

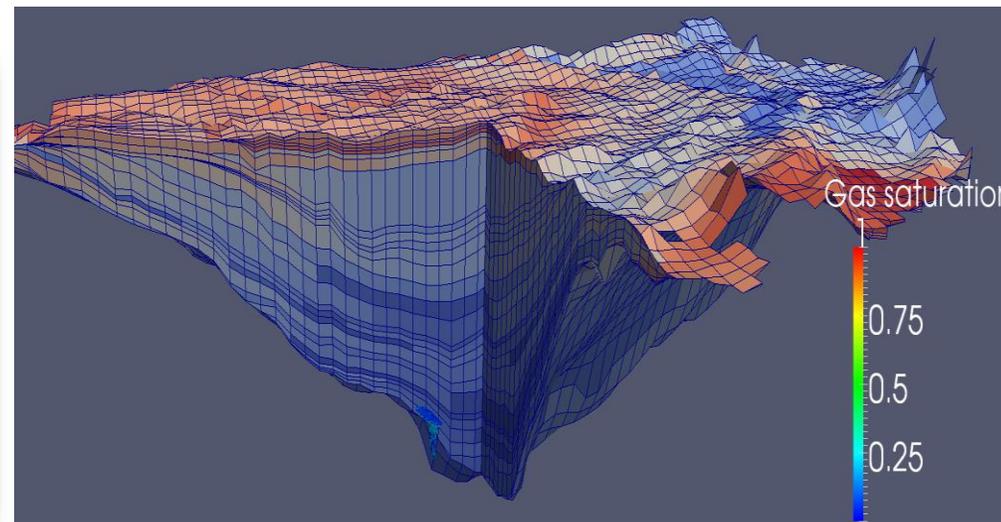


Capture, stockage et utilisation du CO₂

*Colloque annuel F2S
Science et Progrès 2022*

24 mars 2022

florence.delprat-jannaud@ifpen.fr



CAPTAGE, STOCKAGE, VALORISATION DU CO₂ (CCUS) DE QUOI PARLE-T-ON ?

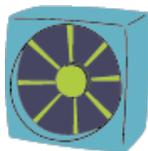
1 Captage

Séparation du CO₂ des autres
éléments constitutifs

des fumées
industrielles

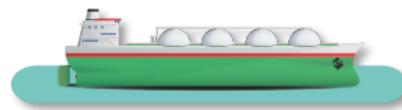


de l'air



2 Transport

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



3a Storage

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



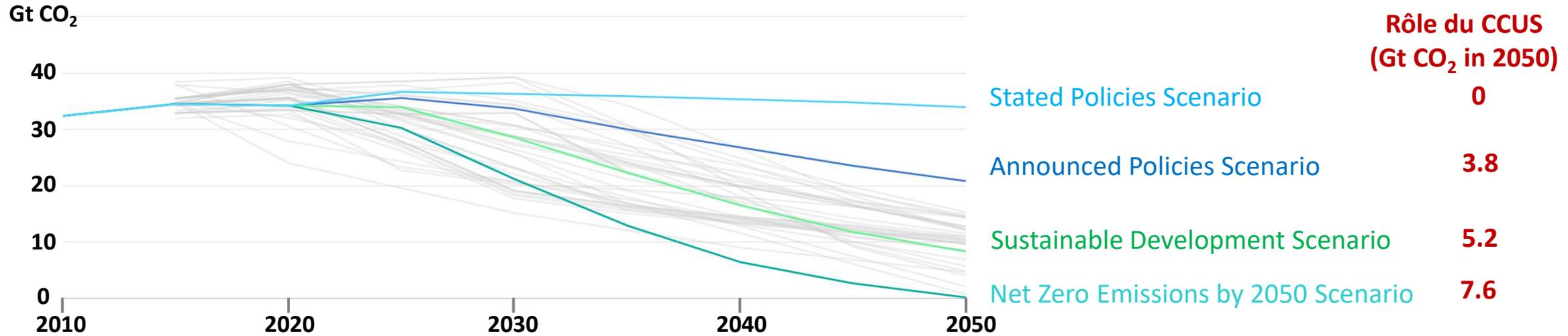
3b Utilisation

Utilisation directe ou conversion du CO₂
en produits valorisables



UNE FILIÈRE INCONTOURNABLE POUR ATTEINDRE LA NEUTRALITÉ CARBONE

Climate,
environment
and circular
economy

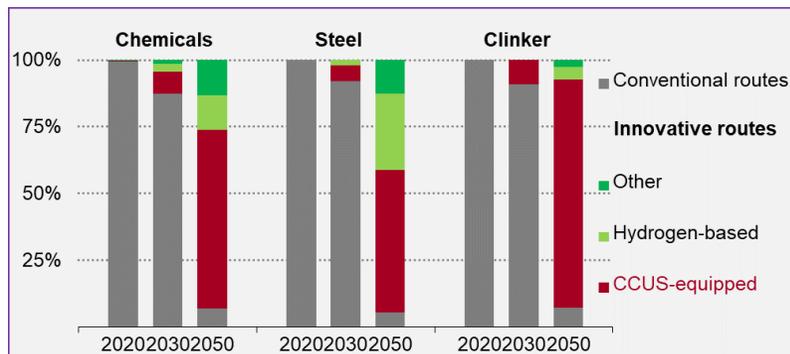


Source : IEA, 2021

Une technologies clé de décarbonation

➤ Décarboner certains secteurs industriels

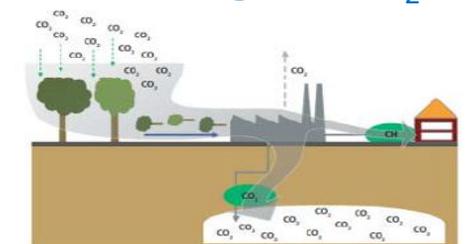
- Production d'énergie
- Industrie lourde



