



Innover pour un monde
décarboné et durable

© I F P E N - 2 0 2 5



CCUS : captage, stockage et valorisation du CO₂

Florent Guillou, IFPEN

Organisme public de R&I (EPIC)

IFP School
 > 500 diplômés/an,
 50 nationalités

Groupe Industriel
 > 4500 personnes

Climate,
 environment
 and circular
 economy



Champ d'action international

Domaines : **Energie, Mobilité** et **Environnement**



2 sites Rueil / Lyon
1531 personnes*
 dont **1078** dédiées R&I
130 (post)doctorants

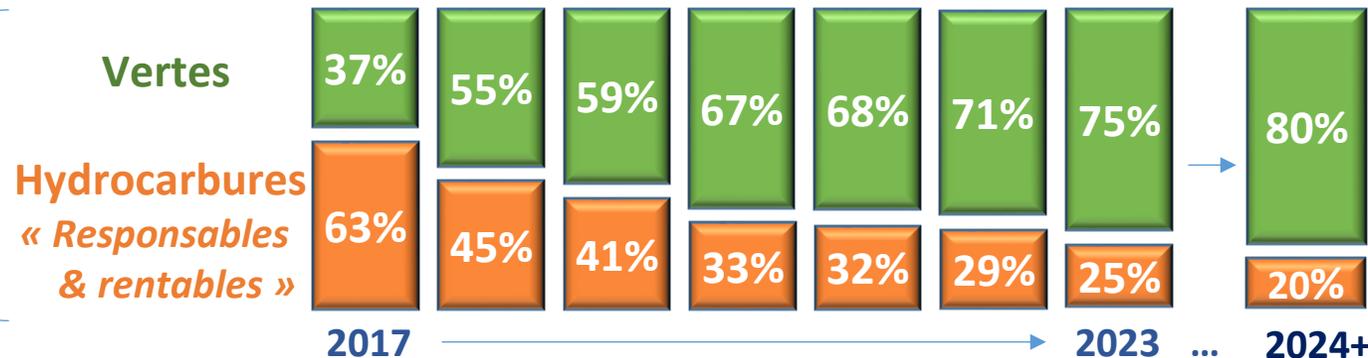


Dotation budgétaire* : **124,1 M€**
 Ressources propres* : **156,5 M€**



30% du budget dédié à la Recherche Fondamentale

Activités



* Données 2023

Technologies bas-carbone
4^e organisme de recherche mondial
 Leader sur le CCUS et les carburants alternatifs

Patents and the energy transition
 Global trends in clean energy technology innovation
 April 2021
 Période 2000-2019

Recyclage chimique/biologique des plastiques
5^e déposant mondial
1^{er} organisme de recherche mondial

Patents for tomorrow's plastics
 Global innovation trends in recycling, circular design and alternative sources
 October 2021
 Période 2010-2019

Technologies hydrogène
2^e organisme de recherche mondial

Hydrogen patents for a clean energy future
 A global trend analysis of innovation along hydrogen value chains
 January 2023
 Période 2011-2020

Technologie CCS & CCU

Enjeux et conditions de réussite





TECHNOLOGIE CCS & CCU - DE QUOI PARLE-T-ON ?

D'UNE SOLUTION DE DÉCARBONATION

Climate,
environment
and circular
economy

OUR SOLUTIONS ACROSS THE ENTIRE CCUS CHAIN

Capture

- DMX™ process
- Chemical Looping Combustion (CLC) process
- Breakthrough processes: process intensification, eco-efficient solvents, Direct Air Capture
- Design of integrated solutions



Transport



- Compression process
- Purification solutions
- Gas specification (CO₂ quality)

Conversion

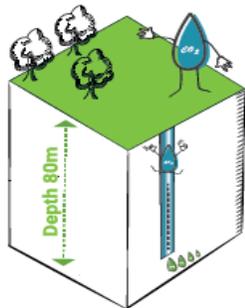


- E-chemical
- E-fuels / e-biofuels / solar fuels



Storage

- Site screening & characterization
- Injectivity
- Monitoring
- Well integrity reuse of O&G wells



Assessment scenarios



- Economy
- Environmental impact assesment (LCA - Life Cycle Analysis)
- Regulatory framework

Emissions control

- Environmental gas monitoring solution (Flair Suite)
- Leakage detection
- Securing storage sites





ELEMENTS DE CONTEXTE TECHNOLOGIE CCS & CCU (1/2)

(1/2)

Réduction des émissions incompressibles (hard to abate)

- Industrie (sidérurgie, cimenteries, chimie...)
- Énergie



Production d'H₂ bas-carbone (H₂ bleu) : vaporéformage de méthane avec captage de CO₂



Émissions négatives (puits de carbone technologiques)

- DACCS / BECCS



Économie circulaire du carbone / défossilisation via l'Utilisation du CO₂ capté → e-carburants, e-produits

- DACCU / BECCU



@ 2035 : 400-600 Mt/an CO₂ capté
Estimations McKinsey, WoodMcKensie

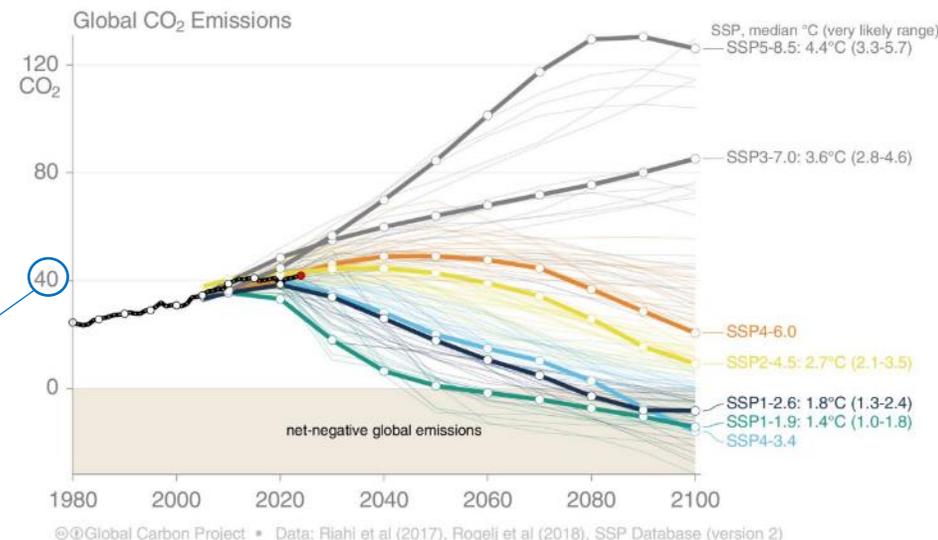


@ 2030 : 50 Mt/an CO₂ stocké
 @ 2040 : 280 Mt/an CO₂ capté (DAC : 60 Mt/an)
 @ 2050 : 450 Mt/an CO₂ capté (DAC : 150 Mt/an)

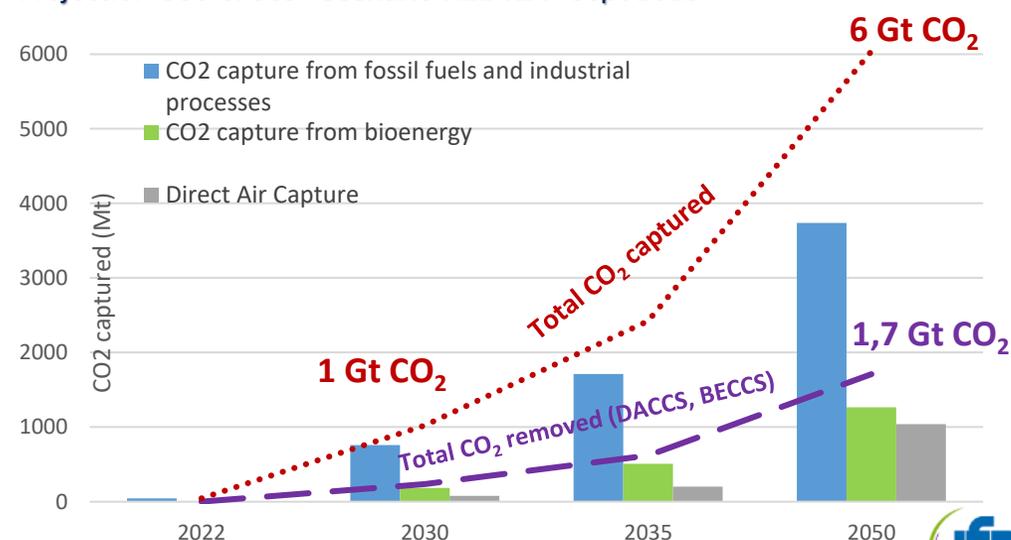
Management Carbon Strategy – fev 2024

> 80 % CO₂ à capter
Fumées industrielles
(impuretés : O₂, NO_x, SO_x - % CO₂ : 10-18)

Aujourd'hui
~40 Gt CO₂/an



Projection CCU & CCS - Scénario NZE-IEA - Sept 2023



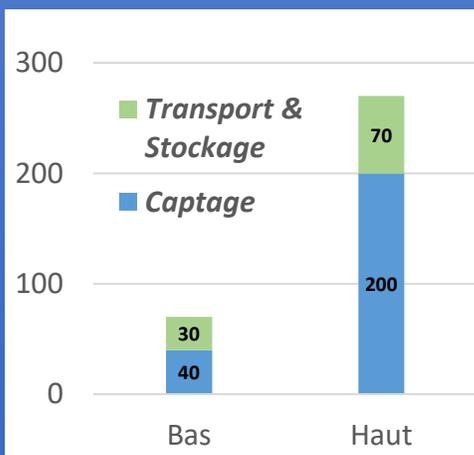


ELEMENTS DE CONTEXTE TECHNOLOGIE CCS & CCU

PRINCIPAUX ENJEUX POUR LE DÉPLOIEMENT DE LA FILIÈRE

Climat,
Environnement
et Économie
circulaire

Réduire les coûts sur l'ensemble de la chaîne CCUS... en particulier le captage



EU @ 2030 : 70-270 €/t CO₂

Stimuler les investissements

- Stratégies/politiques nationales (Fr CCUS 2023) et européennes (NZIA 2023, Indus. C Managem^t Strategy 2024)
- Financements publics (EU-Innov. Fund, France 2030, USA-IRA) & mécanismes financiers (CCfd)
- **Réglementation du marché carbone (EU-ETS : fin des quotas gratuits, MACF-CBAM)**
- Nouveaux marchés pour valoriser le CO₂ comme une ressource



Développer les infrastructures de transport & de stockage

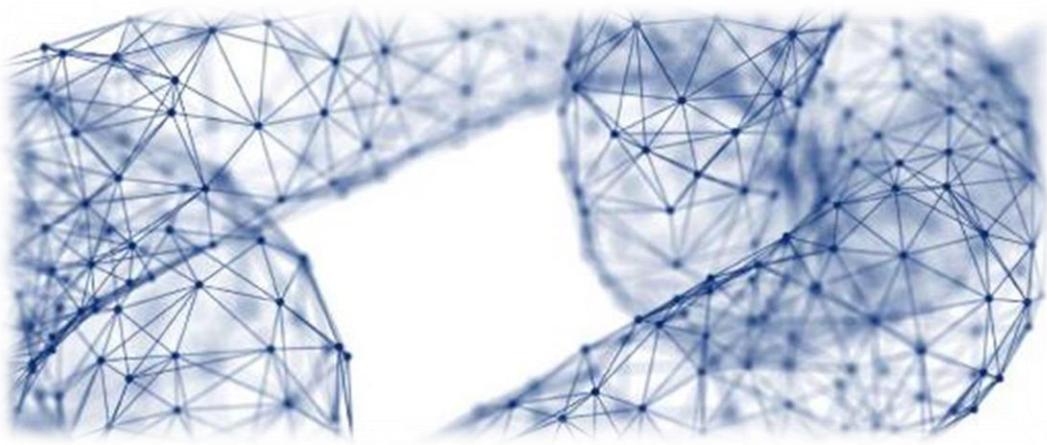
- Clusters & Hubs – mutualisation
- Accélérer le développement de sites de stockage
- Coordination / synergie requise entre les différents acteurs de la chaîne



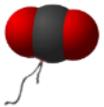
Sécuriser l'ensemble de la chaîne CCUS

- Stockage du CO₂ sûr et pérenne – Maîtrise des risques
- Monitoring sur toute la chaîne
- Perception sociétale





Challenges économiques au déploiement du CCS & CCU*



CCS, CCU* : Carbon Capture and Storage, Carbon Capture and Utilisation

MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE,
DES FINANCES
ET DE LA SOUVERAINÉTÉ
INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE

État des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France

Juillet 2024

Thème 2024

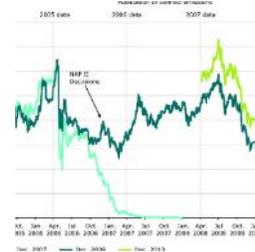


Le CCUS dans la transition écologique | IFP En...
**Déployer le CCUS : une question de
coûts et de planification des inf...**

CADRE LÉGISLATIF ET RÉGLEMENTAIRE EUROPÉEN



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.

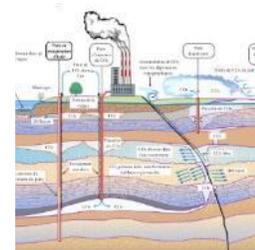
La Loi européenne sur le climat (2021): objectif de neutralité climatique 2050 juridiquement contraignant



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



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.

