membres de l'UE que s'ils veulent pouvoir continuer à mener des plans d'investissements, la résilience et la compétitivité du tissu industriel allaient de plus en plus dépendre des coûts liés à leur consommation énergétique et à la prévisibilité des prix de l'énergie sur le moyen terme<sup>10</sup>. La réforme du marché européen de l'électricité va d'ailleurs en ce sens, puisqu'elle prévoit la décorrélation du prix de l'électricité de celui du gaz (ou de toute autre dernière énergie appelée sur le marché<sup>11</sup>). L'instauration de *Contrats pour différences (CfD)* définit une tranche de prix de l'électricité entre l'opérateur électrique et le contracteur public dans laquelle l'opérateur doit redistribuer aux clients finaux les excès de bénéfice perçus lorsque le prix de l'électricité dépasse la tranche de prix définie. À l'inverse, le producteur d'énergie se voit rembourser la différence par l'entité publique lorsque les prix sont inférieurs à la tranche de prix convenue<sup>12</sup>. Cette réforme vient nuancer le développement très libéralisé du marché européen de l'énergie, dont l'objectif initial était d'assurer la recherche de prix compétitifs pour les consommateurs mais sans plafonnement, provoquant, en cas de crise d'approvisionnement, une très forte volatilité des prix, comme ce fut le cas en 2022. Une telle réforme est structurante pour les pays membres de l'UE tant pour les industries que pour le développement des énergies bas-carbone puisqu'elle apporte une relative stabilité et prévisibilité des prix de l'électricité et qu'elle accompagnera la dynamique d'électrification entamée par l'UE.

Dans la même veine, l'évolution du prix et la disponibilité des matières premières (produits énergétiques, minerais et autres) sont des variables importantes à prendre en compte pour

<sup>10</sup> Annabelle Livet, « Crise énergétique : quels enjeux pour l'Allemagne ? », [Défense & Industries](#), n° 17, juin 2023.

<sup>11</sup> Les prix de l'électricité en Europe se basent sur les mécanismes de l'offre et la demande avec un ordre de réponse selon le taux de carbone produit. Autrement dit, les énergies renouvelables et bas carbone sont prioritaires, puis sont appelées les centrales du gaz et à charbon. C'est le prix de la dernière énergie appelée qui fixe le prix de l'électricité de gros.

<sup>12</sup> Voir la page dédiée : « Réforme du marché de l'électricité », [Conseil de l'Union européenne](#), 23 octobre 2023.

l'orientation et la cadence de réalisation des choix énergétiques des pays européens, intégrant ici le recours aux carburants alternatifs.

## 1.2. *Spécificités des technologies de carburants alternatifs*

Par rapport aux carburants « classiques » dérivés des hydrocarbures, les carburants alternatifs répondent aux critères premiers de substitution aux produits pétroliers (essence, diesel, kérosène, etc.) et de décarbonation, c'est-à-dire que leur mode de production, jusqu'aux rejets d'émissions suite au processus de combustion, doit, *a minima*, réduire drastiquement les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à leur équivalent fossile. De façon schématique, une autre distinction réside dans le fait que les hydrocarbures suivent un processus d'extraction et de raffinage tandis que les carburants alternatifs résultent d'une production chimique. Les réflexions autour d'un substitut aux carburants fossiles existent depuis longtemps tant dans le domaine militaire que civil, en réaction aux chocs pétroliers, cependant sans inclusion de la dimension environnementale<sup>13</sup>. À titre d'exemple, des tests d'utilisation avaient été effectués avec des huiles végétales pour les moteurs diesel ou des carburants de synthèse issus d'un processus de liquéfaction du charbon pendant la Seconde Guerre mondiale<sup>14</sup>. Ce dernier procédé continue d'être utilisé en Afrique du Sud et est à l'origine de près de 30 % du carburant consommé nationalement – ces activités de liquéfaction du charbon représentant près de 10 % des émissions du pays<sup>15</sup>.

Aujourd'hui, l'objectif est de conserver au mieux les avantages (performance et facilité d'usage) des carburants classiques tout en limitant les impacts environnementaux. Cet affranchissement à l'égard des produits pétroliers permet aux carburants alternatifs d'offrir une opportunité de réduire le niveau de criticité des dépendances aux importations d'hydrocarbures. Deux familles de carburants alternatifs se distinguent : celle des biocarburants et celle des carburants de synthèse, représentant respectivement 4 % et moins d'1 % de la consommation mondiale du secteur des transports en 2019<sup>16</sup>.

### 1.2.1. *Les biocarburants*

Les biocarburants correspondent à des produits raffinés issus de matières organiques (de type colza, sucre, extraits de bois, biomasse ou encore algues) obtenues par divers procédés (exemple : hydrolyse, pyrolyse, gazéification, extraction, fermentation, synthèse catalysée...). La neutralité carbone est ici justifiée par la captation en amont de CO<sub>2</sub> par les cultures dédiées ou le réemploi d'une matière (dans le cas des graisses de cuisson par exemple), tandis que la combustion du biocarburant rejette ce même CO<sub>2</sub> théoriquement absorbé.

---

<sup>13</sup> Sauf dans le cas des États-Unis, dont le *Clean Air Act* de 1977 faisait la promotion de carburants alternatifs émettant moins d'émissions dans l'air pour le transport terrestre (voir *Alternative Fuels and US automobile manufacturers*, [US Environmental Protection Agency](#), 2017).

<sup>14</sup> Sur les États-Unis, voir « Early Days of Coal Research », [Ministère fédéral américain de l'Énergie](#) (DOE) [consulté le 22/11/2023]. Sur l'Allemagne, voir Anthony Stanges, « Germany's synthetic fuel industry, 1927-1945 » in John E. Lesch (ed.), *The German Chemical Industry in the Twentieth Century*, janvier 2000, pp. 147-216.

<sup>15</sup> Aditya Pant, Mostafa Mostafa, Richard Bridle, *Understanding the Role of Subsidies in South Africa's Coal-Based Liquid Fuel Sector*, [International Institute for Sustainable Development](#) (IISD), octobre 2020.

<sup>16</sup> En 2013, les biocarburants représentaient 2 % du carburant total, et un peu plus de 3 % du carburant pour le transport terrestre (voir le rapport *Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques ?*, Académie des technologies et Académie de l'air et de l'espace, 26 juin 2014).

À ce jour, les biocarburants les plus courants (appelés aussi de première génération<sup>17</sup>) sont ceux issus des cultures de sucre et d'huiles dédiées, notamment de colza ou de palme, et sont majoritairement produits sur le continent américain (États-Unis et Brésil)<sup>18</sup>. Quant aux biocarburants issus des résidus agricoles et domestiques, ils appartiennent à la deuxième génération et suivent globalement un procédé de valorisation thermo-chimique de résidus (cultures, biomasses, graisses), pour être ensuite utilisés comme carburant<sup>19</sup>. Enfin, les algues (microalgues et algues) forment la troisième génération de biocarburants et répondent à une logique différente en ce qu'elles ne nécessitent pas autant de surface que les autres générations tout en proposant des propriétés énergétiques intéressantes<sup>20</sup>. Ces générations de biocarburants, que l'on peut qualifier de filière huile pour la première génération, filière résidus pour la deuxième et filière algue pour la troisième, font appel à une mobilisation d'acteurs différents au sein des branches agricole et chimique.

L'Union européenne définit les biocarburants selon les matières premières utilisées mais suivant d'autres critères que ceux faisant références aux générations. Elle fait la distinction entre les biocarburants « simples », produits à partir de cultures destinées à l'alimentation humaine et animale, et les biocarburants dits « avancés », qui sont issus de cultures marines, de déchets, de résidus et de coproduits (exemples : les algues, la biomasse constituée de déchets urbains, la paille, les matières cellulosiques non alimentaires et les matières lignocellulosiques). Enfin les biocarburants issus d'huiles de cuisson usagées et de graisses animales impropres à l'alimentation humaine ou animale forment une troisième catégorie<sup>21</sup>.

Le ratio performance/coût diverge lui aussi entre les générations de biocarburants avec un net avantage pour la première génération. La troisième génération souffre d'un manque de maturité technologique qui rend l'ampleur de son déploiement encore relativement incertain et onéreux. Dans le cas des biocarburants de deuxième génération, la biomasse issue des déchets alimentaires posséderait des propriétés assez favorables pour la production de biocarburants. Néanmoins, ces derniers (en particulier les première et deuxième générations) sont privilégiés dans le transport terrestre plutôt que dans le secteur aérien car leurs propriétés sont jugées trop « limitées »<sup>22</sup>.

<sup>17</sup> La catégorisation des carburants alternatifs reste encore assez mouvante selon les acteurs, les acteurs et les institutions.

<sup>18</sup> Ces deux pays ont surtout une filière éthanol développée tandis qu'en Europe, le biodiesel avait été privilégié dans les années 1990.

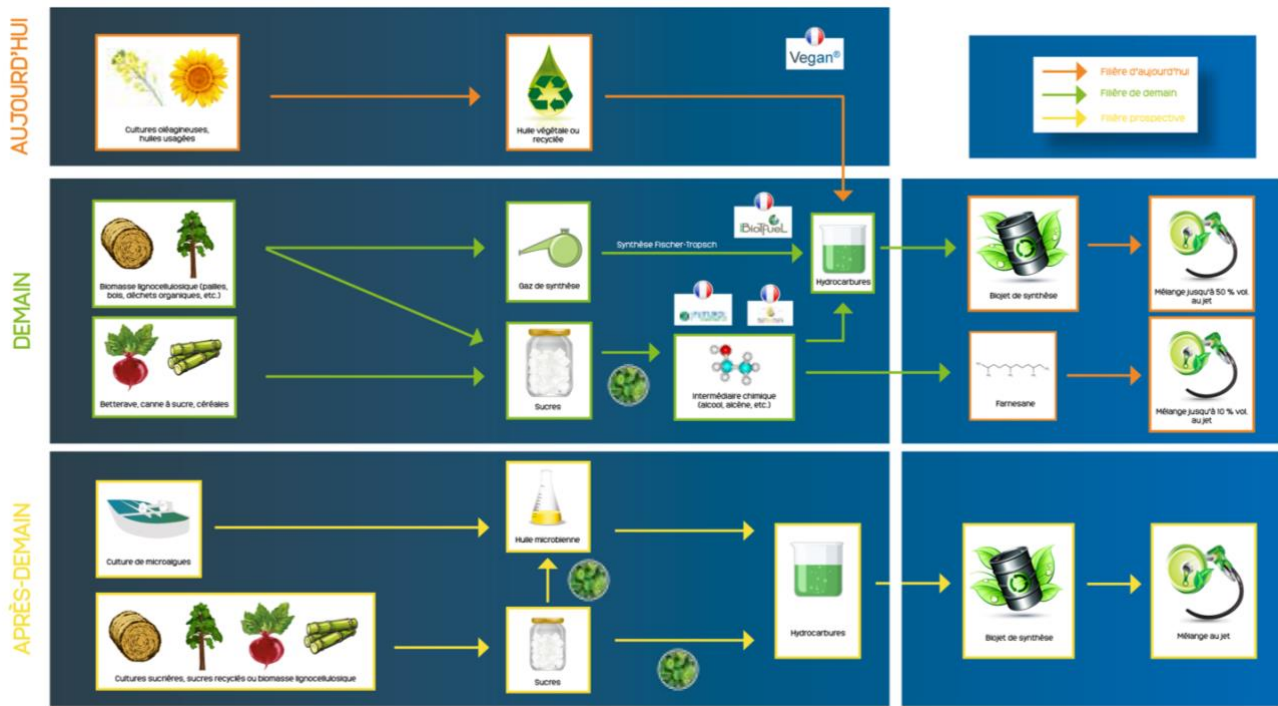
<sup>19</sup> Il y a deux procédés que l'on peut distinguer ici, l'un correspond à la transformation directe de la matière biologique (l'hydrogénation d'acides gras provenant d'huiles végétales ou animales, sucre, biomasse) en carburant, l'autre qui passe par une étape d'alcoolification stricte, sous forme de butanol par exemple, qui est ensuite travaillé en carburant. Ce dernier procédé est utilisé notamment par la société *Swedish Biofuels* qui est associée à des producteurs d'alcool.