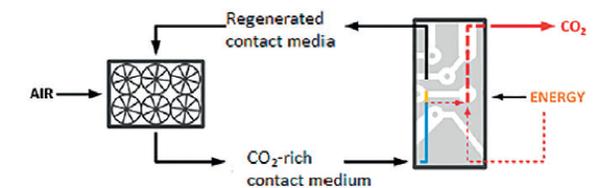
Source : IEA, 2021

➤ 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

Climate,
environment
and circular
economy

40 Mt CO₂
captés et stockés /an

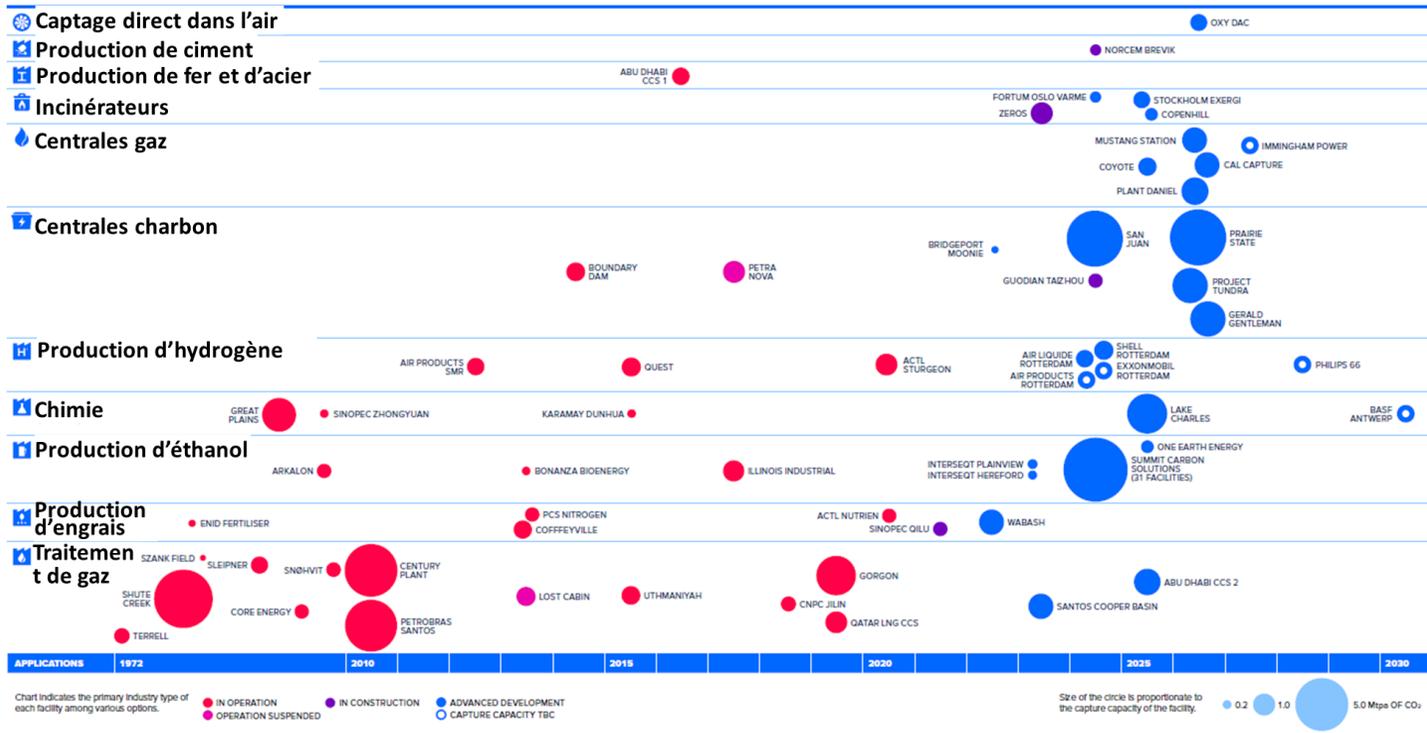


FIGURE 9 CCS PROJECTS BY SECTOR AND SCALE (BY CO₂ CAPTURE CAPACITY) OVER TIME

135

projets grande échelle en 2021

- 27 en opération
- 2 interrompus
- 4 en construction
- 58 en étape de développement avancé
- 44 en étude

