

ÉVÈNEMENT

Transition énergétique Les défis de la défossilisation



Demi-journée thématique
à l'occasion de la sortie du
numéro spécial des *Reflets*
de la Physique

📍 **16 mars 2024** dès 14h
ENS Paris

www.sfpnet.fr



Captage, stockage et utilisation du CO₂

Transition énergétique
Les défis de la défossilisation
16 mars 2024

florence.delprat-jannaud@ifpen.fr



CAPTAGE, STOCKAGE, UTILISATION DU CO₂

DE QUOI PARLE-T-ON ?

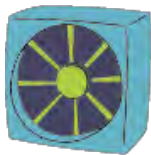
1 Captage

Séparation du CO₂ des autres éléments constitutifs...

...des fumées industrielles



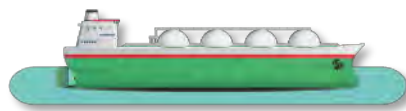
...de l'air



2 Transport

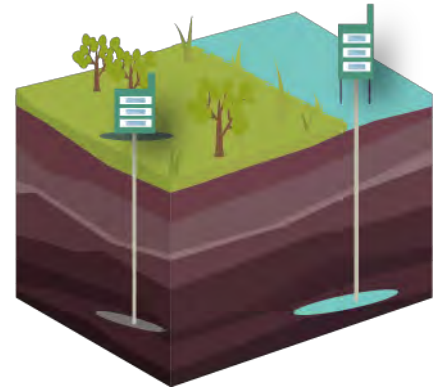
Après compression

Par gazoduc, camion, ou bateau sur le lieu de stockage



3a Stockage

Injection du CO₂ dans une formation géologique profonde pour un stockage long terme



3b Utilisation

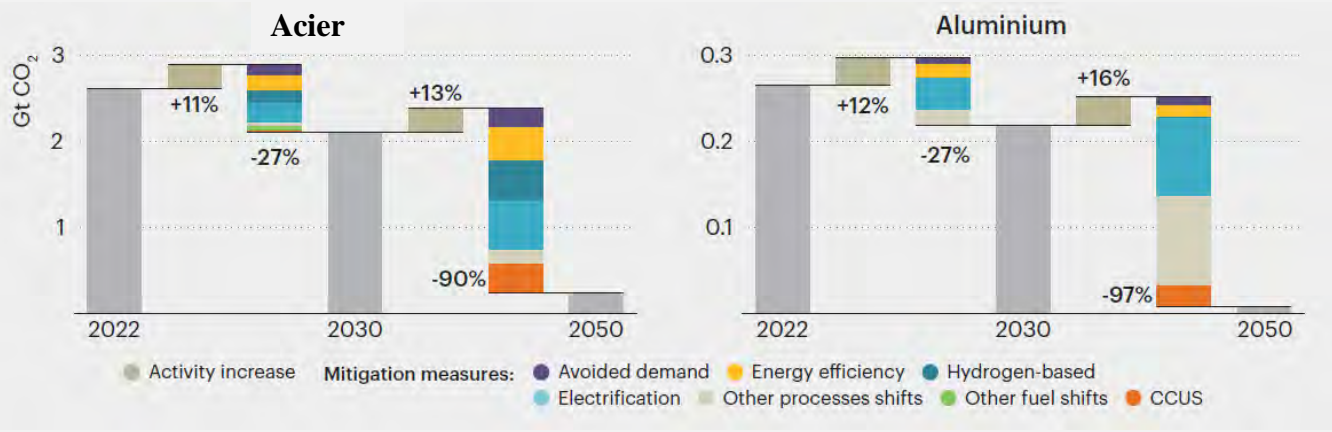
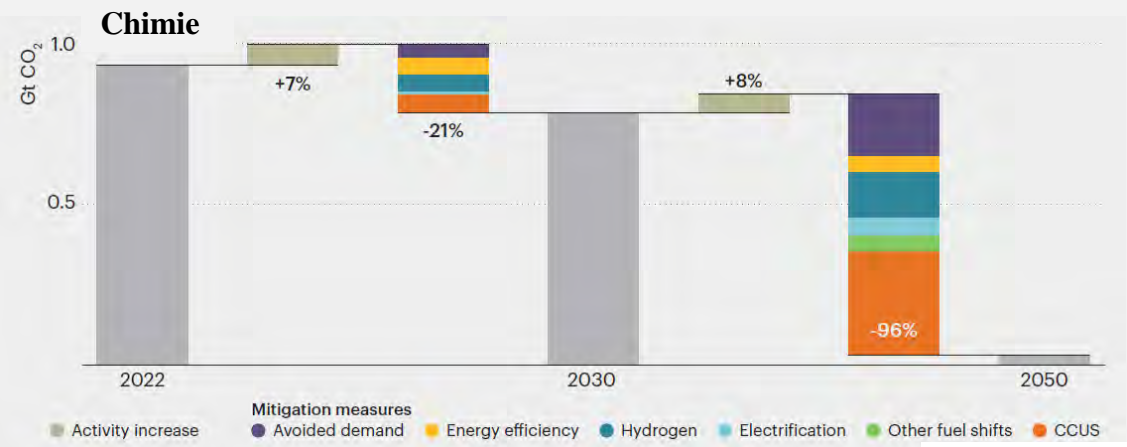
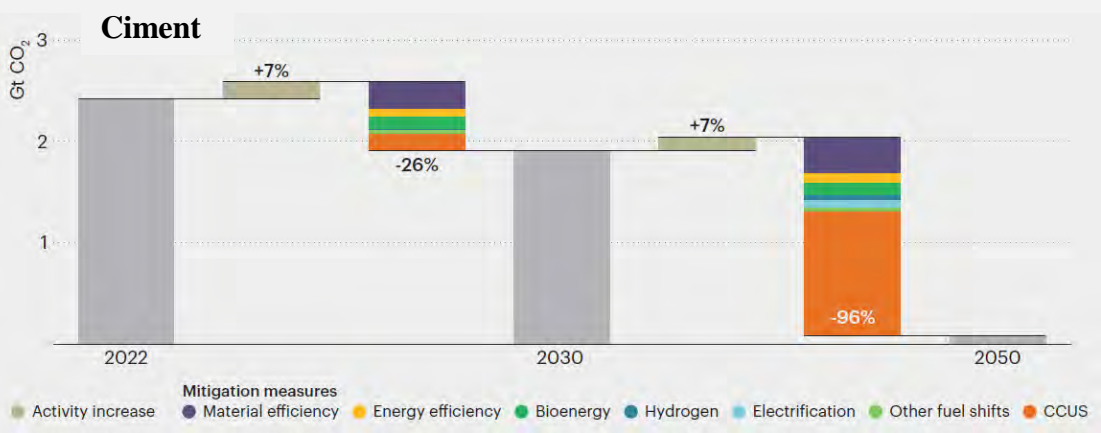
Utilisation directe ou conversion du CO₂ en produits valorisables



