

13 novembre 2023

PROPOSITION D'UNE « FEUILLE DE ROUTE 2035 » POUR LE DÉVELOPPEMENT DE E-CARBURANTS

1. Introduction	1
2. Les voies technologiques considérées	3
3. Proposition d'une « feuille de route 2035 » pour le développement de e-carburants	3
4. Récapitulatif de la feuille de route	10
Annexe I – Enjeux et motivations pour une production massive de e-carburants en France	13
Annexe II – Questions sous-jacentes à la production des e-carburants en France	16
Annexe III – Dynamique internationale	19

1. Introduction

La production de carburants durables est incontournable sur le chemin de la décarbonation des secteurs aériens et maritimes, à eux deux responsables de 28 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur des transports dans l'Union européenne ; les émissions de ce secteur augmentent régulièrement et dépassent le cinquième des émissions européennes. Le Parlement et le Conseil européens ont récemment entériné la trajectoire de décarbonation du transport maritime¹ et aérien² :

¹ Sustainable maritime fuels, 'Fit for 55' package: The FuelEU Maritime proposal, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIEF/2021/698808/EPRS_BRI\(2021\)698808_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIEF/2021/698808/EPRS_BRI(2021)698808_EN.pdf)

² Sustainable aviation fuels (ReFuelEU Aviation Initiative), https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0319_EN.pdf

Objectifs endossés par le Parlement et le Conseil européens	AVIATION Taux d'incorporation de carburants net bas carbone	MARITIME Diminution de l'intensité carbone
2025	2 %	2 %
2030	6 %	6 %
2035	20 %	14,5 %
2040	34 %	31 %
2045	42 %	62 %
2050	70 %	80 %

Tableau 1 : trajectoires de décarbonation de l'aviation et du maritime, telles que adoptées en 2023 par le Parlement et le Conseil européens.

La production massive de molécules énergétiques durables³ est au cœur de cette trajectoire : hydrogène, ammoniac, biocarburants avancés (méthanol, éthanol, naphta, kérosène, gazole ...) issus de la biomasse lignocellulosique, e-carburants ou carburants de synthèse (e-kérosène, e-fioul, e-méthanol ou encore e-GNL pour le gaz naturel liquéfié).

Les biocarburants et les e-carburants sont des solutions complémentaires qui devront, à terme, être déployées en parallèle pour satisfaire tous les usages du transport. Un intérêt majeur de ces carburants durables, notamment pour l'aérien et le maritime, est d'être utilisable sans modification des infrastructures de distribution et d'usages, permettant ainsi une transition gérable à l'échelle mondiale grâce à leur capacité de mélange avec les carburants fossiles.

Il faut donc préparer la production des e-carburants, ce qui nécessite la mise en œuvre d'une politique énergétique et industrielle volontariste pour surmonter trois défis : *i)* la mobilisation d'une grande quantité d'électricité décarbonée, *ii)* la maîtrise des briques technologiques pour contribuer à la réindustrialisation *iii)* le déploiement à grande échelle d'une filière industrielle.

Ces défis sont sérieux et il convient de les jauger à l'aune d'une ambition plus générale : la décarbonation de nos sociétés européennes qui consomment encore aujourd'hui plus de 75 % de leur énergie sous forme de carburants fossiles. Aucune trajectoire simple ou sans effort ne permettra d'atteindre des performances de décarbonation significatives.

Le rapport de l'Académie des technologies sur la décarbonation du secteur aérien⁴ référence et justifie la plupart des évaluations quantitatives ci-après. Ce rapport explicite les conditions technologiques, énergétiques et économiques d'une trajectoire de production des carburants durables à l'échelle du besoin et dans la bonne cinétique. Compte tenu des limites de disponibilité de la biomasse, les besoins devront être assurés de manière significative par la production de carburant de synthèse dès la prochaine décennie. Du fait de son mix électrique décarboné, la France est un des rares pays à pouvoir considérer le déploiement rapide sur son territoire d'une filière industrielle pour la production de carburants de synthèse. Ceci nécessite un investissement technologique et industriel important pour atteindre les rendements de l'ordre de 50 % permettant d'assurer la viabilité économique et énergétique des carburants de synthèse.

³ Dans la suite, les molécules énergétiques durables, dont les carburants durables, désignent des vecteurs énergétiques dont le bilan carbone est proche de zéro.

⁴ Rapport de l'Académie des technologies sur la décarbonation de l'aviation par les carburants durables, février 2023, <https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2023/03/Rapport-decarbonation-secteur-aerien-production-carburants-durables-AT-Mars-2023.pdf>

2. Les voies technologiques considérées

La substitution d'hydrocarbures fossiles par des molécules énergétiques durables peut être réalisée par un grand nombre de couples « intrants/technologies ».

Certaines molécules permettent une élimination des émissions de CO₂ lors de la propulsion (hydrogène, ammoniac), l'empreinte carbone étant alors réduite à celle de leur production; d'autres molécules garantissent un bilan net en carbone proche de zéro en prélevant le carbone dans l'environnement avant de le relâcher lors de la propulsion. Ces deux approches sont équivalentes sur le plan des émissions de CO₂.

La production de molécules énergétiques durables nécessite des ressources en biomasse et/ou en électricité bas carbone. Pour simplifier, on ne considérera dans la suite que deux familles :

- la première famille concerne les biocarburants produits à partir de la biomasse, comme les biokérosènes pour l'aviation ou encore les bioGNL pour le maritime. La biomasse apporte ici à la fois le carbone et l'hydrogène nécessaires aux molécules énergétiques ;
- la deuxième famille concerne les carburants de synthèse ou e-carburants. Pour l'aviation, il s'agit de kérosène de synthèse. Pour le maritime, plusieurs types de molécules énergétiques sont envisagées : e-fioul, ammoniac, e-GNL, e-méthanol, hydrogène. Au premier ordre, toutes ces molécules nécessiteront la même quantité d'électricité bas carbone par unité de service rendu. L'électrolyse à l'échelle GW, et la capture du CO₂ pour la plupart des vecteurs énergétiques considérés, sont ici des défis centraux.

Il existe une voie intermédiaire entre les biocarburants et les e-carburants : les e-biocarburants produits à partir de la biomasse avec un ajout d'hydrogène⁵. Cette voie présente de fortes synergies technologiques avec la voie des hydrocarbures de synthèse. Par abus de langage, on traitera ci-dessous cette voie intermédiaire dans la famille des carburants de synthèse ou e-carburants.

3. Proposition d'une « feuille de route 2035 » pour le développement de e-carburants

Cible et périmètre de la feuille de route proposée

L'annexe 2 évalue la demande française en carburants durables à 2,1 Mt₂₀₃₅ et 9,3 Mt₂₀₅₀. De nombreuses raisons pourront induire un décalage temporel ou une diminution des quantités effectivement demandées ; néanmoins, cette cible a la vertu de bien poser le problème et permet de dimensionner les efforts à déployer.

L'objectif de la feuille de route proposée est la maîtrise technologique à l'échéance 2035 i) pour sécuriser les choix technologiques à anticiper d'ici quelques années pour le déploiement industriel et ii) pour disposer des savoir-faire et du droit d'usage sur un portefeuille cohérent de technologies, pour une utilisation domestique et à l'exportation. Cet objectif est critique pour la production de e-carburant d'ici 2035, comme pour sécuriser la croissance post-2035 dont les conditions ne sont pas examinées ici.

⁵ Ceci permet d'augmenter le ratio hydrogène sur carbone, de 3/2 dans la biomasse à 2 dans les hydrocarbures. La production d'un million de tonnes de carburant e-biocarburant requière 2,2 Mt de biomasse sèche et 6 TWh d'électricité bas carbone.

La voie biocarburant, par exemple oléochimique pour l'aviation ou biométhane pour le maritime, n'est pas évoquée ici car bénéficiant d'un marché établi et limité au regard du besoin. Elle sera une composante essentielle de la trajectoire réglementaire (tableau 1) au moins jusqu'à 2030. La voie e-biocarburant (à partir de biomasse lignocellulosique avec ajout d'hydrogène), initiée par exemple avec le projet BioTJet⁶, assurera la transition jusqu'à ce que la production de carburant de synthèse prenne le relais de croissance. La voie e-biocarburant restera ensuite une composante importante, mais limitée dans le marché.