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



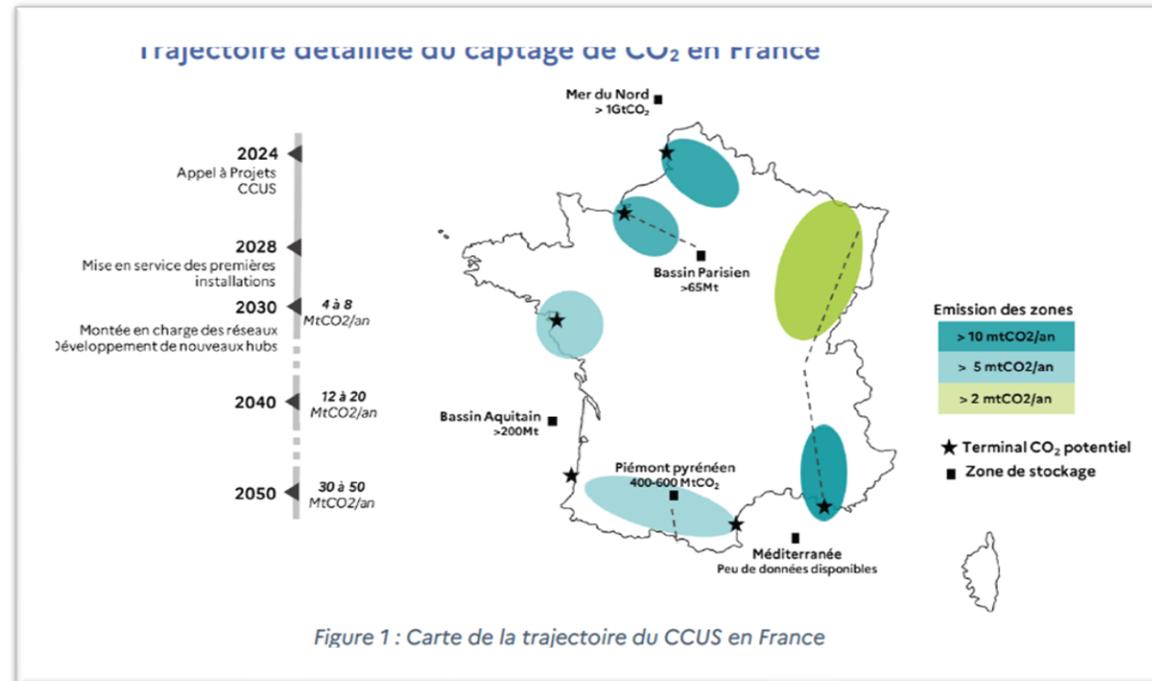
La Directive sur les Energies Renouvelables encourage le déploiement de combustibles CCU-based pour remplacer les combustibles fossiles





PERSPECTIVES DE DÉPLOIEMENT DU CCS & CCU (FRANCE - 2024)

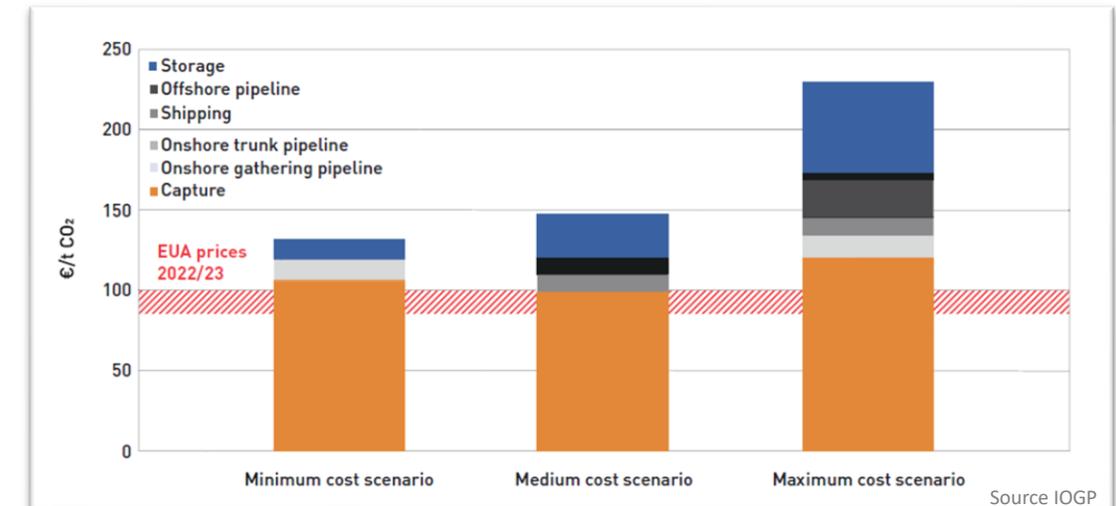
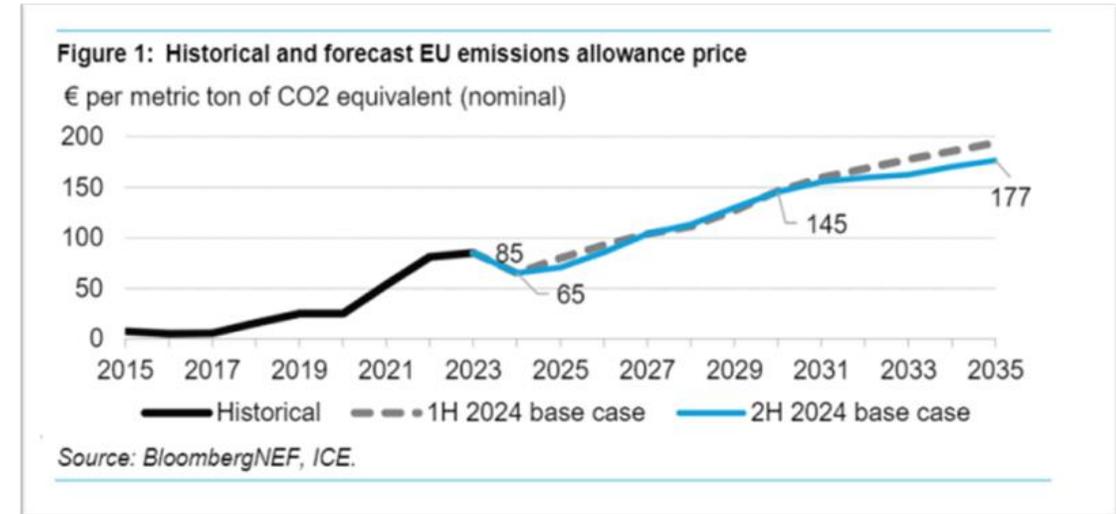
Les Etats se dotent d'une vision de long terme CCS & CCU Importance des Contributions Nationales Déterminées (NDCs)



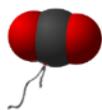
- **Cible:** les technologies de captage visent les secteurs **sans autres alternatives de réduction d'émissions**
- **Démarrage:** déployer les **premières chaînes CCS & CCU à l'horizon 2030** sur les sites industriels couverts par le marché du carbone (EU-ETS): *ciment, chimie, acier et aluminium*
- **Objectif:** d'ici à 2035 capter **4 à 8 Mt CO₂/an**, notamment au niveau des hubs industriels portuaires du Havre, Dunkerque, Saint-Nazaire et de l'axe Rhône.

UN PRIX CARBONE (EU-ETS) POUR SOUTENIR LES INVESTISSEMENTS CCS & CCU

- Face aux coûts de la chaîne CCS & CCU la pénalité carbone sur l'EU-ETS :
 - 80€/tCO₂ en 2024, est envisagée à 180€/tCO₂ en 2035
 - dépend de l'état de l'économie (exogène): incertaine et fluctuante
 - peu incitative face aux investissements CCS & CCU
- La chaîne commerciale CCS est nouvelle pour les industriels – ceux-ci doivent s'associer:
 - CAPEX élevés au démarrage (50 à 75 % des coûts)
 - Selon le type de chaîne CCS : 130 to 230 €/tCO₂
- Risques financiers importants
- Besoin d'un Monitoring Reporting et Verification du CO₂ le long de la chaîne CCS & CCU



Panorama du captage de CO₂

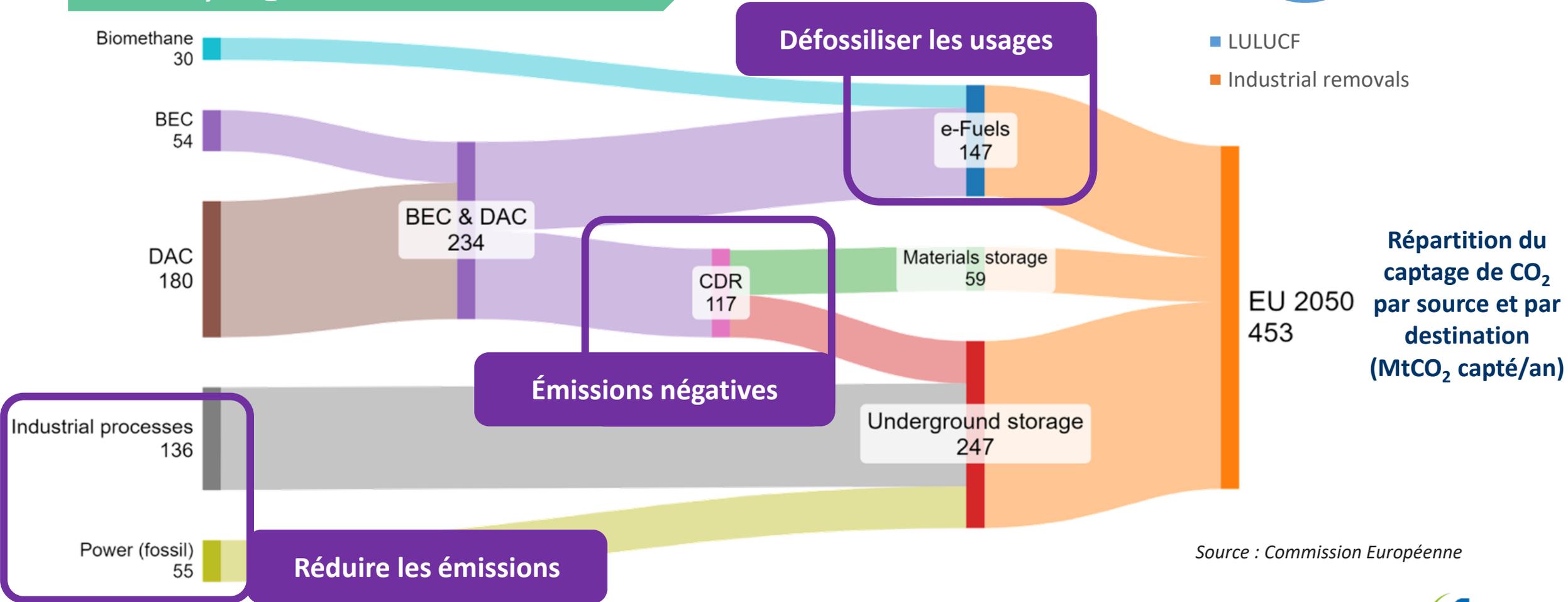
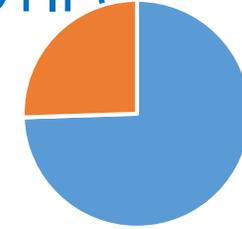


CAPTAGE DU CO2 : UN CONTEXTE EN ÉVOLUTION ET 3 OBJECTIFS

Le scénario européen « neutralité carbone »

Estimation contribution DAC en EU
~ 180 Mt /an @ 2050

Parts respectives des puits naturels et industriels dans l'objectif "net zéro" de l'Europe en 2050



Source : Commission Européenne

CAPTAGE DU CO₂

PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE CO₂

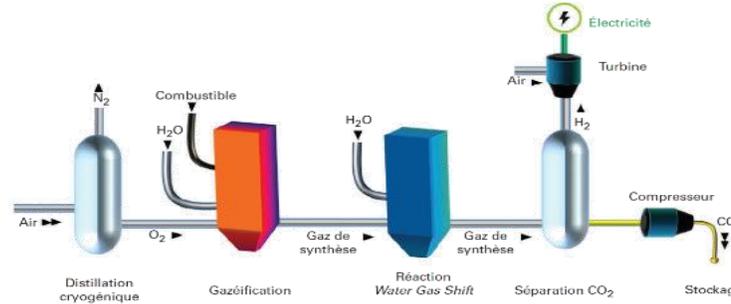
IFPEN est engagé en R&I sur toutes ces technologies, en collaboration avec des partenaires, à différents niveaux de maturité technologique (TRL)

Climat,
Environnement
et Économie
circulaire

PRÉCOMBUSTION

Décarboner le combustible avant son utilisation

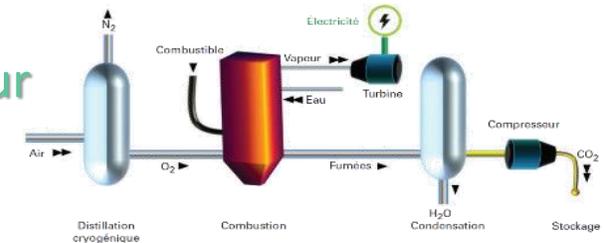
Production d'électricité, d'H₂ décarboné (H₂ « bleu »)



OXYCOMBUSTION

Combustion à l'oxygène pur pour produire de l'énergie et récupérer du CO₂ pur

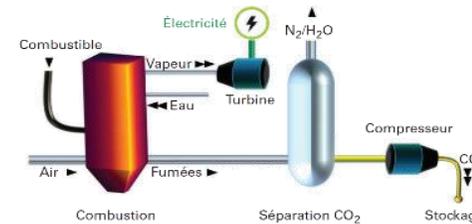
Production d'énergie...