<sup>20</sup> Taroffeq D. Moshood *et al.*, « Microalgae biofuels production: A systematic review on socioeconomic prospects of microalgae biofuels and policy implications », *Environmental Challenges*, 5, 100207, 2021.

<sup>21</sup> European Court of Auditors, *Special report 29/2023: The EU's support for sustainable biofuels in transport – an unclear route ahead*, décembre 2023.

<sup>22</sup> Par exemple, l'éthanol possède un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) à 28,9 MJ/kg et un point éclair inférieur à 13°C alors que le besoin du secteur aérien est un PCI se situant au-dessus de 42,8 MJ/kg et un point éclair supérieur à 38°C. Le PCI indique le niveau de rendement (ou performance) d'un combustible en mesurant la quantité réelle de chaleur produite au cours du processus de combustion. Ici, plus la valeur est élevée, plus le rendement est intéressant. Le point éclair correspond au degré d'inflammabilité, c'est-à-dire la température minimale à laquelle un produit peut s'enflammer momentanément au contact d'une source d'inflammation. Autrement dit, l'enjeu est qu'un combustible ne s'enflamme pas trop « rapidement » – ou à trop basse température – afin d'être stocké et transporté dans les engins.

Figure n° 4 : PRINCIPALES FILIERES FRANÇAISES DE BIOCARBURANTS



Source : [IFPEN](#) (consulté le 22 novembre 2023)

### 1.2.2. Les carburants de synthèse

Pour l'UE, les carburants de synthèse font partie des carburants dits « avancés » au même titre que les biocarburants avancés définis plus haut. Le principe des carburants de synthèse (ou *e-fuels*) repose sur la combinaison chimique d'une source gazeuse (de type hydrogène (H<sub>2</sub>)) avec du monoxyde de carbone (CO) afin de créer une solution liquide suivant différentes méthodes de production à l'instar du procédé thermochimique Fischer-Tropsch (FT)<sup>23</sup>. Un deuxième procédé de production s'effectue *via* la synthèse d'alcool (méthanol, éthanol ou isobutanol). Les deux procédés sont relativement matures du point de vue technologique. Outre le procédé, la différence majeure entre les carburants de synthèse et les biocarburants réside dans la source principale, qui n'est pas biologique mais chimique, avec des matières qui peuvent se capturer (carbone) et d'autres se « produire » (hydrogène). Si le procédé FT est connu depuis les années 1920<sup>24</sup>, son déploiement est en revanche limité en raison d'une part des coûts engendrés par les différents processus de production – gazéification, synthèse et conversion –, et, d'autre part, des besoins électriques et hydriques nécessaires à leur réalisation. À titre d'exemple, la production d'une tonne de kérosène synthétique requiert près de sept tonnes d'eau, cinq tonnes de CO<sub>2</sub> et 37 MWh d'électricité<sup>25</sup>.

<sup>23</sup> Procédé permettant de produire un hydrocarbure liquide à partir d'un gaz de synthèse. La réaction provoquée est celle d'une polymérisation (soit une « association » de molécules légères), en l'occurrence d'hydrogène et de monoxyde de carbone. Le procédé FT requiert du gaz de synthèse qui peut être produit de différentes manières (à partir de gaz naturel, de charbon, de biomasse, d'hydrogène et d'électricité). L'utilisation d'hydrogène pour le procédé FT pour la production de carburants de synthèse correspond à la méthode PtL (Power-to-Liquid).

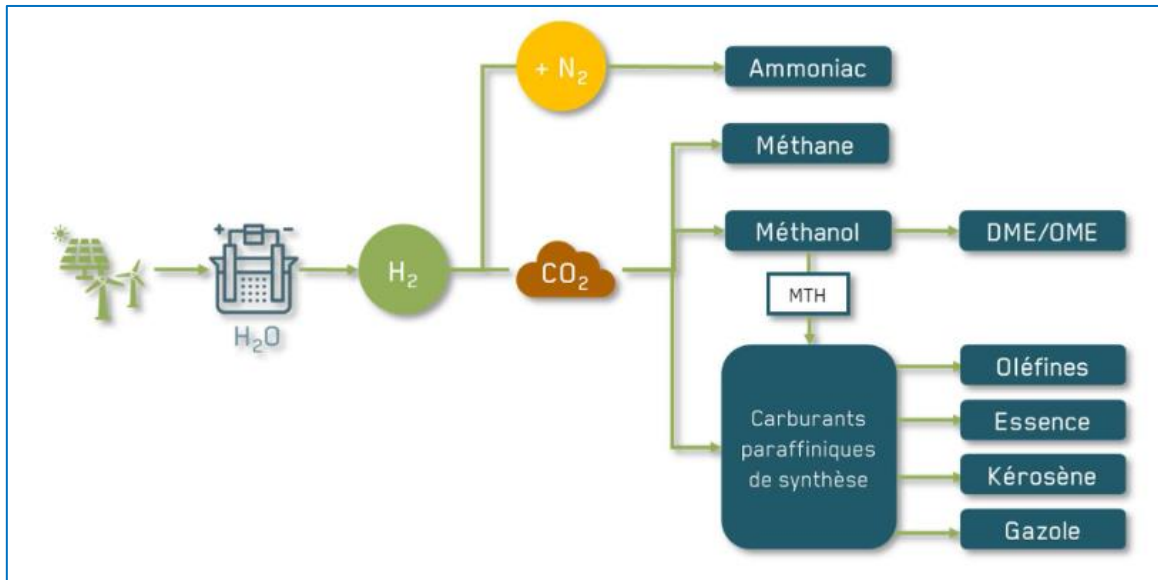
Cf. Note de synthèse sur les électro-carburants, [EVOLEN](#), février 2023, p.30.

<sup>24</sup> « The return of a classic to fuel production », [Max-Planck Gesellschaft](#), 14 décembre 2005.

<sup>25</sup> Note de synthèse sur les électro-carburants, [EVOLEN](#), février 2023.

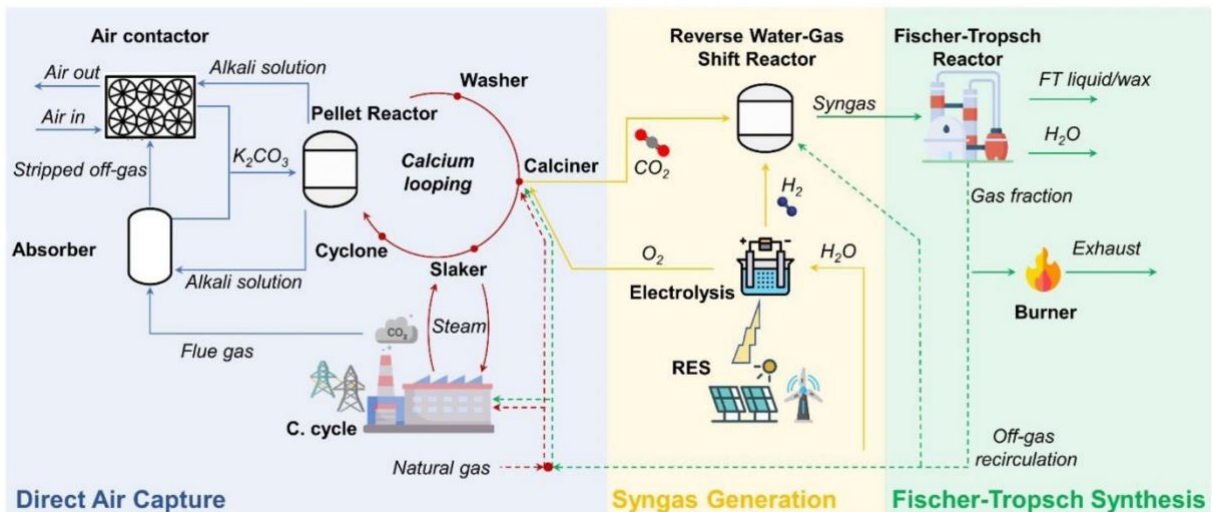
Les carburants paraffiniques de synthèse se distinguent des autres e-fuels (ammoniac, méthane, méthanol) dans la mesure où ces carburants se rapprochent fortement des propriétés des carburants fossiles. Ces carburants peuvent ainsi être directement mélangés aux carburants conventionnels et intégrés dans les infrastructures ou moyens de transport existants. De ce fait, ils sont qualifiés de carburants « drop-in ».

Figure n° 5 : PRINCIPALES VOIES DE SYNTHÈSE DES E-FUELS



Source : [Evoluen](#), Note de synthèse sur les électro-carburants, février 2023

Figure n° 6 : DETAIL D'UN SYSTEME DE PRODUCTION DE CARBURANT DE SYNTHÈSE PAR PROCÉDE FISCHER-TROPSCH ET LE RECOURS AU CAPTAGE DU DIOXYDE DE CARBONE DANS L'AIR (DAC)



Source : Marco Marchese *et al.*, « CO<sub>2</sub> from direct air capture as carbon feedstock for Fischer-Tropsch chemicals and fuels: Energy and economic analysis », *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, vol. 46, avril 2021

Pour autant, le développement des carburants de synthèse intéresse car il permet de s'affranchir des surfaces de culture que requièrent les biocarburants mais aussi de favoriser les coproductions. La production d'hydrogène (ainsi que le CO<sub>2</sub>) sert également à la composition d'autres produits dérivés, par exemple de type ammoniac, engrais ou encore

aluminium. Au-delà du facteur coût, les carburants de synthèse (hors carburants paraffiniques), selon leur teneur en hydrogène, peuvent nécessiter des adaptations techniques plus ou moins importantes des équipements les consommant, tant pour des raisons de corrosion des métaux que de sûreté (risques d'explosions, d'agression cutanée, d'irritation des voies respiratoires)<sup>26</sup>.

Le critère de durabilité (ou de décarbonation) des carburants de synthèse est atteint dès lors que l'hydrogène produit est lui-même décarboné. Cela concerne la production d'hydrogène, dont les atomes de la molécule d'eau (hydrogène (H<sub>2</sub>) et oxygène (O)) ont été séparés par un courant électrique (appelé aussi électrolyse de l'eau). Ce procédé ne rejette alors que de l'oxygène (cf. figure 6). La réaction thermochimique de l'électrolyseur est alimentée par de l'électricité qui, dans le cas d'un hydrogène décarboné, doit provenir de sources d'énergies primaires elles-mêmes bas-carbone (éolien, solaire, nucléaire, etc.). La neutralité carbone du processus de production de l'hydrogène est comptabilisée lorsque celui-ci repose sur une méthode de production qui capte du CO<sub>2</sub>, contrebalançant le rejet du CO<sub>2</sub> résultant de l'étape de combustion (valable pour l'hydrogène bleu et turquoise<sup>27</sup>). Dans l'ensemble de ces cas, un apport non négligeable en électricité est essentiel pour la production de l'hydrogène et *de facto* des carburants de synthèse.

