

DU CAPTAGE DE CARBONE AUX CARBURANTS DURABLES

Série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes »

À propos de la série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes » : issus du séminaire 2024 de l'Académie des technologies, les avis de cette collection proposent une liste (non exhaustive) des technologies et écosystèmes industriels à développer dès maintenant, pour assurer à la France (et l'Europe) la réindustrialisation, la souveraineté et la décarbonation de son économie à l'horizon 2035-2050.

En bref

L'atteinte de zéro émissions nettes en 2050, conformément aux objectifs de l'Accord de Paris visant à limiter le réchauffement climatique en deçà de 2 degrés, requiert le développement d'émissions négatives via en particulier le captage du CO₂ directement dans l'air ou encore via le captage du CO₂ issu des bioénergies. Ce CO₂ peut être stocké, mais peut également être utilisé pour décarboner certains secteurs pour lesquels les alternatives manquent. Notamment, la décarbonation de l'aviation et du maritime nécessitera la production de carburants durables combinant du CO₂ capté dans l'air et de l'hydrogène. Avec son électricité bas-carbone et son écosystème industriel et de recherche, la France est bien positionnée pour développer les nouvelles filières industrielles liées aux carburants durables. L'État doit pour cela soutenir la maturation à la fois des briques technologiques (notamment en matière d'hydrogène et de captage du carbone atmosphérique) et de leur intégration sous forme de projets pilotes.



1. Face aux grands enjeux du XXI^e siècle

Selon l'Agence internationale de l'énergie, l'atteinte de « zéro émission nette » en 2050 nécessite, à l'échelle mondiale, une capacité de captage annuel de 7.6 Gt¹ de CO₂².

Le rapport "Net Zero by 2050" de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) vise l'atteinte de la neutralité carbone d'ici 2050. Il souligne l'importance d'une transformation rapide et ambitieuse du secteur énergétique mondial, impliquant une réduction drastique de l'utilisation des combustibles fossiles et le développement continu des énergies renouvelables. Le rapport insiste sur la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique et de développer des technologies de capture et de stockage du carbone pour compenser les émissions.

Pour la France, dans la nouvelle stratégie « Carbon capture, usage and storage » (CCUS) publiée en juillet 2024, les pouvoirs publics³ estiment que la décarbonation profonde de l'industrie et l'atteinte de la neutralité climatique devraient nécessiter, à l'horizon 2040-2050, le captage de 30 à 50 MtCO₂/an dont environ 10 Mt/an capté directement dans l'air et 20 à 30 Mt/an dans des processus de transformation de la biomasse (captage du CO₂ biogénique). Le captage du carbone y compris directement dans l'air est clef pour l'atteinte de l'objectif climatique.

Le « **Carbon capture, usage and storage** » (CCUS) est un processus qui vise à capter le CO₂ par différentes méthodes : directement lors de son émission par des procédés industriels (fabrication de ciment, combustion, ...), soit directement dans l'atmosphère (moyennant un procédé plus sophistiqué car la concentration en CO₂ est bien plus faible). Après son captage et un éventuel transport, le CO₂ peut être utilisé soit pour être confiné en [stockage géologique](#) permanent (on parle alors de CCS), soit pour décarboner certains usages liés à l'industrie ou au transport (on parle alors de CCU). Il peut dans ce second cas (CCU) être transformé en matériaux (plastiques, béton, chimie, ...) ou en carburants durables pour l'aviation et le maritime.

Cet avis se concentre sur la feuille de route pour le captage du CO₂ et sa transformation en carburants durables, c'est-à-dire un carburant dont la production a absorbé autant de CO₂ que sa combustion en produira.

Des efforts d'investissement seront nécessaires pour que la stratégie CCUS s'accompagne de l'émergence de nouvelles filières industrielles performantes compétitives et assurant la souveraineté du pays.

