

Colloque Les grands enjeux de l'énergie – 20 et 21 juin 2025

CO₂ : Captage & conversion en carburants de synthèse

Florence Delprat-Jannaud et Daniel Iracane

CO₂ : Captage & conversion en carburants de synthèse

- ▶ **Captage du CO₂ : où en est-on & quels enjeux pour son déploiement à grande échelle ?**

Florence Delprat-Jannaud (Académie des technologies)

- ▶ **Carburants de synthèse : décarboner la mobilité lourde et optimiser la gestion du mix électrique**

Daniel Iracane (Académie des technologies)

1

Captage du CO₂

*Où en est-on ? Quels enjeux pour son
déploiement à grande échelle ?*

Florence DELPRAT-JANNAUD

*Membre de l'Académie des technologies
Directrice scientifique d'IFP Énergies nouvelles
(IFPEN)*

Kateryna VORONETSKA

Responsable de programme CCS/CCU (IFPEN)

SOMMAIRE

► Les filières CCS & CCU

Enjeux
Législation
État des lieux du déploiement

► Le captage du CO₂

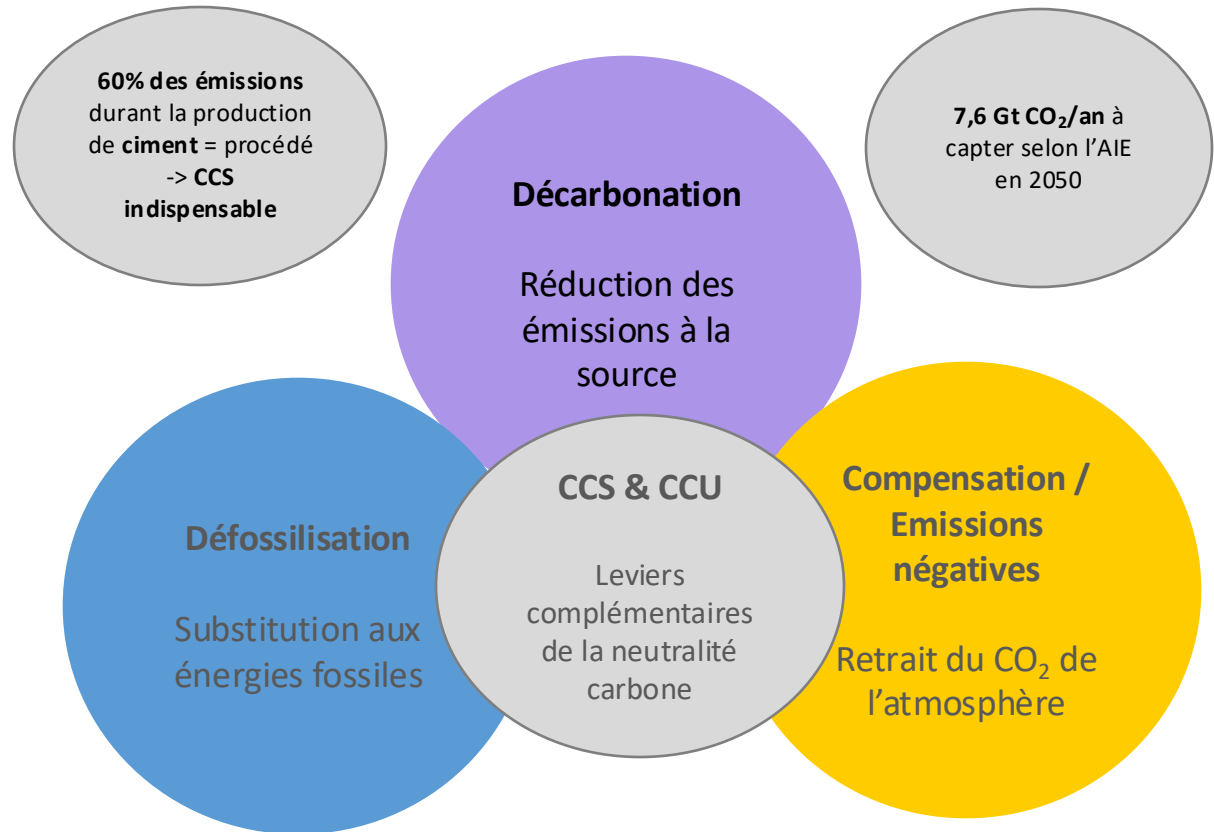
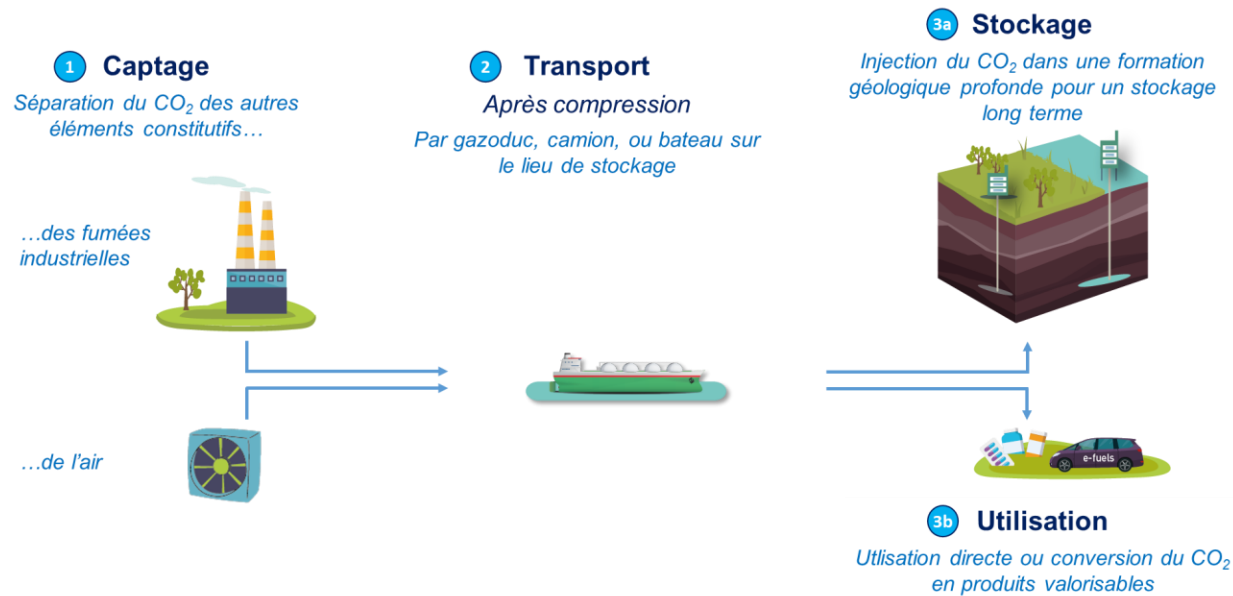
Technologies / Procédés
Enjeux pour la montée en échelle

► Le DAC

Enjeux
Etat des lieux
E-carburants

CCS & CCU

Deux filières clés au service de la décarbonation



CCS & CCU

Un cadre législatif et réglementaire qui se met en place



The **Green Deal** (2019) : vise la neutralité carbone de l'UE en 2050.