UNE FILIÈRE INCONTOURNABLE POUR ATTEINDRE LA NEUTRALITÉ CARBONE

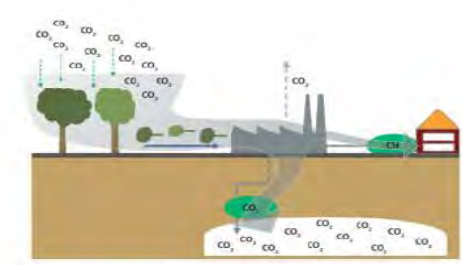
➤ Décarboner certains secteurs industriels

- Production d'énergie
- Industrie lourde

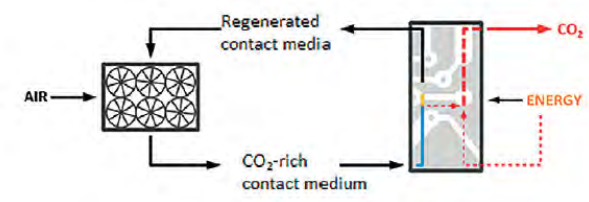


➤ Réduire le CO₂ présent dans l'atmosphère

- Bioénergie avec captage et stockage du CO₂
- Captage direct dans l'air



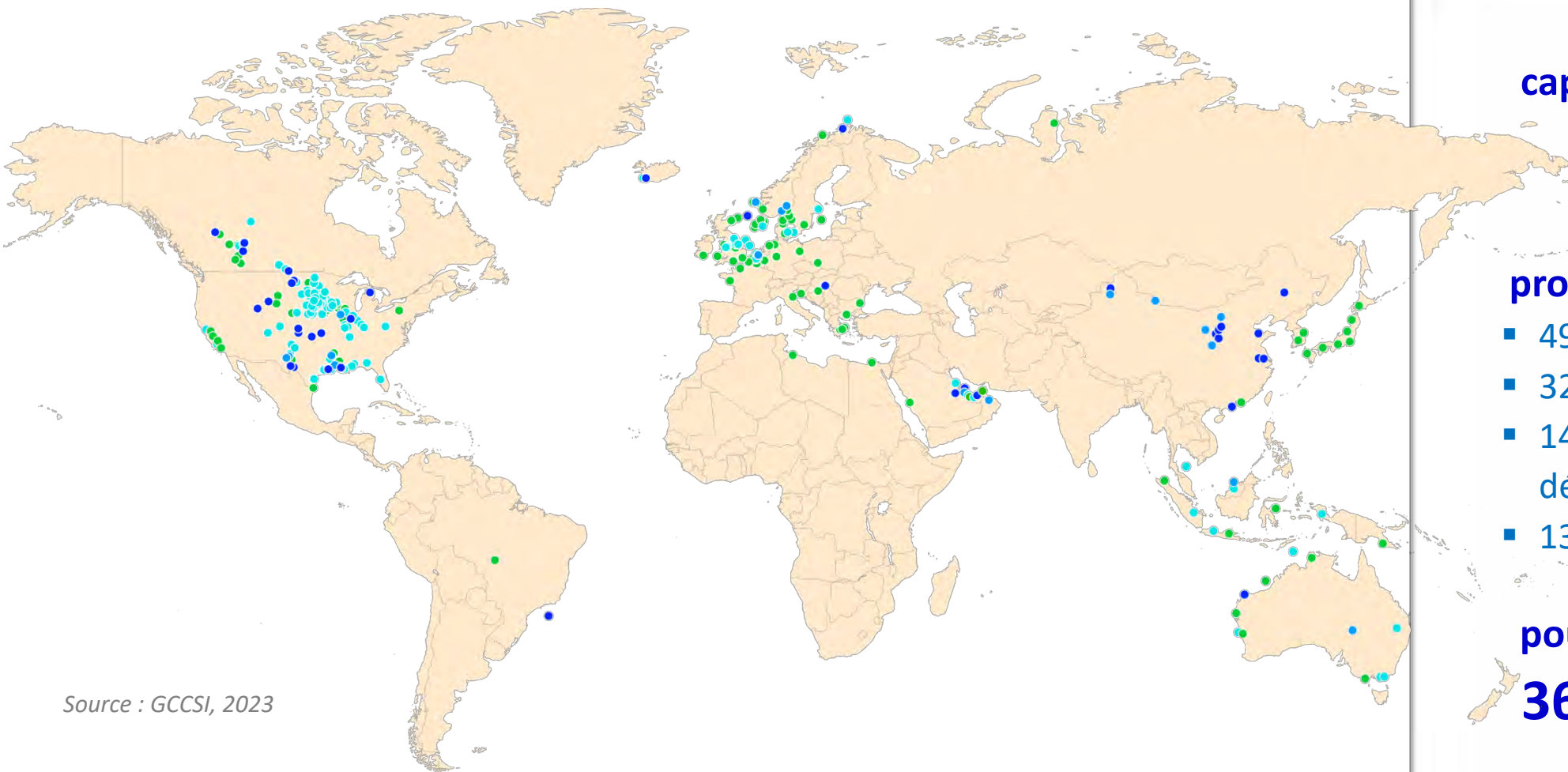
deVos, 2014 & apud Del Alamo, 2015



EASAC, 2018

UNE RÉALITÉ INDUSTRIELLE

SUR UNE LARGE VARIÉTÉ D'UNITÉS INDUSTRIELLES



Source : GCCSI, 2023

49 Mt CO₂
captés et stockés /an

392

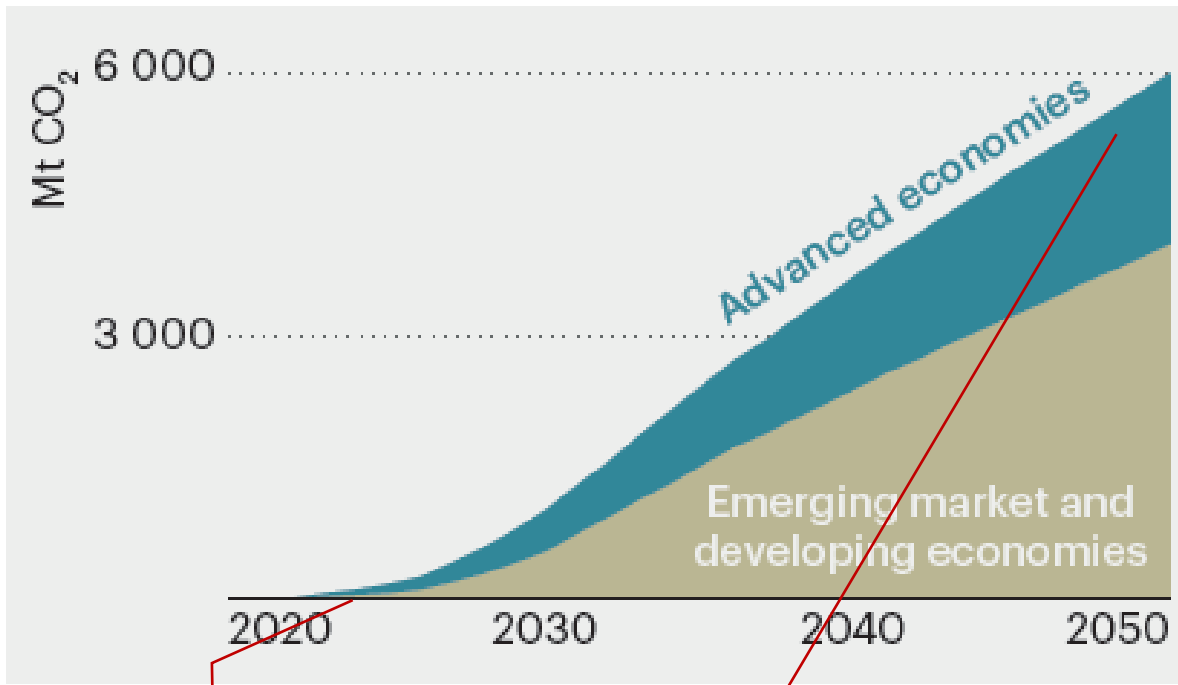
projets grande échelle