POST-COMBUSTION

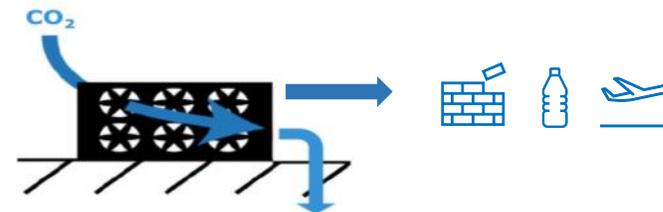
Décarboner les effluents en sortie de procédés (Point source)

Production d'énergie, cimenteries, sidérurgies, BECCS, biogaz



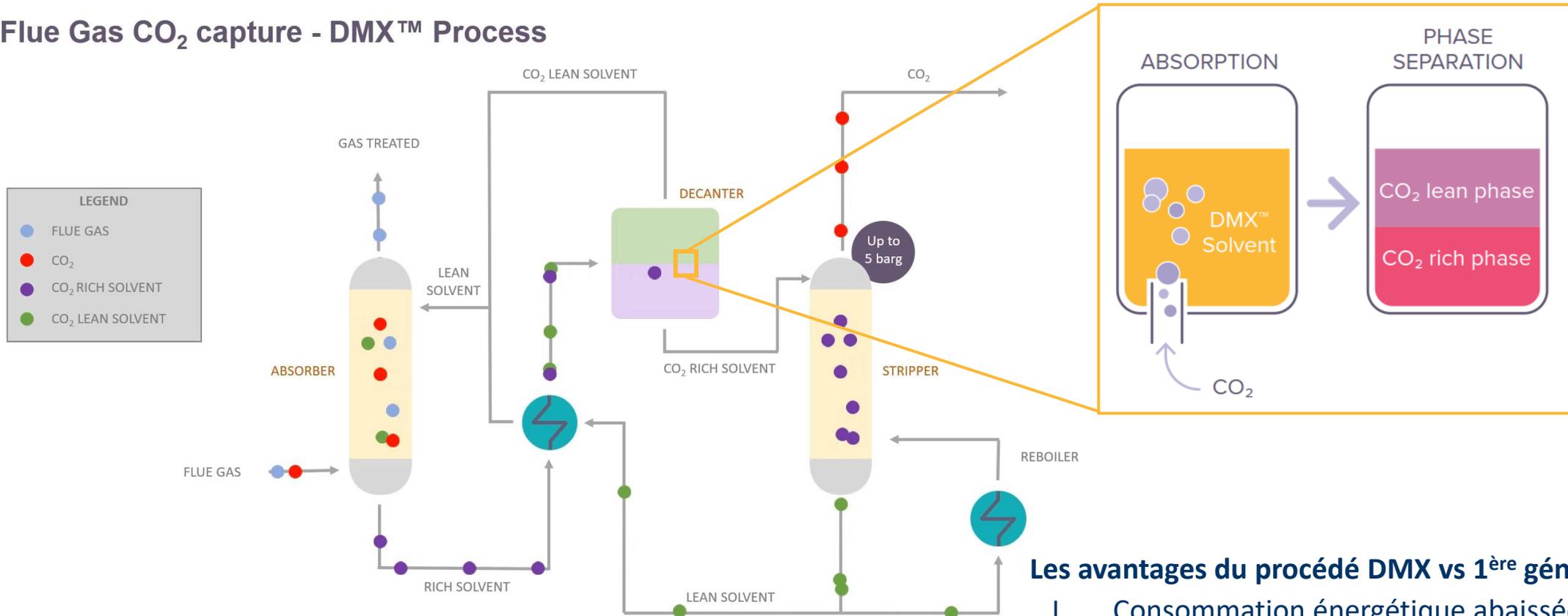
DIRECT AIR CAPTURE

Capter le CO₂ directement dans l'atmosphère (400 ppm)



CAPTAGE POST-COMBUSTION SUR FUMÉES : PROCÉDÉ DMX™ DE SECONDE GÉNÉRATION

Flue Gas CO₂ capture - DMX™ Process



En chiffres :

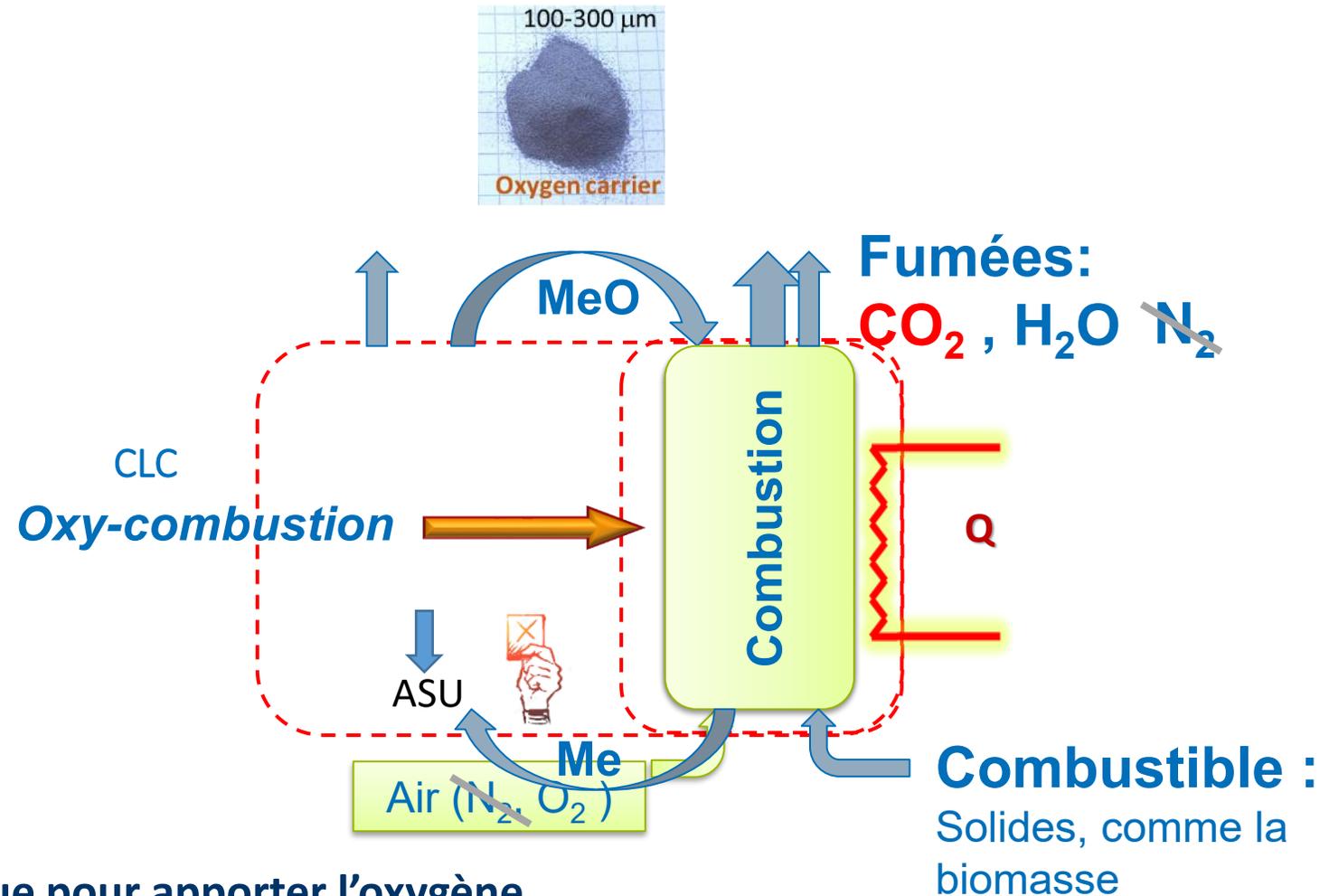
~2,5 GJ/t_{CO₂} selon les applications

Soit typiquement de l'ordre de 10% de perte de rendement sur une centrale électrique thermique

Les avantages du procédé DMX vs 1^{ère} génération

- I. Consommation énergétique abaissée de 30%
- II. Solvant plus stable en température et à l'oxydation
- III. CO₂ très pur et à haute pression

COMBUSTION EN BOUCLE CHIMIQUE : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



Utilisation d'un oxyde métallique pour apporter l'oxygène

Intérêt: faible pénalité énergétique car oxycombustion sans distiller l'air pour produire O_2 .

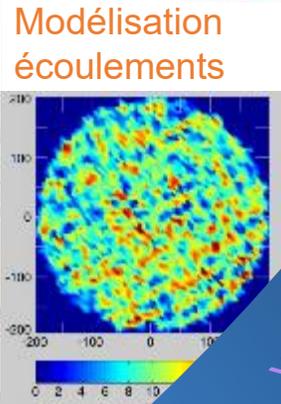
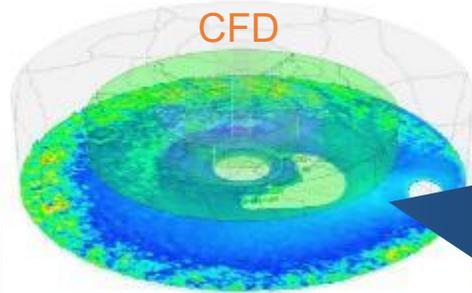
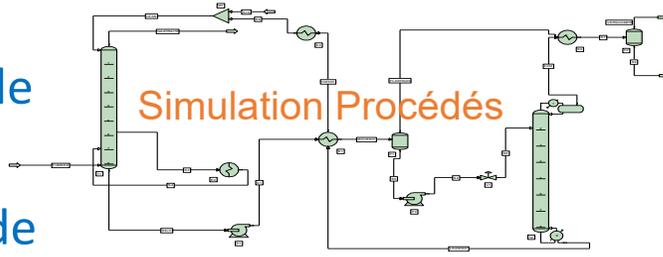
De l'ordre de 5% de perte de rendement électrique par rapport à son équivalent sans CCS

DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS

Montée en échelle
Point clef du
développement de
procédés à
destination de
l'industrie.

A chaque étape
expérimenter et
comprendre à
l'échelle juste :

- Dans le temps
- Dans l'espace



**PREMIÈRE
INDUSTRIELLE**



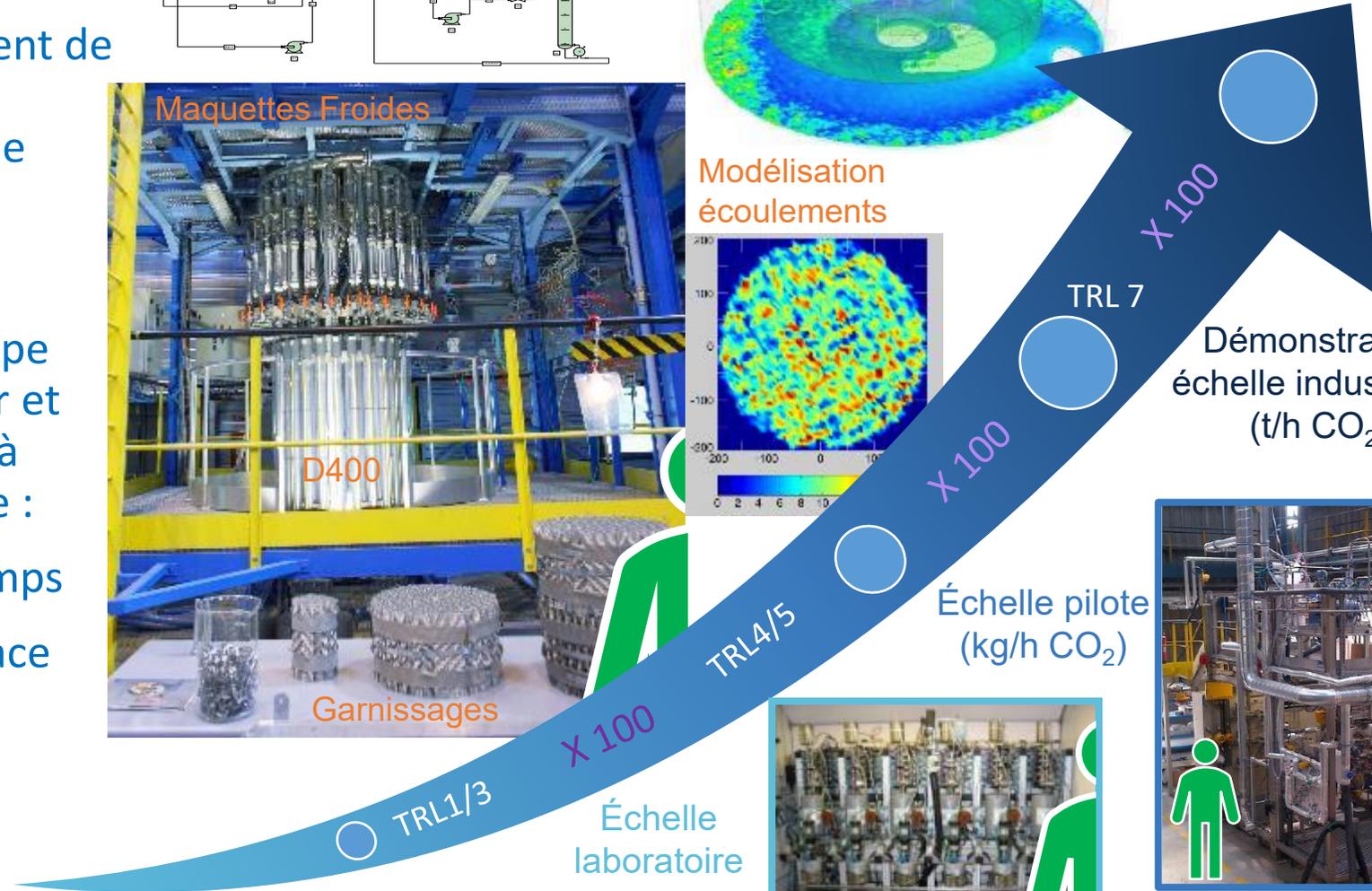
Démonstration
échelle industrielle
(t/h CO₂)



Échelle pilote
(kg/h CO₂)



Échelle
laboratoire



2 DÉMONSTRATEURS DE CAPTAGE DE CO₂

UNE ÉTAPE CLEF VERS L'INDUSTRIALISATION...
...ET L'ABOUTISSEMENT DE PLUS DE 15 ANS DE RECHERCHE !