### **1.3. Quelles politiques en faveur des carburants alternatifs ?**

Dans le contexte actuel, aucun marché international de carburants durables qui impliquerait des flux importants d'échanges entre les régions/pays n'existe en tant que tel. Dans le cas de l'aviation, les échanges de kérosène bas-carbone en 2022 s'effectuèrent à hauteur de 0,3 Mt, soit moins de 0,1 % des 400 Mt théoriquement nécessaires<sup>28</sup>. Les dynamiques de développement de marché des carburants alternatifs s'observent pour l'heure surtout au niveau régional, voire national.

L'intérêt pour tel ou tel carburant alternatif varie selon les continents et les régions. De manière générale, les biocarburants trouvent écho auprès de filières agricoles existantes et en mesure de fournir les composants primaires nécessaires à leur production (en particulier pour les première et deuxième générations). Cela explique ainsi l'intérêt marqué et précoce des États-Unis ou encore du Brésil, de l'Inde et de l'Indonésie pour le déploiement des biocarburants<sup>29</sup>.

D'autres pays, comme l'Allemagne et les Pays-Bas, mais également la Corée du Sud et le Japon, partagent la particularité d'être très investis dans le développement industriel de l'hydrogène, ce qui explique en partie l'intérêt axé sur les carburants de synthèse<sup>30</sup>. En ce sens, d'ailleurs, on peut souligner la corrélation entre cet intérêt pour l'hydrogène et l'existence d'un tissu industriel chimique dense pour les pays précédemment mentionnés.

---

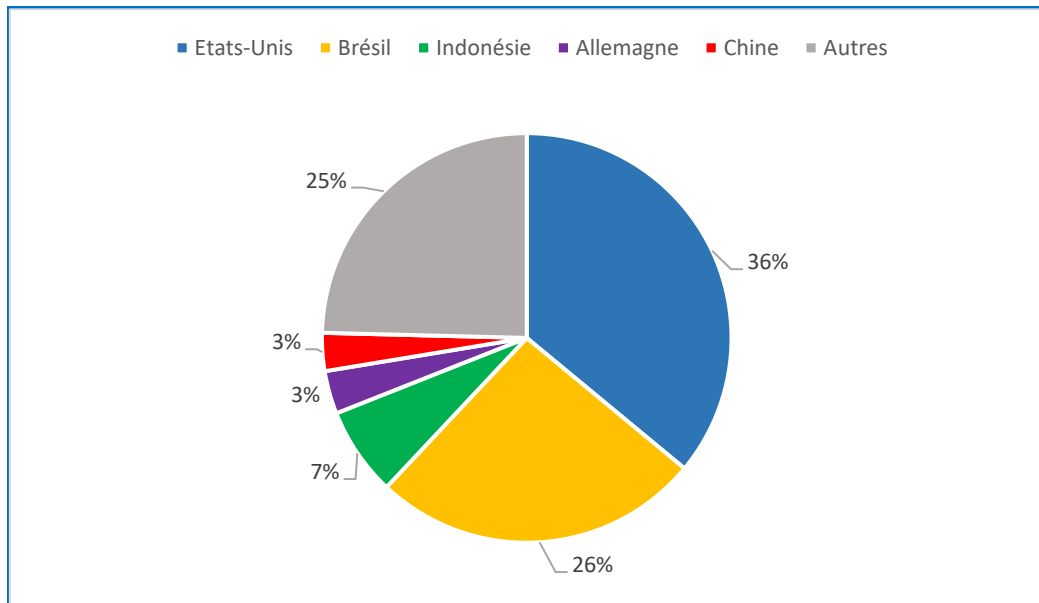
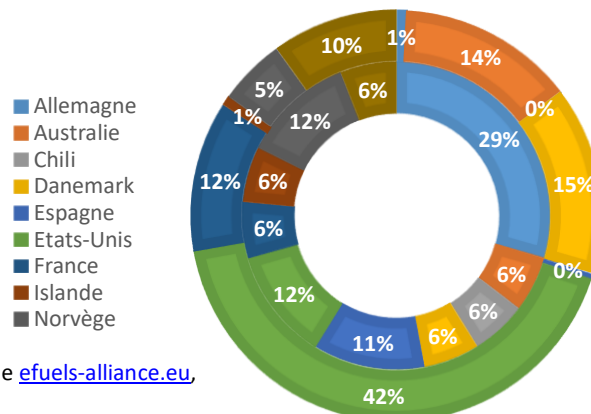
<sup>26</sup> *Ibid.*, p. 15.

<sup>27</sup> Qui correspond à la production d'hydrogène par pyrolyse du méthane.

<sup>28</sup> « Feuille de route vers la production de e-carburants », Académie des Technologies, 13 septembre 2023, p. 4.

<sup>29</sup> « Biofuel Policy in Brazil, India and the United States: Insights for the Global Biofuel Alliance », [AIE](#), 24 juillet 2023.

<sup>30</sup> En France, la branche de la méthanisation et de la biomasse est relativement importante et semble donner une politique moins massivement focalisée sur les carburants de synthèse.

**Figure n° 7 : REPARTITION DE LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS PAR PAYS (%) EN 2020****Figure n° 8 : REPARTITION DU NOMBRE DE PROJET PTL PAR PAYS (CERCLE INTERIEUR) ET LES ANNONCES DE PRODUCTION DE CARBURANT DE SYNTHÈSE (TONNE) ENTRE 2024 ET 2026 (CERCLE EXTERIEUR)**

Source : données issues de [efuels-alliance.eu](https://efuels-alliance.eu), [consulté le 25/11/2023].

Les premiers engagements de l'Union européenne concernant le secteur aérien ont été pris en 2002 dans le cadre du programme ACARE 2020 (*Advisory Council for Research and Innovation in Europe*). Ce programme prévoyait une amélioration de l'efficacité énergétique des appareils se traduisant par une réduction de 50 % des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2020 et de 75 % en 2050 par rapport à 2000. Or, la seule option de l'efficacité énergétique obtenue par un progrès technologique apparaissait déjà insuffisante, ces efforts devant être, *a minima*, combinés avec l'intégration de carburants alternatifs dans les mélanges consommés.

Un certain nombre d'initiatives européennes ont ciblé le recours aux biocarburants dans le secteur aérien. Du côté de la production de biocarburants, l'initiative *European Advanced*

*Biofuels Flightpath*, définie en 2011, prévoyait un premier objectif de production au sein de l'UE de 2 millions de tonnes de *biojet*<sup>31</sup> utilisé dans l'aviation commerciale d'ici 2020. De façon similaire, le plan *Fit for 55*, adopté en 2019 dans le cadre du Pacte Vert, a permis la mise en place d'une initiative dédiée à la consommation de carburants aériens (*ReFuelEU Aviation Initiative*) pour la régulation des carburants aériens durables (SAF) – tout comme le *FuelEU Maritime* pour le secteur maritime –, qui entre en vigueur au 1<sup>er</sup> janvier 2024<sup>32</sup>. Ces réglementations européennes s'étendent à des horizons allant de 2025 à 2050 et sont composées de deux axes majeurs :

- ➔ le taux de mélange des carburants (entre bio/efuels et carburants conventionnels) ;
- ➔ la mise en place de critères de durabilité (quels composants et à quelles conditions de production les biocarburants et carburants de synthèse sont-ils durables ?).

Ces axes obligent également les fournisseurs et aéroports de l'UE à garantir l'approvisionnement, le stockage et le ravitaillement de ces carburants, ce qui implique l'existence d'infrastructures adaptées. En outre, le paquet législatif européen *Fit for 55* a établi l'objectif de réduire les émissions à effet de serre d'au moins 55 % d'ici 2030<sup>33</sup>.

**Tableau n° 1 : OBJECTIFS DE DECARBONATION ESTIMÉS POUR LE SECTEUR AÉRIEN PAR INCORPORATION DE CARBURANT ALTERNATIF DANS L'UE EN 2023**

Échéances indiquées par le Parlement et le Conseil européens	Taux d'incorporation de carburants net bas-carbone (ou alternatifs)	Besoin en carburant des aéroports (France)	Dont carburants durables (France)
2025	2 %		
2030	6 %	0,5 Mt	1,2 %
2035	20 %	9,0 Mt = 110 TWh	1,8 Mt <sup>34</sup> = 22 TWh
2040	34 %		
2045	42 %		
2050	70 %	9,0 Mt = 100 TWh	6,3 Mt = 77 TWh

Source : « Feuille de route vers la production de e-carburants », Académie des Technologies, 2023

Pour le transport terrestre, les biocarburants (E10 et E85) ont été intégrés depuis 2011 dans les textes européens. Cependant, leur développement reste strictement régulé et limité en raison du risque de rivalités autour des surfaces agricoles dédiées aux biocarburants et celles

<sup>31</sup> Autre terme employé pour parler des biocarburants aériens.

<sup>32</sup> Voir infographie « 'Ajustement à l'objectif 55' : accroître l'utilisation de carburants plus écologiques dans les secteurs aérien et maritime », [Conseil de l'UE](#), octobre 2023.

<sup>33</sup> Infographie « Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors », [Council of the EU](#), 2023.

<sup>34</sup> À noter qu'en 2014, l'objectif européen de production de carburant durable aérien (biojetfuel) pour 2020 s'élevait déjà à 2 Mt, ce qui correspond à 3,5 % de la consommation anticipée de carburants (Aca2014, p. 50).



dédiées à l'alimentation<sup>35</sup>. Il s'agit d'un argument repris dans la plus large *Directive européenne pour les énergies renouvelables* (2018/2001, dite RED II), qui encadre la promotion des énergies secondaires issues des énergies renouvelables. La Commission européenne impose aux fournisseurs de carburants d'atteindre au moins 14 % d'ENR (sous la forme de carburant de synthèse notamment) dans la consommation énergétique finale dans le secteur du transport d'ici 2030<sup>36</sup>.

Plus spécifiquement, pour les carburants de synthèse, la RED II impose désormais l'augmentation des capacités de production d'hydrogène dédiées aux *efuels* et prévoit une méthodologie d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (autres que le CO<sub>2</sub>)<sup>37</sup> tout en préparant une disposition<sup>38</sup> concernant l'origine du CO<sub>2</sub>. En matière de biocarburants, la Commission européenne semble *in fine* miser davantage sur la deuxième (voire la troisième génération, en dépit des problèmes de maturité technologique) afin de conserver une garantie de contrôle sur les surfaces consacrées aux cultures dédiées aux biocarburants (notamment de première génération)<sup>39</sup>. Les craintes pour les surfaces dédiées aux biocarburants se retrouvent aussi dans les dialogues avec les potentiels pays partenaires compte tenu de la production fortement extra-européenne des biocarburants (voir figure 7). Pour les carburants de synthèse, l'e-gazole ainsi que l'e-kérosène (FT-SPK et AtJ-SPK)<sup>40</sup> sont déjà certifiés par l'ASTM<sup>41</sup>.