pour une capacité de
150 Mt CO₂/an

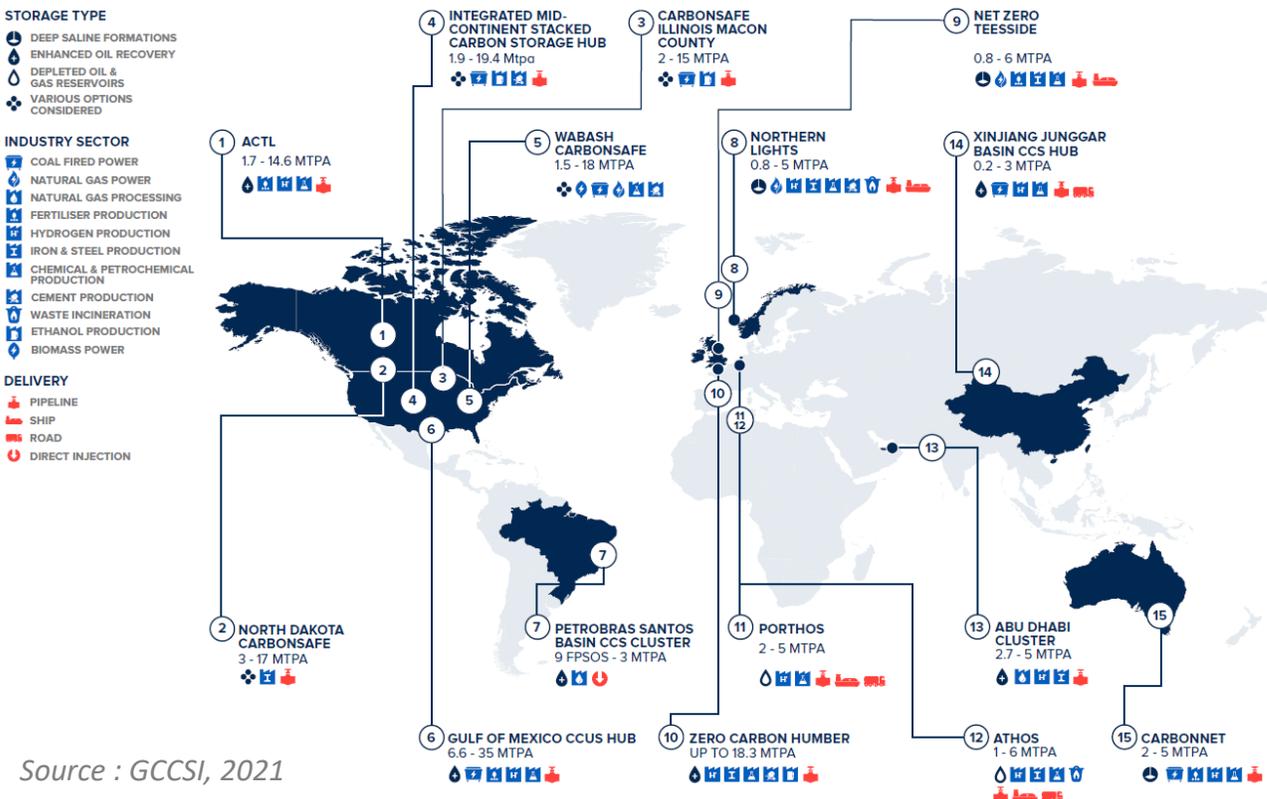
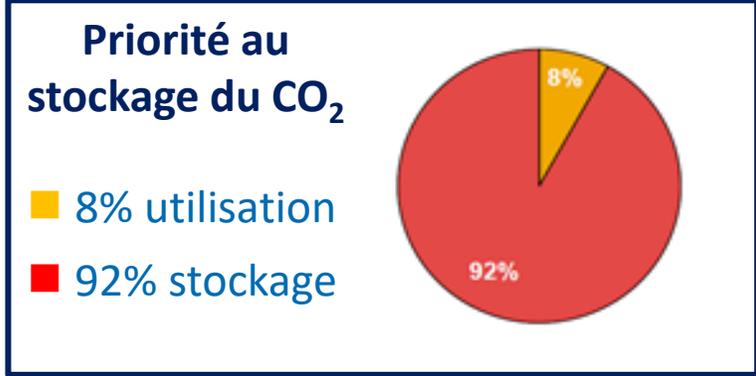
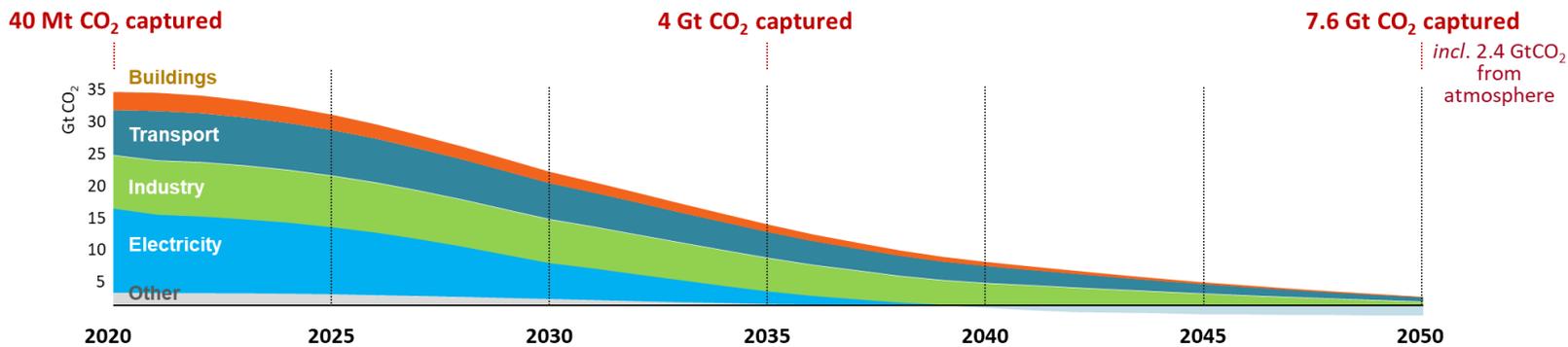
Source : GCCSI, 2021



UN ENJEU DE DÉPLOIEMENT À GRANDE ÉCHELLE

... DÈS 2030

Climate,
environment
and circular
economy



Source : IEA, 2021

Développement de « hubs régionaux » associés à des clusters industriels

- ✓ Plusieurs émetteurs connectés à un réseau de transport
- ✓ Proximité de zones de stockages