Climat,
Environnement
et Économie
circulaire

Unités pilotes @ IFPEN



24 M€ (UE)



11 partenaires EU



5 ans (2019 ⇨ 2024)



0,5 t/h CO₂

DMX™

captage de CO₂ en
post-combustion de
2nde génération

Première
industrielle



TRL4



中欧污染物减排技术研究



7 ans (2017 ⇨ 2024)



9 partenaires



22 M€ (EU + Chine)



1 t/h
CO₂

Maquette
1MWth eq.

3 MWth

CLC

Combustion en
boucle chimique de
charges solides
(fossiles/biomasse)



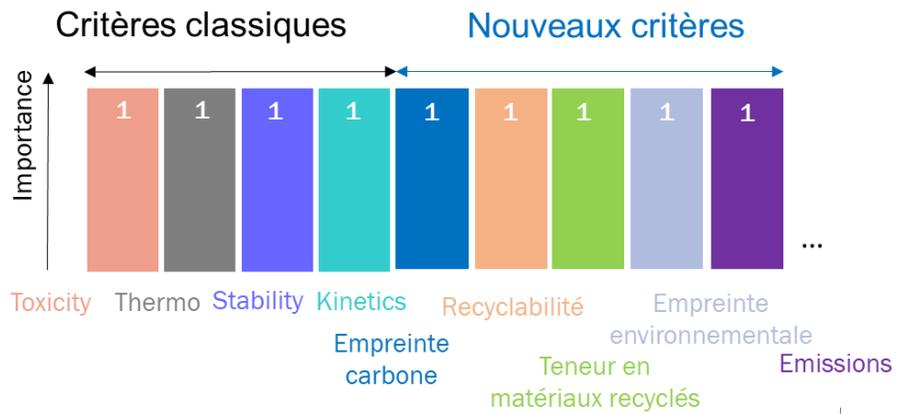
LES FUTURS DÉVELOPPEMENTS

Des technologies dédiées au CCS

Intensifier les procédés pour des unités plus compactes et plus accessibles pour les petits et moyens émetteurs



De nouveaux solvants avec de nouveaux critères de performances intégrant l'éco-conception



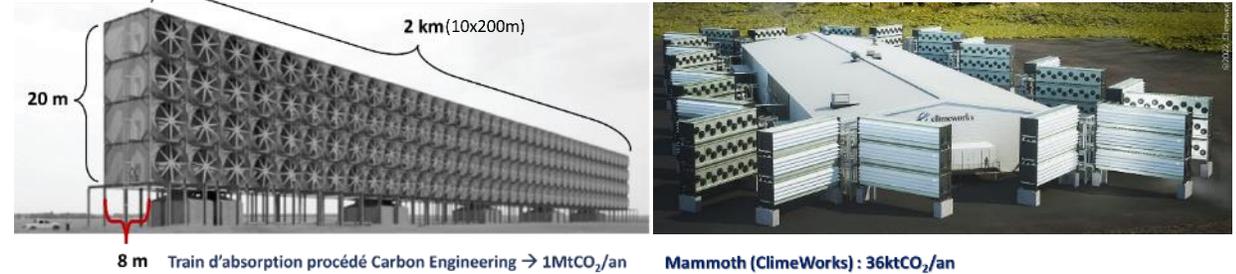
Approche systémique du produit = Éco-conception

Diversifier les sources de CO₂

Combustion de biomasse : BECCS

Basses teneurs : déchets, métallurgie et turbines à gaz

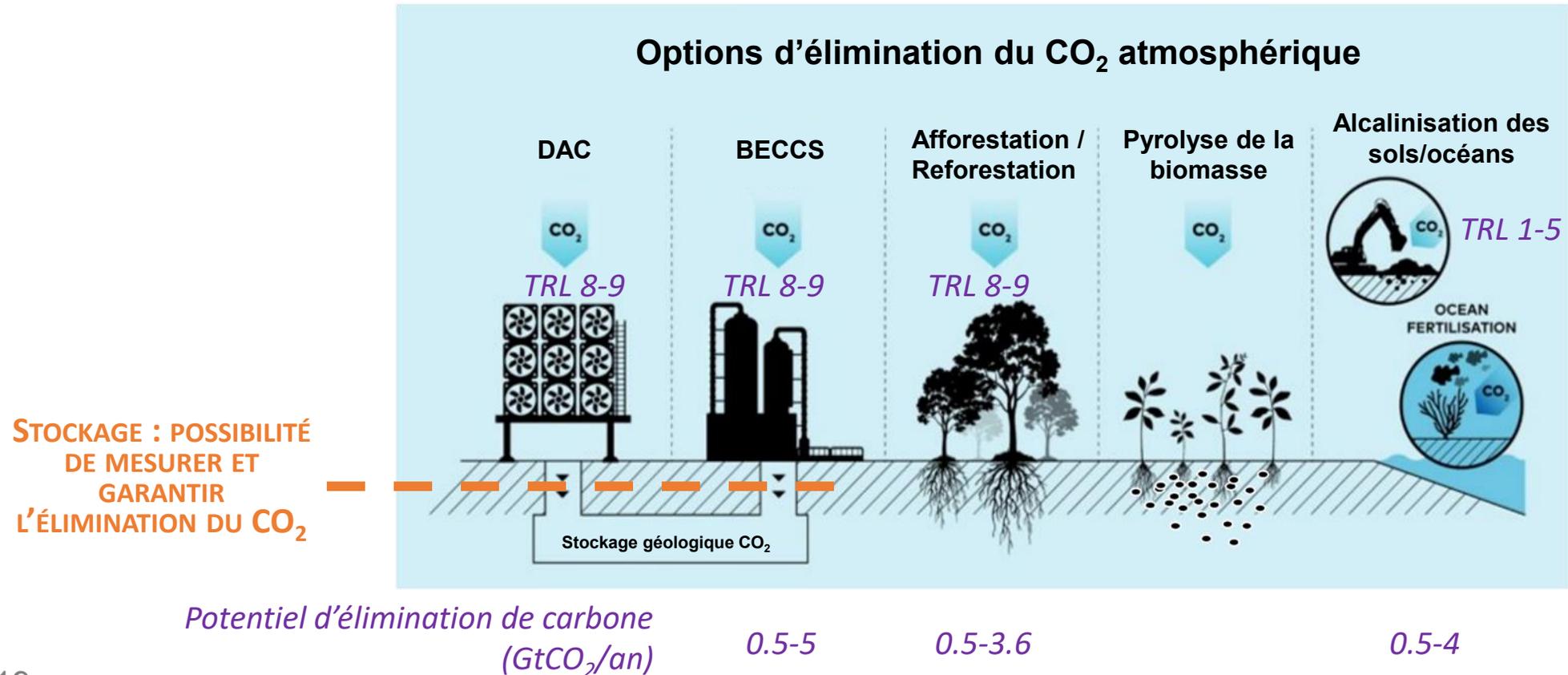
Très basses teneurs : captage du CO₂ atmosphérique (DAC, direct air capture) pour puits de carbone et valorisation de CO₂



Intégrer les énergies bas carbone : réduction de l'empreinte CO₂ du captage (électrification, intégration des renouvelables, couplage au nouveau nucléaire)

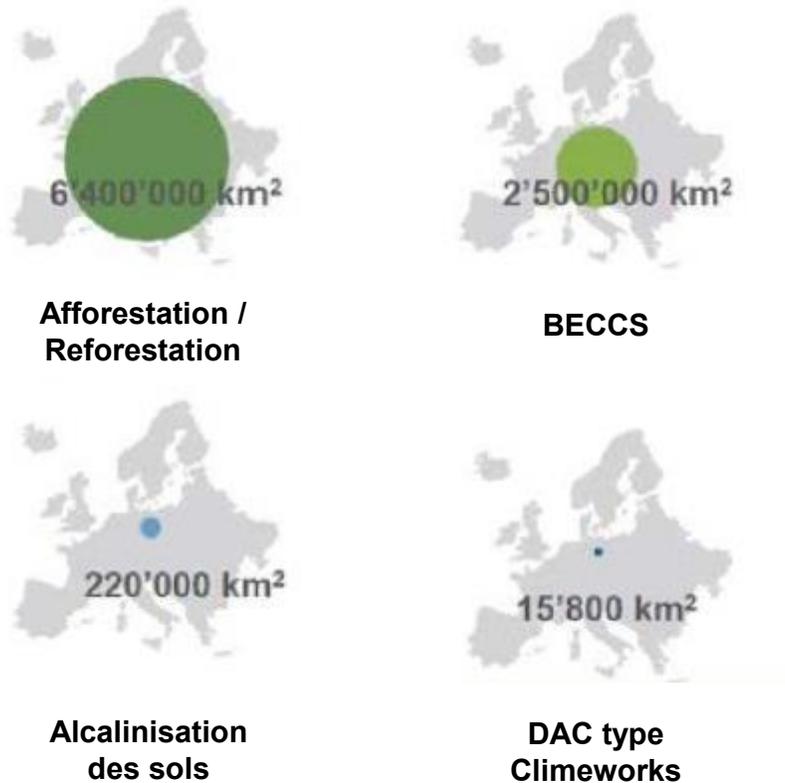
ÉMISSIONS NÉGATIVES

- Afforestation/Reforestation
- Energie à partir de la biomasse avec captage et stockage de CO₂ (BECCS)
- Alcalinisation des sols et des océans
- Pyrolyse de la biomasse (échelle très locale)

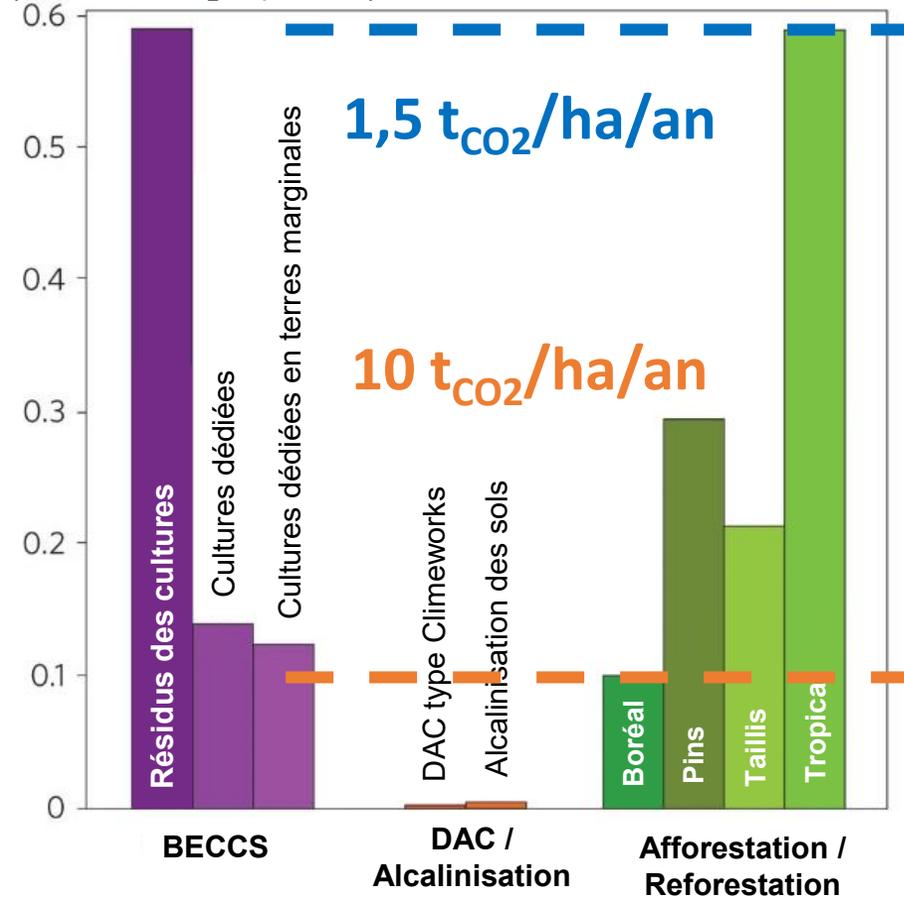


ASPECT UTILISATION DES SOLS POUR LES ALTERNATIVES DE CAPTAGE

Estimations des besoins de surface par Climeworks pour capturer 8 GtCO₂/an (20% émissions annuelles en 2021)



Besoin de surface (hectares/tCO₂ captée/an)



Forte variabilité BECCS et Afforestation (type de culture et espèces)

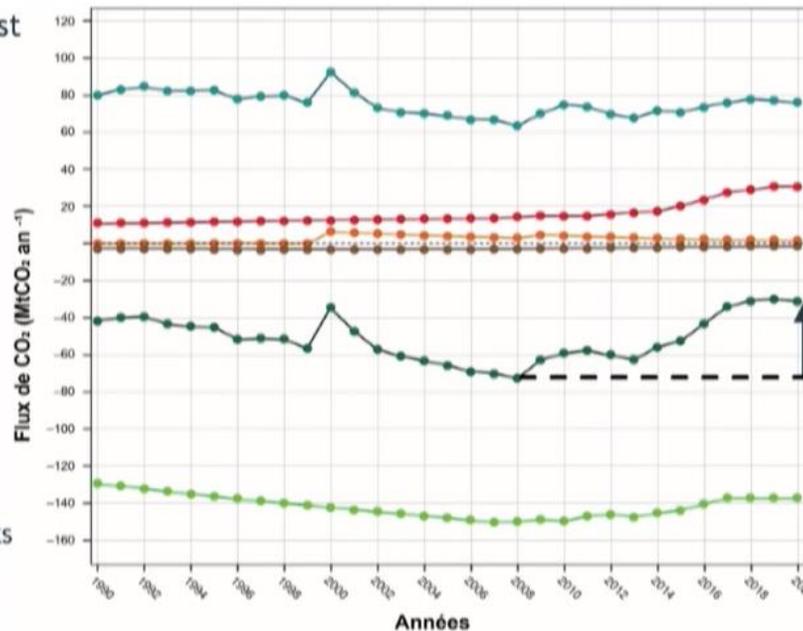
Climeworks : Clean Energy Ministerial CCUS Initiative Webinar- Direct Air Capture of CO₂: Helping to Achieve Net-Zero Emissions. 21 avril 2020.)