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

pour une capacité de
361 Mt CO₂/an

UN ENJEU DE DÉPLOIEMENT À GRANDE ÉCHELLE

... DÈS 2030

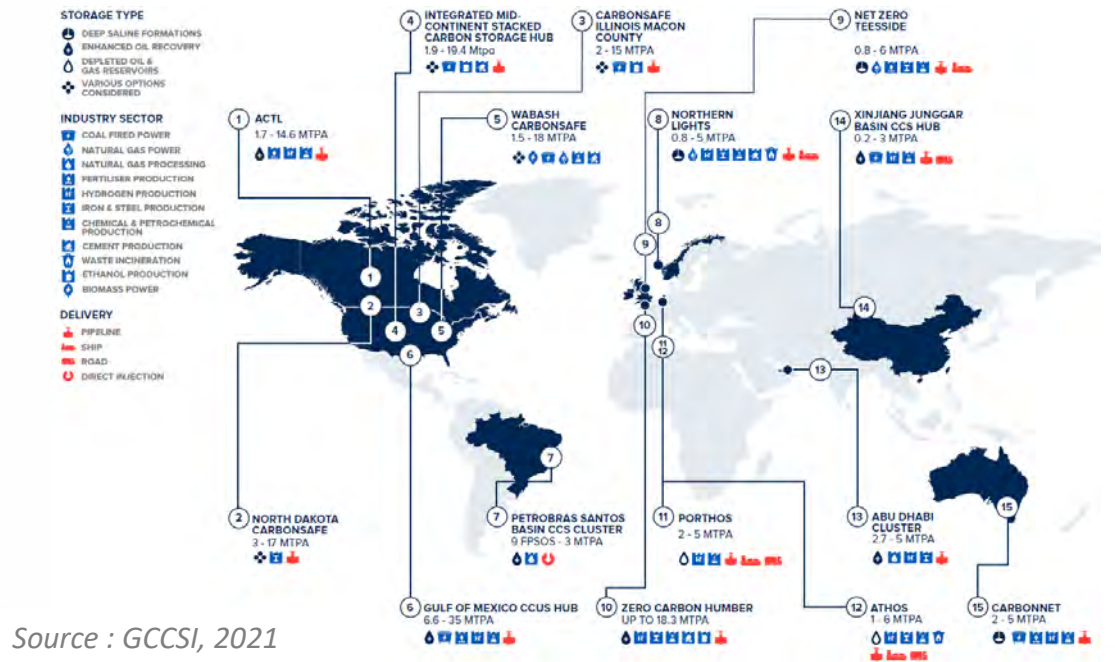


6 Gt =
3,7 Gt - fossil fuels & industrial processes
+ 1,3 Gt - bioenergy
+ 1 Gt - DAC

Source : IEA, 2023

Des hubs régionaux associés à des clusters industriels

- ✓ Plusieurs émetteurs connectés à un réseau de transport
- ✓ Proximité de zones de stockages
- Mutualiser les risques d'investissement
- Réduire les coûts unitaires de transport/stockage
 - Economies d'échelle & Synergies commerciales



Source : GCCSI, 2021

ET EN FRANCE ?