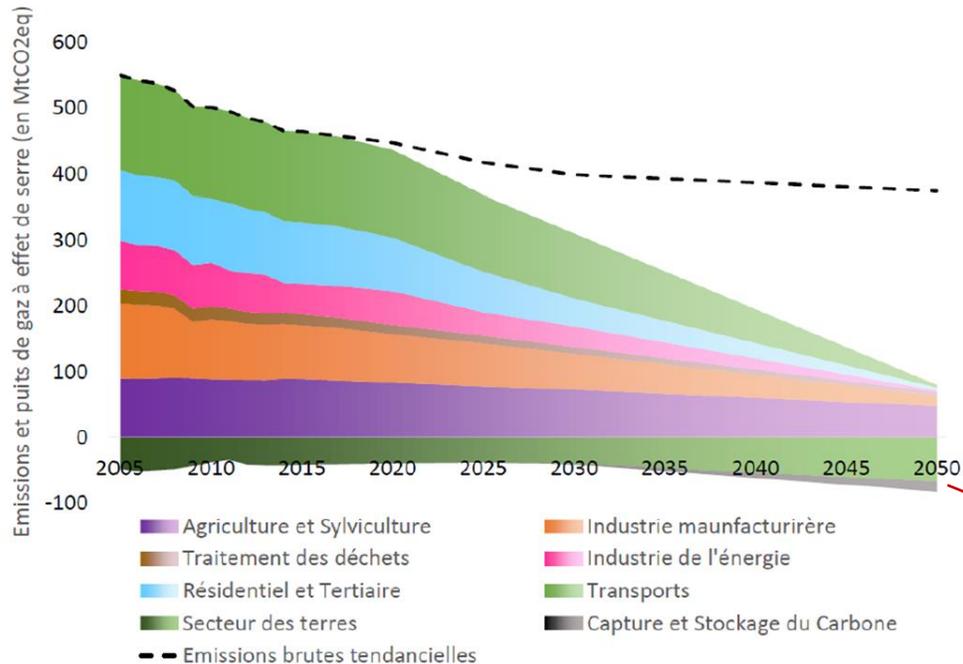
afin de

- Mutualiser les risques d'investissement
- Réduire les coûts unitaires de transport/stockage
 - Economies d'échelle
 - Synergies commerciales

Source : GCCSI, 2021

ET EN FRANCE ?

- Décarboner totalement la production d'énergie @ 2050
- Réduire les consommations d'énergie dans tous les secteurs
- Diminuer les émissions non liées à la consommation d'énergie
- Augmenter les puits de carbone (naturels & technologiques)

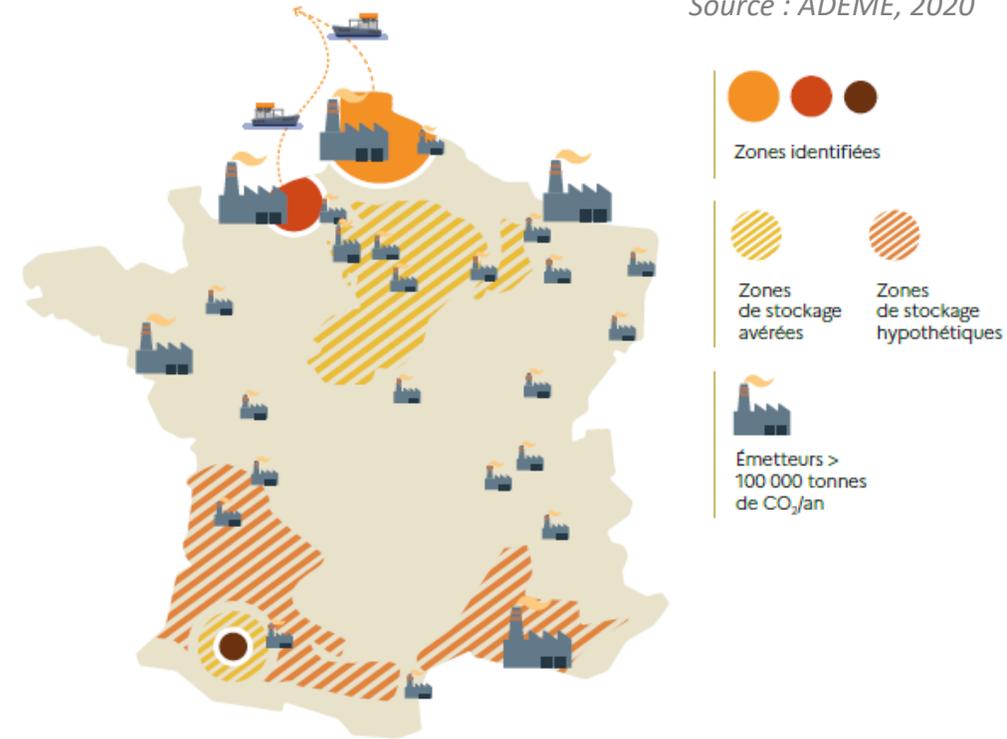


Captage et stockage du CO₂ → 15 MtCO₂/an

- 5 Mt → Industrie
- 10 Mt → Bioénergie avec captage et stockage du CO₂

Potentiel identifié par l'ADEME

Source : ADEME, 2020



Hauts-de-France (Dunkerque) 15 MtCO₂/an

- ⊕ Possibilité de stockage offshore (avec la Mer du Nord)
Gros volumes de CO₂ pour la mise en place d'infrastructures de transport de CO₂
- ⊖ Verrou réglementaire à lever sur la possibilité d'exporter les émissions de CO₂ hors du territoire et par bateau
Coût minimal estimé à 100 €/t CO₂