L'**EU ETS**: outil central de l'UE pour réduire les émissions de GES. Pas besoin de quotas si CO₂ est capturé et stocké sur le long terme.

Le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (**CBAM**). Devrait entrer en vigueur en 2026.



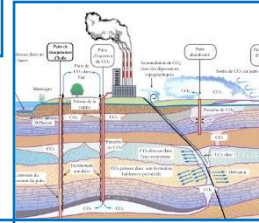
La **Loi européenne sur le climat** (2021): objectif de neutralité climatique 2050 juridiquement contraignant



ReFuelEU aviation : permettre au secteur de l'aviation de réduire son empreinte carbone et de créer des conditions de concurrence équitables pour un transport aérien durable dans l'Union européenne.



Le Paquet "**Fit for 55**" (2021): vise 55 % de réduction des émissions de GES d'ici 2030



La Directive sur le stockage géologique du CO₂ (**Directive CCS**) fournit un cadre réglementaire pour le CCS.

La Directive sur les **Energies Renouvelables** encourage le déploiement de combustibles **CCU-based** pour remplacer les combustibles fossiles



FuelEU Maritime : encourager l'utilisation de carburants renouvelables à faibles émissions de carbone et de technologies énergétiques propres pour les navires.

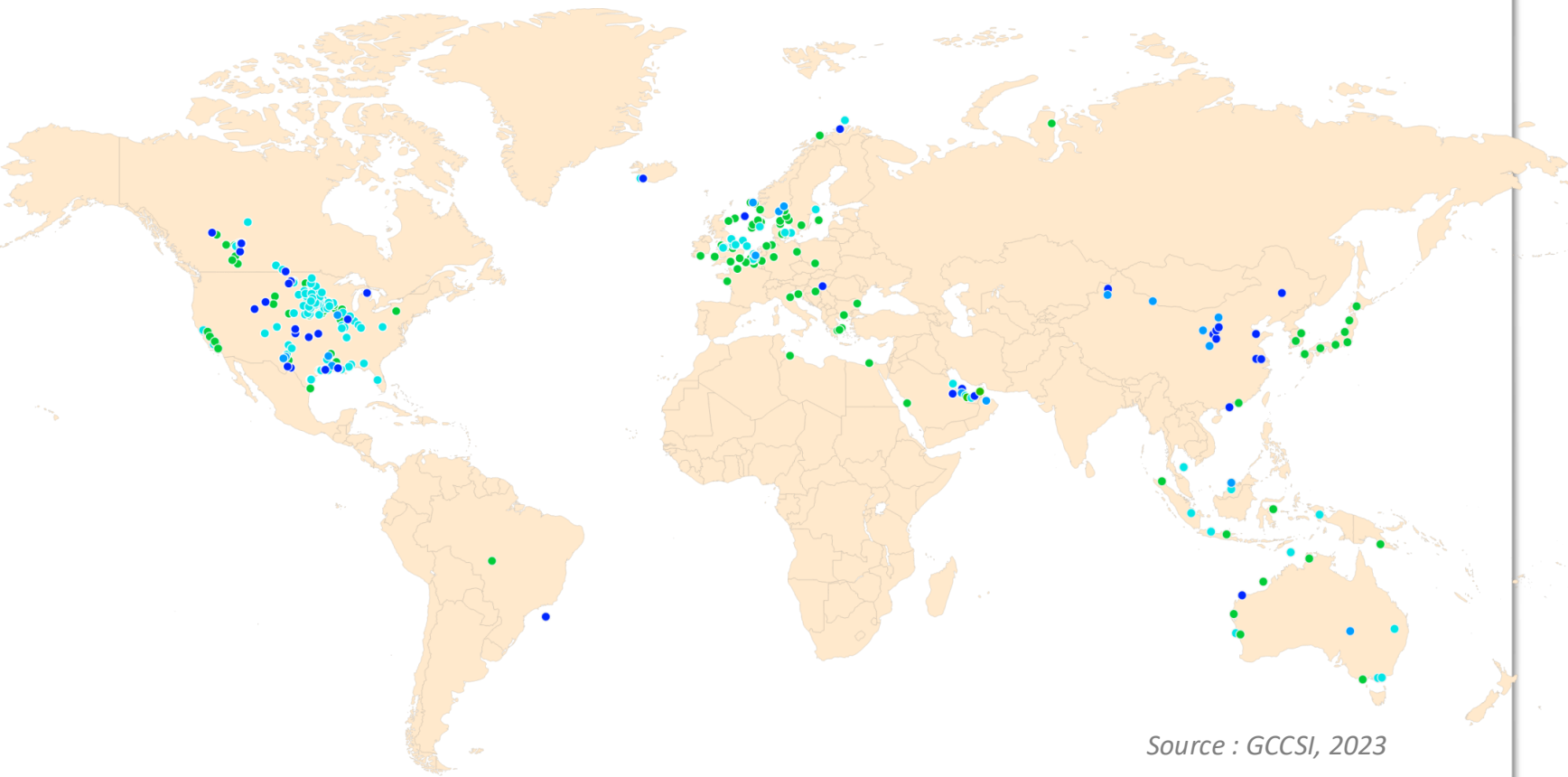


Net-Zero Industry Act (2023) : propose capacités de stockage de CO₂ de:

- 50 Mt/an d'ici 2030 (obligatoire)
- 280 Mt/an d'ici à 2040
- 450 Mt/an d'ici 2050

CCS & CCU

Une réalité industrielle



Source : GCCSI, 2023

51 Mt CO₂
captés et stockés /an

628
projets grande échelle

- 49 en opération
- 32 en construction
- 144 en étape de développement avancé
- 135 en étude

