ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

AVIS

APPROUVÉ PAR L'ASSEMBLÉE
13 SEPTEMBRE 2023

FEUILLE DE ROUTE VERS LA PRODUCTION DE E-CARBURANTS

1) Introduction 1
2) Les voies technologiques considérées 2
3) Enjeux et Motivations pour une production massive de e-carburants 3
4) Les questions sous-jacentes aux stratégies de production des e-carburants 5
5) Proposition d'une « feuille de route 2035 » pour le développement de e-carburants 8
6) Récapitulatif de la Feuille de route 14

1) Introduction

La production de carburants durables est sur le chemin critique 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. Le Parlement et le Conseil européens ont récemment entériné la trajectoire de décarbonation du transport maritime[1] et aérien[2] :

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.

[1] Sustainable maritime fuels, 'Fit for 55' package: The FuelEU Maritime proposal, https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/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

La production massive de molécules énergétiques durables[3] 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. 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 maturation de certaines briques technologiques et *iii)* un déploiement industriel à grande échelle.

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 à 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 *§2* présente les voies technologiques envisageables. Les *§3* et *§4* explicitent les motivations et analysent les alternatives qui toutes nécessitent de lourds investissements pour synthétiser en grandes quantités des molécules énergétiques. Le *§5* propose une feuille de route technologique en cohérence avec les *§3* et *§4*.

Le rapport de l'Académie des technologies sur la décarbonation du secteur aérien[4] 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.

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 CO_2 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 CO_2.

Un intérêt majeur des hydrocarbures durables, notamment pour l'aérien et le maritime, est d'être utilisable sans modification des infrastructures, permettant ainsi une transition gérable à l'échelle mondiale grâce à leur capacité de mélange avec les carburants fossiles.

[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

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 CO_2 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'hydrogène[5]. 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) Enjeux et Motivations pour une production massive de e-carburants

Trois enjeux structurent la montée en échelle de cette production.

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 »[1] et « ReFuelEU »[2].

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).

[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.

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 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.

La maîtrise des briques technologiques

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 chaine 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 du *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. À court terme, il s'agit pour eux de contribuer à l'exploration technologique 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 maitrise 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 productions en France et 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 fossiles[6], 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 française[7], 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.

4) Les questions sous-jacentes aux stratégies de production des e-carburants

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 les questions suivantes.

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-GNL[8] et du e-GNL[9]. 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.

---

[6] 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

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

[8] 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

[9] 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

- 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 France[4]. Le relais de croissance devra être pris en Europe par la biomasse lignocellulosique. L'analyse[4] du cas français montre que la bioénergie disponible en France restera de l'ordre de 60 Mt de biomasse sèche, soit un potentiel énergétique 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 seule 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-biokérosène[10] 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.

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 électrointensive. 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 CO_2, les pays ayant une électricité très carbonée doivent en priorité décarboner leur mix électrique avant de produire des molécules énergétiques[11].

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 décarbonation[12]. Malgré des progrès récents dans la prise en compte du nucléaire 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 sur 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

---

[10] La décision le 16 juin 2023 de réalisation du projet BioTJet sur le bassin de Lacq, un 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 %20 implantation %20biotjet %20- %20 %2016 %20Juin %202023.pdf

[11] Considérons un pays dont le mix électrique a une empreinte carbone de 0,3 kgCO_2/kWh (moyenne européenne). La production de 1 Mt de e-carburant, avec par exemple une énergie éolienne à 0,01 kgCO_2/kWh, mobilisera 22 TWh et permet à ce pays de ne pas bruler 1 Mt de carburant fossile, réduisant ainsi ses émissions d'un peu moins de 4 Mt de CO_2. 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 CO_2. 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.

[12] 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

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 énergétique[6] 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 décarbonée 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 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 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 de la France ne dépend plus, au premier ordre, du ratio entre productions domestiques et importations (même s'il convient de noter qu'un investissement domestique conduit à renforcer le mix national, ce qui n'est pas le cas pour 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 hauteur[13]. À ce stade, il parait raisonnable de penser que la production domestique et les importations de carburants durables pourront à termes 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.

[13] 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

- Maitriser 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.

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

Cible et périmètre de la feuille de route proposée

Le paragraphe 3 évalue la demande française en carburants durables à 2,1 Mt_{2035} et 9,3 Mt_{2050}. 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, et pour sécuriser la croissance post-2035 dont les conditions ne sont pas examinées ici.

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 BioTJet[10], peut assurer la transition jusqu'à ce que la production de carburant de synthèse soit effective.

La feuille de route technologique 2035

La France dispose déjà d'un portefeuille de technologies démontrées pour le captage de CO_2 sur émetteur concentrée, pour la réduction du CO_2 et pour la synthèse de carburants de deuxième génération. On distinguera trois niveaux afin de hiérarchiser les technologies nécessaires à la production de e-carburants :

- **Les « technologies classiques »** bénéficient à la fois d'une grande maturité, d'industriels bien établis sur le domaine et d'une chaine de fabricants disposant d'un fort retour d'expérience.