Normandie (Le Havre-Rouen) 6 MtCO₂/an

- ⊕ Interconnexion avec le hub CO₂ de Dunkerque pour stockage offshore (avec la Mer du Nord)
Gros volumes de CO₂ pour la mise en place d'infrastructures de transport de CO₂
- ⊖ Verrou réglementaire à lever sur la possibilité d'exporter les émissions de CO₂ hors du territoire et par bateau
Coût minimal estimé à 125 €/t CO₂
Pérennité des sites (secteurs industriels qui seront impactés par la transition énergétique)

Nouvelle Aquitaine (Lacq) 3 MtCO₂/an

- ⊕ Infrastructures existantes (ancien gisement de gaz)
Coût minimal estimé à 88 €/t CO₂
- ⊖ Faible volume de CO₂
Zone de stockage onshore

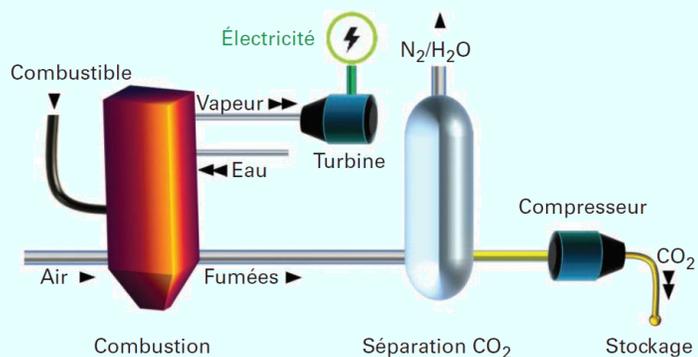
LE CAPTAGE DE CO₂

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

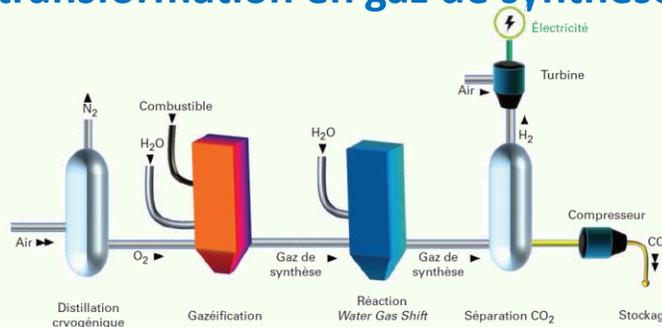
Séparer le CO₂ des fumées de combustion à l'aide de technologies



- 😊 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)