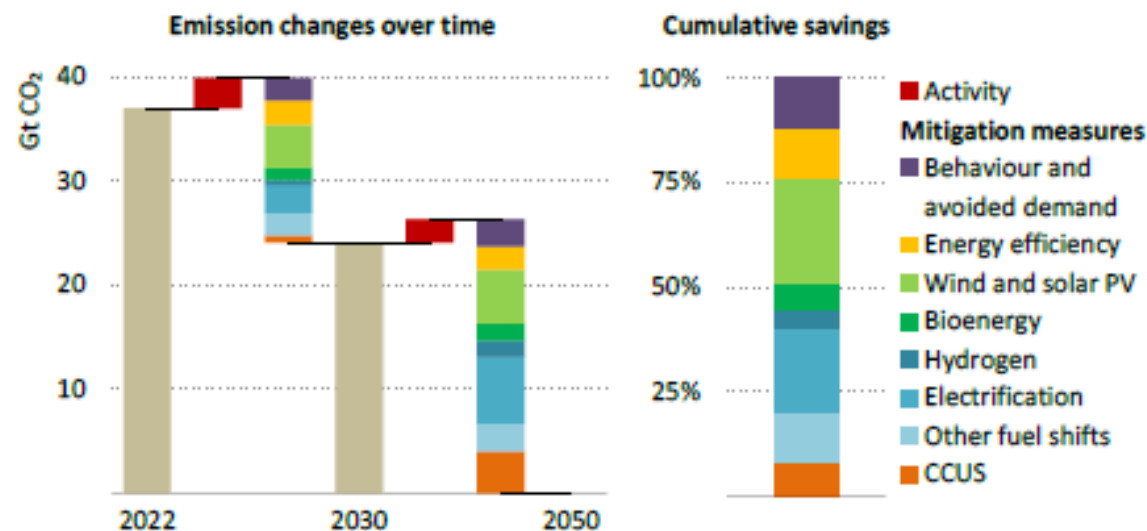
pour une capacité de
416 Mt CO₂/an

Source : GCCSI, 2024

CCS & CCU

Un déploiement aujourd’hui largement insuffisant

Scénario NZE de l’IEA



Source : IEA, 2024

Action vs. inaction climatique

	Références	Inaction	Action
Monde	M. Kotz et al., 2024: The economic commitment of climate change. Nature	38 000 Milliards \$ dommages @ 2050	6 fois moins que l'inaction pour respecter l'Accord de Paris
France	Etude ADEME 2023	Entre 5 et 7 points PIB d'ici 2100 soit plus de 260 Milliards \$/an	Entre 1 et 2 points PIB mondial soit entre 36 et 72 Milliards \$/an (entre 7 et 4 fois moins que l'inaction)



Forest in California with panoramic aerial wildfire is burning trees smoke fire dry grass

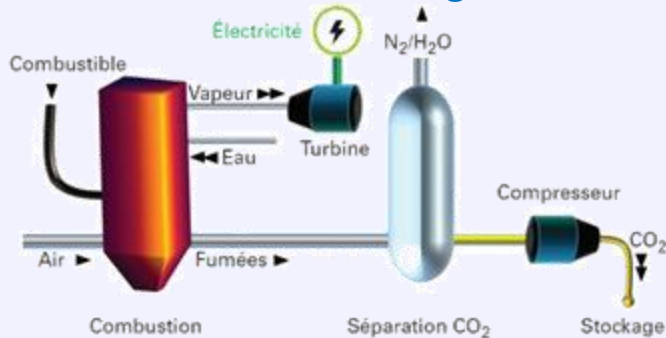
Focus sur le captage de CO₂

Une variété de technologies pour s'adapter aux enjeux & aux écosystèmes

3 familles de technologies qui interviennent à différentes étapes de la chaîne de valeur de la combustion

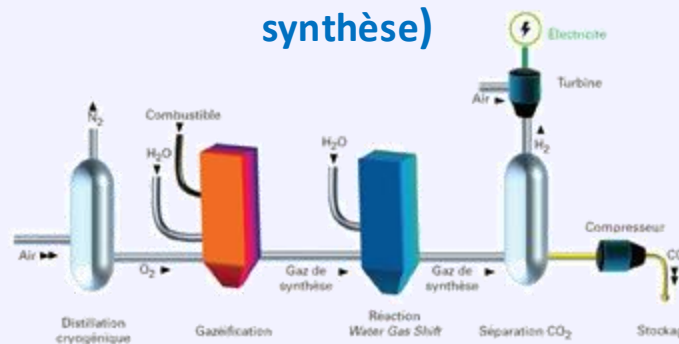
Postcombustion

Séparer le CO₂ des fumées de combustion à l'aide de technologies



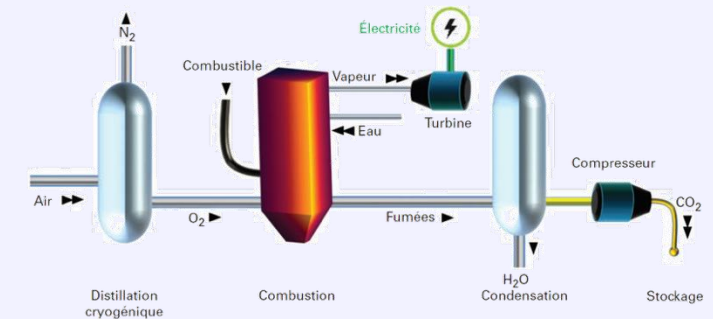
Pré-combustion

Produire un combustible qui ne contient pas de carbone (transformation en gaz de synthèse)



Oxycombustion

Réaliser une combustion en absence d'N₂, puis séparer le CO₂ par dépressurisation



3 familles de procédés de séparation du CO₂ des fumées

Absorption / Adsorption

- Par un **support liquide** (solvant) ou **solide** (sorbant)
- Régénération du liquide / solide en augmentant la température ou en réduisant la pression

Membranes

- Matériau métallique, polymère ou céramique pour la **séparation des gaz**
- Approprié pour haute pression / haute concentration en CO₂

Cryogénie

Basse température pour liquéfier et séparer le CO₂ d'autres gaz
Production de CO₂ liquide + absence de solvant ou autre produit