Nature Climate Change, 6, 42–50 (2016)

RISQUE SUR LA BIOMASSE?

In France, the forest carbon sink was divided by two in less than 10 years

Loss by forest Emissions

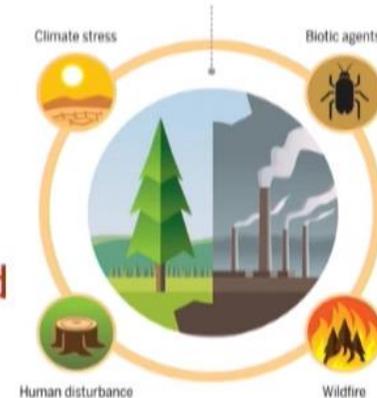


Harvest slightly increased

Natural mortality Strongly increased

Net Carbon sink Decreased by 50%

Growth decreased



- ▶ Natural mortality increased by 80%
- ▶ 54% of failure in new plantations

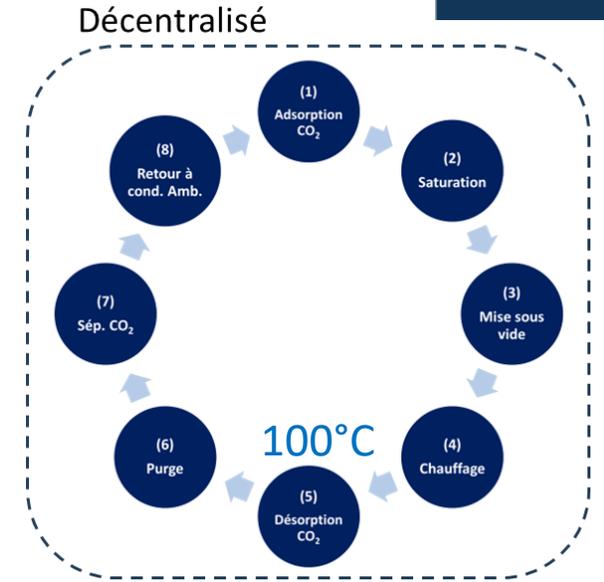
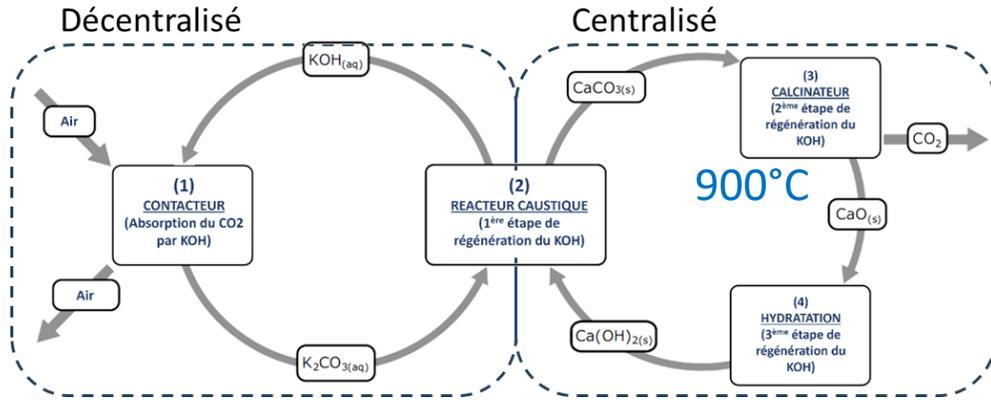
Source : P. Ciais, *Les forêts françaises face au changement climatique*, Colloque "l'urgence climatique: un tournant décisif?" 8-9 mars 2024, Académie des Sciences

<https://youtu.be/-1slemWBI24?si=s-MMYsJjEvMHY9Qh>

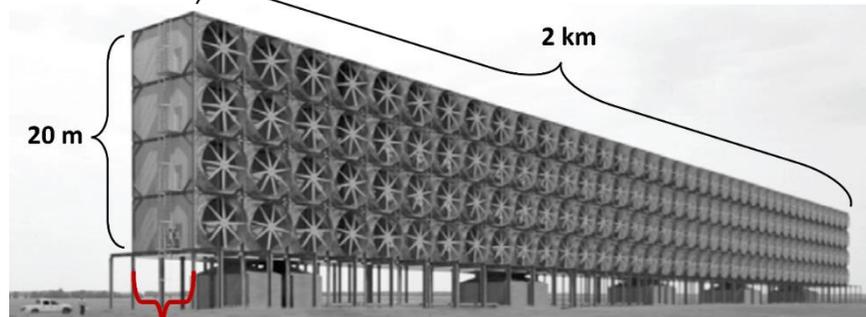
ÉTAT DE L'ART DU CAPTAGE DU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE : 2 VOIES TECHNOLOGIQUES PRINCIPALES

2 étapes principales :

- Captage du CO₂ atmosphérique par un agent de séparation solide ou liquide
- Régénération de l'agent pour capter à nouveau



Mammoth, Climeworks : 36ktCO₂/an



8 m Train d'absorption procédé Carbon Engineering → 1MtCO₂/an

Consommation énergétique : 3 GJ_{élec}/tCO₂ – 7 GJ_{therm}/tCO₂
En chiffres (CE) : 230 USD/tCO₂, agent sép. 4 USD/t



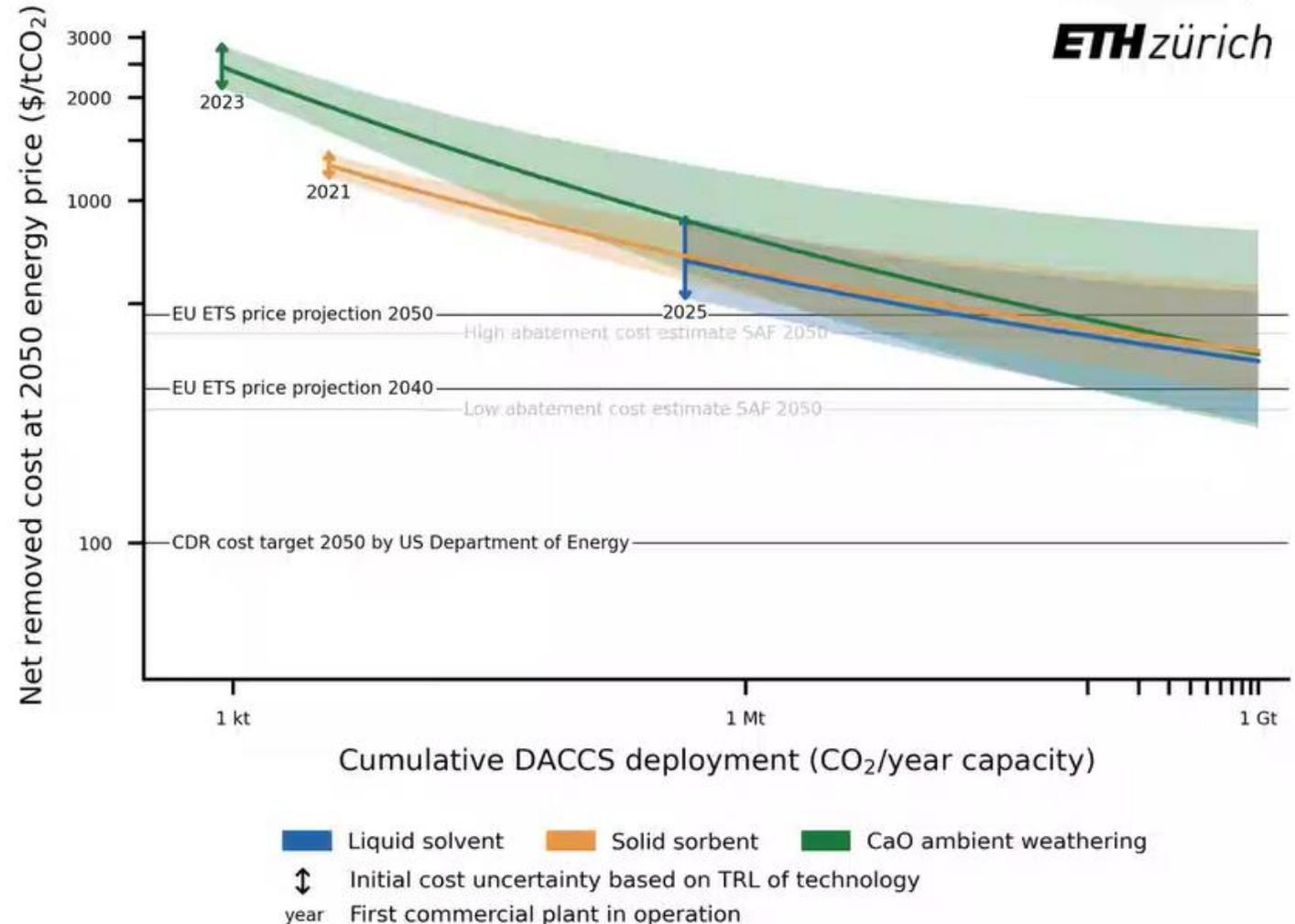
Consommation énergétique : 2 GJ_{élec}/tCO₂ – 11 GJ_{therm}/tCO₂
En chiffres (CW) : 600 USD/tCO₂, agent sép. 250 USD/t

DAC 1POINTFIVE, JUIN 2025, 500 KT/AN (CARBON ENGINEERING)



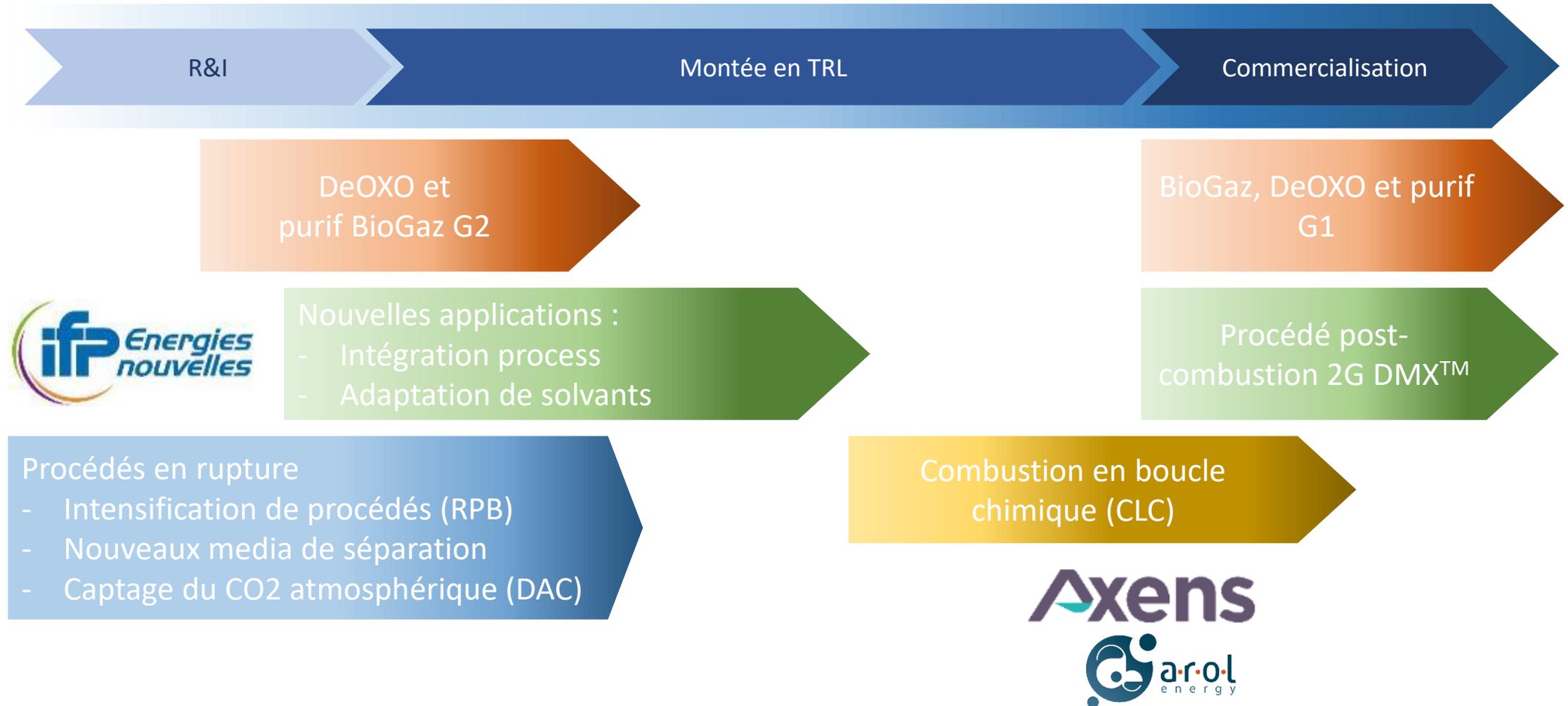
CAPTAGE DE CO₂ ATMOSPHÉRIQUE : POUR QUEL COÛT?

- Procédés avec une forte composante capitalistique
- Forte consommation énergétique
- Une communication très optimiste qui vise les 100 USD/t à prendre avec prudence (//CCS)
- Une fourchette probable entre 300 et 700 USD/t (source AIE)
- Conditions de la réduction des coûts
 - Un déploiement massif
 - Des matériaux optimisés à coûts contenus
 - De nouveaux contacteurs à transfert de masse optimisé
 - Un accès à une énergie bas carbone abondante



Source: Sievert K., Schmidt T.S., Steffen B. "Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture" *Joule* 2 (2024)

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE : UN GROUPE INTÉGRÉ



LE CAPTAGE DU CO₂, BRIQUE ESSENTIELLE DE LA DÉCARBONATION

Une technologie maîtrisée

Avec près d'un siècle d'expérience dans la séparation du CO₂, les technologies actuelles doivent être déployées pour être au RDV

Un incontournable des stratégies de décarbonation

Si le meilleur CO₂ est celui que l'on n'émet pas, il faudra capter celui que l'on émettra quand même

Un coût énergétique contenu

Poursuivre la recherche pour rendre le captage accessible, en particulier pour les moyens et petits émetteurs ou pour les basses teneurs en CO₂



Transport de CO₂:

Levier stratégique pour attirer les investissements ?