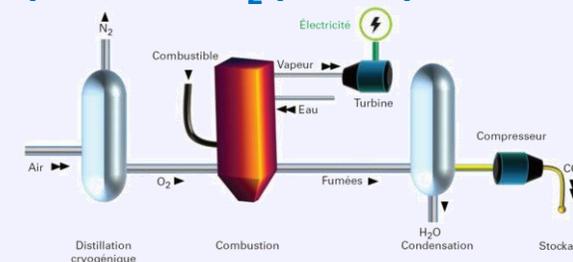


Spécifique au reformage du gaz ou gazéification charbon et biomasse

- 😊 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

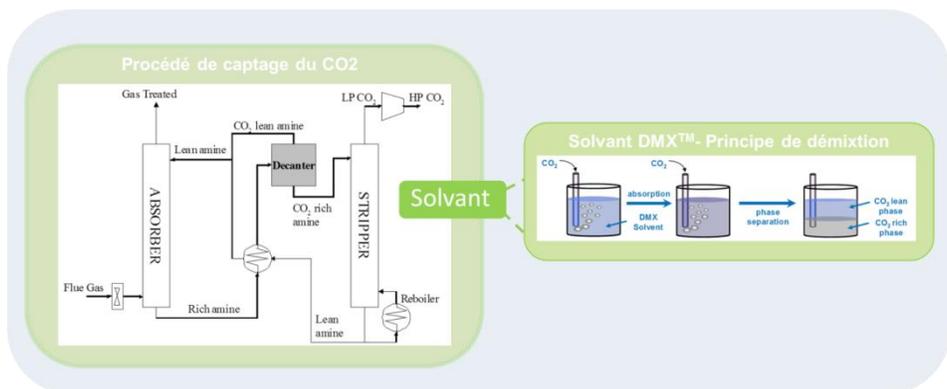
LE CAPTAGE DE CO₂

UN EXEMPLE DE PROCÉDÉ FRANÇAIS

Le procédé DMX™ de captage du CO₂

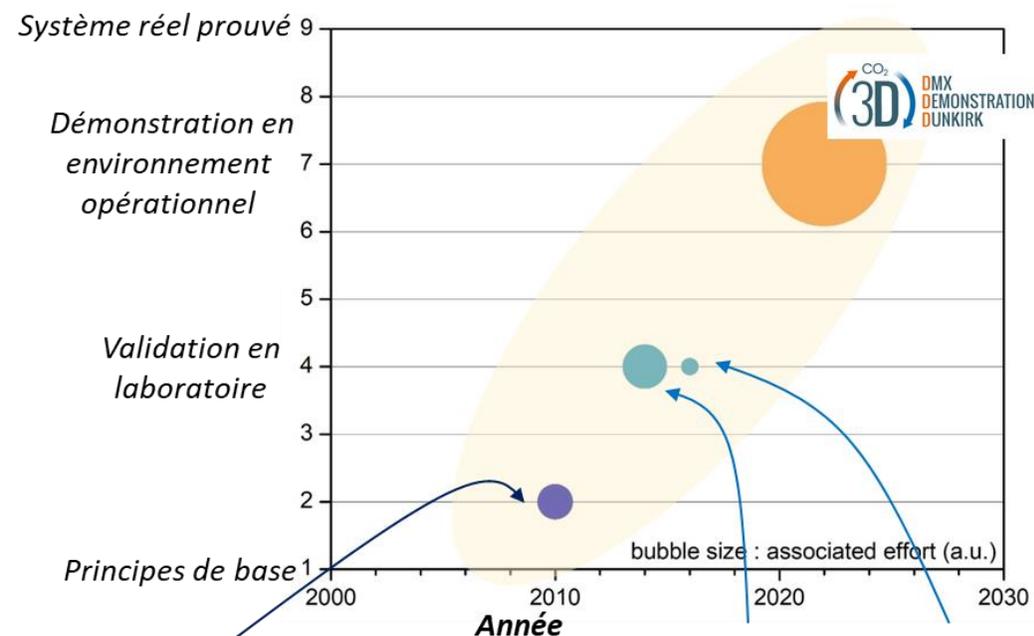
Un procédé post-combustion par solvant démixant...

... fruit de 15 ans de recherche @ IFPEN

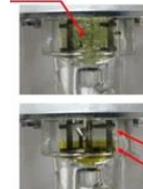


- **Haut potentiel de réduction de pénalité énergétique et de coût de captage du CO₂**
 - Faible consommation de vapeur
 - 2,3 à 2,9 GJ/tCO₂ en fⁿ du cas applicatif et du taux de captage
 - Solvant thermiquement stable avec un faible taux de dégradation
- **Production de CO₂**
 - Très pur (99,7%)
 -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

Maturité technologique



Tests en labo @ IFPEN



Cas Centrale à charbon

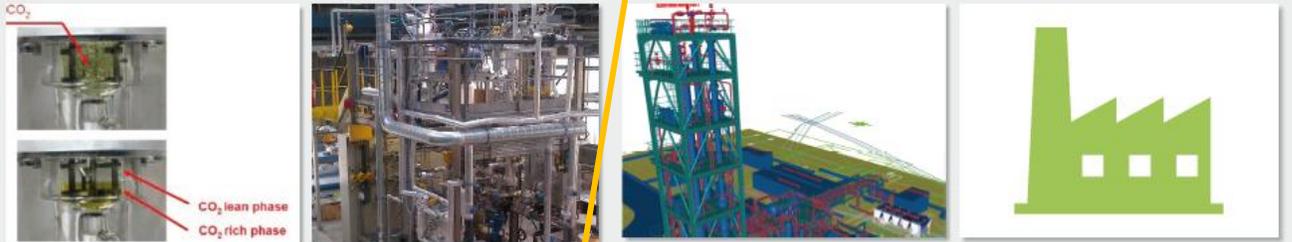


Cas Sidérurgie



LE CAPTAGE DE CO₂

UN EXEMPLE DE PROCÉDÉ FRANÇAIS EN DÉMONSTRATION SUR UN SITE FRANÇAIS



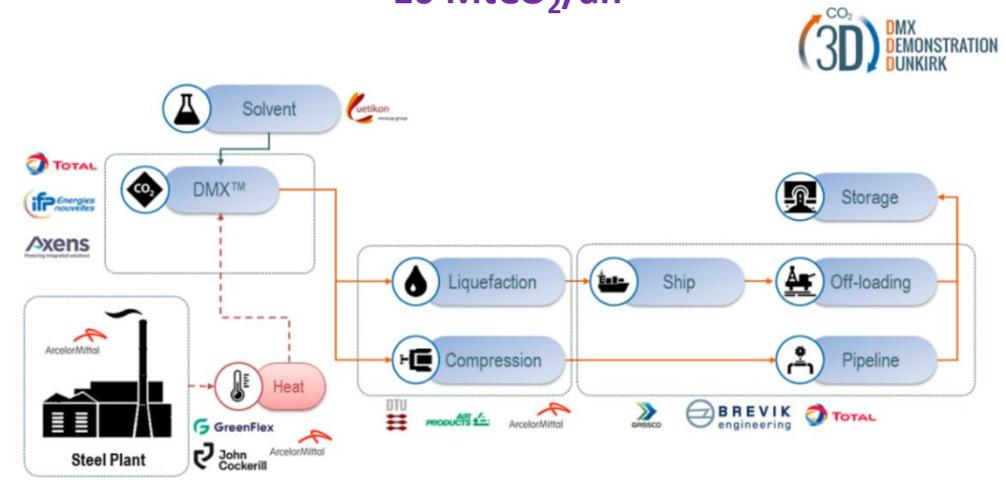
2019 – 2023

1. **Démontrer le procédé DMX™**
 - Démonstrateur sur gaz sidérurgiques (Arcelor Mittal, Dunkerque)

0,5 tCO₂ /h
2. **Préparer la construction de la 1^{ère} unité industrielle**

> 1M tCO₂/an
3. **Etudier la faisabilité d'un cluster CCS Dunkerque-Mer du Nord @ 2035**