En parallèle des feuilles de route et des cadres juridiques pour la production et la consommation des carburants alternatifs, le déploiement des infrastructures dédiées est régi par la directive 2014/94/EU, qui permet de créer un socle commun à l'ensemble des États membres<sup>42</sup>. En juillet 2021, la Commission européenne a soumis une proposition (COM2021/0223) visant à transformer cette directive en un règlement communautaire afin de créer une dynamique plus coordonnée et plus rapide du développement des infrastructures dédiées (bornes de rechargements par exemple)<sup>43</sup>.

<sup>35</sup> Argument avancé de nouveau dans l'article 26 du RED II. Voir *Directive (UE) 2018/2001 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables*, [Parlement et Conseil de l'UE](#), 11 décembre 2018.

<sup>36</sup> *Ibid.*, RED II, article 25.

<sup>37</sup> Rapport final : « Updates analysis of the non-cO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30 (4) », [Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne](#) (EASA), septembre 2020.

<sup>38</sup> *Ibid.*, art. 25(2) et 28(5), RED II.

<sup>39</sup> Que ce soit en évitant des importations qui favoriseraient des actes de déforestation ou qui mettraient sous tension les équilibres en termes de sécurité alimentaire. Juridiquement, l'UE exclut des objectifs en matière de carburants alternatifs les biocarburants issus de cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale.

<sup>40</sup> Actuellement encore en mélange à hauteur de 50 % avec les carburants conventionnels.

<sup>41</sup> Voir présentation de Jame Hileman, « Fuel Approval Process and Status », Federal Aviation Administration, ICAO, 30 avril 2019.

<sup>42</sup> Ceci ne s'applique pas aux carburants paraffiniques.

<sup>43</sup> Dans le droit européen, la Directive correspond à l'imposition d'un objectif européen mais dont la trajectoire et la politique mise en œuvre pour atteindre l'objectif sont gérées par les États membres. Un règlement est un acte législatif contraignant pour lequel le droit européen prime sur le droit national (*cf.* Communiqué de presse, « Le Pacte Vert pour l'Europe : accord sur une nouvelle législation ambitieuse aux fins du déploiement d'une infrastructure suffisante pour les carburants alternatifs », Commission européenne, 28 mars 2023).

## 2. Les principales variables d'une transition énergétique vers les carburants alternatifs

En complément aux spécificités techniques propres à chaque type de carburant alternatif, leur recours implique d'intégrer des questions connexes pour leur déploiement. Ce sont des variables à prendre en compte pour le développement des capacités de production ainsi que pour l'usage à grande échelle de ces carburants. Il s'agit en somme d'assurer la compatibilité de l'utilisation des carburants alternatifs avec les moyens de transport actuels et futurs, tout en capitalisant sur un savoir-faire technologique qui peut s'inscrire dans un cadre normatif plus large. Parallèlement, l'enjeu de la disponibilité des énergies nécessaires à la production de ces carburants est dimensionnant pour la résilience et la stabilité de la chaîne d'approvisionnement en carburants alternatifs.

### 2.1. La question technologique

#### 2.1.1. Enjeux de consommation et de production des carburants alternatifs

A l'exception des carburants paraffiniques, tout changement de carburation implique une acceptation plus ou moins grande des équipements consommateurs (voitures, avions, etc.). L'indicateur de la performance de propulsion ne peut être pris en compte seul ; il convient d'y ajouter par exemple la résistance des joints ou la stabilité du carburant sous forme liquide. De fait, le concept du *drop in* (ou carburant fongible) correspond ici à la recherche de carburants alternatifs ayant les mêmes propriétés de performance et d'acceptabilité mécanique que les carburants conventionnels.

Les coûts de production des *e-fuel* sont aujourd'hui élevés par rapport aux carburants fossiles et dépendent du prix du CO<sub>2</sub><sup>44</sup> et de l'hydrogène. Sachant que le prix d'un hydrogène « vert », donc provenant exclusivement des ENR, n'est toujours pas totalement déterminé<sup>45</sup>, la tranche de variabilité des prix des *e-fuels* reste vague avec un plafond assez haut. Du fait de ce constat, les recherches se concentrent sur les carburants de synthèse dont les propriétés permettent de conserver les infrastructures existantes. L'adaptation minimale des infrastructures devient ainsi un levier pour limiter les coûts. Cela concerne notamment les infrastructures de distribution et de stockage. Pour autant, des adaptations plus ou moins contraignantes sont nécessaires : par rapport aux unités de production de ces carburants et leur raccordement aux réseaux électriques décarbonés (par exemple décentralisés avec les ENR), puis pour les méthodes de stockages (sauf pour les carburants paraffiniques), et enfin, en raison de spécificités chimiques les rendant plus ou moins toxiques ou réactifs à l'environnement

---

<sup>44</sup> Il s'agit surtout du CO<sub>2</sub> biogénique, c'est-à-dire du CO<sub>2</sub> issu de matières végétales que l'on récupère par exemple à l'issue de l'épuration de biogaz (méthanisation) ou lors d'une fermentation alcoolique. Ce type de CO<sub>2</sub> ne correspond pas au CO<sub>2</sub> capturé dans l'air qui reste aujourd'hui fortement minoritaire et coûteux. La variable du prix du CO<sub>2</sub> biogénique dépend beaucoup de la distance parcourue en camion (sous la forme liquide). Pour les distances en dessous de 200 km, le circuit est encore considéré comme « local » et jugé compétitif ; les distances de moins de 5 km permettent d'éviter cette étape de liquéfaction et ainsi épargner les coûts de conversion (source : [GRDF](#)).

<sup>45</sup> Il est prévu que les coûts de l'hydrogène vert baissent en corrélation avec la baisse de prix de l'électricité issue des ENR.

extérieur (notamment selon la teneur en hydrogène, en ammoniac). Il s'agit également de construire, en parallèle de ces infrastructures « carburants alternatifs », toutes les infrastructures et les chaînes d'approvisionnement relatives à l'hydrogène et au CO<sub>2</sub> (aujourd'hui encore quasi inexistantes).

### **2.1.2. Enjeux de maîtrise technologique**

La maîtrise technologique est également une composante à prendre en compte dans un contexte politique de recherche de souveraineté industrielle européenne. Le secteur des technologies énergétiques fait déjà partie des atouts industriels jugés critiques pour l'Union européenne<sup>46</sup>. C'est dans ce cadre que les technologies des énergies bas-carbone (éolien, nucléaire et autres) ainsi que les vecteurs énergétiques (carburants alternatifs, hydrogène) sont particulièrement défendus par les États membres et font face à une concurrence mondiale accrue avec les pays asiatiques et les États-Unis. La recherche de synergies entre ces différentes branches permet de renforcer des chaînes industrielles européennes. Les carburants alternatifs durables étant des produits finaux, puisque dérivés de l'ensemble des autres composants énergétiques (électricité, conversion), leur production correspond à la maîtrise de l'ensemble du secteur des technologies des énergies bas-carbone.

Comme mentionné plus haut, hormis pour les carburants paraffiniques, les chaînes d'approvisionnement en carburants alternatifs répondent à un système tout autre que celui des carburants fossiles, qui correspondent à une logique d'extraction-raffinage-importation-consommation. Les carburants alternatifs s'insèrent dans une logique de production-conversion-distribution-consommation. Pour les fournisseurs de carburants et les exploitants d'aéronefs (ou portuaires), cela implique de prévoir des unités de production de ces carburants alternatifs. Puisque les coûts augmentent largement dès lors qu'il y a de la distance pour le transport et la distribution de carburants, il apparaît nécessaire d'avoir des unités de production proches des lieux de consommation. Par ailleurs, la production de carburants alternatifs nécessite elle-même un raccordement de proximité avec les filières fournisseurs (hydrogène, CO<sub>2</sub>, biomasse, etc.). Ainsi, c'est toute une chaîne d'approvisionnement qui semble devoir se relocaliser à une échelle plus locale ou régionale. Un tel changement de système d'approvisionnement requiert un niveau de coordination à flux constant entre les acteurs impliqués afin d'éviter toute interruption. À l'inverse, la consolidation et le bon fonctionnement d'une chaîne d'approvisionnement permettent d'assurer une certaine pérennité et résilience pour la demande environnante. Les consommateurs obtiennent une prévisibilité dans le volume de production disponible et dans le prix proposé.

De manière plus indirecte, la maîtrise des carburants durables du futur permettrait d'en retirer un avantage en matière d'ingénierie mécanique. La conservation des moteurs thermiques permet, d'une part, d'épargner des coûts d'entrée liés aux investissements pour les moteurs autres que thermiques (exemple des moteurs électriques), et, d'autre part, de continuer à optimiser les savoir-faire et les avancées dans les technologies à combustion.

---

<sup>46</sup> On retrouve ce point notamment dans l'élaboration d'une plateforme des technologies stratégiques pour l'Europe (STEP) (voir « Technologies essentielles : comment l'UE compte soutenir les industries-clé », [Parlement européen](#), 17 octobre 2023).

Par ailleurs, la chaîne d’approvisionnement des carburants alternatifs implique une main d’œuvre qualifiée dédiée. Les enjeux en ressources humaines apparaissent toutefois compatibles avec la main d’œuvre existante pour les moteurs thermiques dans la mesure où les carburants alternatifs requièrent une évolution des savoirs mais sans aller jusqu’à un renouvellement complet – ou une perte complète de ces savoirs. Ces ajustements « minimales » sont ainsi des leviers permettant le déploiement et l’utilisation rapide des carburants alternatifs, l’objectif étant déjà de réduire drastiquement l’usage et l’empreinte carbone des carburants conventionnels. En d’autres termes, les carburants alternatifs permettent d’enclencher la trajectoire de décarbonation sur le court terme, et de transiter progressivement vers d’autres technologies potentielles arrivant à maturation ou offrant des avantages compétitifs majeurs pour la décarbonation du transport.

## **2.2. La question de la disponibilité des énergies vertes**

Aux enjeux technologiques de production et de consommation des carburants alternatifs s’ajoute la question de la constance de l’approvisionnement en carburant. Cette variable dépend des capacités de production installées mais également de la disponibilité des matières premières nécessaires à la fabrication de ces carburants.