La feuille de route technologique 2035

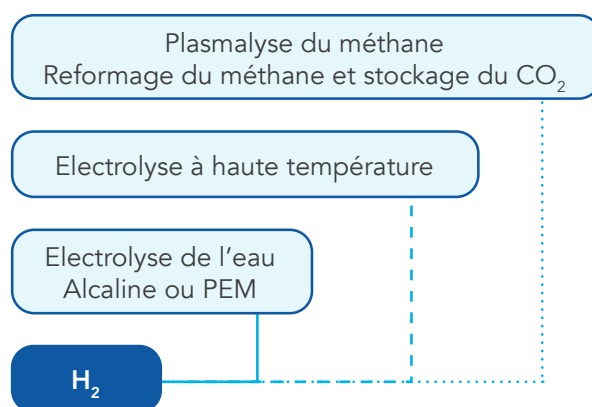
La France dispose déjà d'un portefeuille de technologies démontrées pour le captage de CO₂ sur émetteur concentrée, pour la réduction du CO₂ et pour la synthèse de carburants de deuxième génération. On distinguera trois niveaux afin de hiérarchiser les technologies nécessaires à la production de e-carburants⁷ :

- **les « technologies classiques »** bénéficient à la fois d'une grande maturité, d'industriels bien établis sur le domaine et d'une chaîne de fabricants disposant d'un fort retour d'expérience ;
- **les « technologies clés »** désignent des technologies bénéficiant d'un savoir-faire établi mais ne disposant pas d'une expérience industrielle. Sans être porteuses en soit d'incertitudes importantes, les technologies clés présentent des risques significatifs pour la montée en échelle industrielle et/ou pour leur intégration dans le processus complet de production. Pour réduire ces risques, le développement de démonstrateurs techniques et économiques à l'échelle est donc un élément essentiel dans la feuille de route ;
- **les « technologies critiques »** existent et sont validées à une échelle préindustrielle. Elles concentrent le risque technologique. En amont des grands investissements, il faudra sélectionner ces technologies, en évaluer les performances et en quantifier le marché.

La production d'hydrogène pour le carburant durable

La très grande majorité (> 80%) de l'énergie nécessaire à la production d'e-carburants est utilisée à produire de l'hydrogène.

Aujourd'hui l'hydrogène est principalement produit à partir de méthane fossile par un procédé de reformage accompagné d'importantes émissions de CO₂. Ce procédé peut être envisagé dans le futur à condition de lui associer une capture et un stockage du CO₂. Le développement de capacités de stockage CO₂ à grande échelle⁸ sera ici le facteur dimensionnant et renvoie cette solution au moyen long terme.



⁶ La décision le 16 juin 2023 de réalisation du projet BioTJet sur le bassin de Lacq concerne la production de biokérosène ; cet investissement de 1 G€ est un bon exemple des initiatives participant à cette feuille de route ; <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/202306%20CP%20ElyseEnergy%20implantation%20biotjet%20-%202016%20Juin%202023.pdf>

⁷ Les schémas ci-dessous décrivent les différentes technologies à maîtriser avec une couleur verte, marron ou rouge pour indiquer leur niveau de maturité, respectivement classique, clé ou critique.

⁸ Dossier de consultation 2023 pour la Stratégie CCUS, capture, stockage et utilisation du carbone

Alternativement, le procédé de reformage peut être alimenté par du biogaz, garantissant un hydrogène bas carbone. La technologie ne pose pas de problème, mais l'affectation de grandes quantités de biogaz à la production d'hydrogène ne paraît pas possible à court terme.

L'hydrogène peut être produit à partir de l'eau par électrolyse. Le procédé mobilise alors une grande quantité d'électricité et son empreinte carbone découle de celle de l'électricité utilisée. Pour que le e-carburant présente un bilan net 10 fois inférieur au carburant fossile, il faut en effet une électricité dont l'empreinte carbone est 20 gCO₂/kWh, performance accessible au mix électrique français.

Les technologies classiques d'électrolyse alcaline et à membrane échangeuse de protons (PEM) sont aujourd'hui matures ; le défi court terme est essentiellement lié à la croissance rapide de la production des électrolyseurs (un peu moins de 3 GW d'électrolyseurs PEM sont requis pour une production de 1 Mt de e-carburant par an) et à la concurrence chinoise dans un schéma parallèle à celui observé pour les panneaux solaires.

À moyen terme, l'électrolyse haute température (EHT), en cours d'industrialisation par la société Genvia et d'autres sociétés européennes, permet un gain de 20 % sur l'électricité consommée. Ce gain est significatif ; pour chaque Mt de e-carburant, l'économie sur la consommation électrique est de l'ordre de 5 TWh par an, soit une économie annuelle de 250 M€ si le coût de l'électricité est 50 €/MWh. Cette technologie est importante pour la performance économique des e-carburants.

Des technologies émergentes de production de l'hydrogène sont identifiées. C'est notamment le cas de la plasmalyse qui mobilise du gaz naturel et de l'électricité. Son intérêt est de diviser par cinq la quantité d'électricité nécessaire par rapport à l'électrolyse. En contrepartie, la plasmalyse consomme quatre tonnes de méthane par tonne d'hydrogène produit ; mais le carbone libéré par ce procédé est solide et n'a aucune contribution à l'effet de serre. Une autre technologie émergente concerne l'extraction de « l'hydrogène naturel », produit dans le sous-sol. Des sites d'intérêt sont identifiés en nombre croissant mais sans qu'il soit possible à ce jour d'évaluer l'ampleur des gisements ; cette technologie pourrait prendre une part du marché d'ici dix ans si des gisements exploitables de grande taille étaient avérés.

Le panorama ci-dessus montre que la production massive d'hydrogène nécessaire aux e-carburants peut être obtenue par une stratégie évolutive, avec plusieurs générations de technologies dont la pénétration dans le marché peut se faire continûment au gré de leur maturation technique et économique :

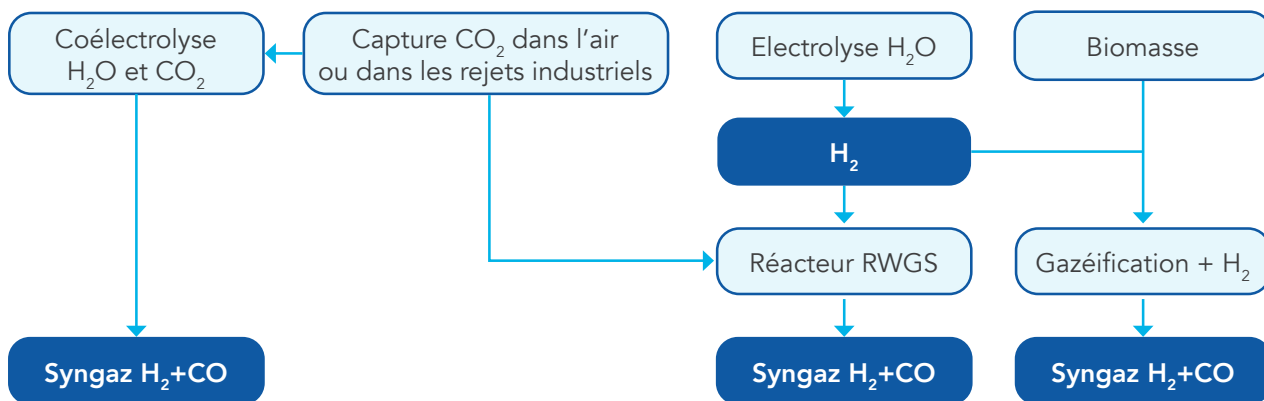
- **Mesure 1a :** Cette mesure rejoint le plan d'accélération du déploiement de l'hydrogène⁹ qui prévoit la production de 6,5 GW d'électrolyseur d'ici 2030. La production en 2035 de 2,1 Mt de carburants durables (e-biocarburants et e-carburants) nécessitera de l'ordre de 2 GW d'électrolyseurs.
- **Mesure 1b :** Cette mesure consiste à soutenir l'industrialisation de l'électrolyse à haute température qui permet de réduire la facture électrique de 20 % et d'améliorer le rendement de production des e-carburants de 10 %.
- **Mesure 1c :** Cette mesure vise à soutenir les efforts d'innovation et de développement sur les technologies émergentes, comme la plasmalyse et l'exploration des sites de production d'hydrogène naturel, afin de garder un portefeuille technologique à l'état de l'art sur le sujet stratégique de la production d'hydrogène bas carbone.