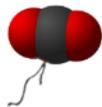
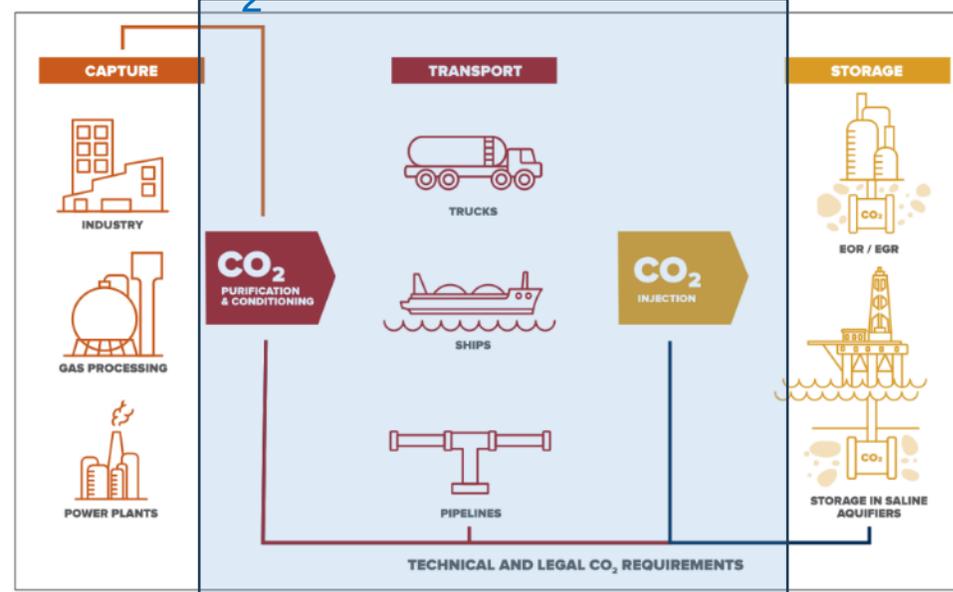


Image générée par une intelligence artificielle (DALL·E, OpenAI)

CONTEXTE DU TRANSPORT CO₂

Source : Global CCS
Institute



MODE DE TRANSPORT

Le transport se fait généralement par **pipeline** - des canalisations terrestres ou sous-marines - mais peut aussi se faire par **bateau** ou par **camion/train**.

BESOIN EU

Stocker **50 millions de tonnes CO₂ par an (MtCO₂/an) d'ici 2030**



BESOIN FR

Stocker **~4-8 MtCO₂/an** d'ici 2030, avec une augmentation progressive à 20-30 MtCO₂/an d'ici 2050.



ENJEUX

Transport pipeline:

- Transport continu et fiable
- Convient pour de grandes quantités sur des distances longues



Transport par bateau:

- Transport plus flexible que les pipelines
- Idéale pour relier des sites éloignés

QUELQUES CHIFFRES



1 Mt CO₂/an transportables via un navire cargo (capacité 20 000 tonnes, 1 trajet par semaine)

Les projets en cours pourraient permettre de transporter jusqu'à **39,5 Mt CO₂/an** d'ici 2030

26 projets de stockage identifiés pourraient utiliser le transport maritime

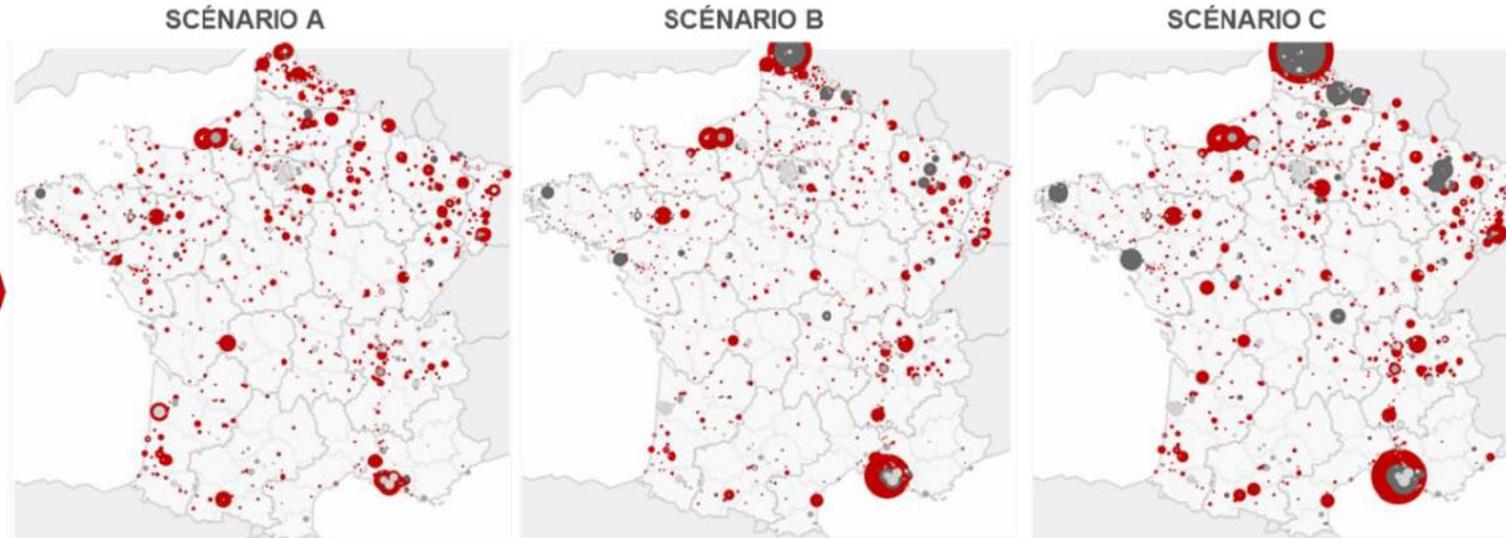
Court et moyen terme: le **transport maritime** est **essentiel** pour la **décarbonation industrielle** et le développement de CCS

TRANSPORT CO₂ EN FRANCE 2030

Cartographie des EMETEURS

Source : Etude du Club
CO₂ sur un schéma de
transport de CO₂ en France

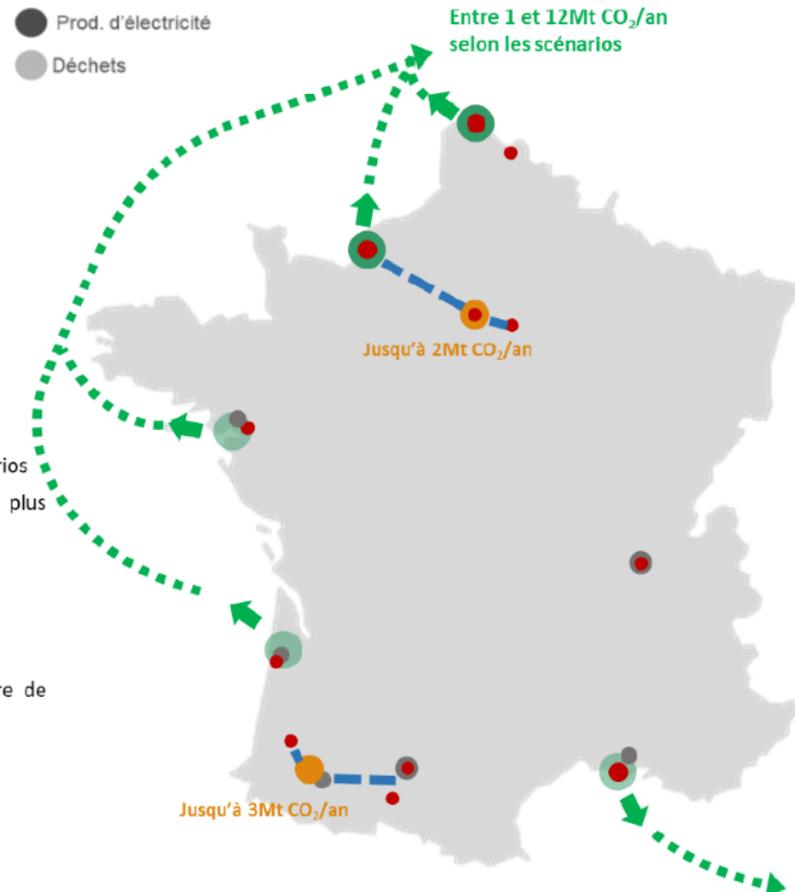
2050



- Industrie
- Tertiaire
- Production de vapeur et d'AC
- Prod. d'électricité
- Déchets

SCENARIO DE CAPTAGE	
A	CCUS en dernier recours pour les émissions non-abattables
B	CCUS mobilisé parmi d'autres leviers de décarbonation
C	CCUS principal levier de la politique de décarbonation

- Terminal d'export, plus ou moins développé selon les scénarios
- Terminal d'export développé dans les scénarios les plus ambitieux
- Stockage onshore France (scénarios B et C)
- Sites de valorisation
- Sites de captage
- Intérêt du développement d'axes de transport à instruire de manière prioritaire – vision 2030



Rapport de l'ADEME « Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat », 2021

TRANSPORT CO₂ EN FRANCE 2050

BESOIN FR

Infrastructures portuaires **d'export de CO₂ vers la Mer du Nord**
Dunkerque, Le Havre, Saint Nazaire et Fos-Sur-Mer

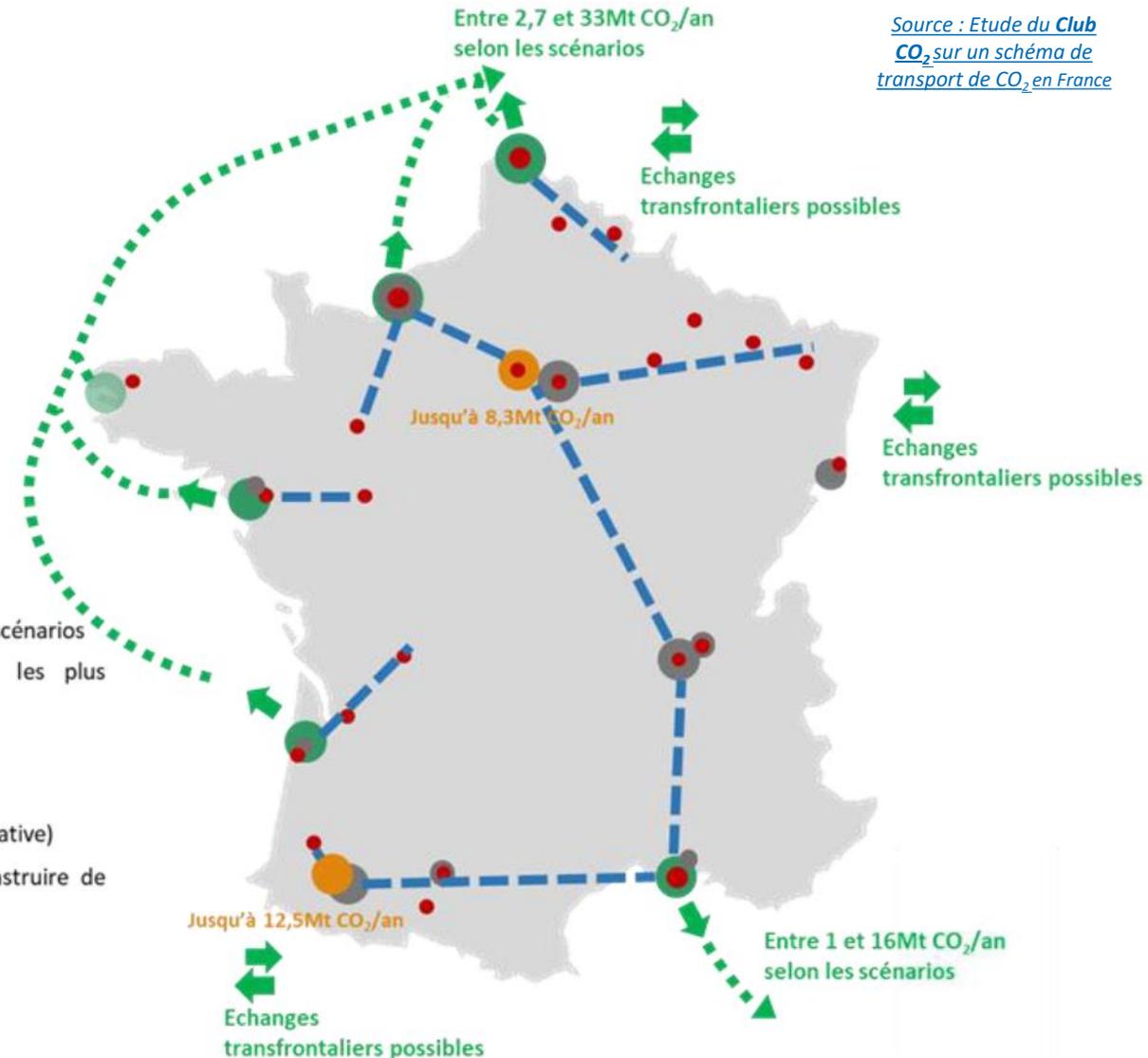
Besoin de qualification et **le développement de capacités de stockage géologique onshore** (Sud-Ouest, Bassin parisien) option de stockage souverain sur le territoire

Ces **régions concentrent les émissions les plus élevées**, nécessitant des infrastructures adaptées.