PUBLICATION DE LA STRATÉGIE CCUS

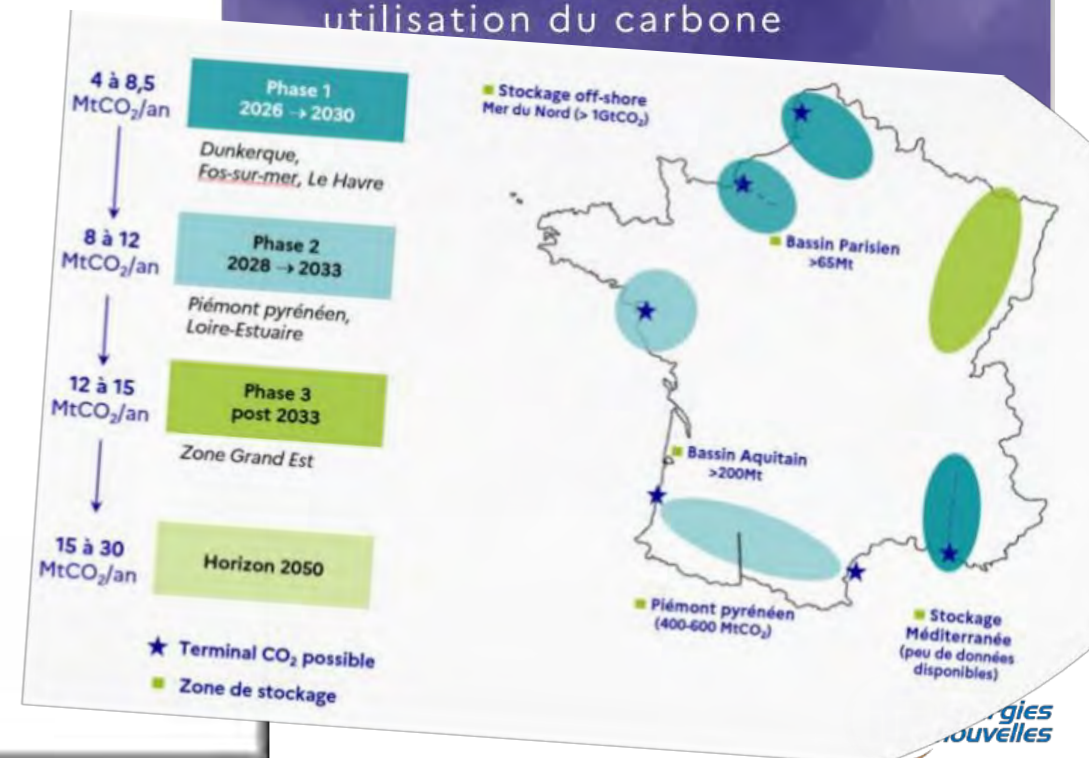
Stratégie CCUS - juillet 2023

■ Cadre

- Entre 4 et 8,5 MtCO₂/an séquestré @ 2030
- Pour les émissions résiduelles incompressibles

■ Orientations

- Une **trajectoire de déploiement**
 - *Calendrier de mise en œuvre et de volumes*
 - *Reposant sur une priorisation par grandes zones industrielles*
- Un **régime de soutien** via des Contrats pour Différence
 - *Octroyés par appel d'offres*
- Un **cadre pour les infrastructures de transport de CO₂**
 - *Régulé par la Commission de Régulation de l'Énergie*
- Une **diversification des possibilités de stockage de CO₂**
 - *Stockage en France clé pour assurer souveraineté et compétitivité*
- Une **valorisation du CO₂** possible alternativement au stockage
 - *Levier de décarbonation des secteurs de l'aviation et du maritime*



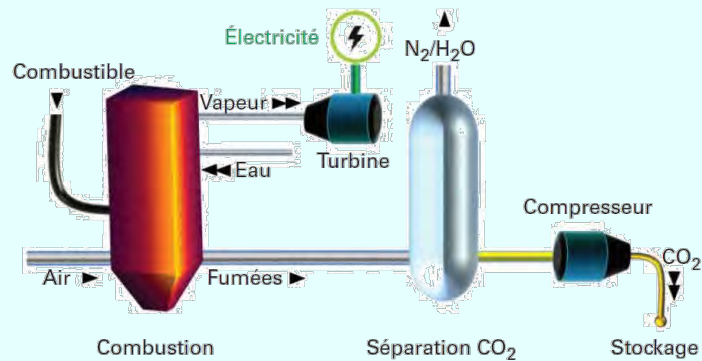
LE CAPTAGE DE CO₂

SÉPARER LE CO₂ DES AUTRES CONSTITUANTS DES FUMÉES (H₂O, N₂...)

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

Postcombustion

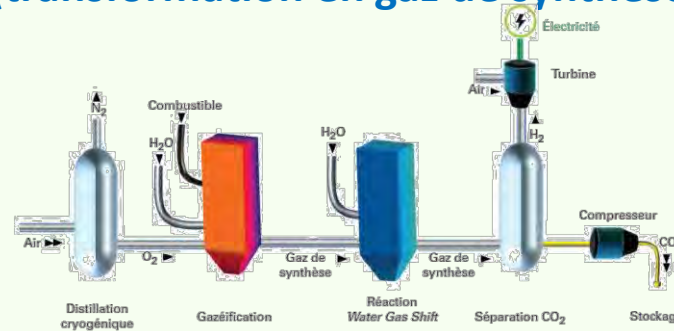
Séparer le CO₂ des fumées de combustion à l'aide de technologies



- 😊 Maturité des procédés par absorption
- 😊 Large gamme d'application
- 😞 Pénalité énergétique

Pré-combustion

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

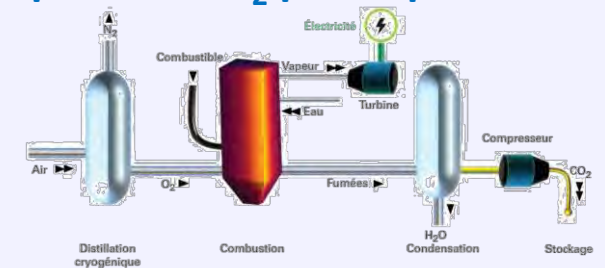


Spécifique au reformage du gaz ou gazéification charbon et biomasse

- 😊 Consommation énergétique
- 😞 Installation sur de nouvelles unités / rétrofit

Oxycombustion

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



😞 Nouvelles unités / rétrofit

- Oxygène produit par séparation de l'air (cryogénie, membranes)
 - 😞 Pénalité énergétique
- Chemical Looping : apport d'oxygène sous forme d'oxyde métallique
 - 😊 Consommation énergétique