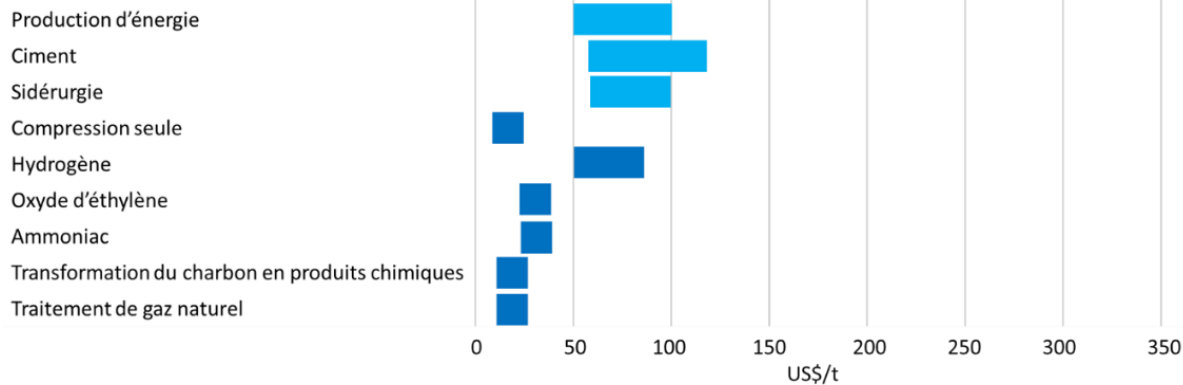
Focus sur le captage de CO₂

Des technologies qui restent à optimiser

- 😊 Maturité
- 😊 Diversité de sources de CO₂
- 😞 Pénalité énergétique
- 😞 Petits émetteurs
- 😞 Faibles concentrations en CO₂

Coûts du captage

Captage direct dans l'air

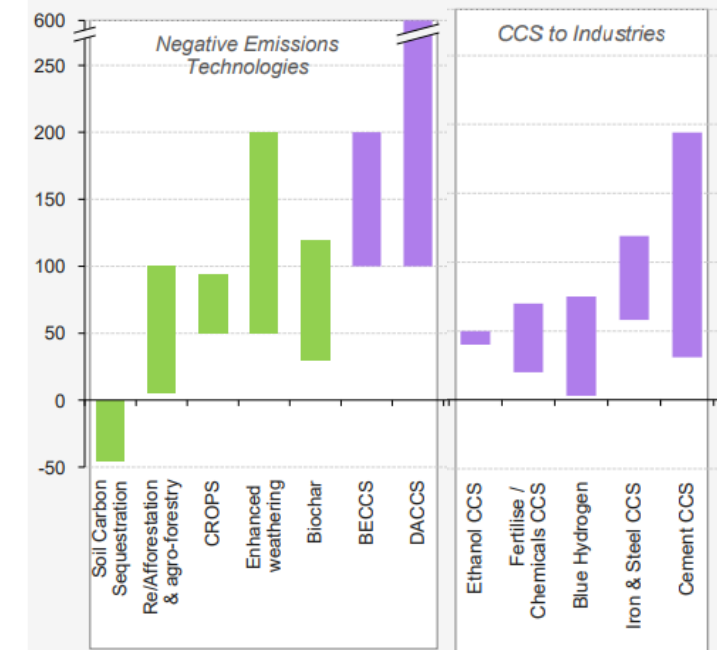


Faible concentration de CO₂

Forte concentration de CO₂

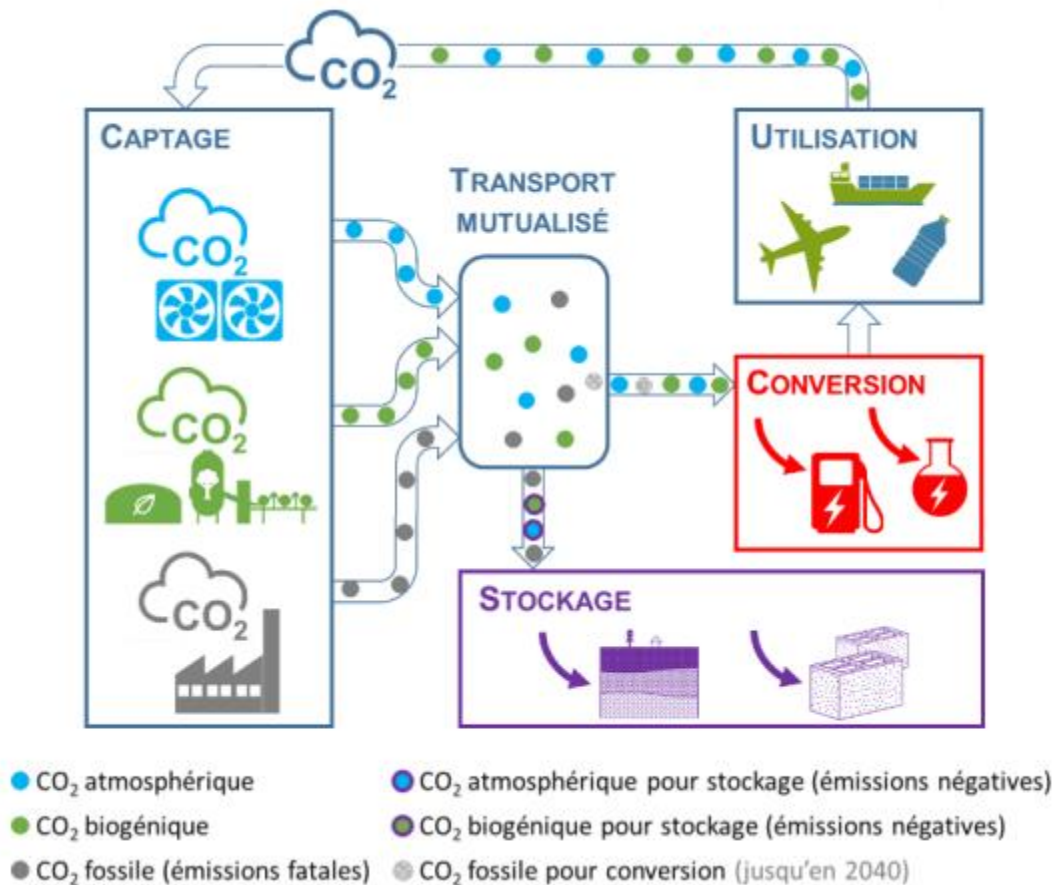
Coût du CCS par secteur

CCUS offers opportunities for CO₂-abatement at a moderate cost, especially in industrial applications where CO₂ separation is already inherent to the process