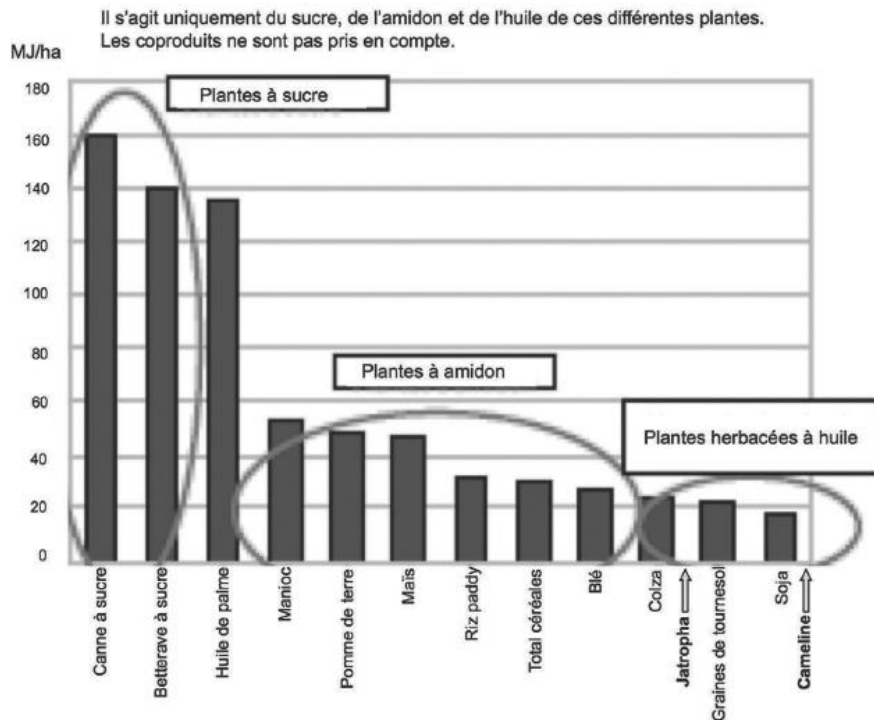
Sachant que la France, tout comme la plupart des pays européens, importe la très grande majorité des énergies fossiles qu’elle consomme pour le secteur du transport (essentiellement en produits raffinés), la question des lieux de production des carburants durables devient structurante. La localisation d’unités de production de carburants durables implique le maillon de l’allocation de surface aux cultures dédiées aux biocarburants, ou de la disponibilité d’une source électrique – et de CO<sub>2</sub> – suffisante et réservée à la production des carburants de synthèse.

### **2.2.1. Disponibilité des surfaces**

Dans le cas des biocarburants de première génération, leur développement reste limité tant pour des raisons juridiques, définies par l’UE, que structurelles puisque la surface requise reste importante et s’ajouterait encore aux cultures déjà prévues pour l’alimentation. La diversification des matières biologiques utilisées pour les biocarburants (biomasses) offre une certaine marge pour pallier le problème des monocultures, d’autant plus que ces dernières varient géographiquement. L’option pour les biocarburants reste davantage ouverte en France comparativement à d’autres pays dans la mesure où l’organisation de la filière huile végétale y est relativement éprouvée pour le biodiesel. La filière éthanol (ou filière sucre) avait été identifiée comme offrant un potentiel en France *via* la filière betteravière. La capacité de production combinée à un rendement énergétique relativement élevé semblait offrir une perspective intéressante<sup>47</sup>.

---

<sup>47</sup> Sébastien Abis, *Géopolitique du sucre : la filière française face à ses futurs*, IRIS Editions, novembre 2023. Voir également *Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques ?*, *op. cit.*, p. 48.

**Figure n° 9 : ACADEMIE DES TECHNOLOGIES 2014**

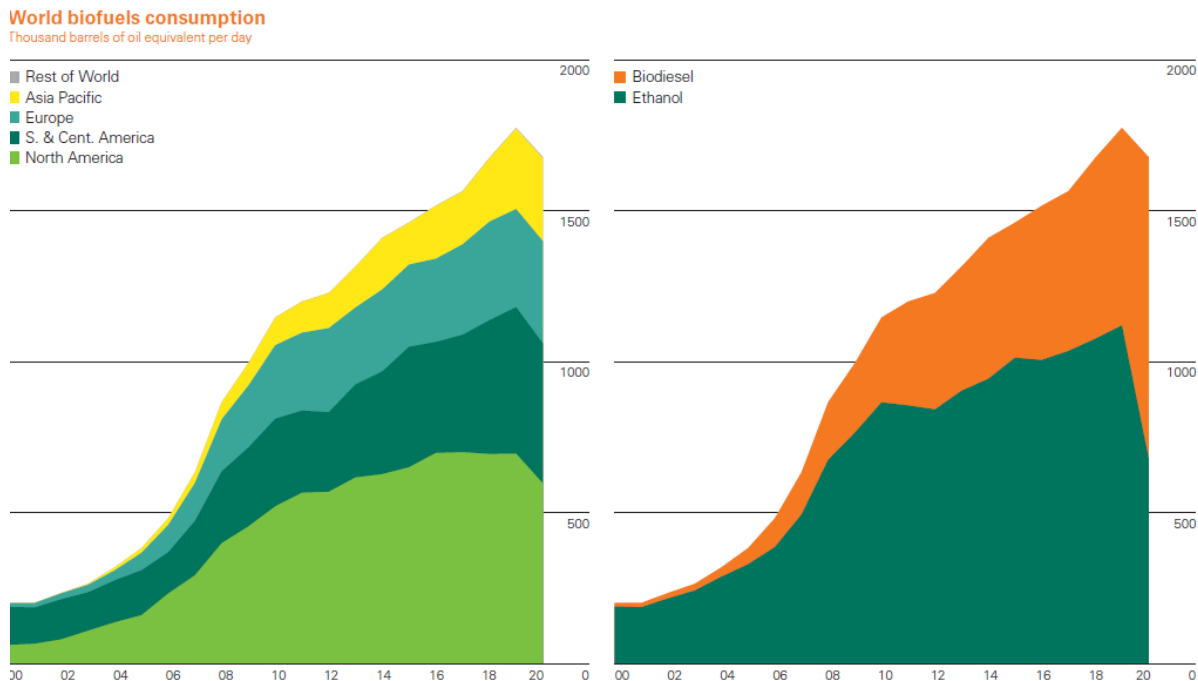
Source : RM/STD/RMMB d'après FAO Stats

La compétitivité des prix des biocarburants est fonction du prix des matières premières, et *de facto* de leur disponibilité. Autrement dit, la sécurité d'approvisionnement et de production des biocarburants réside dans le rendement et la constance des cultures végétales. Cette variable reste non maîtrisable car elle dépend largement de facteurs environnementaux, tels que le niveau de sécheresse, d'événements climatiques, de la qualité des sols et de la mise en perspective avec le cadre juridique d'allocation spatiale définie. Ces variables peuvent inciter un recours aux importations plus systématiques, notamment extra-européennes. Les pays en capacité d'exportation à ce jour seraient le Brésil, l'Indonésie, voire les États-Unis. Dans tous les cas, des distorsions dans les standards environnementaux sont à considérer avec des risques de poursuite des actions de déforestation. Les questions relatives à l'adéquation production-demande, aux conséquences internationales, à la sécurité d'approvisionnement et à la compétitivité prix sont déjà prégnantes dans certains territoires.

Cette dynamique d'importation est à mettre en perspective des dynamiques de croissance des besoins d'autres économies, particulièrement en Asie, à l'instar de la Chine, qui a doublé sa consommation de biocarburants entre 2010 et 2019, ou encore de l'Inde et de l'Indonésie. Ces dynamiques peuvent attirer les investissements en matière de biocarburants vers ces régions plutôt qu'en Europe et, surtout, venir mettre en tension les capacités d'exportation espérées à destination de l'Europe. Le cas des États-Unis est à cet égard représentatif. En tant que premier producteur mondial de biocarburants issus de plantes à amidon (maïs à 60 %) pour la filière éthanol, les cultures sont partagées à 36 % pour l'alimentation animale et 40 % pour les biocarburants. Sachant que les améliorations de rendements énergétiques semblent saturer, la conversion totale des cultures de maïs pour la filière éthanol couvrirait 15 % de la consommation américaine de carburant. Une dépendance américaine plus forte aux biocarburants représenterait ainsi une tension pour l'équilibre du marché des denrées

alimentaires et de celui des biocarburants, avec une capacité d'exportation qui serait alors contrainte<sup>48</sup>.

**Figure n° 10 : STRUCTURE DE LA CONSOMMATION MONDIALE DE BIOCARBURANTS EN 2020**

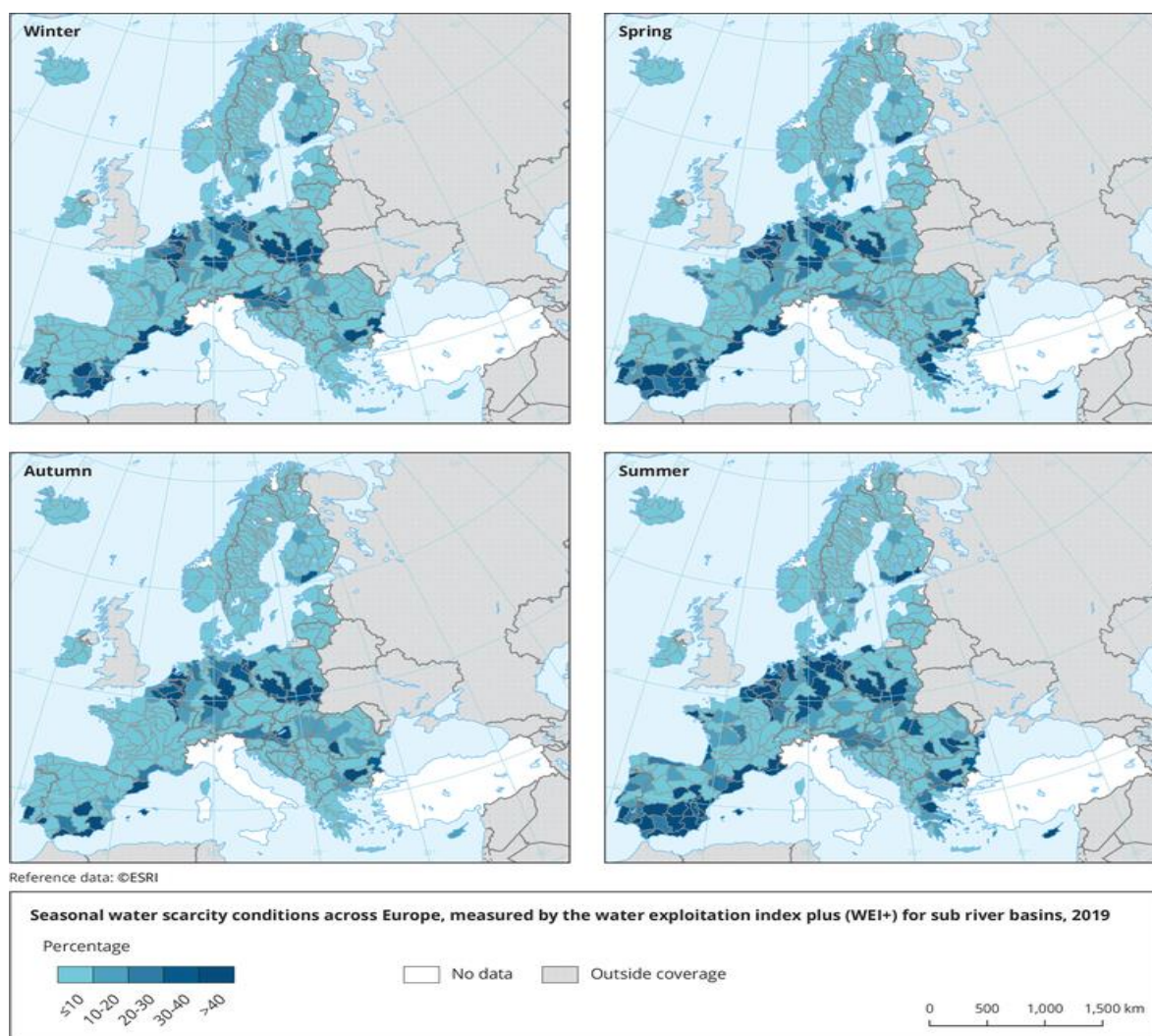


Source : BP Statistical 2021

### 2.2.2. La disponibilité des ressources

S'agissant des carburants de synthèse, les ressources hydriques et électriques sont également à considérer puisqu'elles sont essentielles à la fabrication de l'hydrogène (par électrolyse de l'eau) ainsi qu'aux processus de conversion. La variable hydrique, et notamment la fréquence et le niveau de stress pendant les périodes de sécheresse, constitue nécessairement une dimension de plus en plus structurante pour la localisation des unités de production de carburant de synthèse. Elle s'intègre par ailleurs déjà dans les réflexions sur l'hydrogène (beaucoup de projets annoncés se situent le long des côtes maritimes).