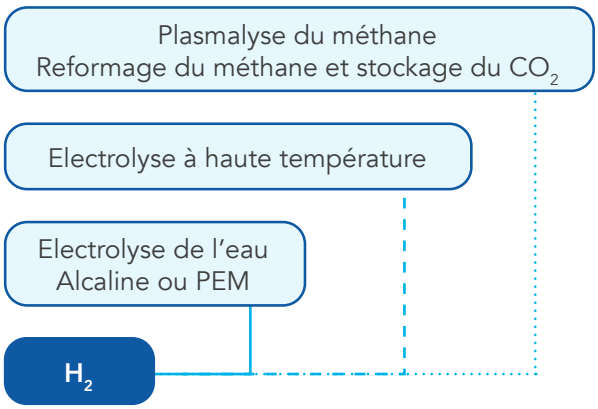
- **Les « technologies clef »** désignent des technologies bénéficiant d'un savoir-faire établi mais ne disposant pas d'une expérience industrielle. Sans être porteuses en soit d'incertitudes importantes, les technologies clef présentent des risques significatifs pour la montée en échelle industrielle et/ou pour leur intégration dans le processus complet de production. Pour réduire ces risques, le développement de démonstrations 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 procédé

La très grande majorité 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 CO_2. Ce procédé peut être envisagé dans le futur à condition de lui associer une capture et un stockage du CO_2. Le développement de capacités de stockage CO_2 à grande échelle[14] sera ici le facteur dimensionnant et renvoie cette solution au moyen long terme.



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 parait 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 gCO_2/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 cout 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 pour 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 mobilisant quatre tonnes de méthane par tonne d'hydrogène produit ; de plus 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 continument au gré de leur maturation technique et économique :

[14] Dossier de consultation 2023 pour la Stratégie CCUS, capture, stockage et utilisation du carbone

- **Mesure 1a :** Cette mesure rejoint le plan d'accélération du déploiement de l'hydrogène[15]. Il s'agit de produire 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.

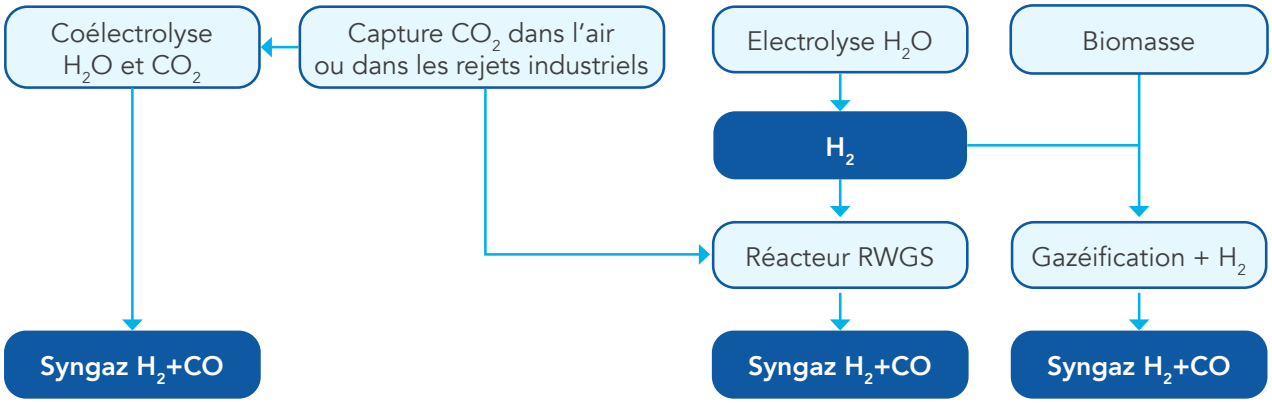
- **Mesure 1b :** Cette mesure consiste à soutenir l'industrialisation de l'électrolyse à haute température qui permet de réduire la facture électrique de 20 % et d'améliorer le rendement de production des e-carburants de 10 %.

- **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.

La production du syngaz

Le syngaz est le mélange H_2+CO 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 maitrisée. Mais par principe elle ne fait que diviser les émissions par deux en attribuant la moitié du gain à l'industriel émetteur et l'autre moitié au 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 maitrise 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

[15] 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

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 proposée par quelques industriels[16]. Une première usine de grande taille, 0,5 $MtCO_2$/an est en construction au Texas depuis 2022, avec des compresseurs Siemens, pour un investissement de 1 G€. Cette technologie critique est jeune et son potentiel d'innovation reste important. Il est donc nécessaire de mener une stratégie de développement permettant de sélectionner la ou les bonnes technologies et porter à niveau leurs performances industrielles.