À côté de l'électrification directe du transport routier, la disponibilité de carburants durables est indispensable pour l'aviation et le maritime⁴. Cette filière nécessite la mobilisation de carbone durable. Ce carbone peut venir de la biomasse pour la production de biocarburants ou de e-biocarburants⁵, mais cette solution ne pourra qu'être limitée compte tenu de la disponibilité de la ressource en biomasse⁶. Il peut également venir du CO₂ capté dans un premier temps en sortie d'usine puis ultérieurement dans l'atmosphère, d'où l'importance de la filière CCUS mentionnée plus haut. Le développement d'une filière

¹ Gigatonne, soit 1 milliard de tonnes.

² Voir le rapport AIE, « Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector », 2021, [disponible en ligne](#).

³ Direction générale des Entreprises et Direction générale de l'Énergie et du Climat, « État des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France », juillet 2024, [disponible en ligne](#).

⁴ Les alternatives comme l'hydrogène et les batteries électriques ne sont pas envisageables à grande échelle pour l'aviation et le maritime.

⁵ Les e-biocarburants sont produits à partir de la biomasse avec un ajout d'hydrogène permettant d'accroître le rendement carbone du procédé. Lorsque la limite de disponibilité de la biomasse pour l'aviation et le maritime sera atteinte (probablement au milieu de la prochaine décennie), les carburants de synthèse prendront le relais de croissance et seront produits à partir de l'hydrogène bas carbone et du CO₂ capté dans l'air ou biogénique.

⁶ Un rapport de l'Académie des Technologies est en cours de publication sur le sujet.



de carburants durables permettra de limiter les importations de carburants fossiles (aujourd'hui quasi 100%) avec un impact sur la balance commerciale important.

Les carburants durables seront nécessairement liquides pour l'aviation (kérosène). Le maritime peut accéder à un spectre plus large de carburants, dont le biométhane. Ce biométhane peut être issu de la méthanisation de certaines productions agricoles et de déchets, de la méthanation de syngas issu de la biomasse ou de la méthanation d'un mélange de CO₂ capté et d'hydrogène.

Dans un contexte mondial d'offre largement inférieure à la demande, la production domestique comme les stratégies d'importation nécessiteront pour la France des investissements énergétiques et technologiques importants. Trois défis se présentent :

- L'accès à la ressource « carbone », par la biomasse et surtout par le captage de CO₂ ;
- L'accès à de l'électricité bas carbone (essentiellement pour la production de l'hydrogène entrant dans la composition des carburants de synthèse (ou e-carburants) et des e-biocarburants) ;
- La maîtrise technologique et industrielle pour l'intégration des différentes briques de la chaîne de valeurs. En particulier, les technologies de production de carburant de synthèse existent mais doivent encore bénéficier d'une maturation industrielle.

Cet avis n'aborde pas en détail les autres usages possibles du CO₂ (chimie et matériaux notamment) ni son stockage géologique ; des avis dédiés seront produits par ailleurs.

2. Le positionnement mondial de la France et de l'Europe

La France a des cartes à jouer avec :

- Son électricité bas carbone ;
- Un socle industriel français robuste et apte à maîtriser de nouvelles filières compétitives pour capter le CO₂ et pour produire des e-carburants. Cet écosystème français est doté de grands acteurs (EDF, ENGIE, TotalEnergies, Air-Liquide, IFPEN, CEA, CNRS ...).

La France dispose des technologies pour le captage du CO₂ dans les fumées d'usines mais est peu présente dans le développement des technologies de capture directe du CO₂ dans l'atmosphère. Les technologies de captage direct du CO₂ dans l'atmosphère sont mises en œuvre dans des premières installations pilotes dans le monde⁷ et font l'objet d'une montée en échelle importante aux USA. La R&D, les développements technologiques et les démonstrations industrielles devront être amplifiés sur ces sujets.