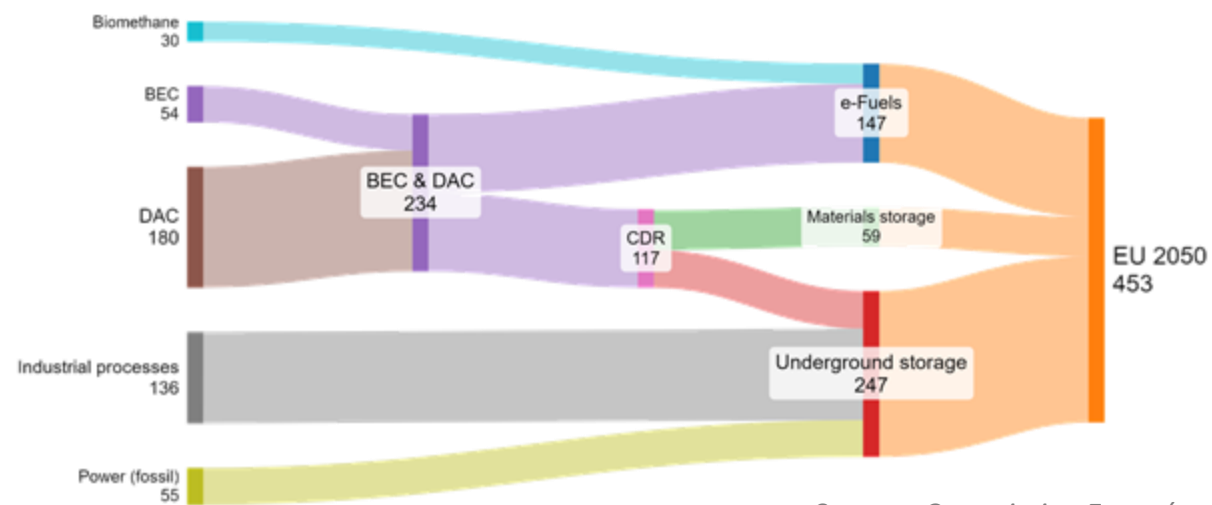
Source: Kearney, 2021

Focus sur le DAC « Direct Air Capture » Une technologie indispensable pour la neutralité carbone



Source : IFPEN / CEA

Répartition du captage de CO₂ par source et par destination
(MtCO₂ capté/an)

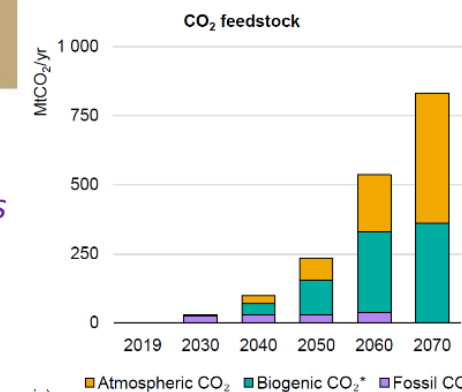
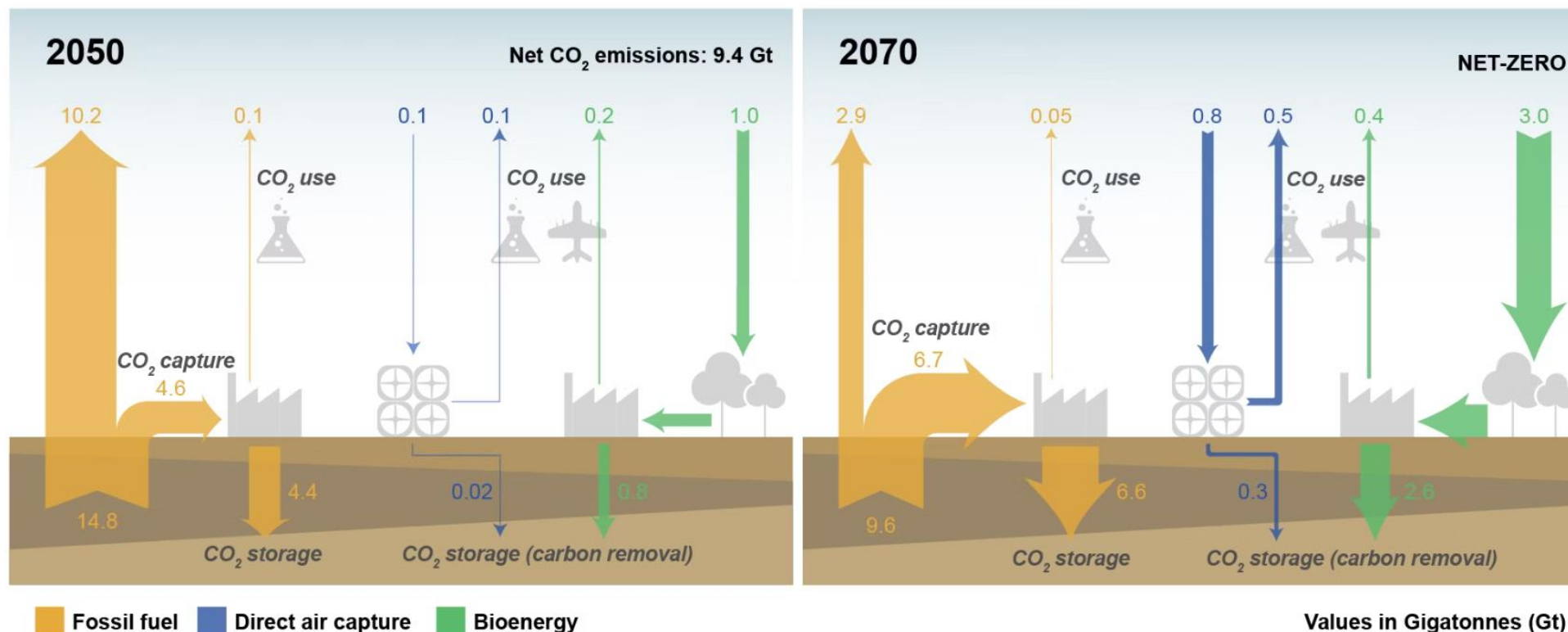


Source : Commission Européenne

Estimation contribution DAC en EU
~ 12 – 120 Mt/an @ 2040
~ 180 Mt/an @ 2050

Focus sur le DAC

Une technologie qui doit monter en échelle



IEA : Le rôle du DAC est important dans la décarbonisation des secteurs des transports et de l'industrie en produisant des carburants et en servant de matière première pour l'industrie chimique.