<sup>48</sup> Ahmed *et al.*, « Bio-jet fuel: An overview of various feedstock and production routes », *AIP Conference Proceedings*, juillet 2023, pp. 3-4.

**Figure n° 11 : CONDITIONS DE PRECARITE SAISONNIERE EN EAU EN EUROPE**

Source : [Agence européenne de l'Environnement](https://www.eea.europa.eu/fr), 11 janvier 2023

En revanche, la variable électrique est plus complexe puisqu'elle s'additionne à divers usages eux-mêmes en transition (chauffage, transport léger, etc.). Pour un pays comme l'Allemagne, les besoins électriques devraient tripler en raison de ces dynamiques et de la concrétisation de la stratégie hydrogène pour l'industrie domestique. En France, la consommation actuelle d'électricité est d'environ 500 TWh, tandis que les besoins anticipés par l'Académie des technologies (ADT) pour le secteur aérien (excluant ainsi le secteur maritime et routier) s'élèvent déjà à 110 TWh<sup>49</sup>. Il s'agirait en somme d'étendre les capacités de production électrique d'un cinquième par rapport à l'actuel niveau de consommation total. Sachant que le déploiement réel des *e-fuels* est attendu à partir de 2030-2035, il s'agit de coordonner la cadence de leur développement avec les infrastructures réseaux (électrique) et la capacité de production.

De ce fait, le développement des carburants de synthèse repose sur le bouquet électrique existant ainsi que sur la disponibilité électrique pour la production d'hydrogène puis pour la synthèse des carburants de synthèse. La production d'hydrogène représente dans ce cas

<sup>49</sup> « Feuille de route vers la production de e-carburants », Académie des technologies, 2023.

environ 85 % des besoins électriques, le reste servant pour la synthèse<sup>50</sup>. Suivant le critère de décarbonation, seule l'électricité issue des énergies renouvelables et du nucléaire est comptabilisée. Le besoin électrique actuel pour la production de carburants de synthèse est défini en France à hauteur de 14 TWh/an<sup>51</sup> (jusqu'à 110 TWh en 2050). À titre d'exemple théorique, 14 TWh/an correspondent à la production continue annuelle d'au moins deux réacteurs de 900 MW<sup>52</sup> ou encore à 12 % de la production annuelle allemande d'éolien allemande<sup>53</sup>. Lorsque l'on met en perspective des objectifs de 2050 de 110 TWh d'électricité nécessaire à la production de carburants de synthèse en France, on arrive à un besoin correspondant à la production annuelle de cinq réacteurs nucléaires ou à l'ensemble de la production éolienne allemande.

Ces ordres de grandeur doivent être replacés dans une réalité géographique évidemment plus dynamique. Tout d'abord cette production d'électricité est à mettre en concurrence avec d'autres secteurs énergivores souvent concentrés dans les mêmes bassins régionaux. Cela concerne plus particulièrement les régions industrielles, pétrochimiques ou les grands *hubs* de transit. En France, les régions Auvergne-Rhône-Alpes, Nouvelle-Aquitaine ou encore Hauts-de-France seraient, par exemple, particulièrement concernées<sup>54</sup>. En Allemagne, ce sont notamment les régions de l'Ouest et du Sud-Ouest qui se trouvent en première ligne en raison de leur tissu industriel robuste (automobile, électronique, métallurgique) et de leurs couloirs de transport (terrestre, aéroports, bateaux fluviaux). À la concurrence des usages s'ajoute celle de l'empreinte au sol, autrement dit l'utilisation de l'espace dédié à la production des carburants de synthèse. Dans ce dernier cas, il s'agit des surfaces dédiées notamment aux unités de production électrique (solaire, éolien, hydraulique, nucléaire, etc.), et celles dédiées aux installations de synthèse ou encore de stockage<sup>55</sup>.

La question de l'importation est ainsi abordée pour l'hydrogène, en particulier pour l'Allemagne, qui envisage un taux d'importation entre 50 % et 70 %<sup>56</sup>. Là encore, la capacité d'importation dépendra de la progression des installations capacitaires en électricité et hydrogène des autres pays (européens et extra-européens). Cette stratégie semble à ce stade très ambitieuse et comporte encore un certain nombre de variables hypothétiques (investissements réels, méthode de transport de l'hydrogène, capacité réelle de production...). Sachant que l'hydrogène doit également servir à la décarbonation des secteurs difficilement électrifiables, tels que les activités sidérurgiques et de cimenterie, les volumes d'hydrogène requis constituent un défi de taille. Parallèlement, la production de carburants de synthèse ne pourra se faire sans disponibilité hydrogène – la disponibilité de l'hydrogène dépendant elle-même du développement des technologies de production et des infrastructures connexes.

---

<sup>50</sup> [Présentation](#), Observatoire français des e-fuels, juillet 2023, p. 20.

<sup>51</sup> *Ibid.*

<sup>52</sup> Sur la base des estimations d'[EDF](#) selon lesquelles un réacteur de 900 MW produit en moyenne chaque mois 500 000 MWh.

<sup>53</sup> Sur la base de production de 2022 et 2023 (Association allemande pour l'éolien – [BWE](#)).

<sup>54</sup> [Présentation](#), Observatoire français des e-fuels, *op. cit.*

<sup>55</sup> *Ibid.*, p. 22.

<sup>56</sup> Ministère fédéral de l'Économie (BMW), *The National Hydrogen Strategy*, juin 2020.



### 2.3. La question normative

La dimension très internationale des secteurs aérien et maritime implique nécessairement une forte coordination des acteurs (exemple : aéroports ou ports internationaux, constructeurs d'avions, chantiers navals) pour l'approvisionnement en carburants. C'est dans ce contexte que s'inscrit le concept de carburant fongible (*drop-in*), soit un carburant de substitution totale ou partielle du *jetfuel* (carburant aérien) qui n'altère ni le fonctionnement des appareils, ni le système d'approvisionnement des aéroports (infrastructures). Face à des appareils prévus pour opérer des dizaines d'années, les carburants alternatifs doivent présenter une capacité d'intégration et d'acceptation dans les systèmes d'ingénierie existants. Cet enjeu rejoint la question des certifications afin de garantir la cohérence des carburants pour l'ensemble des appareils utilisés.

D'un point de vue normatif, les carburants alternatifs s'insèrent dans la norme internationale ASTM<sup>57</sup> D7566 (*Standard Specification for Aviation Turbin Fuel Containing Synthetized Hydrocarbon*) pour toutes les questions de sûreté d'utilisation. Cette norme se base sur celle des carburants classiques (ASTM D1655 – *Standard Specifications for Aviation Turbine Fuels*), et se décline en carburant de synthèse (seulement pour les carburants paraffiniques) depuis 2010 (ASTM D7566) et en biocarburant depuis 2011. Dans les deux cas, la certification peut comprendre jusqu'à 50 % de mélange de carburants conventionnels avec les carburants de synthèse (e-kerosene<sup>58</sup>) ou de biocarburants (HEFA – *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*). Actuellement, les discussions portent sur une norme ASTM permettant d'utiliser du 100 % SAF (carburant aérien du futur).

---

<sup>57</sup> L'*American Society for Testing and Materials* est la principale structure de normalisation internationale dans le domaine des carburants.

<sup>58</sup> Il s'agit du *e-kerosene* produit par le procédé Fischer Tropsch (FT-SPK, *Synthetic Paraffinic Kerosene*), ou du procédé d'Alcool-to-Jet (AtJ-SPK) sauf pour la méthode passant par du méthanol.

**Tableau n° 2 : QUEL AVENIR POUR LES BIOCARBURANTS AERONAUTIQUES ?**

Spécifications ASTM (aérien)	Description
Contenu énergétique	PCI (Pouvoir calorifique inférieur), soit la chaleur de réaction du carburant avec l'air indiqué en MJ/kg. Le standard est à 42 MJ/kg et les carburants alternatifs ne doivent pas être inférieurs (par exemple, l'hydrogène = 120 MJ/kg).
Densité du carburant	Correspond à la question de l'embarcation de l'énergie et donc du volume à transporter. Norme inclut l'intervalle de masse volumique entre 0,775 et 0,840 (kg/L).
Stabilité thermique	Garantie d'un état liquide et uni du carburant pour des températures allant de - 56°C à + 300°C.
Viscosité	Permettant ainsi la possibilité d'être pompé des réservoirs. Valeur minimum : 8 mm <sup>2</sup> /s à - 20°C.
Point éclair	Température à laquelle les vapeurs s'enflamment (étape de combustion). La température minimum du point éclair est de + 38°C (et de + 60°C pour l'aéronavale).
Stockage	Besoin de garantir un faible niveau de toxicité, de sensibilité à l'oxydation naturelle ainsi qu'une faible sensibilité à la contamination bactérienne et fongique.
Non inclus dans la norme	Température d'auto-inflammation Tension de vapeur du carburant Effet d'encrassement Sécurité des systèmes d'avitaillement au sol

Source : Académie des technologies, Académie de l'Air et de l'Espace, 26 juin 2014

L'Union européenne travaille sur deux types d'indices. Le premier est un système d'étiquetage à destination des consommateurs relatif aux indices de performances environnementales des avions utilisant des SAF. Le second correspond au développement de critères d'émission hors CO<sub>2</sub> qui se baserait sur la collecte de données et des obligations de déclarations (fournisseurs de carburants et exploitants d'avions). Parallèlement, l'UE entend observer de près les effets de ce règlement sur la compétitivité des exploitants (distorsions de concurrence)<sup>59</sup>, l'objectif étant d'engager un dialogue international et de positionner des normes et critères de durabilité relatifs aux carburants alternatifs au sein de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI)<sup>60</sup>.

<sup>59</sup> Cf. règlement (UE) 2023/2405 du Parlement européen et du Conseil relatif à l'instauration d'une égalité des conditions de concurrence pour un secteur du transport aérien durable (ReFuelEU Aviation), 18 octobre 2023.

<sup>60</sup> Dans la mesure où le carburant aérien n'est pas taxé au niveau international (Convention de Chicago (7/12/1944) et création de l'OACI), l'UE ne peut recourir à des incitations fiscales, hormis celles fondées sur les échanges de quotas carbone.

### 3. Quelle sécurité d'approvisionnement pour les carburants alternatifs ? Exploration de trois leviers

La sécurité énergétique correspond en substance à la capacité d'approvisionner un volume énergétique suffisant et en continu jusqu'aux points de consommation. La chaîne énergétique des carburants alternatifs implique en tout premier maillon la maîtrise de la production et l'acheminement suffisant d'électricité, de mono/dioxyde de carbone ou de matières organiques. Un deuxième maillon se construit autour de la capacité et du nombre d'unités de production de ces carburants. Le point de consommation final constitue le dernier maillon de la chaîne. Les « liants » de ces maillons sont les systèmes de distribution et de stockages des produits énergétiques (électricité et carburants). Cette chaîne énergétique incarne l'offre énergétique et indique le volume et le niveau de constance d'approvisionnement énergétique.