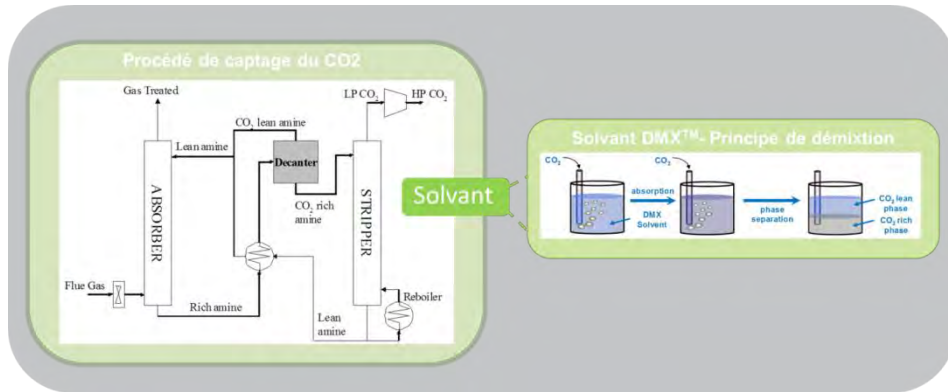
LE CAPTAGE DE CO₂

UN EXEMPLE DE PROCÉDÉ FRANÇAIS

Le procédé DMX™ de captage du CO₂

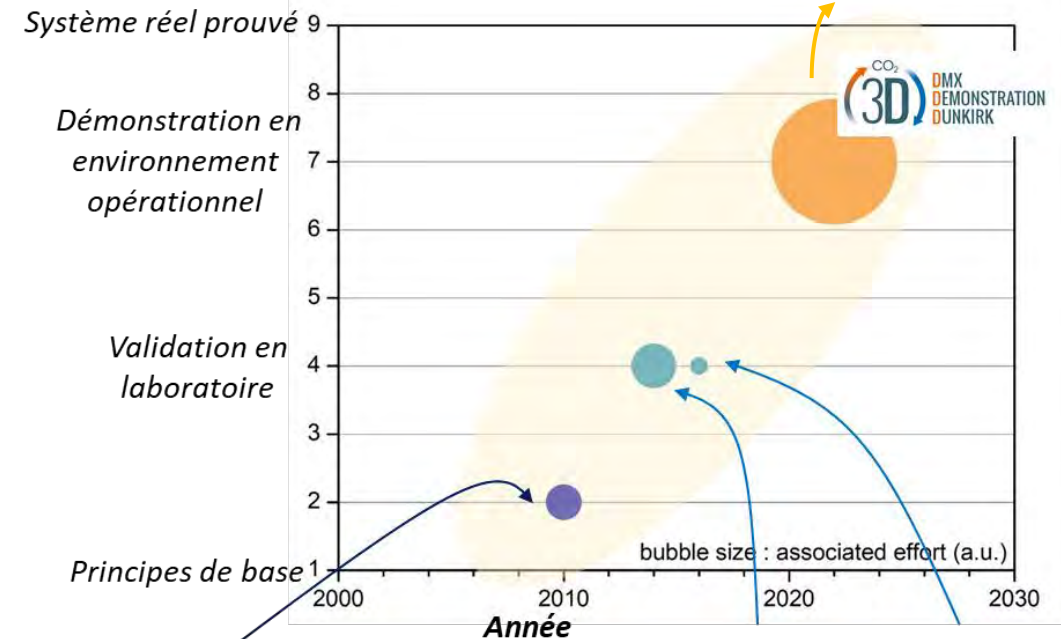
Un procédé post-combustion par solvant démixant...

... fruit de 15 ans de recherche @ IFPEN



- **Haut potentiel de réduction de pénalité énergétique et de coût de captage du CO₂**
 - Faible consommation de vapeur
 - 2,3 à 2,9 GJ/tCO₂ en fⁿ du cas applicatif et du taux de captage
 - Solvant thermiquement stable avec un faible taux de dégradation
- **Production de CO₂**
 - Très pur (99,7%)
 - En pression (jusqu'à 7 bar)

Maturité technologique



Tests en labo @ IFPEN



Cas Centrale à charbon



Cas Sidérurgie



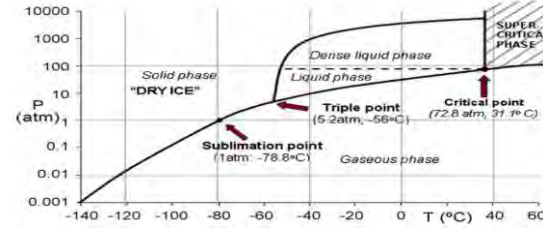
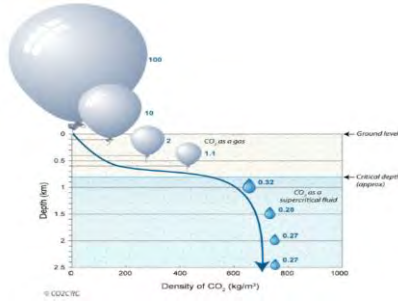
OCTAVIUS
OPTIMISATION OF CO₂ CAPTURE TECHNOLOGY ALLOWING VERIFICATION AND IMPLEMENTATION AT UTILITY SCALE