2030 Infrastructures pouvant aller de **110 km à 790 km** de canalisations

2050 Infrastructures pouvant aller de **1200 km à 10500 km** de canalisations

Source : Etude du **Club CO₂** sur un schéma de transport de CO₂ en France



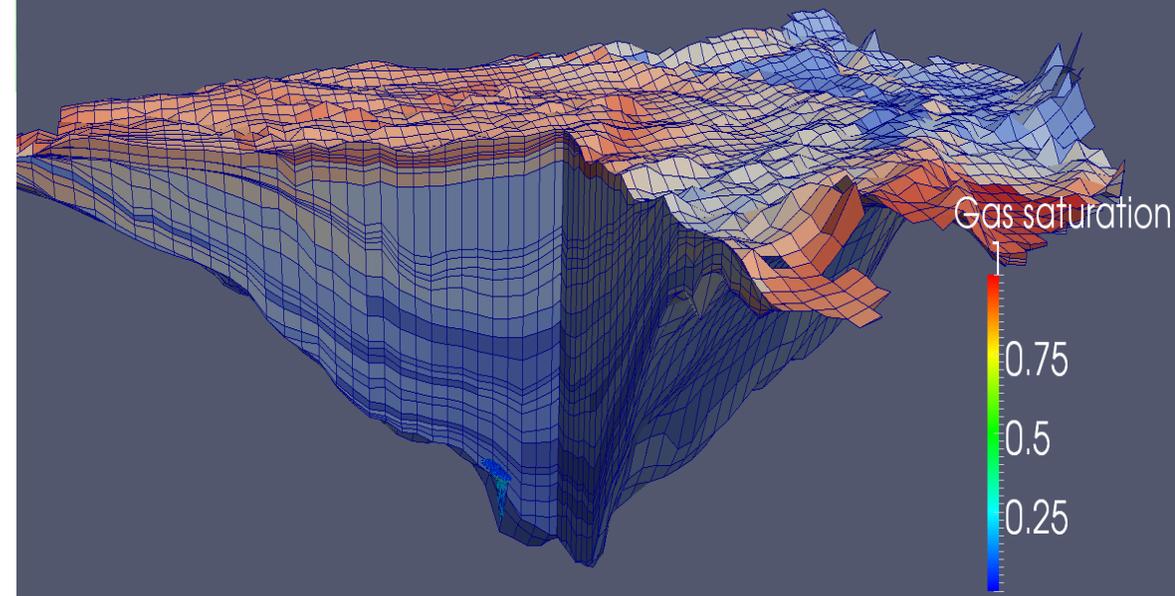
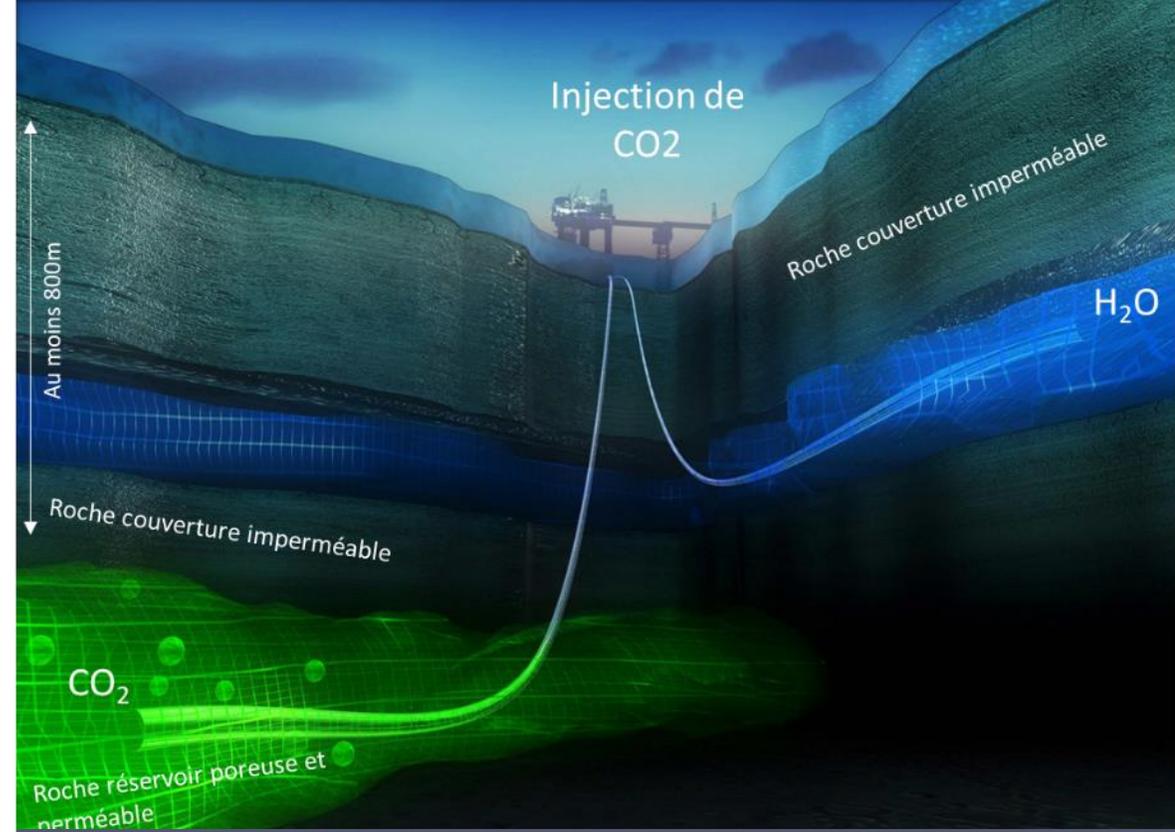
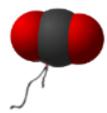
SCENARIO DE CAPTAGE	
A	CCUS en dernier recours pour les émissions non-abattables
B	CCUS mobilisé parmi d'autres leviers de décarbonation
C	CCUS principal levier de la politique de décarbonation

- Terminal d'export, plus ou moins développé selon les scénarios
- Terminal d'export développé dans les scénarios les plus ambitieux
- Stockage onshore France (scénarios B et C)
- Sites de valorisation
- Sites et clusters de captage mobilisés (illustration indicative)
- Intérêt du développement d'axes de transport à instruire de manière prioritaire

Rapport de l'ADEME « Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat », 2021

Le stockage géologique de CO₂:

Une réalité industrielle à passer à l'échelle

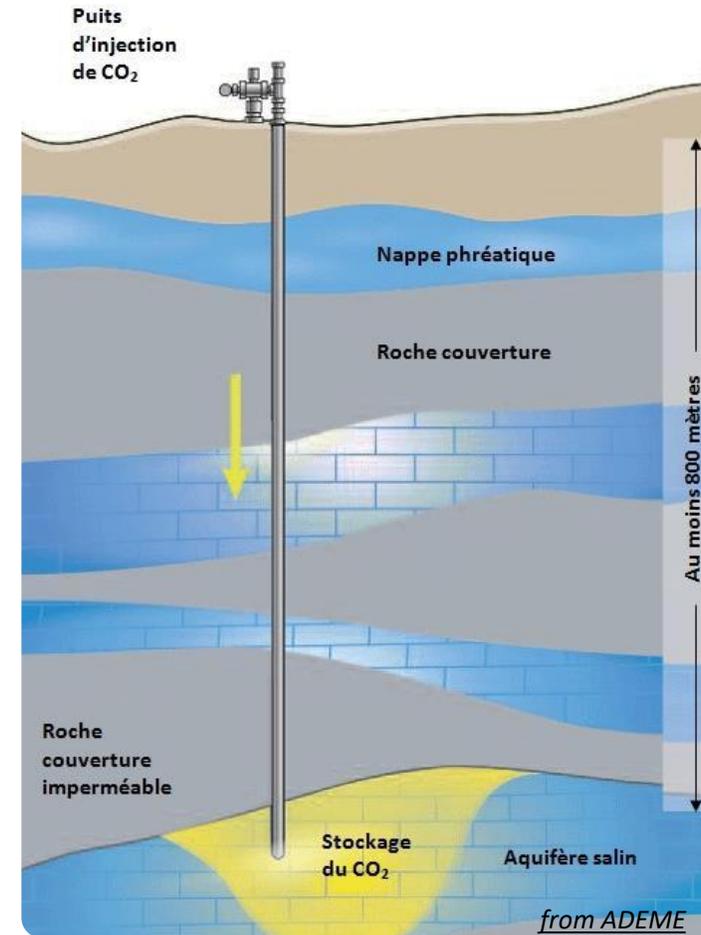
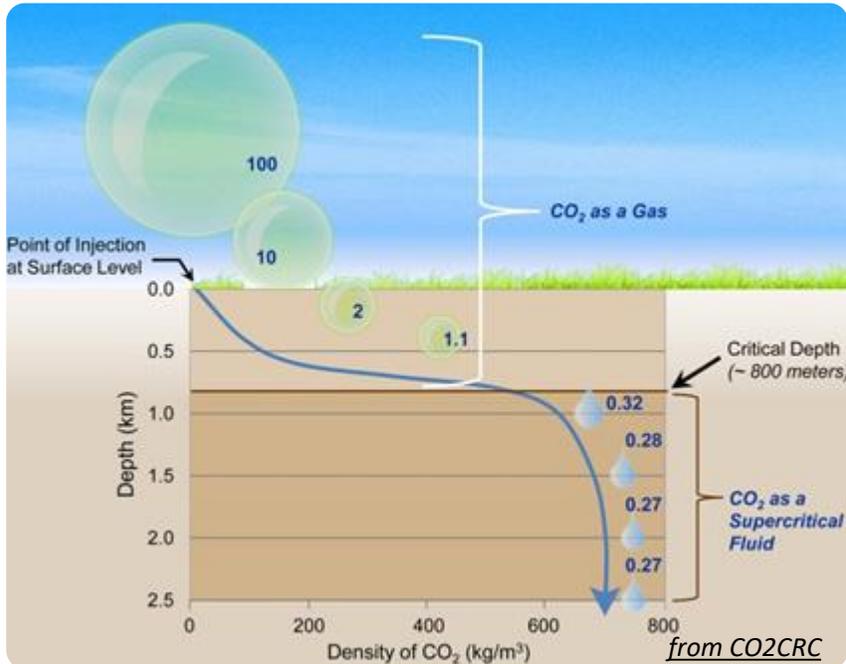


STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO₂

Des principes techniques maîtrisés

INJECTION EN PROFONDEUR DANS DES ROCHES

- Principe similaire utilisé pour le stockage saisonnier des gaz
- Porosité/perméabilité des roches
- Densité du CO₂ vs densité des fluides en place