Ces trois mesures complémentaires permettent d'assurer à la fois une disponibilité effective à court terme et à grande échelle de l'électrolyse tout en permettant l'intégration des progrès technologiques.

⁹ Dossier de presse « accélérer le déploiement de l'hydrogène, clé de voûte de la décarbonation de l'industrie », février 2023, https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2023/02/230202_dp_hydrogene_decarbonation_industrie.pdf

La production du syngaz

Le syngaz est le mélange H_2+CO_2 qui alimente le réacteur de synthèse produisant le e-carburant.



Une première possibilité est d'utiliser la biomasse qui peut produire le syngaz directement par gazéification. L'ajout d'hydrogène permet d'obtenir la bonne proportion d'hydrogène dans le syngaz.

L'alternative consiste à capter le CO_2 dans les fumées industrielles ou directement dans l'air, avant de le réduire en monoxyde de carbone :

- la capture de CO_2 dans les fumées industrielles est une technologie bien maîtrisée. Mais par principe elle ne fait que diviser les émissions globales par deux en répartissant le gain entre l'industriel émetteur et le transporteur utilisant le carburant ainsi produit. Cette solution est de nature transitoire et peut offrir des opportunités intéressantes pour des premiers projets qui permettent de lancer le marché ;
- la capture du CO_2 dans l'air est une technologie existante mais dont la maîtrise et le déploiement à grande échelle exigent des efforts de développement à court terme. Compte tenu des trajectoires de décarbonation du *tableau 1* et des limitations de la biomasse, la production de carburant de synthèse produit à partir de CO_2 capté dans l'air devra démarrer vers 2035 et être largement majoritaire à partir de 2045. Il faut donc investir rapidement sur ces technologies ;
- la capture du CO_2 est aujourd'hui développée par quelques industriels. Le groupe pétrolier texan, Occidental Petroleum (Oxy), sous licence de la société canadienne Carbon Engineering (et équipée de compresseurs Siemens), a inauguré en mai 2023 le chantier au Texas d'une première usine de grande taille (0,5 Mt CO_2 /an) pour un investissement de 1 G€¹⁰. La société suisse Climeworks a réalisé et exploite une installation pilote en Islande pour la capture du CO_2 dans l'air (4 000 t/an) ; Climeworks vise une capacité de captage d'un million de tonnes de CO_2 /an en 2030¹¹ ;
- la technologie de capture du CO_2 dans l'air est la fois critique et jeune ; son potentiel d'innovation reste important. Par exemple le Centre de recherche en énergie solaire et hydrogène du Bade-Wurtemberg a annoncé début octobre 2023 avoir démontré à l'échelle d'un prototype une réduction très significative de l'énergie requise¹². Il est dans ce contexte nécessaire de mener une stratégie de développement permettant de sélectionner la ou les bonnes technologies et porter à niveau leurs performances industrielles.

¹⁰ Projet « Stratos », <https://www.energyintel.com/00000187-dfca-d217-a1df-dfcbc2eb0000>, mai 2023

¹¹ [Climeworks' \\$650m raise signals carbon removal's mainstream arrival](#)

¹² [ZSW: Etappenziel erreicht: Direct Air Capture Verfahren überzeugt im ZSW-Forschungsbetrieb.](#)

La captation du CO₂, technologie au cœur des trajectoires de décarbonation dès 2035, doit faire rapidement l'objet d'investissements de développement :

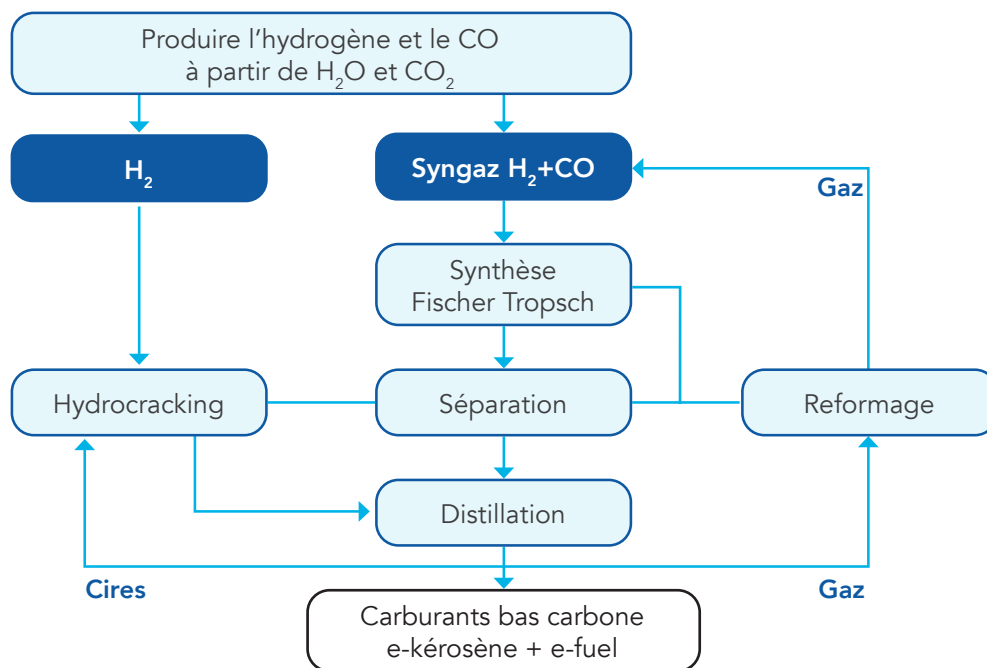
- **Mesure 2 :** l'IFP Énergies nouvelles dispose des compétences et des savoir-faire pour sécuriser la maîtrise des technologies de capture dans l'air. La mesure consiste à financer les organismes de recherche publique pour développer une plateforme d'étude et de développement permettant en parallèle de *i)* qualifier les technologies disponibles sur le marché, *ii)* développer des technologies propriétaires, et *iii)* optimiser une première génération performante pour une industrialisation rapide. Cette mesure pourra ainsi sélectionner et dé-risquer/réduire à court terme les risques d'une technologie pour un premier déploiement industriel 2035, tout en acquérant la maîtrise d'un portefeuille de technologies qui accompagnera dans la durée l'état de l'art dans le domaine. Cette mesure est critique car les technologies de capture du CO₂ sont à la fois indispensables sur la trajectoire de décarbonation et souffrent d'une perception négative du fait de leur méconnaissance. Ne pas progresser rapidement en France sur cette brique technologique empêcherait le développement d'une filière industrielle apte à assurer la trajectoire de décarbonation et laisserait la filière aux seules mains qui investissent sur ces technologies aujourd'hui (et notamment les États-Unis).