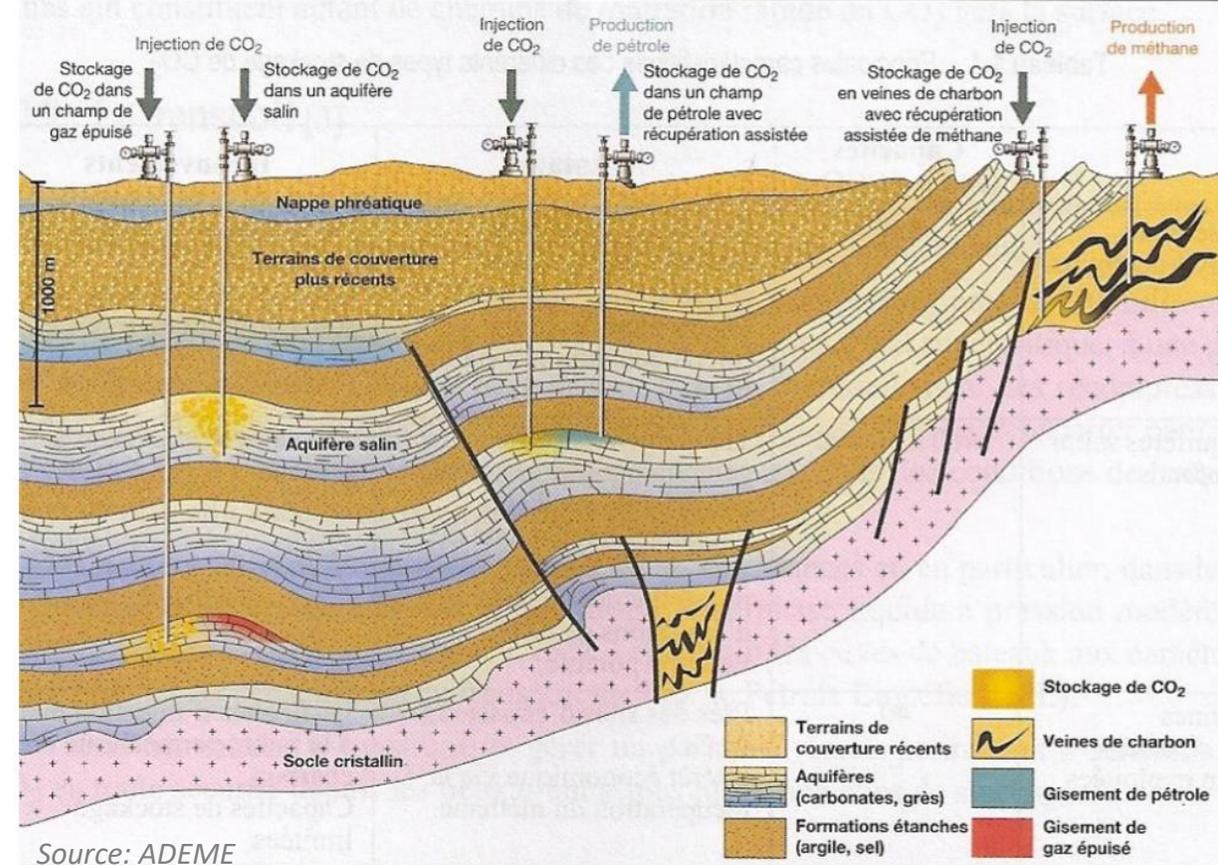
10 MtCO₂/an



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

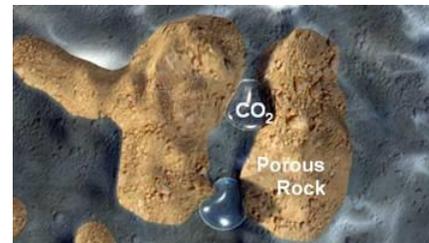
Accumulation sous la couverture



Source: CO2 Capture Project

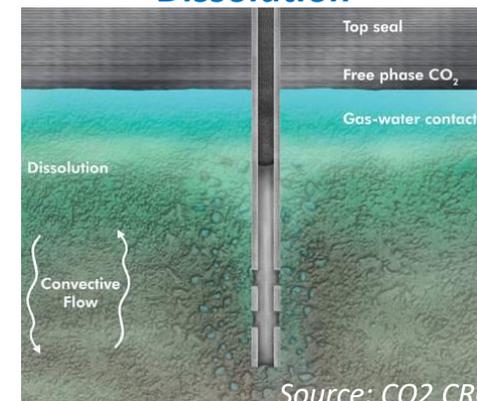
Piégeage résiduel

Immobilisation dans des pores



Source: CO2 Capture Project

Dissolution



Source: CO2 CRC

Minéralisation



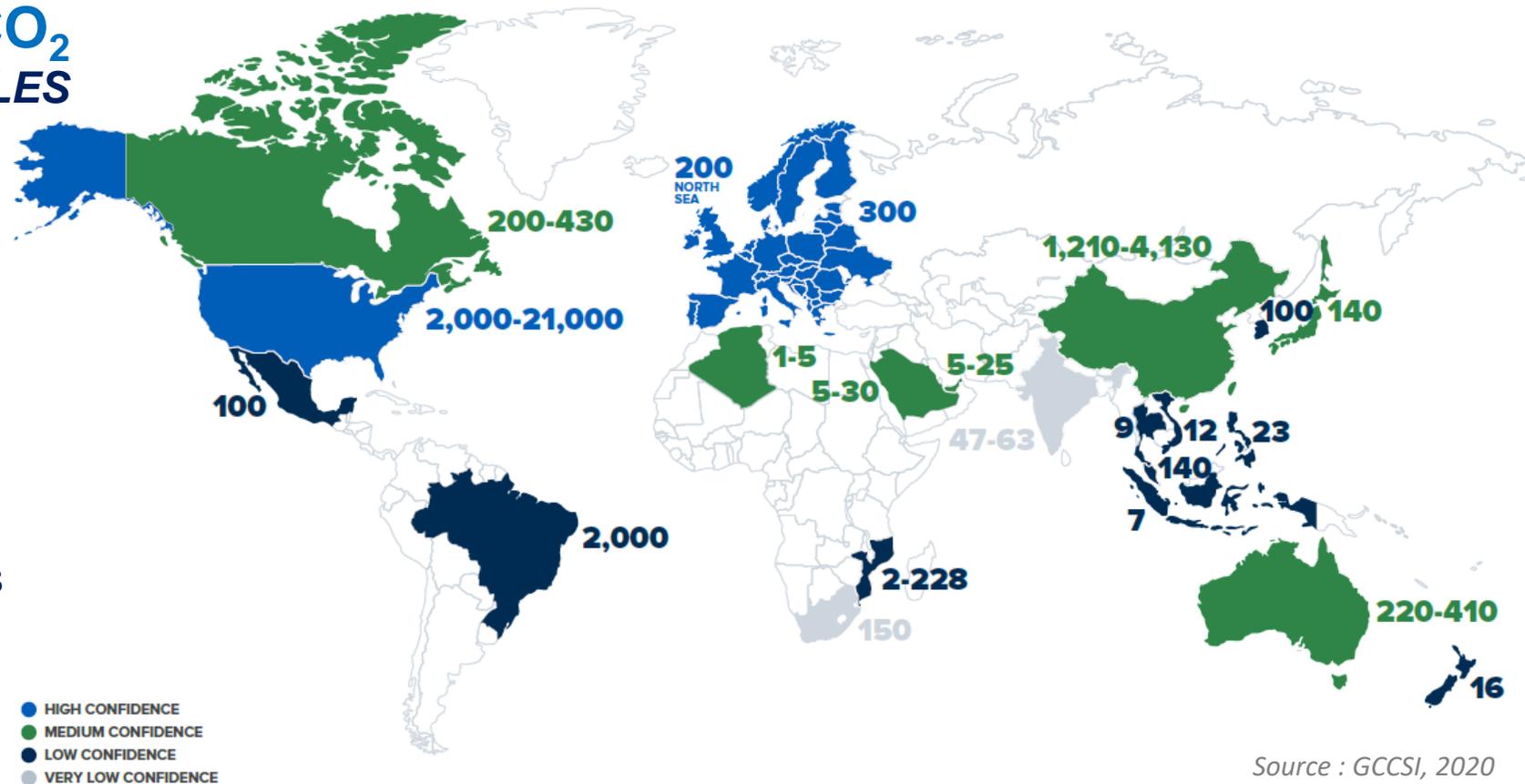
Mineral trapping of CO₂

Source: CO2 Capture Project

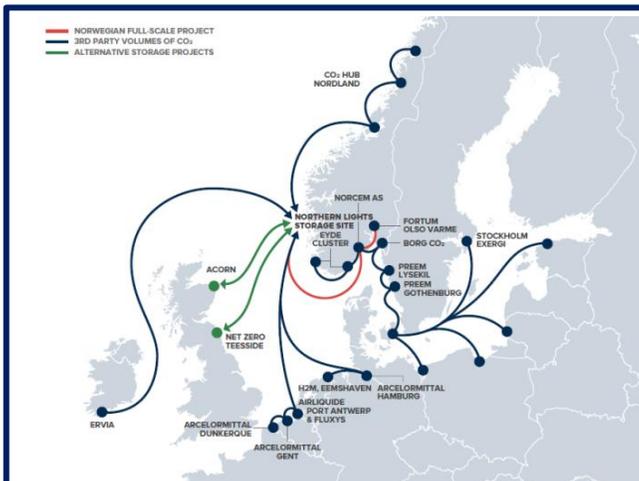
LE STOCKAGE DU CO₂

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 centaines de sites
 - 10 à 30 sites de stockage à développer par an d'ici 2050



Source : GCCSI, 2020



Le projet NorthernLights

Une solution de transport et stockage du CO₂ pour l'industrie européenne

- Phase 1 : 1,5 Mt CO₂ /an
- Phase 2 : 5 Mt CO₂ /an



Northern Lights' planned CO₂ receiving terminal



Source : Developing Longship Key lessons, Gassnova 2020

- **La filière CCUS**
 - 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 80t CO₂ (ETS)