Côté hydrogène (l'un des deux ingrédients essentiels avec le carbone pour la production de carburants durables), les Etats-Unis attirent actuellement les investissements mondiaux, y compris d'entreprises européennes, avec une subvention publique importante. Par ailleurs, la Chine prend actuellement une position dominante sur les électrolyseurs alcalins⁸, comme elle l'a fait dans les secteurs photovoltaïques et batteries. La f

Les filières industrielles devront se développer dans une forte compétition internationale, à la fois sur le plan technologique et pour l'accès aux zones géographiques présentant des conditions favorables pour les ressources en biomasse et en électricité renouvelable. Il est donc stratégique que la France et l'Europe soutiennent activement le développement de filières industrielles, de captage du CO₂ et de production de carburants durables, compétitives à l'échelle internationale.

⁷ On peut notamment citer l'installation Mammoth, d'une capacité de 36000 tCO₂/an, mise en œuvre par la société Climeworks en Islande (<https://climeworks.com/plant-mammoth>).

⁸ Il s'agit de la technologie d'électrolyseurs actuellement la plus répandue, car la moins coûteuse.

3. Les technologies clefs à l'horizon 2035-2050

On peut identifier trois briques technologiques essentielles :

Hydrogène : Les enjeux à court terme portent sur la sécurisation des performances (rendement, durée de vie et flexibilité de fonctionnement des électrolyseurs) et le développement d'unités de production dont la puissance cumulée serait de l'ordre du GW⁹. Il s'agit en parallèle de maîtriser continuellement un portefeuille technologique à l'état de l'art concernant les électrolyseurs, l'hydrogène naturel ou encore la plasmalyse.

Captage du CO₂ : la trajectoire de décarbonation de l'aviation et du maritime reposera d'abord sur la transformation de la biomasse en biocarburants. La biomasse étant une ressource limitée¹⁰, la production de carburants de synthèse avec captage du CO₂ dans l'air sera nécessaire à l'horizon 2035. Le captage de CO₂ dans les fumées industrielles est une technologie maîtrisée. Elle répond au besoin du CCS. Pour ce qui concerne le CCU, elle répartit la réduction des émissions entre l'industriel émetteur et l'utilisateur ; au bilan, la réduction effective ne peut concerner que la moitié des émissions cumulées de l'industriel émetteur et de l'utilisateur, ce qui est incompatible à terme avec l'atteinte de zéro émissions nettes. Pour le CCU, cette approche est de nature transitoire car le CO₂ fossile ne sera plus utilisable en Europe pour la production de e-carburants à l'horizon 2041¹¹. La capture de CO₂ dans les fumées industrielles offre néanmoins une solution pour des premiers projets CCU qui permettent de lancer le marché.

Il convient en outre d'encourager le captage et l'utilisation du CO₂ d'origine biogénique, c'est à dire obtenu à partir de la biomasse. Ce potentiel est néanmoins limité.

À terme, il est donc nécessaire de maîtriser la capture directe du CO₂ dans l'air. La réalisation d'ici 2035 d'un démonstrateur à une échelle représentative, est requise pour permettre ultérieurement la montée en échelle de la production d'e-carburants.

Intégration industrielle : l'optimisation du système et l'intégration des différentes briques technologiques est en soit un enjeu critique de la production de carburant durable. Il apparaît nécessaire de favoriser et soutenir l'émergence de projets intégrant, à l'échelle, les différentes fonctions nécessaires à la production de e-biocarburants et de e-carburants. L'objectif stratégique est le déploiement d'un premier palier industriel en 2035. Ceci implique un soutien aux efforts technologiques d'intégration système, notamment pour maximiser le rendement énergétique et la flexibilité des installations.

A titre d'illustration, le tableau ci-dessous synthétise les technologies à mobiliser pour les carburants de synthèse à partir de la voie Fischer-Tropsch :

Technologies nécessaires pour la production de carburants durables		
Technologies classiques	Technologies clef	Technologies en développement
Pétrochimie (hydrocracking, séparation, distillation, reformage)	Synthèse Fischer-Tropsch	Captage du CO ₂ dans l'air
Production d'hydrogène par les technologies alcaline ou PEM avec un enjeu de production GW	Réaction du gaz à l'eau inverse RWGS Captage du CO ₂ dans les fumées industrielles, et biogéniques	Électrolyse à haute température Électrolyse à membrane échangeuse d'anions
	Gazéification de la biomasse	Coélectrolyse de l'eau et du CO ₂
	Intégration d'H ₂ bas carbone au syngaz issu de la gazéification de la biomasse	Intégration du système

⁹ Gigawatt. Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur, le réacteur de Flamanville 3 à eau pressurisé à une puissance d'environ 1 600 MW, soit 1,6 GW.