LE STOCKAGE DU CO₂

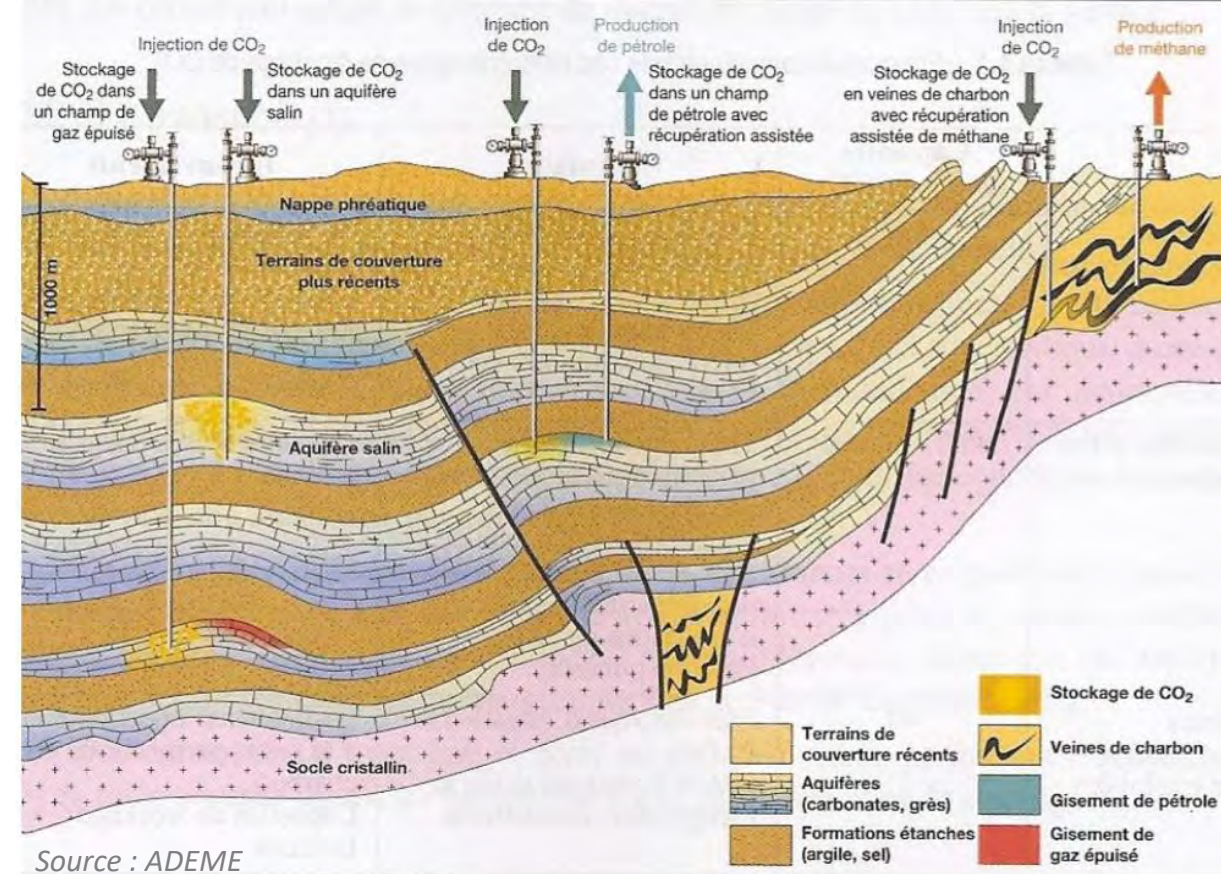
ASSURER UN STOCKAGE SÛR ET PERMANENT

- Dans des structures géologiques profondes



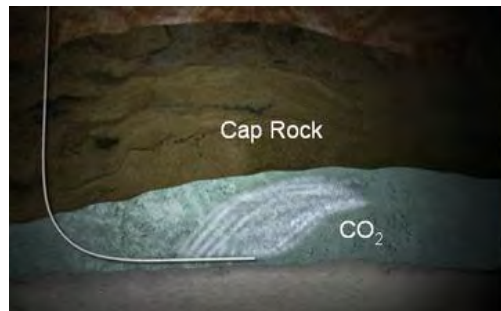
- Réservoirs d'hydrocarbures déplétés
- Aquifères salins profonds

- Grâce à des phénomènes de piégeage naturel



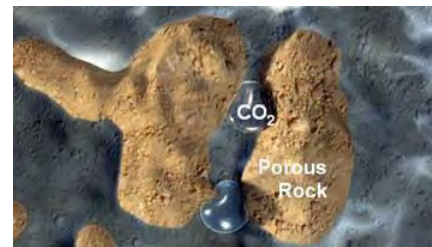
Une sécurité du stockage qui augmente avec le temps