La captation du CO_2, technologie au cœur des trajectoires de décarbonation dès 2035, doit faire rapidement l'objet d'investissements de développement :

- **Mesure 2 :** l'IFPEN dispose des compétences et des savoir-faire pour sécuriser la maitrise 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 dérisquer à court terme une technologie pour un premier déploiement industriel 2035, tout en acquérant la maitrise 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 CO_2 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 CO_2 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 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 H_2 et CO. A 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 maitrisée, mais elle n'est pas industriellement développée. La voie coélectrolyse existe[17] 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 clef 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.

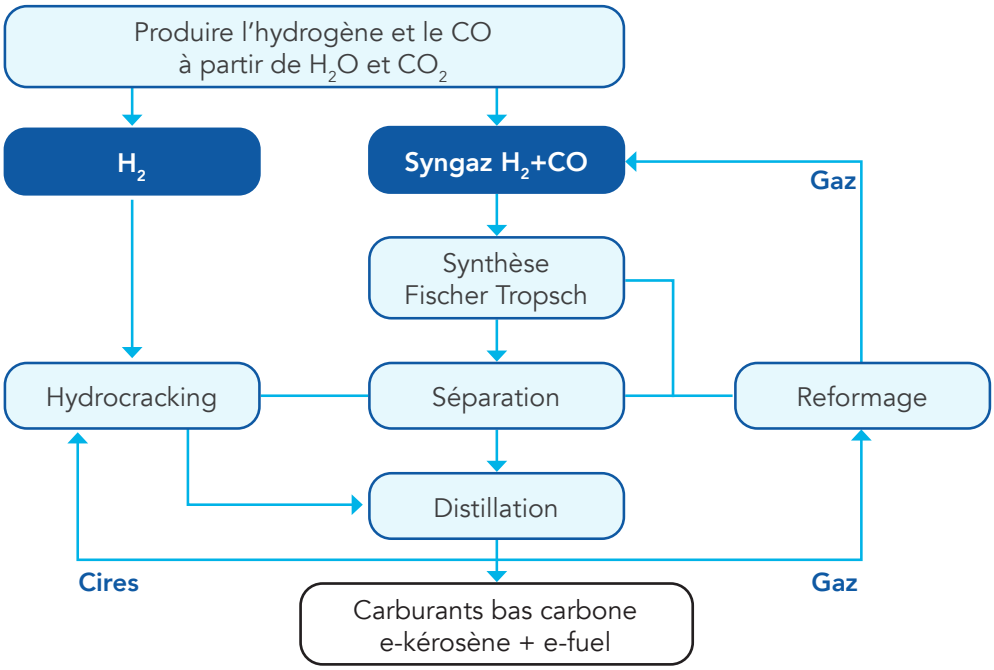
- **Mesure 3b** : La voie coélectrolyse est prometteuse et mobilise les technologies d'électrolyse à haute température EHT. Cette voie bénéficiera des efforts d'industrialisation portés par Genvia sur l'EHT. Les mesures *3b* et *1b* doivent donc être gérée de concert et peuvent conduire à une montée 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.

[16] Entreprise canadienne Carbon Engineering et suisse Climeworks qui exploite en Islande une usine de petite capacité.

[17] 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-dessous 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 maitrisées. La partie centrale, ici un réacteur thermochimique dit de « synthèse Fischer-Tropsch », est une technologie clef. 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/an de carburant durables (BioTJet[10]). Le niveau de risque associé à cette technologie clef est jugé faible.

D'autres types de réacteurs de synthèse peuvent être envisagés. On peut citer notamment la technologie alternative Futurol[18] pour produire de l'éthanol avancé à partir d'une biomasse lignocellulosique 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 BioTJet[10]. 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 soit 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 aller jusqu'à 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 émet 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 CO_2.

[18] https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/biocarburants-2e-generation-premiere-industrielle-technologie-francaise-futuroltm

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 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 pallier 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, CO_2, 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 CO_2 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 technologique[4] (pour une production de 0,1 Mt/an de e-carburant : capex 0,5 G€, 0,3 $MtCO_2$ 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 parait 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 Mt_{2035} et 9 Mt_{2050} de biomasse sèche. 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 (10 % en 2035) de la biomasse éligible à la production d'énergie et une production d'électricité d'une vingtaine de TWh.

6) Récapitulatif de la Feuille de route

Technologies nécessaires pour la production de e-carburants		
Technologies classiques	Technologies clef	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[15]. Il s'agit de produire 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'IFPEN dispose des compétences et des savoir-faire pour sécuriser la maitrise 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 dérisquer à court terme une technologie pour un premier déploiement industriel 2035, tout en acquérant la maitrise 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 CO_2 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 clef 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 gérée 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 pallier 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, CO_2, 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 CO_2 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 technologique[4] (pour une production de 0,1 Mt/an de e-carburant : capex 0,5 G€, 0,3 MtCO_2 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 (10 % en 2035) de la biomasse éligible à la production d'énergie et une production d'électricité d'une vingtaine de TWh.