Source : <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-in-the-transition-to-net-zero-emissions>

Focus sur le DAC

Des enjeux pour la montée en échelle

- 😊 Possibilité d'installer l'unité de DAC **proche**
 - **de la zone de stockage ou d'utilisation**

- Réduction du transport

- **et/ou de la production d'énergie**

- Réduction du coût



- 😞 **Concentration du CO₂ dans l'air**

- 0,04%, soit ~ 300 fois plus faible que dans les gaz de cheminée d'une centrale à charbon

- Augmentation de la pénalité énergétique et des coûts + empreinte au sol

💬 Débat sur la **faisabilité et la pertinence du DAC** comme technologie d'émissions négatives

- **Large fourchette de coûts** pour DAC dans la littérature technico-économique

- **de 50 à 1000 \$/tCO₂**

Majorité des études de modélisation

- **de 50 à 500 \$/tCO₂ capté**

- **Origine et mode d'approvisionnement énergétique** des unités de DAC

- Encore **mal caractérisés** dans la littérature

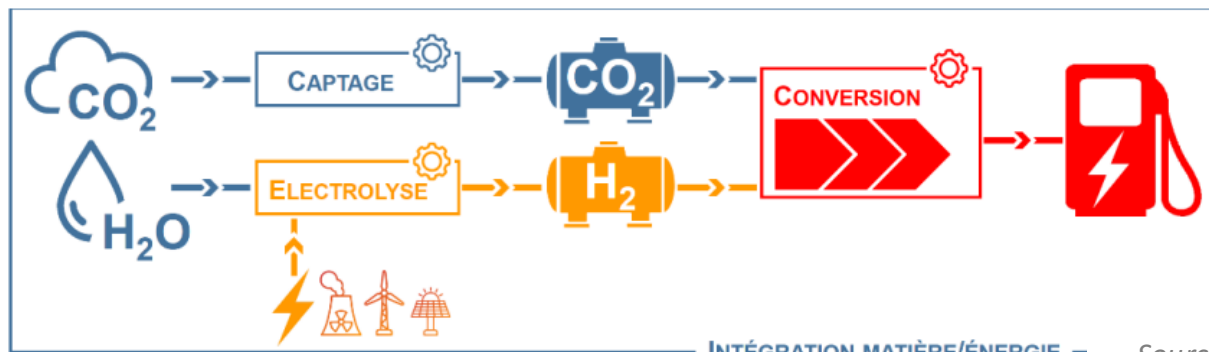
- **Couplage DAC + utilisation du CO₂** : encore **peu étudié**

- **Rôle du marché international des quotas carbone** comme **levier potentiel pour le déploiement du DAC**

- Pas encore été véritablement exploré

Focus sur les e-carburants

Un levier essentiel pour défossiliser les transports @2050



Source : IFPEN / CEA

Une dynamique de développement de projets



Source : IFPEN

■ Un besoin avéré

- **En 2030 et 2050 pour défossiliser les secteurs (aéronautique, maritime) avec peu d'alternatives**

■ Des gains en CO₂

- **REDII : 70% de réduction des émissions de CO₂ min vs. équivalent fossiles**
- **Jusqu'à 95% de réduction des émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie par rapport à la référence fossile**

■ Une réglementation qui se met en place

- **Minimum 1% de la consommation d'énergie finale dans les transports en 2030**
 - **Aérien (ReFuelEU Aviation) : 1,2% dès 2030 et 35% en 2050**
 - **Maritime (FuelEU maritime) : 2% de RFNBOs en 2034 si <1% du mix énergétique dans le secteur maritime en 2031**
- **Enjeu sur les sources de CO₂ éligibles → CO₂ biogénique ou atmosphérique à partir de 2041**

2

Carburants de synthèse : décarboner la mobilité lourde et optimiser la gestion du mix électrique

Daniel IRACANE

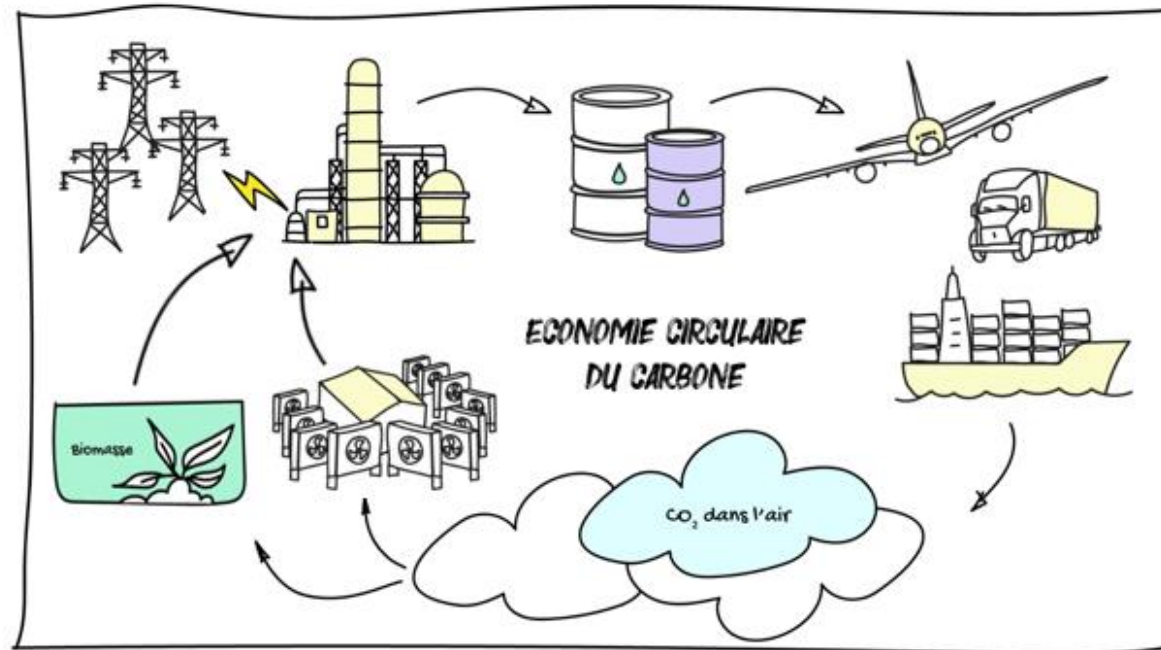
Membre de l'Académie des technologies

Les transports maritime et aérien

- Chacun responsable de 3 % des émissions de gaz à effet de serre
- Évolution ?
 - ✓ Résultante entre les efforts de sobriété et la croissance (convergence des économies émergentes/avancées)
 - ✓ Amélioration des technologies
- Dans tous les cas, les carburants durables sont la part majoritaire de la solution et doivent être déployés avec une forte accélération