Lorsque le CO₂ est disponible, il est nécessaire de le transformer en syngaz. La réduction du dioxyde de carbone en monoxyde de carbone peut être obtenue par la réaction dite du « gaz à l'eau inverse ou Reverse Water Gas Shift (RWGS) » qui consomme de grandes quantités d'hydrogène. Une alternative est de co-électrolyser en même temps l'eau et le dioxyde de carbone pour produire directement H₂ et CO₂. À la limite des rendements parfaits, ces deux voies consomment exactement la même quantité d'électricité. En revanche, elles n'ont pas le même niveau de maturité technologique. La voie RWGS fait partie d'un corpus technologique bien maîtrisée, mais elle n'est pas industriellement développée. La voie coélectrolyse existe¹³ mais est balbutiante. La production du syngaz appelle donc un investissement sur le sujet :

- **Mesure 3a :** La production de syngaz par la voie RWGS est une technologie clé et son industrialisation doit bénéficier d'un soutien dans les projets existants et à venir. Cette voie constitue le socle pour le premier palier d'industrialisation 2035.
- **Mesure 3b :** La voie co-électrolyse est prometteuse et mobilise les technologies d'électrolyse à haute température (EHT). Cette voie bénéficiera des efforts d'industrialisation portés par Genvia sur l'EHT. Les mesures 3b et 1b doivent donc être gérées de concert et peuvent conduire à une montée en échelle de l'EHT à la fois pour produire l'hydrogène et le syngaz. Dès que la voie co-électrolyse EHT sera disponible industriellement, elle pourrait devenir majoritaire au détriment de la voie RWGS.

¹³ L'entreprise allemande Sunfire GmbH dispose d'un module industriel produisant directement du syngaz ; <https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20%28neu%29/Sunfire-Factsheet-SynLink-SOEC-20210303.pdf>

L'intégration du système



Plusieurs procédés sont envisageables pour la production de e-carburants. On considère ci-dessus l'exemple d'un procédé thermochimique qui permet de pointer des briques technologiques critiques qui sont communes à l'ensemble des procédés.

À l'aval du procédé, on retrouve les technologies classiques de la pétrochimie qui sont parfaitement maîtrisées. La partie centrale, ici un réacteur thermochimique dit de « synthèse Fischer-Tropsch », est une technologie clé. Elle a bénéficié de plusieurs années de développement et d'un démonstrateur (BioTfuel) qui a permis de lancer un projet de production de 0,11 Mt de carburants durables (BioTJet18). Le niveau de risque associé à cette technologie clé est jugé faible.

D'autres types de réacteurs de synthèse peuvent être envisagés. On peut citer notamment la technologie alternative Futuro¹⁴ pour produire de l'éthanol à partir d'une biomasse de 2^e génération et offrir une base pour développer de nombreuses applications chimiques.

La technologie de synthèse thermochimique (Fischer-Tropsch) est mûre pour passer à une étape d'industrialisation poussée, comme l'illustre la mise en œuvre du projet BioTJet⁶. Compte tenu de l'importance et de la diversité des applications, les voies alternatives doivent continuer à être explorées et bénéficier de projets de développement et de démonstration.

L'intégration du système est en soi à considérer comme une technologie critique. En effet, la performance économique d'un e-carburant dépend au premier ordre du rendement global de sa production, défini comme le rapport entre l'énergie du carburant produit à l'énergie électrique qu'il a fallu mobiliser pour le produire. Un procédé correctement intégré peut atteindre 55% de rendement. Mais ceci implique une recirculation optimale des chaleurs émises par les réactions exothermiques de l'aval du procédé (et notamment la réaction Fischer-Tropsch qui transforme 20% de l'énergie entrante en chaleur). Ces chaleurs fatales pourraient être suffisantes pour alimenter à coût nul l'électrolyse à haute température et la capture du CO₂.

¹⁴ <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/biocarburants-2e-generation-premiere-industrielle-technologie-francaise-futuro1tm>

Cette optimisation implique d'accumuler de l'expérience sur des projets intégrant toutes les briques technologiques. L'optimisation est donc au cœur de la route vers un premier palier d'industrialisation :

- **Mesure 4a :** L'optimisation du système et l'intégration des différentes briques technologiques sont en soi un enjeu critique. Cette mesure nécessite de favoriser et soutenir l'émergence de projets intégrant à l'échelle les différentes fonctions nécessaires à la production de e-carburant. L'objectif même d'un premier palier industriel en 2035 est le cœur de cible de cette mesure. Elle comporte bien sûr le soutien aux efforts technologiques d'intégration ; mais plus généralement elle implique des efforts de coordination plurisectorielle pour garantir l'accès aux intrants et stabiliser les règles du marché. L'objectif de cette mesure est donc d'établir la viabilité économique des solutions disponibles, avec la perspective contraignante de pouvoir extrapoler ces solutions aux quantités requises pour 2050.
- **Mesure 4b :** Cette mesure vise à décliner la mesure générique 4a. Il s'agit d'inviter les grands acteurs industriels concernés dans les secteurs de l'énergie, de l'aéronautique et du maritime, à échanger sur des projets communs à l'échelle du besoin 2035. Les projets unitaires pourraient assurer la production de 0,1 à 0,3 Mt de e-carburant à partir d'un mix de capture du CO₂ dans les rejets industriels, mais aussi dans l'air. Pour assurer la faisabilité, dans une première étape, l'hydrogène serait produit par des électrolyseurs PEM et le syngaz par RWGS. Les performances de ces projets seraient bien sûr inférieures aux performances à maturité technologique⁴ (pour une production de 0,1 Mt/an de e-carburant : capex 0,5 G€, 0,3 MtCO₂ à capturer, 0,22 GW d'électrolyseur, 2,2 TWh de consommation annuelle, rendement de conversion 55 %). En cohérence avec les exigences auxquelles la France a adhéré (tableau 1), ces premiers projets devraient bénéficier de décisions de principe entre 2025 et 2027 pour voir le jour en 2035.

Le besoin en biomasse et électricité décarbonée

La sécurisation des intrants (biomasse et électricité) fait partie de la feuille de route 2035 car il s'agit d'une condition préalable aux décisions d'investissement.

La biomasse renvoie à un ensemble complexe d'activités et d'enjeux en tension. La mise en priorité de ces activités est délicate mais nécessaire. Elle nécessitera un arbitrage par les pouvoirs publics afin d'orienter le marché en fonction de ces priorités. Par exemple, le fléchage de la biomasse lignocellulosique vers la production de carburants durables paraît prioritaire vis-à-vis d'une utilisation sous forme de bois énergie pour lequel il existe des alternatives décarbonées.

La quantité de biomasse éligible en France et compatible avec le référentiel européen pour la production de bioénergie est de l'ordre de 60 Mt. La part de cette biomasse qui sera consacrée à l'aviation et au maritime pourrait s'établir à 6 Mt₂₀₃₅ et 9 Mt₂₀₅₀ de biomasse sèche (soit 10 % à 15 %). Cette hypothèse détermine en retour un besoin en électricité d'une vingtaine de TWh pour atteindre l'objectif visé en 2035, soit de l'ordre de 2 Mt de carburants durables.

- **Mesure 5 :** Les investissements technologiques proposés dans cette feuille de route visent un premier palier industriel permettant la production en 2035 d'un peu plus de 2 Mt de carburants durables. Il sera pour cela nécessaire de mobiliser une part significative (au moins 10 % en 2035) de la biomasse éligible à la production d'énergie et une production d'électricité d'une vingtaine de TWh.

4. Récapitulatif de la feuille de route

Technologies nécessaires pour la production de e-carburants		
Technologies classiques	Technologies clés	Technologies critiques
Pétrochimie (hydrocracking, séparation, distillation, reformage)	Synthèse Fischer-Tropsch	Capture du CO ₂ dans l'air
Production d'hydrogène par les technologies PEM ou alcaline avec un enjeu de production GW	Réacteur chimique RWGS Capture du CO ₂ dans les fumées industrielles	Electrolyse à haute température
	Gazéification de la biomasse	Coélectrolyse de l'eau et du CO ₂
	Ajout d'H ₂ au syngaz issu de la biomasse	Intégration du système