¹⁰ Voir rapport de l'Académie des Technologies en cours de publication.

¹¹ [Règlement délégué 2023/1885](#) « précisant la méthode d'évaluation des réductions des émissions de gaz à effet de serre réalisées grâce aux carburants liquides et gazeux renouvelables destinés aux transports, d'origine non biologique, et aux carburants à base de carbone recyclé ». Il conviendrait de faire évoluer cette réglementation pour qu'elle ne s'applique qu'aux nouvelles installations, et pas à celles mises en service avant 2041.

4. Les recommandations de l'Académie des technologies

En complément des efforts de sobriété dans la société, la satisfaction des objectifs adoptés en Europe passe par l'action et le soutien de l'État dans les domaines suivants :

- Projets de biocarburants de deuxième génération¹² pour initier la trajectoire de production de carburants durables en France. Par ailleurs, compte tenu des synergies industrielles, ces projets faciliteront l'émergence des carburants de synthèse qui prendront le relais de croissance des biocarburants de deuxième génération.
- R&D pour la capture directe du CO₂ dans l'atmosphère et réalisations de pilotes d'ici 2035 ;
- Investissement pour la maturation et l'intégration des technologies clef liées à la production de carburants durables. Compte tenu des besoins importants en électricité, il est en effet essentiel pour la production de carburants de synthèse de s'approcher du rendement énergétique maximum de l'ordre de 50 %.
- Déploiement de premières réalisations industrielles pour la production de e-biocarburants complétée dès 2035 par une production de carburants de synthèse ; ces premières réalisations portent sur des installations significatives sur le plan industriel, avec une production par installation d'au moins 100 kt de carburant durable par an.
- Obtention d'un cadre réglementaire européen stable et assurant la compétitivité à l'international (neutralité technologique pour la décarbonation, ...).

Plus généralement, il s'agit pour l'État de créer les conditions d'une maîtrise industrielle nationale et européenne, avec un bénéfice en termes de sécurité d'approvisionnement, de réindustrialisation, d'impact socioéconomique pour les territoires, de balance commerciale et de capacités de déploiement à l'international.

À l'horizon 2035 et au-delà, le différentiel de coût entre le carburant durable et le carburant fossile dépendra de l'évolution de la valeur de référence pour les carburants fossiles (prix et taxe carbone), du prix de l'électricité et de la maturation technologique pour les carburants durables. C'est bien l'investissement public et privé qui permettra la maturation technologique pour une production de carburant durable compétitive.

Pour aller plus loin :

On pourra également se reporter vers d'autres productions de l'Académie des technologies :

- Un rapport sur [la décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables](#) (février 2023) ;
- Un avis pour une [feuille de route vers la production de e-carburants](#) (septembre 2023).

Auteurs principaux (liens d'intérêts en relation avec le thème le cas échéant) : Daniel Iracane ; Hélène Olivier-Bourbigou. Les auteurs remercient Pascal Fournier, Paul Parnière et Daniel Favrat pour leurs relectures attentives. La déontologie académique exige que tout contributeur à l'élaboration d'un rapport n'apporte au collectif que sa seule expertise, en se gardant de promouvoir tout intérêt personnel, institutionnel ou corporatiste. L'indépendance de nos positions est assurée par le caractère collectif de nos travaux. Ce document a été validé par l'Académie des Technologies selon la procédure disponible sur le site de l'Académie.

¹² Ces biocarburants utilisent la partie lignocellulosique de la biomasse (type biomasse forestière, ou certains résidus de culture), ce qui évite la concurrence avec la biomasse alimentaire utilisée dans les carburants dits de première génération. Les carburants de deuxième génération entrent néanmoins en concurrence avec d'autres usages.