Dès lors qu'il s'agit de produire de l'électricité (et ensuite des carburants), la disponibilité de l'énergie est calquée sur les capacités de production et la densité du réseau de distribution. En face de l'offre énergétique se trouve la variable demande énergétique, qui vient rencontrer, dépasser ou être inférieure à l'offre énergétique. La demande énergétique correspond donc à la variable permettant de définir si la disponibilité de l'offre énergétique est suffisante ou non pour couvrir les besoins.

#### 3.1. Rationaliser la demande : un impératif

Dans la pensée économique classique, la croissance économique est liée à la disponibilité de l'énergie. Autrement dit, être en mesure de dégager davantage d'énergie – par exemple grâce à un approvisionnement plus massif d'énergie ou par des efforts d'efficacité énergétique – permet d'augmenter les activités en nombre (production, déplacement, etc.). Or, la structure de la demande énergétique en Europe connaît un profond changement vers du « tout électrique » :

- ➔ La transition énergétique est axée sur l'électrification des besoins (chauffage, transport et autres) ;
- ➔ La décarbonation des secteurs difficilement électrifiables passe par de l'hydrogène dont la production nécessite elle-même des capacités d'électricité importantes.

Ces deux points sont à mettre en perspective des annonces sur la ré-industrialisation de l'Europe, qui laissent entrevoir une projection des besoins énergétiques à la hausse. À titre d'exemple, les besoins énergétiques de l'Allemagne devraient, selon les projections, tripler d'ici 2050. Une croissance est également anticipée côté français. En France, la consommation électrique actuelle est d'environ 500 TWh par an (sans ré-industrialisation) tandis que le besoin en électricité du secteur aérien, suivant la dynamique de transition énergétique, devrait s'élever à 77 TWh d'ici 2050 ; c'est-à-dire, qu'à elle seule, la consommation électrique du secteur aérien correspondrait à un cinquième de l'actuelle consommation nationale. Dans ce cadre, un recours aux importations semble essentiel. Cette idée d'importation est déjà envisagée par un certain nombre de pays membres de l'UE afin de couvrir parfois plus de la

moitié de leurs besoins énergétiques<sup>61</sup>. Ainsi, le levier de la demande énergétique apparaît comme un levier fondamentalement sous-exploité. En distinction avec l'efficacité énergétique, qui se focalise sur l'optimisation de la disponibilité énergétique, un travail structurel de réduction de la demande est à recommander. La réduction structurelle de la demande implique des efforts sur les modes de consommation et sur les systèmes de mobilité jusqu'à la conception des engins de transport afin de les rendre moins « énergivores ». Il s'agit donc d'un projet d'ordre sociétal, dont le pilotage politique, les efforts menés et les résultats obtenus peuvent néanmoins s'observer à court terme<sup>62</sup>.

### **3.2. Garantir un volume de production dédié grâce à la planification ?**

L'enjeu du développement et de la sécurité d'approvisionnement en carburant alternatif est d'en assurer une quantité suffisante dans plusieurs points de consommation afin de répondre à la demande, elle-même en croissance, idéalement sur le même rythme. L'objectif est ainsi d'optimiser la rentabilité économique et d'éviter d'avoir à faire face aux problématiques du stockage ou de pénuries. Le développement des capacités de production étant dépendant aussi de l'ajustement – ou développement – des systèmes de distribution ainsi que du stockage, un développement généralisé de la branche ne peut se faire sans l'impulsion et la coordination des trois maillons de la chaîne des carburants alternatifs : les unités de production (électrique et de carburant), les infrastructures de transport/distribution ainsi que les points de consommation<sup>63</sup>.

La maîtrise technologique pour la construction et le déploiement des unités de production de carburants (électrolyses, technologies de captage de CO<sub>2</sub>, production de biocarburants de troisième génération, etc.) est également à intégrer au raisonnement afin de répondre aux enjeux de souveraineté industrielle. Ces enjeux correspondent par extension au choix des pays quant à la définition des tissus et à la résilience de leur économie. Ces choix structurants permettent de s'organiser en conséquence sur les importations qui devront être faites (produits énergétiques, pièces détachées ou équipements entiers...), sur les exportations que l'on souhaite mettre en avant, et surtout, identifier ce qu'il paraît vital de produire sur place afin de garantir une politique d'autonomie stratégique. La question de la capacité de construction des équipements et des unités de production de carburants alternatifs incarne ainsi une dimension industrielle et stratégique pour la résilience de la chaîne d'approvisionnement des carburants alternatifs.

*In fine*, cette prise en compte incontournable de la chaîne énergétique signifie que les feuilles de route du développement des carburants alternatifs ne reposent plus uniquement sur un indicateur-prix ; ce dernier relevant finalement de valeurs hypothétiques des coûts de

---

<sup>61</sup> À titre d'exemple, l'Allemagne, dans sa stratégie hydrogène, prévoit aujourd'hui un niveau d'importation se situant dans une fourchette de 50 % à 70 %.

<sup>62</sup> Le [plan de sobriété](#) du gouvernement français en place au moment de la crise énergétique de l'hiver 2022 a notamment montré son efficacité et devrait se poursuivre dans le cadre d'un « acte 2 » censé s'inscrire sur du plus long terme.

<sup>63</sup> Ce principe ne s'applique pas véritablement aux carburants paraffiniques puisqu'ils s'intègrent dans les infrastructures existantes dédiées aux carburants conventionnels.

production<sup>64</sup>. La variable du volume de production sur un temps donné (par exemple, la production totale par an) peut, en revanche, devenir un indicateur fiable servant d'orientation tant pour informer sur l'ampleur du développement des capacités d'approvisionnement en carburant que sur la disponibilité en carburant pour les consommateurs. L'incitation ne se fait plus sur la base des prix – dont la valeur est de toute façon hypothétique à ce stade – mais sur la prévisibilité et la stabilité du développement de la chaîne de production des carburants, qui implique nécessairement une stratégie à différents termes (court, moyen, long) avec un suivi pour chacune des étapes.

L'impulsion pour l'essor d'une telle chaîne d'approvisionnement semble résider surtout dans la capacité de coordination et dans l'organisation d'une certaine cohérence géographique. Cela implique un lien fort avec les autorités et les acteurs au sein de cet espace, la mobilisation suffisante d'une main-d'œuvre adéquate (en nombre et en qualification) permettant la création d'écosystèmes ayant vocation à s'agrandir. En ce sens, les *hubs* de mobilité tels que les aéroports et les ports présentent des caractéristiques intéressantes d'attraction des moyens de transport (avions, bateaux, véhicules, trains), éventuellement d'industries et de main-d'œuvre. La coordination requiert évidemment une mobilisation des différents acteurs (publics comme privés) et un dialogue continu, dans une logique de compromis en matière de planification et d'efficacité commerciale, assurant une relative maîtrise des coûts<sup>65</sup>.

En 2014, les compagnies aériennes ne souhaitent pas devenir productrices de carburants alternatifs malgré un intérêt manifeste pour leurs besoins de consommation<sup>66</sup>. Elles ont préféré adopter une position de « facilitateur » dans les discussions entre producteurs de biocarburants, « consommateurs » et instances de régulation (nationale, européenne et internationale). Aujourd'hui, des réflexions s'engagent sur le fait de construire une chaîne d'approvisionnement à proximité des aéroports ou des ports afin de consommer directement sur place le carburant, ce qui présente le double avantage de réduire au maximum les coûts de transport et de distribution et d'avoir une visibilité sur la demande énergétique des aéroports permettant de se coordonner dès lors qu'une capacité de production en carburants est planifiée. L'exemple des études sur la « Mise en place d'une filière d'approvisionnement en biocarburants aéronautiques durables en France »<sup>67</sup> semble ouvrir des perspectives intéressantes.

---

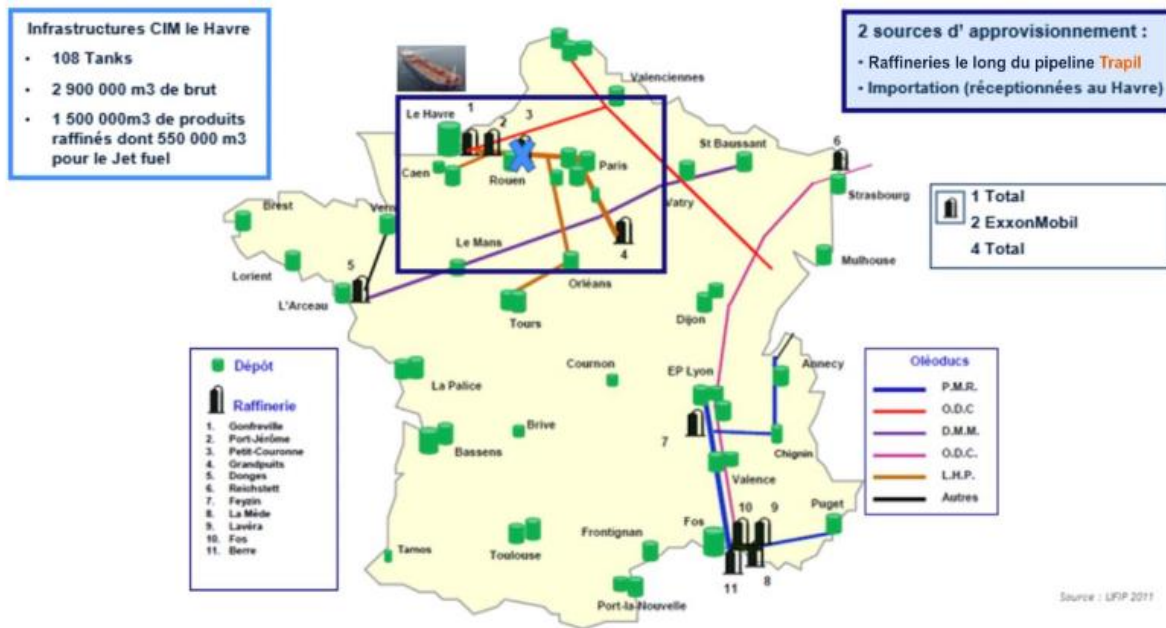
<sup>64</sup> En référence ici aux coûts de l'hydrogène décarboné, de la capture du CO<sup>2</sup> ou encore aux autres méthodes de production de biofuels, dont les chaînes d'approvisionnement n'existent pas encore. Toutes ces variables se voient attribuer des projections de prix qui relèvent actuellement de simulations – pour l'instant avec trop peu de références prix tangibles.

<sup>65</sup> Voir Marc-Antoine Eyl-Mazzega, « L'impératif de sécurité économique requiert mobilisation et planification », *La Revue de l'Énergie*, n° 668, septembre-octobre 2023.

<sup>66</sup> « Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques ? », Académie des technologies et Académie de l'air et de l'espace, 26 juin 2014.

<sup>67</sup> Rapport « Mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durables en France », [Ministère de la Transition écologique et solidaire](#), 2020.