Piégeage structural / stratigraphique
Accumulation sous la couverture



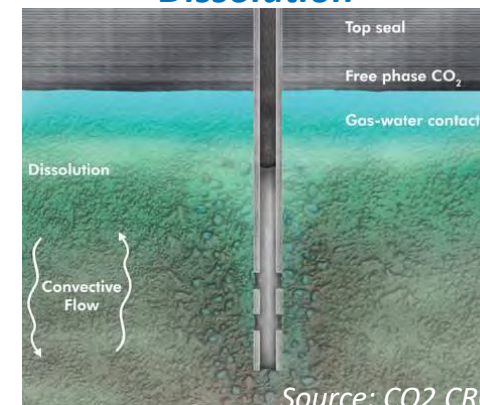
Source: CO₂ Capture Project

Piégeage résiduel
Immobilisation dans des pores



Source: CO₂ Capture Project

Dissolution



Source: CO₂ CRC

Minéralisation

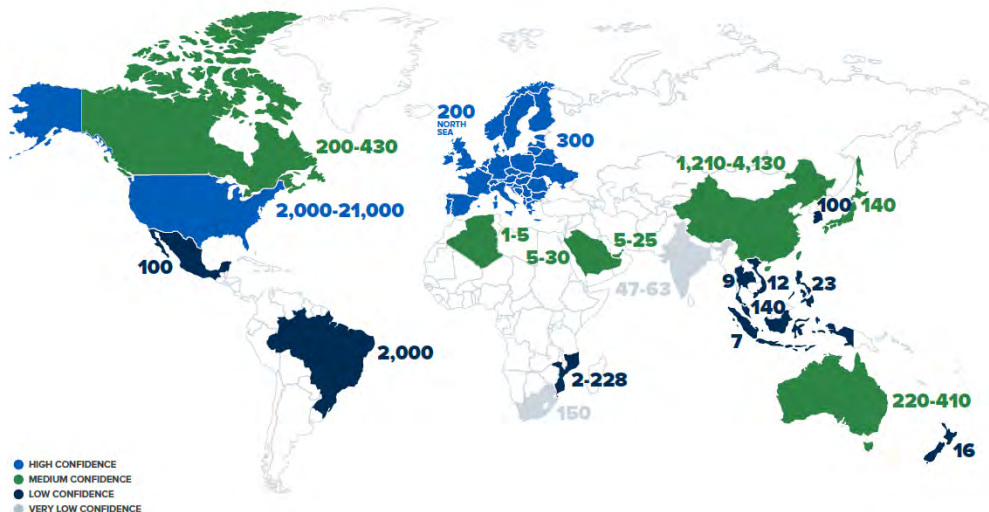


Mineral trapping of CO₂

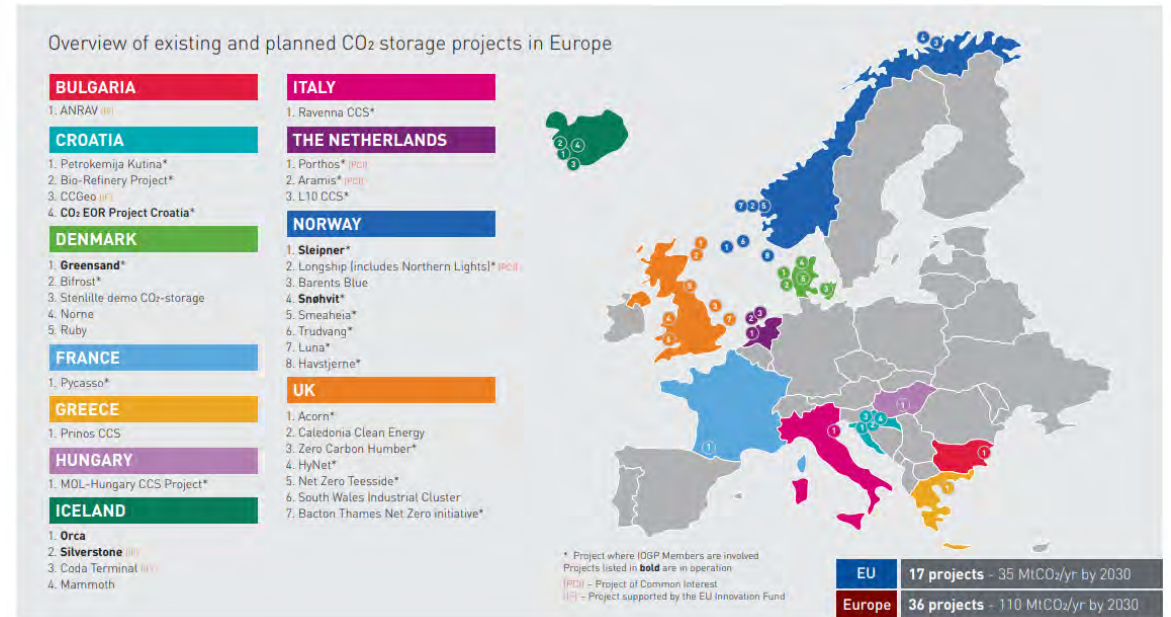
Source: CO₂ Capture Project

LE STOCKAGE DU CO₂ DES CAPACITÉS DISPONIBLES

- Confiance dans la disponibilité des ressources de stockage de CO₂
 - 220 Gt de CO₂ à stocker d'ici 2070
 - Capacités : 8 000 - Gt – 55 000 Gt
 - Onshore : 6 000 Gt - 42 000 Gt
 - Offshore : 2 000 Gt - 13 000 Gt
- Mais besoin de caractériser, d'évaluer et de développer des 100aines de sites
 - 10 à 30 sites/ an à développer d'ici 2050



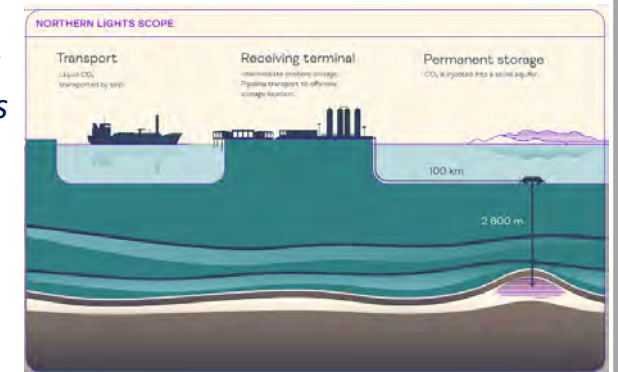
... DES PROJETS EN DÉVELOPPEMENT



Le projet NorthernLights

1^{er} projet de création d'une chaîne de valeur transfrontalière pour les industriels européens