Feuille de route vers la production de e-carburants

Liste des mesures

- **Mesure 1a:** Cette mesure rejoint le plan d'accélération du déploiement de l'hydrogène qui prévoit la production de 6,5 GW d'électrolyseur d'ici 2030. La production en 2035 de 2,1 Mt de carburants durables (e-biocarburants et e-carburants) nécessitera de l'ordre de 2 GW d'électrolyseurs.
- **Mesure 1b:** Cette mesure consiste à soutenir l'industrialisation de l'électrolyse à haute température qui permet de réduire la facture électrique de 20% et d'améliorer le rendement de production des e-carburants de 10%.
- **Mesure 1c:** Cette mesure vise à soutenir les efforts d'innovation et de développement sur les technologies émergentes, comme la plasmalyse et l'exploration des sites de production d'hydrogène naturel, afin de garder un portefeuille technologique à l'état de l'art sur le sujet stratégique de la production d'hydrogène bas carbone.
- **Mesure 2:** L'IFP Énergies nouvelles dispose des compétences et des savoir-faire pour sécuriser la maîtrise des technologies de capture dans l'air. La mesure consiste à financer les organismes de recherche publique pour développer une plateforme d'étude et de développement permettant en parallèle de *i*) qualifier les technologies disponibles sur le marché, *ii*) développer des technologies propriétaires, et *iii*) optimiser une première génération performante pour une industrialisation rapide. Cette mesure pourra ainsi sélectionner et à court terme dérisquer/réduire les risques dues à une technologie pour un premier déploiement industriel 2035, tout en acquérant la maîtrise d'un portefeuille de technologies qui accompagnera dans la durée l'état de l'art dans le domaine. Cette mesure est critique car les technologies de capture du CO₂ sont à la fois indispensables sur la trajectoire de décarbonation et souffrent d'une perception négative du fait de leur méconnaissance. Ne pas progresser rapidement en France sur cette brique technologique empêcherait le développement d'une filière industrielle apte à assurer la trajectoire de décarbonation et laisserait la filière aux seules mains qui investissent sur ces technologies aujourd'hui (et notamment les États-Unis).
- **Mesure 3a:** La production de syngaz par la voie RWGS est une technologie clé et son industrialisation doit bénéficier d'un soutien dans les projets existants et à venir. Cette voie constitue le socle pour le premier palier d'industrialisation 2035.
- **Mesure 3b:** La voie coélectrolyse est prometteuse et mobilise les technologies d'électrolyse à haute température (EHT). Cette voie bénéficiera des efforts d'industrialisation portés par Genvia sur l'EHT. Les mesures 3b et 1b doivent donc être gérées de concert et peuvent conduire à une montée en échelle de l'EHT à la fois pour produire l'hydrogène et le syngaz. Dès que la voie coélectrolyse EHT sera disponible industriellement, elle pourrait devenir majoritaire au détriment de la voie RWGS.

- **Mesure 4a:** L'optimisation du système et l'intégration des différentes briques technologiques est en soit un enjeu critique. Cette mesure nécessite de favoriser et soutenir l'émergence de projets intégrant à l'échelle les différentes fonctions nécessaires à la production de e-carburant. L'objectif même d'un premier palier industriel en 2035 est le cœur de cible de cette mesure. Elle comporte bien sûr le soutien aux efforts technologiques d'intégration ; mais plus généralement elle implique des efforts de coordination plurisectorielle pour garantir l'accès aux intrants (biomasse, CO₂, électricité bas carbone) et stabiliser les règles du marché. L'objectif de cette mesure est donc d'établir la viabilité économique des solutions disponibles, avec la perspective contraignante de pouvoir extrapoler ces solutions aux quantités requises 2050.
- **Mesure 4b:** Cette mesure vise à décliner la mesure générique 4a. Il s'agit d'inviter les grands acteurs industriels concernés dans les secteurs de l'énergie, de l'aéronautique et du maritime, à échanger sur des projets communs à l'échelle du besoin 2035. Les projets unitaires pourraient assurer la production de 0,1 à 0,3 Mt de e-carburant à partir d'un mix de capture du CO₂ dans les rejets industriels mais aussi dans l'air. Pour assurer la faisabilité, dans une première étape, l'hydrogène serait produit par des électrolyseurs PEM et le syngaz par RWGS. Les performances de ces projets seraient bien sûr inférieures aux performances à maturité technologique⁴ (pour une production de 0,1 Mt/an de e-carburant: capex 0,5 G€, 0,3 MtCO₂ à capturer, 0,22 GW d'électrolyseur, 2,2 TWh de consommation annuelle, rendement de conversion 55%). En cohérence avec les exigences auxquelles la France a adhéré (*tableau 1*), ces premiers projets devraient bénéficier de décisions de principe entre 2025 et 2027 pour voir le jour en 2035.
- **Mesure 5:** Les investissements technologiques proposés dans cette feuille de route visent un premier palier industriel permettant la production en 2035 d'un peu plus de 2 Mt de carburants durables. Il sera pour cela nécessaire de mobiliser une part significative (au moins 10% en 2035) de la biomasse éligible à la production d'énergie et une production d'électricité d'une vingtaine de TWh.

Annexe I

Enjeux et motivations pour une production massive de e-carburants en France

Suivre la trajectoire de décarbonation

Le premier enjeu concerne la chronologie et les masses de carburants durables imposées aux transports maritime et aérien par les règlements européens 'FuelEU maritime' et 'ReFuelEU'.

France	2035	2050	2035	2050
Besoin en carburant des aéroports	9,0 MT	9,0 MT	110 TWh	110 TWh
dont carburant durable	1,8 MT	6,3 MT	22 TWh	77 TWh
besoin en carburant des ports	2,8 MT	3,8 MT	31 TWh	43 TWh
dont carburant durable	0,3 MT	3,0 MT	3 TWh	34 TWh
Carburant durable - Total	2,1 Mt	9,3 Mt	25 TWh	111 TWh

Tableau 2 : Estimation des quantités de carburants durables (biocarburants et e-carburants) nécessaires pour l'aviation et le maritime (en Mt et TWh).

Ces estimations découlent d'une part des règles adoptées au niveau européen (tableau 1) et d'autre part d'hypothèses sur la croissance du trafic et sur les progrès d'efficacité énergétique. Les ordres de grandeurs du tableau 2, et notamment l'accélération demandée, sont robustes. Bien sûr, les valeurs précises pourraient évoluer, par exemple d'une dizaine de pourcents, ou plus, à la baisse en fonction des efforts de sobriété ou si l'économie mondiale stagne.

Aux obligations réglementaires s'ajoute une motivation stratégique pour les ports et aéroports français dont l'attractivité et l'évolution économique dépendront de leur capacité à mettre à disposition des quantités importantes de carburants durables.

On rappelle que la production de carburants de synthèse spécifiques à l'aviation et au maritime s'accompagne d'une coproduction de diesel décarboné qui pourra être utilisé dans d'autres secteurs (engines agricoles ou de travaux publics, etc) contribuant à la décarbonation de ces secteurs.

La maîtrise des briques technologiques au cœur de la politique de réindustrialisation

Le deuxième enjeu concerne la maîtrise des briques technologiques à mobiliser pour un déploiement industriel, viable économiquement et à grande échelle, de ces technologies.

La motivation pour cet enjeu se place au cœur de la politique de réindustrialisation.

La réindustrialisation de la France passera par des prises de positions sur des marchés nouveaux plutôt que par le rapatriement de marchés déjà délocalisés et dont le leadership est déjà fortement ancré ailleurs. La production de e-carburants, et plus généralement les technologies de l'hydrogène et des molécules énergétiques, constituent une nouvelle vague technologique de grande ampleur pour laquelle la France dispose d'un atout majeur avec son électricité décarbonée.

Il s'agit donc ici de développer une filière industrielle permettant d'internaliser la chaîne de valeur des e-carburants, de contribuer aux exportations de technologies et de savoir-faire, de déployer en France comme à l'étranger des sites de production et in fine d'augmenter la valeur ajoutée industrielle de la France. Pour cela, et compte tenu des échéances imposées par le *tableau 1*, il est nécessaire d'investir dès maintenant sur le développement et la pleine maîtrise des briques technologiques nécessaires.

Au-delà de ces motivations macro-économiques, il convient de souligner la motivation importante des grands industriels de l'aérien et du maritime (compagnies de transport, fabricants d'avions et de navires, motoristes) pour investir dans l'exploration des technologies nécessaires à la production de carburants durables, a minima pour anticiper et sécuriser leurs choix stratégiques de filières d'approvisionnement et de motorisation.

Maîtriser le déploiement d'une production de carburants durables à grande échelle

Le troisième enjeu est la maîtrise du déploiement à grande échelle de la production de carburants durables.