**Figure n° 12 : SCHEMA GENERAL DE L'APPROVISIONNEMENT DE PARIS – CHARLES DE GAULLE EN BIOCARBURANT AERONAUTIQUES**



Source : « Mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durable en France », [Ministère de la Transition écologique et solidaire](#), 2020, p. 45

### 3.3. Vers une ère XtL ou pluri-carburant ?

La diversification des sources d'approvisionnement est l'une des stratégies qui garantit un niveau de sécurité énergétique suffisant. Ce principe consiste à diversifier les routes d'approvisionnement en ayant des partenariats avec différents acteurs issus de diverses localisations. Or, la diversification peut également s'opérer par la diversité des types de matières premières, à la condition que ces derniers n'affectent pas les performances ou la sûreté d'ingénierie des engins. C'est ainsi que la pluralité des carburants alternatifs peut être perçue comme une complémentarité.

Cette pluralité permet, d'une part, le développement *théoriquement* optimal des chaînes d'approvisionnement, dès lors qu'elle se fonde sur les atouts géographiques (disponibilité de résidus agricoles ou forestiers, disponibilité électrique, proximité de points de consommation importants) et sur la capacité de coordination ou de cohérence territoriale lors de l'émergence de la chaîne d'approvisionnement. D'autre part, elle permet de favoriser l'inclusion d'un plus grand nombre d'engins mobiles, et notamment d'une partie du transport terrestre existant. À l'instar du secteur aérien, qui prévoit un mélange avec les hydrocarbures, avec une teneur de plus en plus élevée, jusqu'à 70 %, en SAF, il apparaîtrait donc vraisemblable que les secteurs terrestre et maritime (partiellement pour ce dernier) suivent cette même voie.

La différence notable pour le secteur du transport terrestre reste la dynamique parallèle d'électrification du parc automobile. Au regard de la décision européenne adoptée par le Parlement européen en juin 2022 sur l'interdiction de la vente de véhicules thermiques

neufs<sup>68</sup> d'ici 2035, l'orientation du développement des carburants alternatifs est plus opaque, dans la mesure où les carburants alternatifs fongibles (*drop-in*) ne pourront être intégrés uniquement dans la flotte terrestre déjà existante. Pourtant cette mesure jugée très ambitieuse ne se focalise que sur la technologie moteur et non sur la consommation énergétique, en l'occurrence électrique. Que l'électricité produite recharge directement une voiture électrique ou bien serve à la production de carburant, les enjeux de capacité énergétique à fournir restent élevés. La différence réside néanmoins dans l'impact pour les savoir-faire en matière de motorisation et de maintien en condition opérationnelle dont les avancées sur le thermique risquent de connaître une rupture.

### 3.4. Quel lien civilo-militaire ?

La transition énergétique des moyens de transport (qu'elle soit vers une propulsion électrifiée ou passe par l'intégration de carburants alternatifs) pose la question de la structure logistique des forces armées et de leur mode d'approvisionnement en énergie tant sur le territoire national qu'en opérations extérieures (OPEX). L'enjeu de l'interopérabilité des forces armées en coalition, particulièrement dans le cadre de l'OTAN, avait mené à la fin des années 1970 à l'instauration d'une politique du carburant unique (*Single Fuel Policy*) qui unifie la logistique pétrolière en OPEX. Cette politique relève d'un raisonnement tactique et opératif permettant d'augmenter la sécurité d'approvisionnement énergétique en OPEX puisque l'ensemble des carburants acheminés doivent correspondre aux critères OTAN définis<sup>69</sup>.

Suivant le développement des biocarburants aux États-Unis entre 2000 et 2010, des travaux d'expérimentation de mélange biocarburants et carburants classiques ont été éprouvés notamment auprès de l'*US Air Force* puis de l'*US Navy*, jusqu'au programme de *Great Green Fleet* en 2014<sup>70</sup>. Sous la coordination du *Department of Defense* (DoD), des efforts et des tests technologiques ont pu être menés sur des plateformes de test, jusqu'à l'arrivée de l'administration Trump, qui a plutôt freiné cette dynamique.

Pour les forces terrestres, l'intégration de biocarburants dans la logistique militaire répondrait avant tout à des logiques écologiques et ne semble pas véritablement contribuer à l'efficacité opérationnelle des forces armées terrestres<sup>71</sup>. La capacité de production locale de carburants de synthèse est perçue comme offrant une alternative à l'acheminement de carburants classiques, surtout dans des zones géographiques où l'approvisionnement serait difficile ou en proie à des risques de ruptures (exemple : milieux insulaires ou isolés). La garantie d'une disponibilité de carburant grâce à une production locale permettrait ainsi d'atteindre un certain niveau d'autonomie opérationnelle. Cet avantage reste néanmoins à nuancer compte tenu des coûts de production imposant une rationalisation forte des usages.

<sup>68</sup> « L'Union européenne acte la fin des moteurs thermiques en 2035 », [Le Monde](#), 27 octobre 2022.

<sup>69</sup> Liste des critères : « Fuels, Oils, Lubricants and Petroleum Handling Equipment », chapitre 15, [NATO Logistics Handbook](#), octobre 1997.

<sup>70</sup> Colonel Mark F. Cancian, « Sink the Great Green Fleet », [US Naval Institute](#), septembre 2017.

<sup>71</sup> Les biocarburants n'offrent pas d'avantages significatifs en matière de performance ou de rendement.

La piste des carburants de synthèse est privilégiée par le Royaume-Uni *via* la *Royal Air Force* pour le transport aérien<sup>72</sup>, dynamique venant ainsi compléter l'activisme annoncé du pays sur les questions des SAF tant sur le plan technologique que normatif. L'Allemagne également songe aux carburants de synthèse pour les engins terrestres<sup>73</sup>, faisant écho à la forte implication du pays dans l'hydrogène. D'autres réflexions s'articulent autour des propulsions hybrides (électriques et carburants, ou carburants alternatifs, tous types disponibles, et carburants conventionnels), l'une des idées étant d'intégrer la pluralité des carburants dès la conception des engins afin de pouvoir mélanger les carburants disponibles sans altérer les performances existantes. Cette option hybride semble ainsi fonder son avantage sur sa flexibilité d'utilisation, sa complémentarité vis-à-vis des dynamiques d'électrification des flottes terrestres légères (véhicules de reconnaissance notamment) d'ici 2050<sup>74</sup>, sans imposer pour autant une refonte complète des systèmes de logistique énergétique des armées – prenant en compte les enjeux de main-d'œuvre qualifiée pour les nouveaux types de propulsion.

À noter que, à l'instar des batteries, les dynamiques de développement des carburants alternatifs dans le domaine militaire semblent largement reposer sur les avancées du monde civil, même sur le plan normatif. Autrement dit, la logistique militaire dépend des orientations technologiques et systémiques relatives à la production et à la distribution des carburants alternatifs. Le point de divergence se cristalliserait sur le critère de la performance énergétique pour les équipements militaires ainsi que sur la garantie d'un niveau d'efficacité opérationnelle. C'est notamment sur ces dynamiques que des dérivations de normes civiles s'effectuent afin de s'adapter au domaine militaire. Ces questions seront de toute façon structurantes puisqu'elles devront être traitées *a minima* au niveau otanien et potentiellement impliquer une réforme de la politique du carburant unique.

Par extension, la question des carburants alternatifs est à mettre en perspective avec les infrastructures stratégiques de stockage et de distribution parmi les pays membres de l'OTAN, qui concernent à ce jour exclusivement les hydrocarbures<sup>75</sup>. Dans l'hypothèse d'un développement des carburants alternatifs, une réflexion sur l'alimentation des oléoducs interalliés émergera sans doute. Les réflexions autour de réseaux hydrogène dédiés aux forces armées européennes sont au cœur du projet *RESHUB*<sup>76</sup>, porté par la Slovénie en coordination avec l'Agence européenne de défense. Le développement de ce type de réseaux peut ainsi être mis en lien avec les capacités de production de carburants de synthèse.

---

<sup>72</sup> « RAF and Zero Petroleum to research and develop synthetic fuel technology », [Airforce Technology](#), juillet 2022.

<sup>73</sup> Björn Müller, « Nachhut an der Klimafont », [Association des réservistes allemands](#), 27 mai 2021.

<sup>74</sup> Objectif défini par les États-Unis, « Climate Strategy », [US Army](#), février 2022.

<sup>75</sup> Voir page web : « NATO Pipeline System », [OTAN](#), 9 mars 2017.

<sup>76</sup> Voir page de présentation [SiEnE](#), « RESHUB Project », 17 mars 2021.



## Conclusion : des défis ambitieux... et des opportunités

Les carburants alternatifs constituent un compromis ; une option moins carbonée aux carburants classiques qui permet d'épargner une refonte totale des architectures logistiques et de l'ingénierie des moteurs thermiques. Les carburants alternatifs provoquent des changements structurels pour la chaîne d'approvisionnement, en ce sens que cette dernière peut être relocalisée à proximité des points de consommation et non plus être totalement soumise à la capacité d'exportation de pays dotés de sols riches en hydrocarbures.

Le développement des carburants alternatifs reste néanmoins à aborder avec réalisme puisqu'il implique des coûts de production élevés et fondamentalement dépendants de la maturation des technologies, de la disponibilité des surfaces (pour les biocarburants) et des ressources limitées (résidus organiques, CO<sub>2</sub>, hydrogène et électricité). De la même manière, les enjeux de maîtrise technologique et de développement industriel des unités de production des carburants alternatifs seront des contributeurs significatifs pour atteindre un niveau effectif d'autonomie stratégique.

L'électricité constitue la variable clef puisqu'il s'agit d'une énergie soumise à une demande très forte (numérisation, électrification des usages, production d'hydrogène...). Cela induit la nécessité de raisonner en termes de disponibilité limitée de l'énergie. C'est dans ce cadre que la rationalisation de la demande énergétique (électrique et en carburants alternatifs) ainsi que le principe de pluralité des carburants deviennent des leviers. La combinaison de ces deux aspects assurerait l'essor économique des chaînes d'approvisionnement tout en garantissant leur sécurité.

Pour ce faire, une feuille de route, au niveau local, régional, national et européen, apparaît primordiale. Néanmoins, compte tenu des nombreuses valeurs hypothétiques liées aux coûts de production, les indicateurs servant à l'impulsion et à l'orientation des chaînes de production des carburants alternatifs devraient se fonder sur des indicateurs volumétriques de capacités de production ainsi que sur l'assurance d'une consommation des volumes produits. La fiabilité de ces indicateurs offrirait la prévisibilité et la continuité nécessaires au développement de telles branches technologiques. Une approche coordonnée géographiquement par des acteurs locaux autour de points de consommation importants tels que les aéroports ou les ports paraît pertinente et réaliste afin de faire se rencontrer l'offre énergétique et la demande, tout en minimisant les coûts de transport. Cela implique néanmoins une coordination forte de tous les acteurs concernés (publics comme privés).

La diversité des carburants alternatifs semble apporter plus de flexibilité et une amélioration de la sécurité d'approvisionnement. La concrétisation de cette vision dépendra très largement de la capacité des pays à l'intégrer et à se coordonner à différents niveaux (UE, OTAN, autres organisations internationales). En d'autres termes, il s'agit de concevoir des normes fondées sur des critères de durabilité et d'acceptabilité technologique des engins plutôt que sur l'imposition d'une orientation technologique précise basée uniquement sur les intérêts économiques nationaux.