Les carburants durables pour le transport lourd

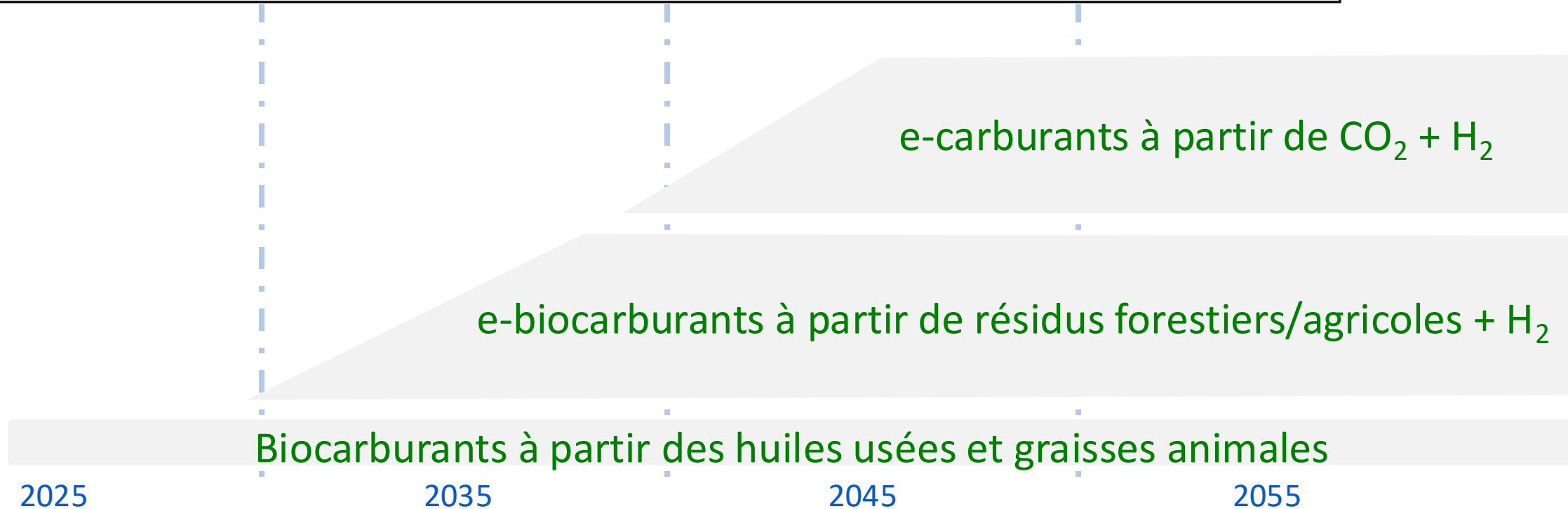
- **Délivrer une forte densité d'énergie** ⇒ **hydrocarbure liquide**
- **Mais « bas carbone net »** ⇒ **économie circulaire du carbone**



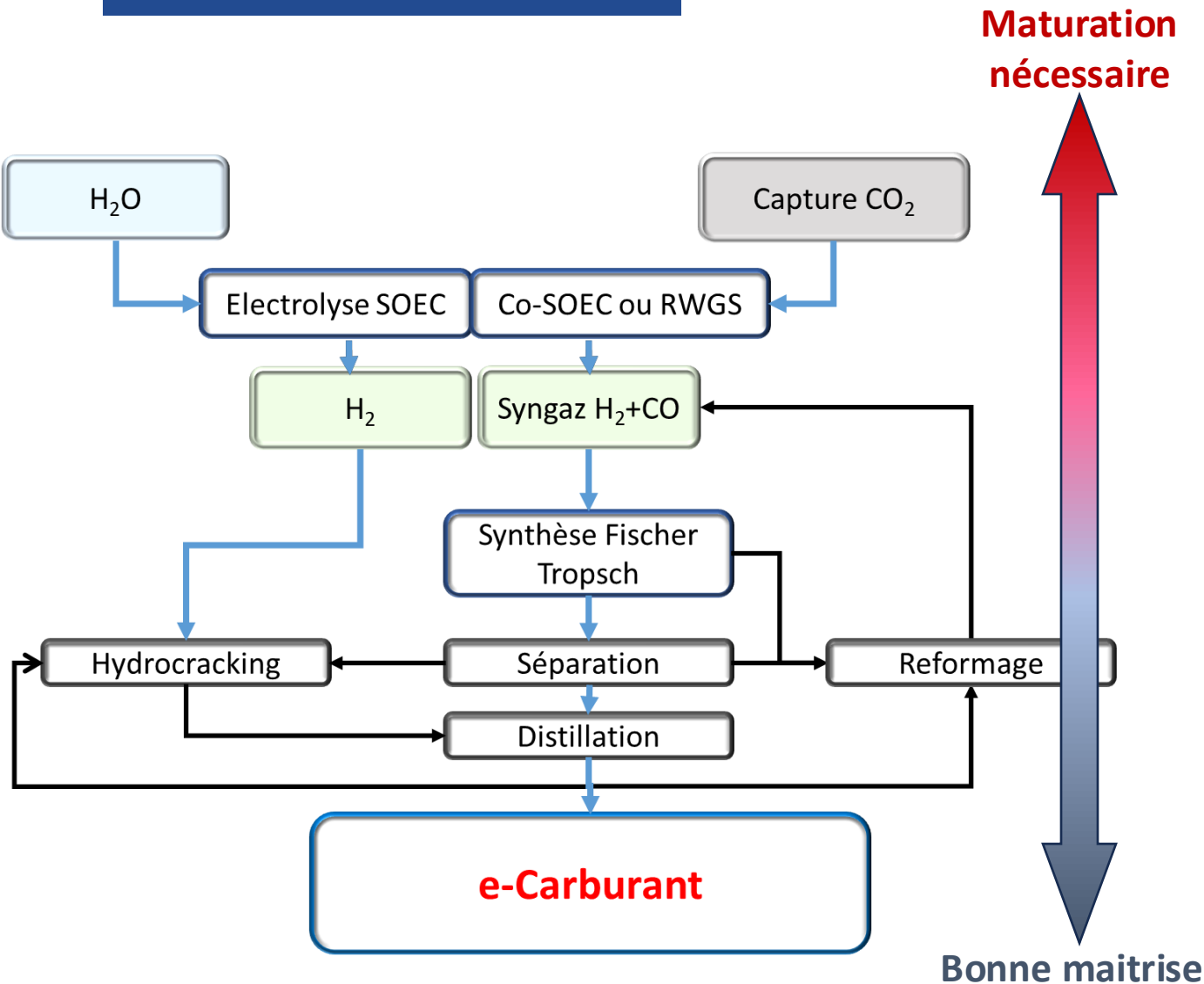
Plusieurs voies complémentaires de production