Cet enjeu pose la question de l'importation de carburants durables à partir d'un marché international qui n'existe qu'à très faible niveau aujourd'hui : pour l'aviation par exemple, 0,3 Mt de kérosène bas carbone sont disponibles dans le monde en 2022, soit de l'ordre de 0,1 % des besoins mondiaux évalués à 400 Mt.

Certains pays investiront dans des pays tiers, en Afrique et en Amérique du Sud, disposant de ressources naturelles en biomasse ou en électricité renouvelable favorables à la production de carburants durables. D'autres pays comme les États-Unis ou en Asie auront des capacités de production à bas coût car ils ne s'imposent pas les règles européennes sur l'exclusion de ressources à potentiel alimentaire, comme le maïs ou les huiles de palmes.

Les productions de carburants durables sur le marché international seront durablement inférieures à la demande et la sécurisation de l'accès à cette offre internationale imposera aux clients de participer très en amont aux investissements nécessaires à ces productions.

La motivation liée à ce troisième enjeu est d'abord la sécurité d'approvisionnement qui implique un investissement français pour développer des sites de production en France et/ou à l'étranger.



Compte tenu de son potentiel de biomasse et d'électricité bas carbone, la France a la possibilité d'assurer le déploiement d'un premier palier industriel dans la prochaine décennie. Ce palier est un socle stratégique, à la fois pour crédibiliser les briques technologiques nécessaires (y compris dans une perspective d'exportation) et pour établir une filière industrielle de production massive sur des sites de production domestiques ou étrangers.

Enfin, l'investissement dans une production domestique est aussi motivé par l'impact socio-économique. Pour une consommation d'énergie primaire de 230 Mtep en 2019, la France importe 120 Mtep de carburants fossiles¹⁵, soit un taux de dépendance fossile de 51,5%. Une partie significative du besoin en carburants durables produite en France permettra tout à la fois une injection importante d'investissements sur le territoire français, une augmentation de quelques pourcents de la valeur ajoutée créée par l'industrie française¹⁶ avec une création d'emplois à valeur ajoutée et non délocalisables, une diminution de quelques pourcents des importations de pétrole avec un impact en proportion sur la facture et le taux de dépendance fossile.

¹⁵ BP statistical review, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>

¹⁶ En 2018, la valeur ajoutée de l'industrie française était de 280 G€ contre 766 G€ pour l'Allemagne.

Annexe II

Questions sous-jacentes à la production des e-carburants en France

La production de carburants durables ne relève pas d'une croissance d'un marché déjà établi. Cette activité présente de ce fait un certain nombre d'incertitudes technologiques et de risques de marché qui posent plusieurs questions importantes.

Quand l'accès aux e-carburants deviendra-t-il incontournable ?

Les alternatives aux e-carburants ne permettent pas de satisfaire les engagements de décarbonation au-delà de 2035-40 :

- pour le maritime, le passage du fuel lourd au GNL est aujourd'hui une option intéressante en permettant une réduction de 25 % les émissions. Le GNL offre donc une bonne solution de transition. Le nombre de navires propulsés en GNL est aujourd'hui faible mais en croissance. Avec une durée de vie de l'ordre de 25 à 30 ans, ces navires pourraient assurer une part significative du transport de fret en 2050, date à laquelle ils devront consommer du bio-GNL¹⁷ et du e-GNL¹⁸. En effet, le règlement « ReFuel maritime » adopté par le Parlement et le Conseil européens le 23/03/2023 impose une réduction de l'intensité carbone de 14,5% en 2035, 31 % en 2040 et 80 % en 2050. La propulsion GNL ne permet pas de suivre la trajectoire de décarbonation au-delà de 2035-40 ;
- l'aviation utilise aujourd'hui des biocarburants issus du recyclage des huiles usées et des graisses animales, à hauteur de 0,1 % de sa consommation totale. Les perspectives de croissance de cette technologie plafonnent à quelques pourcents du besoin, soit 0,3 Mt pour la France⁴. Le relais de croissance devra être pris en Europe par la biomasse lignocellulosique. L'analyse⁴ du cas français montre que la bioénergie disponible en France restera de l'ordre de 60 Mt de biomasse sèche, soit un potentiel énergétique annuel de 27 Mtep. La compétition d'usage pour cette ressource est sévère et nécessitera un arbitrage politique délicat pour donner au marché un cadre éthique, socialement et économiquement acceptable. En considérant que 10 % de cette ressource puisse être transformé (hors ajout d'hydrogène) en carburants durables pour l'aviation, il sera possible de produire 1,3 Mt de biokérosène. Les voies biokérosène ne permettront donc pas d'assurer la trajectoire de décarbonation du transport aérien au-delà de 2035, date à laquelle une part significative et croissante de la consommation devra reposer sur le e-biokérosène⁶ et le e-kérosène qui seront majoritaires en 2040.

Les engagements climatiques, concrétisés par la trajectoire de décarbonation du *tableau 1*, imposent une production de e-carburants (incluant les e-biocarburants) significative dans la prochaine décennie et majoritaire en 2040. Cette chronologie nécessite le déploiement dès maintenant d'une feuille de route pour la production de e-biocarburants et e-carburants.

¹⁷ La CGM-CMA et ENGIE ont signé un partenariat pour la production de 0,2 Mt de bioGNL en 2030 (projet Salamandre au Havre) ; <https://newsroom.engie.com/assets/salamandre-cc-engie-fr-30-06-2022-pdf-6e0b-ff316.html?lang=fr>.

¹⁸ Le projet Jupiter-1000 à Fos-sur-Mer, piloté par GRT-gaz, a fait la démonstration d'une production de méthane de synthèse à partir d'énergie renouvelable et d'une capture de carbone dans les rejets industriels ; <https://www.jupiter1000.eu>

Est-ce que le mix électrique décarboné de la France est un atout ?

La production de molécules énergétiques durables pour la décarbonation des transports, mais aussi pour l'agriculture et l'industrie, est électro-intensive. La synthèse de ces molécules énergétiques exige de plus une électricité très bas carbone, faute de quoi le bilan net carbone associé à ces molécules énergétiques sera pire que le bilan résultant de l'utilisation directe de produits fossiles.

Du point de vue des émissions physiques de CO₂, les pays ayant une électricité très carbonée doivent en priorité décarboner leur mix électrique avant de produire des molécules énergétiques¹⁹.

Grâce à son électricité décarbonée, il est pertinent pour la France d'investir rapidement dans une filière industrielle pour la production massive de carburants durables, là où d'autres pays devraient mettre en priorité la décarbonation de leur mix.

Mais cette réalité physique et factuelle est obérée par le référentiel réglementaire européen actuel qui porte un engagement de moyen sur les énergies renouvelables au lieu de porter un engagement de résultat sur la décarbonation²⁰. Malgré des progrès très récents dans la prise en compte de l'hydrogène bas carbone, et non pas seulement renouvelable, dans les règlements européens, l'ensemble du référentiel européen est en l'état largement dommageable à la France et à la performance européenne de décarbonation.

Dans le futur, le mix français, nucléaire et renouvelable, peut être attractif pour des investisseurs nationaux et internationaux attirés par sa performance carbone effective et sa disponibilité, mais cela suppose de faire prévaloir cette performance dans le contexte réglementaire actuel en Europe. La feuille de route proposée repose sur le constat factuel d'une France disposant d'un atout majeur pour la décarbonation : son mix décarboné. Ceci implique trois engagements fondamentaux : i) retrouver rapidement une disponibilité du parc nucléaire au niveaux atteints dans le passé ; ii) investir activement sur un mix nucléaire et renouvelable robuste et iii) œuvrer pour remettre l'Europe sur la voie d'une politique énergétique pragmatique et efficace.

Production domestique ou importation ?

L'Europe est aujourd'hui largement importatrice sur le plan énergétique¹⁵ avec 883 Mtep de carburants fossiles importés pour une consommation de 1450 Mtep en énergie primaire, soit une dépendance à 61 % en carburants fossiles importés.