	Centrale charbon supercritique	Cycle combiné gaz naturel	Sidérurgie	Cimenterie	Traitement gaz naturel	Engrais (ammoniac)	Biomass to Ethanol
Coûts CO ₂ évité US/ ton CO ₂							
Europe	70-121	92-138	72-113	130-188	25-27	29-33	25-27
USA	74	89	77	124	22	25	21
Surcoûts liés au CCS	US\$/MWh	US\$/MWh	US\$/ ton acier	US\$/ton ciment	US\$/GJ	US\$/ton engrais	US\$/litre
USA	60 à 70%	57%	30-41%	68%	2%	3-4%	4-5%

Coûts complets du CCS en US\$ / tonne de CO₂ évité et surcoût sur le produit (MWh électrique, tonne d'acier, tonne de ciment...) lié à la mise en place d'une chaîne CCS. D'après Irlam, 2017.

L'étude suppose un transport du CO₂ par gazoduc sur 100 km, et un stockage onshore dans une formation géologique profonde (1700 m) et de perméabilité moyenne (120 mD) (contexte américain Mid-West). Les coûts de transport et de stockage considérés sont compris entre 7 et 12 US \$ / tonne de CO₂ pour les technologies de production d'électricité, et de 11 US \$ / tonne de CO₂ pour les cas industriels.

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