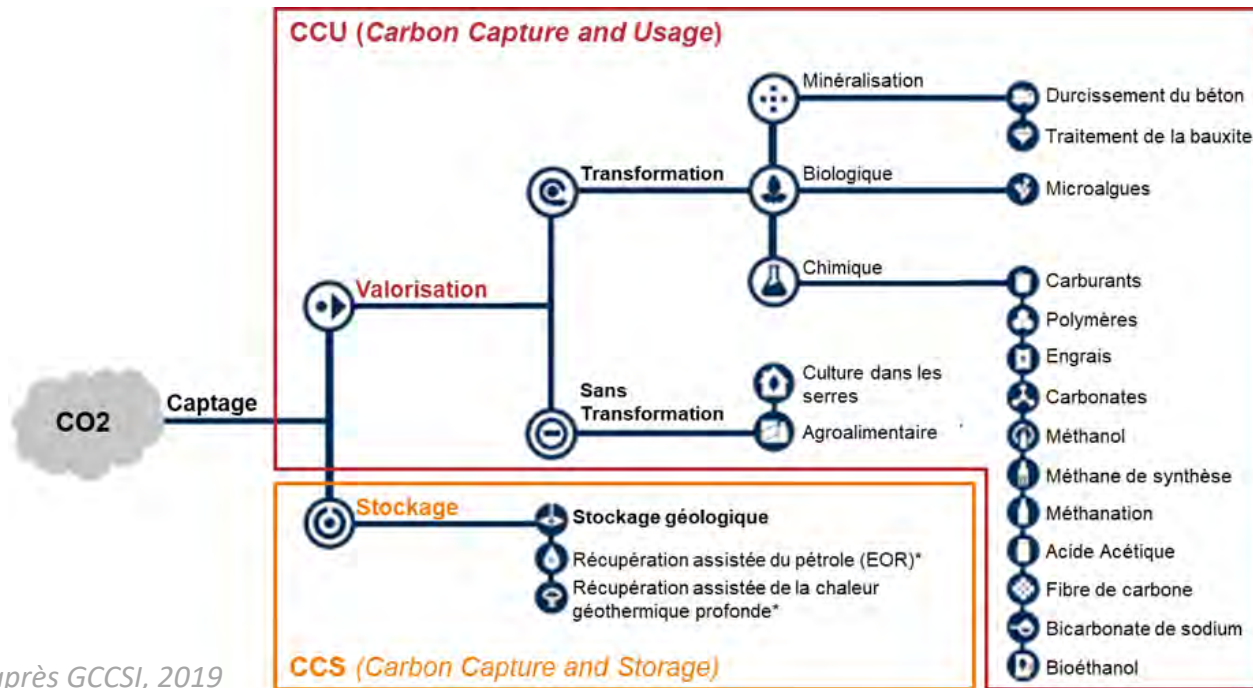
1,5 Mt CO₂ stockées/an à partir de 2024



Source : <https://norlights.com/>

L'UTILISATION DU CO₂

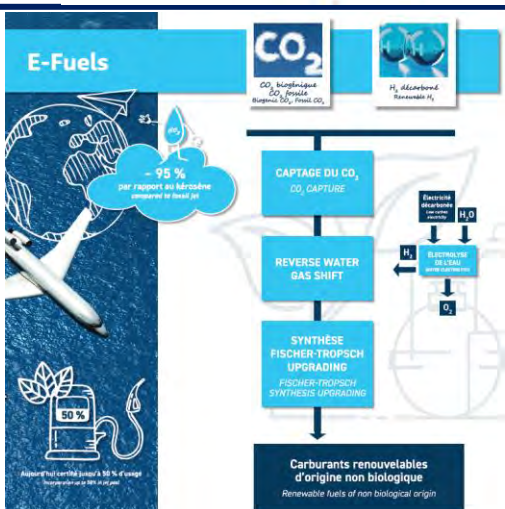
UNE SOLUTION COMPLÉMENTAIRE AU CAPTAGE ET STOCKAGE DU CO₂



D'après GCCSI, 2019

Des voies de valorisation du CO₂ pour :

- **Eviter** l'extraction de ressources fossiles en recyclant le CO₂
- **Substituer** par des molécules bas carbone les molécules carbonées dont nous avons besoin
- **Réduire** la quantité de CO₂ dans l'atmosphère en le séquestrant durablement dans des matériaux de construction



Focus sur les e-fuels

- **Un besoin avéré**
 - En 2030 et 2050 pour les transports (aéronautique, maritime)
- **Des réductions des émissions de CO₂**
 - REDII : 70% min vs. équivalent fossiles
 - Jusqu'à 95% sur l'ensemble du cycle de vie vs. référence fossile
- **Une réglementation qui se met en place**
 - Min 1% de la consommation d'énergie finale dans les transports
 - **Aérien (ReFuelEU Aviation) : 1,2% dès 2030 ; 35% en 2050**

Une dynamique de développement de projets

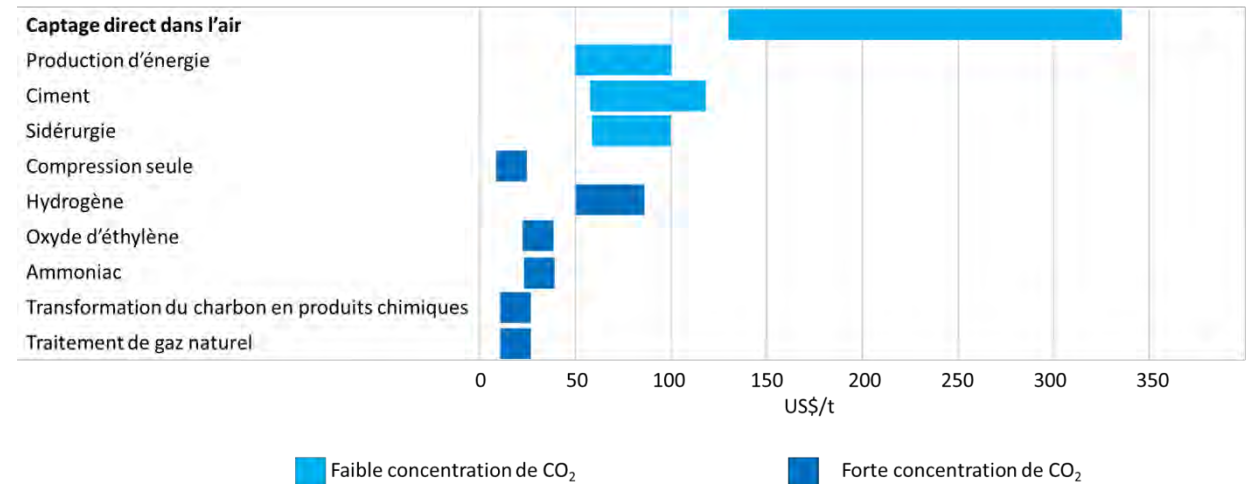


CONCLUSIONS

ENJEUX ET PERSPECTIVES

- **La filière CCS/CCU**
 - Incontournable la décarbonation de l'industrie
 - Une opportunité de maintien de la compétitivité de l'industrie française et européenne
- **Une industrie**
 - Prête à le déployer en Europe pour décarboner le secteur industriel
- **Des enjeux**
 - Démonstration de maturité économique et commerciale de l'ensemble de la chaîne à l'échelle industrielle
 - Accès à des infrastructures de transport et de stockage du CO₂
 - Mécanismes de financement pour accélérer le développement du CCUS
 - Perception sociétale

Un coût variant entre 20 à 190 €/tCO₂
A mettre en regard des 80€/tCO₂ (ETS)



Source: IEA, 2020

Et un coût global pour atteindre la neutralité qui pourrait plus que doubler sans le déploiement du CCS/CCU