La production domestique de carburants durables à partir d'énergie nucléaire et renouvelable permettra de diminuer le taux de dépendance de l'Europe et de la France en carburants fossiles. Mais l'ampleur de cette dépendance (51,5 % pour la France et 61 % pour l'Europe) montre qu'il sera nécessaire dans un monde décarboné d'importer de l'énergie sous la forme de molécules énergétiques durables (hydrogène, hydrocarbures, ammoniac...).

Il convient de bien distinguer deux approches pour l'importation. La première approche consiste à acheter sur un marché ouvert une partie des productions assurées par des investisseurs tiers, privés ou publics. La

¹⁹ Considérons un pays dont le mix électrique a une empreinte carbone de 0,3 kgCO₂/kWh (moyenne européenne). La production de 1 Mt de e-carburant, avec par exemple une énergie éolienne à 0,01 kgCO₂/kWh, mobilisera 22 TWh et permet à ce pays de ne pas brûler 1 Mt de carburant fossile, réduisant ainsi ses émissions d'un peu moins de 4 Mt de CO₂. Mais si ce pays injecte ces mêmes 22 TWh dans son mix électrique pour le décarboner, il diminuera ses émissions de 22*(0,3-0,01) = 6,4 Mt CO₂. Pour la moyenne des pays européens, la réduction de l'empreinte carbone est 1,5 fois plus efficace par l'injection directe des énergies renouvelables sur le réseau que par la production de e-carburant.

²⁰ Académie des technologies ; pour une nouvelle politique européenne de l'énergie ; mai 2023 ; <https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2022/11/Academie-des-technologies-Politique-europeenne-energie.pdf>

deuxième approche, stratégique et cohérente avec les enjeux de sécurité d'approvisionnement, consiste à encourager des investissements privés nationaux dans des partenariats internationaux permettant de garantir des droits de tirage sur des projets déployés dans des zones favorables à la production de carburants durables (c'est-à-dire avec un fort potentiel de biomasse et/ou d'énergie renouvelable). Cette approche stratégique – retenue par l'Allemagne – requiert donc une politique de ciblage des partenariats et des zones géographiques à fort potentiel, et ce nécessairement dans un contexte de compétition géostratégique pour ces zones. Dans cette approche stratégique, le besoin d'investissement pour satisfaire les engagements ne dépend plus, au premier ordre, du ratio entre productions domestiques et importations. Il convient cependant de souligner qu'un investissement domestique offre le bénéfice d'un renforcement du mix national et d'une meilleure sécurité d'approvisionnement énergétique qu'un investissement à l'étranger.

L'approche peut être alors identique pour l'hydrogène et pour les carburants durables. La stratégie européenne vise pour 2030 à la fois une production domestique de 10 Mt d'hydrogène et des importations d'hydrogène à la même hauteur²¹. À ce stade, il paraît raisonnable de penser que la production domestique et les importations de carburants durables pourront à terme avoir des contributions du même ordre.

Le ratio entre production domestique et importations devra être piloté au fil de l'eau au gré de la création et de l'évolution d'un marché international des carburants durables, des concurrences économiques entre pays, et des contextes géopolitiques généraux. Le débat sur le ratio en 2050 entre production domestique et importation est prématuré car il dépendra d'un contexte qui ne peut pas être anticipé.

En revanche, pour que ce ratio puisse être piloté en fonction des intérêts vitaux de la France, il est nécessaire de :

- renforcer significativement le mix électrique décarboné français car il permet non seulement d'assurer le niveau de production domestique mais il offre une grande attractivité pour des investissements étrangers en mal de ressources énergétiques bas carbone. De plus, il n'y a pas de risque de surinvestissement car les pays limitrophes seront durablement importateurs d'électricité décarbonée ;
- maîtriser un premier palier d'industrialisation domestique pour la production de carburants durables. Les investissements associés à ce premier palier, doivent être identifiés et concrétisés ; c'est l'objet de cette « feuille de route 2035 » de pointer les éléments sur le chemin critique de ce premier palier industriel.

²¹ Communication sur le plan REPowerEU de la Commission Bruxelles, mai 2022, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF

Annexe III

Dynamique internationale

Les investissements pour la production de carburants de synthèse et le développement des technologies associées s'accroissent fortement et permettent de gagner en maturation industrielle. Ils permettent aussi aux acteurs qui investissent de prendre des positions clés dans un marché qui démarre sa structuration.

Les acteurs impliqués dans ces investissements sont en général :

- des États au premier rang desquels on retrouve les États-Unis qui mobilisent via la loi sur la réduction de l'inflation (Inflation reduction Act - IRA) des fonds publics importants ; on retrouve aussi l'Allemagne qui a engagé de longue date ses organismes de recherche publique sur ces sujets et qui disposent maintenant d'entreprises en croissance sur le domaine ;
- des entreprises jeunes disposant des technologies clef associées à des groupes industriels historiques à la fois pourvoyeurs de technologies et intégrateurs ;
- des groupes énergéticiens ;
- des grands industriels de la chaîne de valeur du domaine utilisateur de ces carburants ; il s'agira aussi bien des transporteurs que de constructeurs souhaitant anticiper les évolutions permises par ces carburants.

Les exemples récents ci-dessous ne prétendent pas à l'exhaustivité, mais illustrent bien la dynamique en cours :

Carburants de synthèse aux États-Unis

1. Les actions du gouvernement américain

- Le gouvernement américain a engagé un processus interministériel dénommé « SAF grand challenge roadmap²² » pour accélérer les premières étapes (9 Mt par an d'ici 2030) permettant d'assurer la production de 100 Mt par an de SAF d'ici 2050, principalement à base de biocarburant.
- L'IRA fournit à court terme les incitations pour les entreprises de l'industrie aéronautique et de la chaîne d'approvisionnement en carburant afin de prendre des mesures vigoureuses pour s'orienter vers un avenir à faibles émissions de carbone, et d'embaucher des travailleurs américains pour mener à bien cette tâche
 - *Extrait : The Inflation Reduction Act of 2022, signed into law by President Biden on August 16, includes a two-year tax credit for those who blend SAF; a subsequent three-year tax credit for those who produce SAF; and a grant program of \$290 million over four years to carry out projects that produce, transport, blend, or store SAF, or develop, demonstrate, or apply low-emission aviation technologies. To be eligible, the SAF must achieve, in general, at least a 50% improvement in GHG emissions*

²² <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/beto-saf-gc-roadmap-report-sept-2022.pdf>

performance on a life cycle basis as compared with conventional jet fuel. The tax credit—which starts at \$1.25/gallon of neat SAF—increases with every percentage point of improvement in life cycle emissions performance up to \$1.75/gallon.

2. En 2023 Airbus est devenu un partenaire stratégique de la société américaine DG Fuels²³ qui vise la production de 454 kt de SAF à partir de 2026. Airbus participerait ainsi à la construction en Louisiane d'une usine qui produira des e-biocarburants (décision d'investissement début 2024). Ce projet s'inscrit dans la politique SAF du gouvernement américain.
3. En décembre 2022, l'entreprise HIF Global a fait la démonstration au Chili, à partir d'énergie éolienne, d'une production de méthanol de synthèse pour le maritime et de e-diesel pour le routier. Fin 2022, HIF Global a passé des contrats à Bechtel, Siemens Energy, and Topsoe pour ce qui pourrait être la plus grande usine de production de e-kérosène du monde (550 kt de kérosène de synthèse par la voie méthanol). Les autorisations environnementales pour commencer la construction seraient obtenues²⁴.

Carburants de synthèse en Allemagne et en Hollande

4. La start-up allemande Ineratec se fondant sur une expérience de production de carburant de synthèse développée par l'institut de technologie de Karlsruhe (KIT) (quelques litres par jour) a réalisé un pilote de production (200 l/jour) en 2021²⁵. En avril 2023, Ineratec a annoncé le lancement d'un pilote d'une capacité de 2 500 t/an dans le parc industriel Höchst situé près de Francfort, financé par l'État fédéral et le Land de Hesse²⁶.