Ordres de grandeur pour la France avec un trafic stable dans les ports et aéroports

	2035	2045	2055
production nationale carburant durable	1.5 Mt	3 Mt	5 Mt
besoin en biomasse	2 Mt	4 Mt	6 Mt
besoin en électricité	23 TWh	46 TWh	77 TWh
importation carburant durable	1 Mt	1.5 Mt	4 Mt



Les défis technologiques et industriels



➤ Production Hydrogène

- ✓ Augmentation du rendement
- ✓ Assurer une bonne flexibilité
- ✓ Maîtriser la filière pour un déploiement à l'échelle GW

➤ Captage du CO₂

- ✓ Technologie disponible pour les fumées d'usine
- ✓ À sécuriser pour le CO₂ atmosphérique

➤ Investir dès maintenant pour une filière française et européenne

- ✓ Contre-exemple : le photovoltaïque

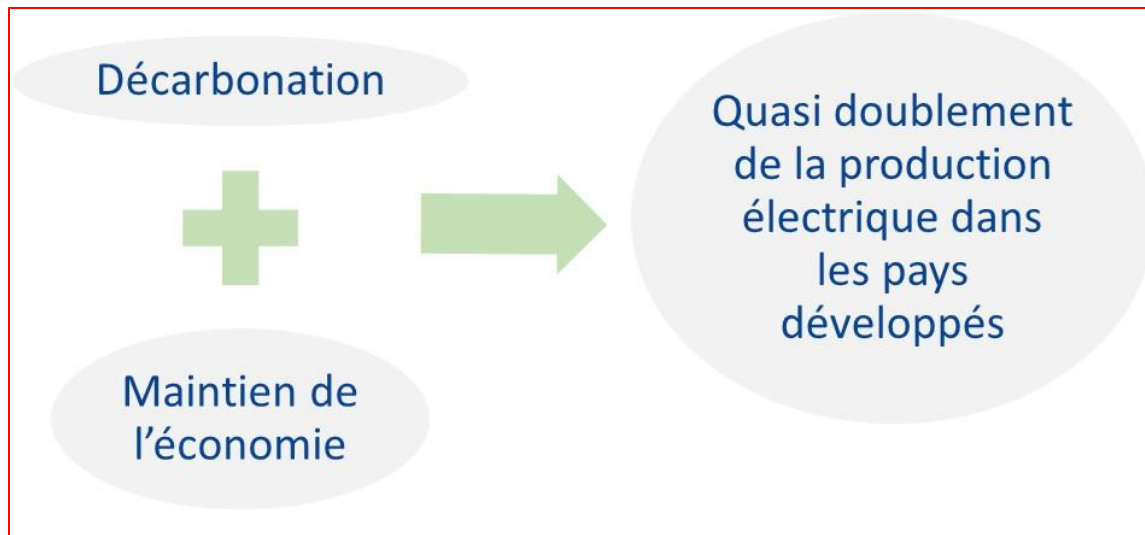
Le défi des intrants : la biomasse

- Des incertitudes importantes
 - ✓ Sur la disponibilité physique de la biomasse (changement climatique)
 - ✓ Sur l'économie de la collecte de la biomasse
 - ✓ Sur la part allouée au transport aérien et maritime (compétition d'usage)
- Une dizaine de pourcent de la biomasse-énergie 2G affectée au transport aérien/maritime semble une anticipation raisonnable : 6 Mt
- À production de carburant durable donnée :

↘ biomasse	⇒	↗ électricité
↗ biomasse	⇒	↘ électricité

Le défi des intrants : l'électricité

➤ France : Mix électrique décarboné et Fort potentiel excédentaire



Scénario France 2050		Capacité installée
Nucléaire	→	60 GW
Photovoltaïque	↗	100 GW
Éolien terrestre	↗	50 GW
Éolien en mer	↗	40 GW

Le mix électrique français peut-il accommoder 25 TWh₂₀₃₅ et 75 TWh₂₀₅₀ pour le développement d'une filière compétitive de carburant durable ?

Solution pour optimiser à la fois la production de carburant durable et le mix électrique

- L'intermittence éolienne et photovoltaïque crée des moments de sous-production et d'autres de surproduction par rapport au besoin
 - ✓ Surproduction annuelle cumulée de l'ordre de 100 TWh₂₀₃₅ et 150 TWh₂₀₅₀
- Nécessite d'augmenter fortement la part de « consommations flexibles » en plus de la « consommation contrainte » (offre=demande à tout instant)

- Stratégie possible pour les carburants durables:

	2035	2050
Production e-biocarburant et e-carburant électro-intensive :	22 TWh	75 TWh
Consommation pour l'exploitation et pour 30 % de l'électrolyse :	8 TWh	25 TWh
70 % de l'électrolyse alimentée par les excédents de productible :	14 TWh	50 TWh

- ✓ Disponibilité moyenne annuelle de l'électrolyse sur excédent : 80 %
- ✓ Besoin en électrolyseurs pour les carburants durables : 2.5 GW₂₀₃₅ et 8.3 GW₂₀₅₀
- ✓ Flexibilité de consommation fonction des besoins du mix : 1.8 GW₂₀₃₅ et 6 GW₂₀₅₀

La France dispose d'une capacité énergétique suffisante pour une production compétitive de carburant durable

- L'approche flexible permet une filière nationale de carburant durable dans les bons ordres de grandeurs pour la décarbonation
 - ✓ Bénéfices : sécurité d'approvisionnement, réindustrialisation, balance commerciale
- La flexibilité de la production de carburant durable permet d'optimiser le mix
 - ✓ Générateurs nucléaires et renouvelables mieux valorisés
 - ✓ Décroissance de la capacité en centrales à gaz compensant l'intermittence
 - ✓ Le gain économique se chiffre à plusieurs centaines de M€
- Ce gain économique permet une production compétitive en France des carburants durables
 - ✓ Pour les carburants durables : ↘ coût électricité par la valorisation de la flexibilité
 - ✓ Pour les autres consommateurs : pas de surcout

MERCI !