Safran et ENGIE New Venture ont investi dans Ineratec²⁷. Selon les communiqués des entreprises, ces prises de participation permettront à Safran de travailler sur les différentes technologies de carburants aériens durables dans les moteurs de future génération. L'enjeu pour ENGIE est de favoriser le développement d'une offre de carburants bas carbone pour le secteur du transport lourd en cohérence avec son objectif de production d'hydrogène vert (4 GW en 2030).

5. En septembre 2023 les entreprises DHL Group, HH2E, and Sasol ont annoncé un partenariat pour la production de kérosène de synthèse²⁸; Airbus devrait rejoindre ces sociétés qui visent des réalisations de 200 kt puis 500 kt d'ici 2030. Les aéroports de Leipzig et de Hambourg soutiennent les projets locaux de ce consortium²⁹.
6. La société danoise Arcadia a passé des contrats avec les sociétés allemandes Sasol et Topsoe pour la construction d'une usine devant produire 80 kt de carburant de synthèse par an³⁰. Les deux entreprises

²³ Airbus partners with DG Fuels to foster sustainable aviation fuel production in the United States ; <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-09-airbus-partners-with-dg-fuels-to-foster-sustainable-aviation-fuel>

²⁴ HIF Global engages Bechtel for eFuels project | Bechtel ; HIF Global receives environmental permit authorizing construction and operation at first U.S. eFuels facility

²⁵ Spin-off Ineratec: PtX-Anlage für synthetische Kraftstoffe - Solarserver

²⁶ Groundbreaking for e-fuel production plant in Frankfurt.

²⁷ <https://www.safran-group.com/fr/espace-presse/safran-engie-new-ventures-investissent-ineratec-startup-allemande-specialisee-production-carburants-2022-01-19>, janvier 2022

²⁸ hh2e - DHL Group, HH2E, and Sasol Collaborate to Propel Germany as a Leader in Decarbonized Aviation

²⁹ Leipzig Airport wants to become a pioneer in the SAF sector et Microsoft Word - Document1 (sasol.com) et green-fuels-hamburg-for-carbon-neutral-aviation

³⁰ <https://arcadiaefuels.com/first-commercial-efuels-for-aviation-plant-in-denmark-on-schedule-for-2026-arcadia-selects-topsoe-and-sasol-technology/>, mai 2023

valorisent ainsi pour la première fois leur licence du procédé G2L™ permettant la production de carburant de synthèse par le procédé RWGS (à deux étages) et Fisher-Tropsch basse température³¹.

7. Sasol et Topsoe ont annoncé en février 2023 mettre en commun leurs efforts de développement des carburants durables pour l'aviation³². Topsoe, société familiale danoise, est un spécialiste mondial de la catalyse.

Captage du CO₂ en Amérique du Nord

Le captage du carbone dans l'air est une technologie critique pour la production de carburants synthétiques. Elle est aussi le socle d'une stratégie complémentaire reposant sur le stockage du CO₂ capturé.

8. Le groupe pétrolier américain Occidental Petroleum (Oxy) s'est engagé dans un développement très ambitieux d'unités de captage du CO₂. Il se fonde sur la technologie du canadien Carbon Engineering qu'il a d'ailleurs acquis mi-2023 pour plus d'un milliard de dollars³³. Des préventes de crédits carbone ont été faites à différents partenaires externes dont Airbus qui a acquis 400 kt de crédits en mars 2022 et les a revendus à easyJet en octobre. Ces contrats reposent sur une usine de capture du CO₂ en construction au Texas (USA) par Oxy (cf. § 3 – 'La production du syngaz'). Le site en construction est dimensionné pour la capture de 1 Mt de CO₂ par an et devrait être opérationnel mi-2025³⁴. Fin 2022, l'ambition de réaliser de nombreux autres projets permettant le captage et la séquestration de 30 Mt de CO₂ par an en 2035 a été exprimée³⁵.

Le coût de la capture du CO₂ est aujourd'hui supérieur à 250 \$/tCO₂ avec une perspective annoncée à dix ans de 150 \$/tCO₂. Avec un crédit de taxe de 180 \$/tCO₂ capturée et séquestrée, l'« *Inflation reduction act* » permet une économie viable de ces projets dès aujourd'hui.

³¹ <https://www.topsoe.com/our-resources/knowledge/our-products/process-licensing/g2ltm-efuels-technology>

³² [Sasol and Topsoe to accelerate growth in sustainable aviation fuel \(SAF\)](#)

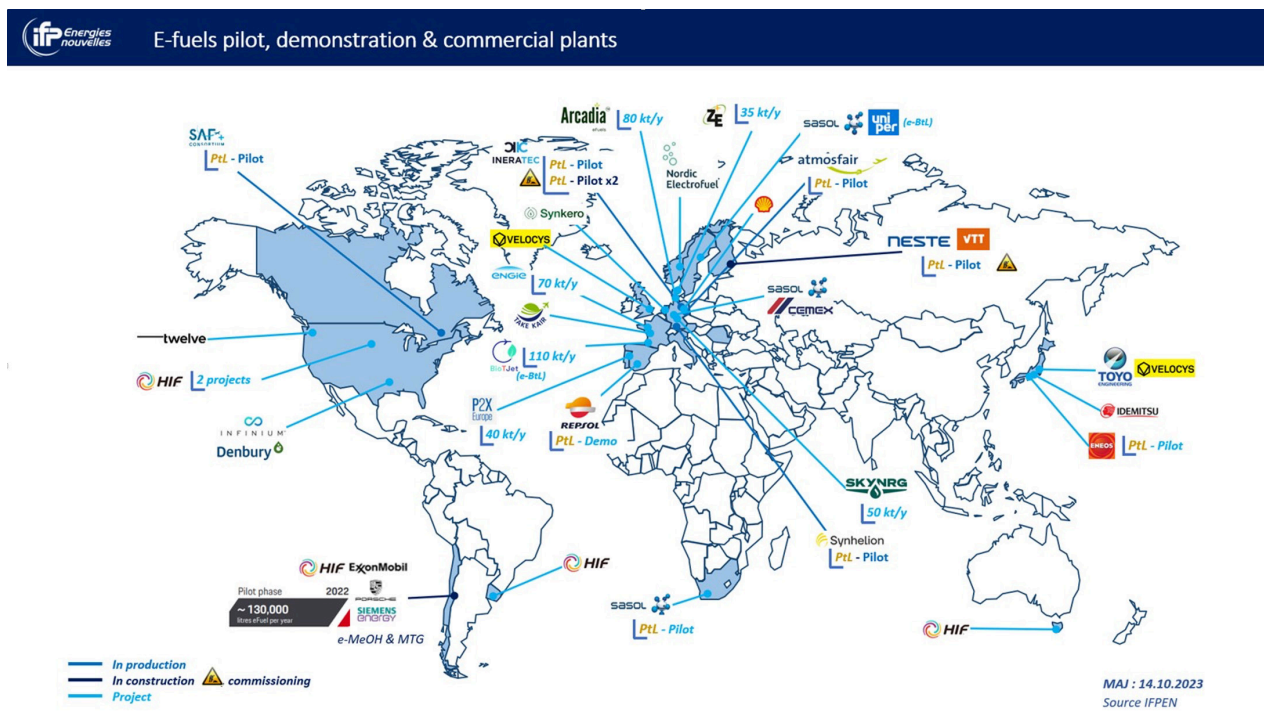
³³ [Occidental to Acquire DAC Firm Carbon Engineering for \\$1.1B](#)

³⁴ [ANA Announces Carbon Dioxide Removal Purchase from 1PointFive easyJet signs up to Airbus' pioneering carbon removal solution](#)

³⁵ <https://www.squamishchief.com/local-news/carbon-engineering-plans-to-build-second-site-in-texas-6062726>, nov 2022

Carte du monde des projets e-carburants

La carte ci-dessous, produite par l'IFP Énergies nouvelles, recense les projets de production de e-carburants, connus à l'échelle mondiale sur la base d'information publique.



Carte mondiale des projets de bio et e-carburants, reproduite avec l'aimable autorisation de l'IFP Énergies nouvelles