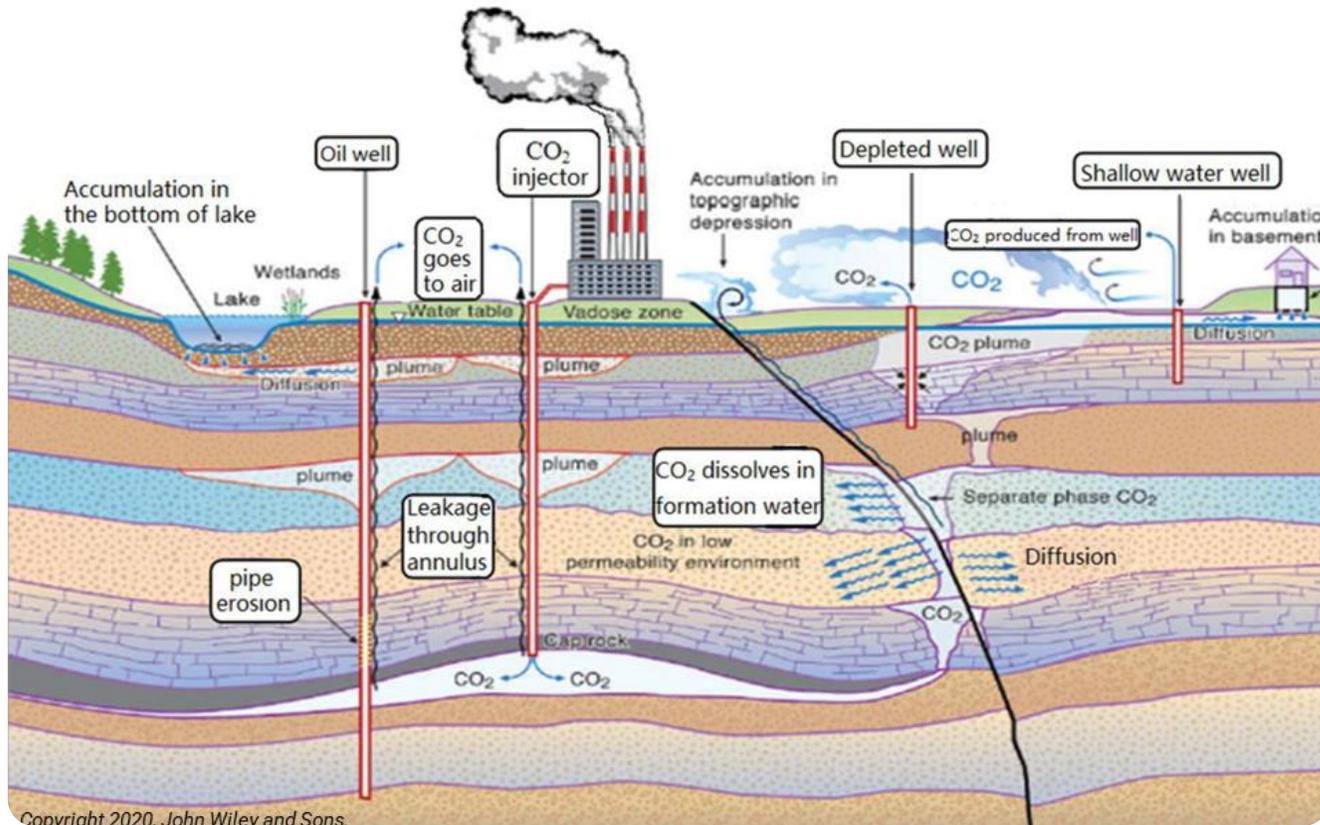


Climat,
Environnement
et Économie
circulaire

CO₂ SOUS FORME SUPERCRITIQUE

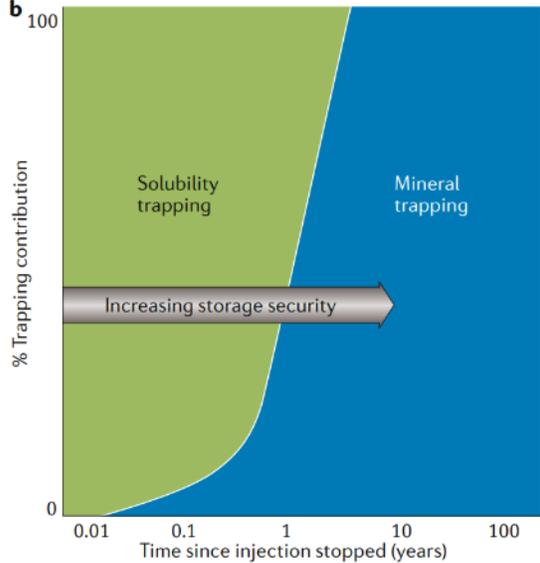
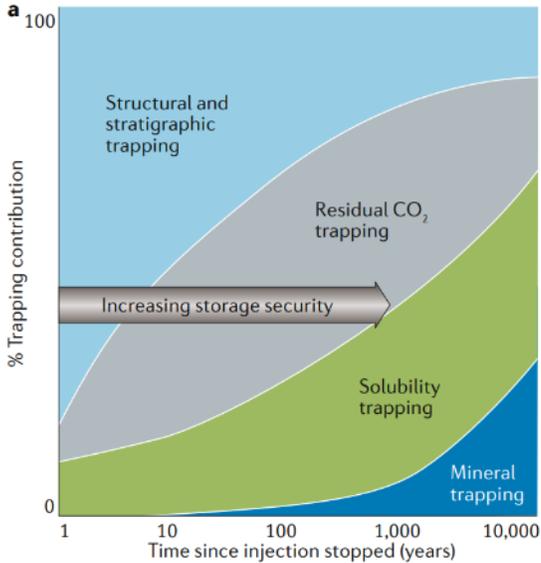
- Correspond aux conditions de profondeur
- Accroît la capacité de stockage

UN ENJEU DE PÉRENNISATION LONG TERME DES STOCKAGES



- UN STOCKAGE LONG TERME MAÎTRISÉ PAR**
- Une caractérisation initiale avancée
 - Un monitoring adapté
 - Des solutions de remédiation

Time is on your side!



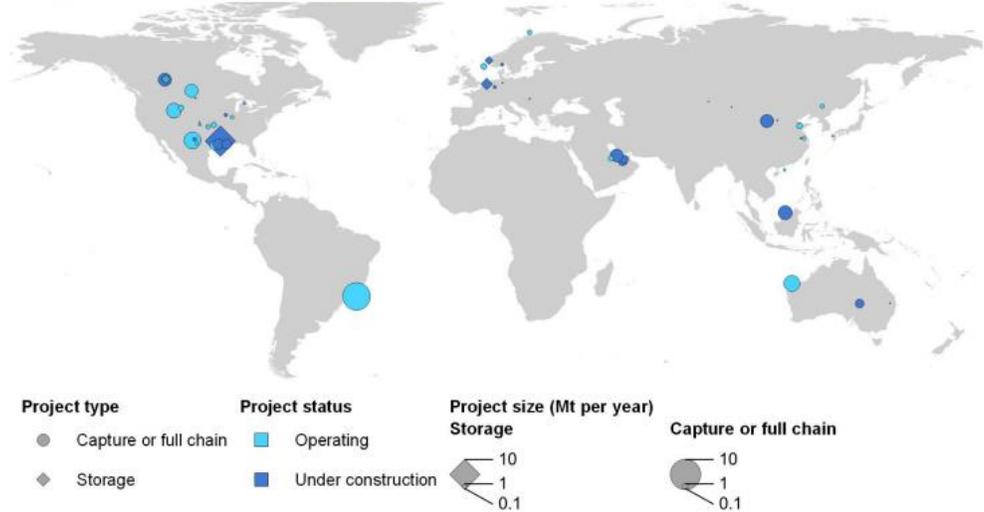
Milieu poreux
« Réservoir »

Roches basiques

UNE RÉALITÉ INDUSTRIELLE EN 2024

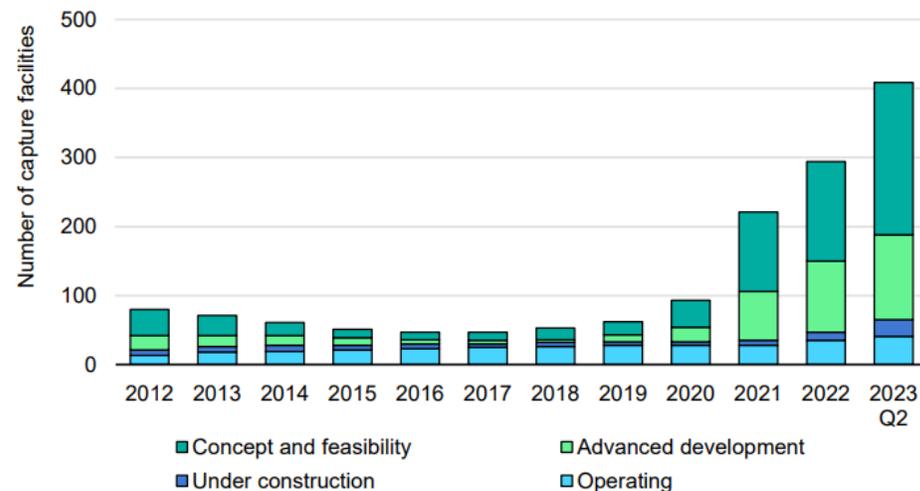
Des projets CCS mondialement mis en œuvre

Large-scale CCUS projects, operating and under construction, 2023



IEA. CC BY 4.0.

Evolution of the CO₂ capture project pipeline, 2012-Q2 2023



IEA. CC BY 4.0.

50

Mt
CO₂/an

Capturées
et stockées
en 2024

45 projets en opération

>400

Projets industriels en
développement @ 2023

Avec une
capacité de...

615

Mt
CO₂/an
@2030

QUID DES CAPACITÉS DES SITES DE STOCKAGE

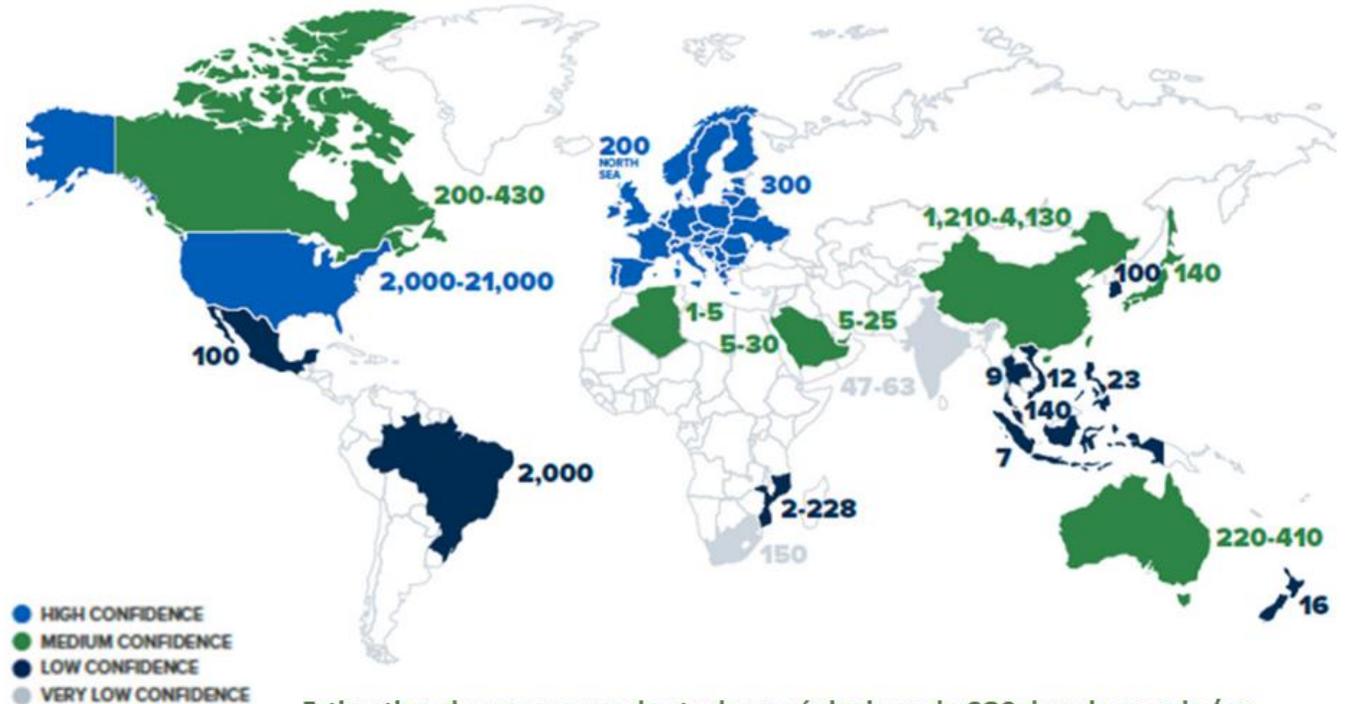
Des capacités mondiales de stockage estimées largement supérieures au besoin requis

BESOIN REQUIS :

- 220 Gt (AIE, 2020 sur la période 2020-2050)
- 350-1200 Gt (GIEC, 2020-2100)

ESTIMATION THÉORIQUE :

- Entre 8000 et 50,000 Gt (AIE, 2020)
- > 28,000 Gt (ICIS, 2019)
- EU ~ 507 Gt > 100 ans d'émissions 2019



Estimation des ressources de stockage géologique de CO₂ dans le monde (en GtCO₂) – Source : Global Institute (2019)

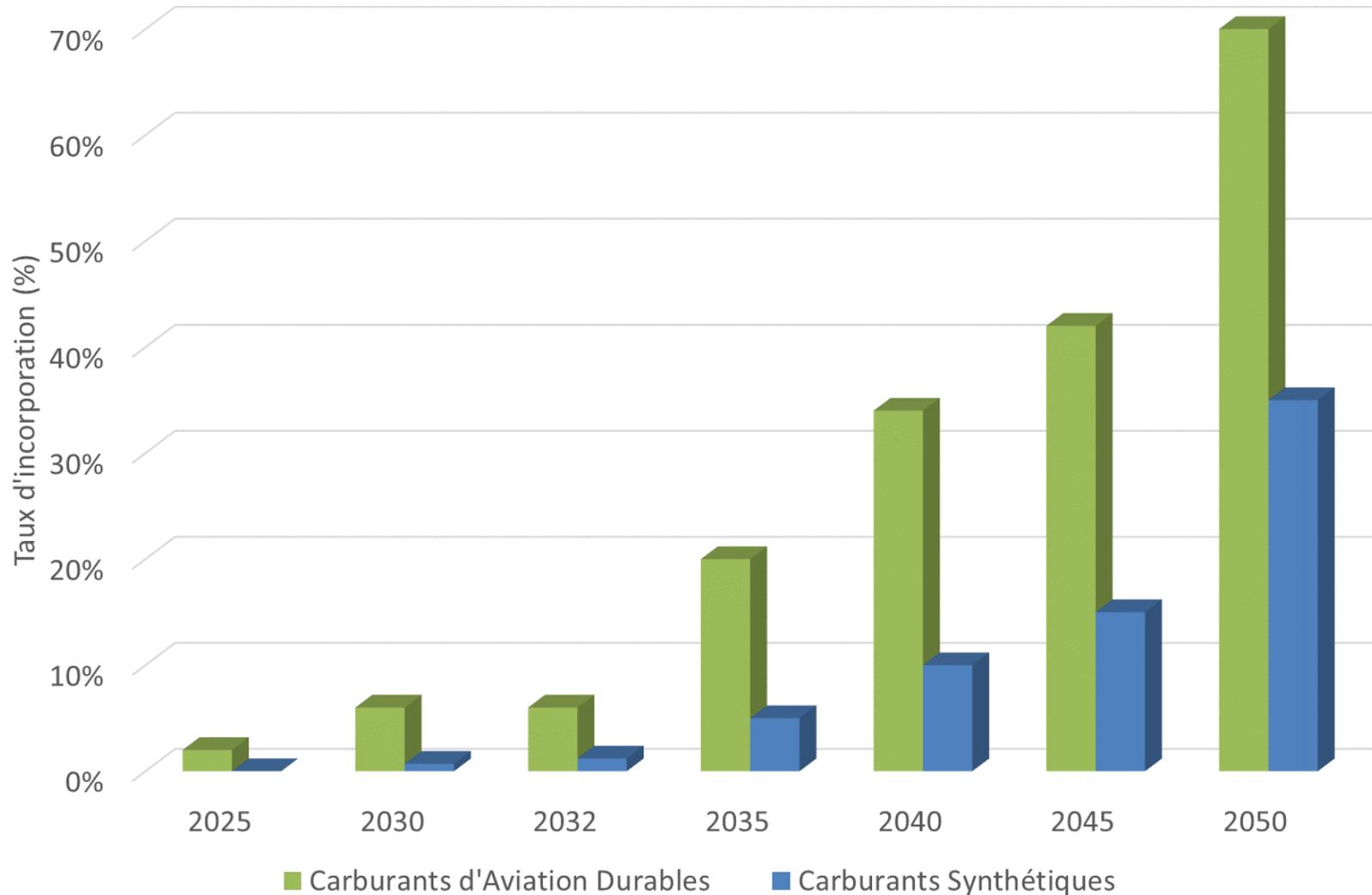
CCU : La valorisation du CO₂ en CAD*

* Carburants d'Aviation Durable



L'INITIATIVE EUROPEENNE REFUEL EU AVIATION

UNE VOLONTE D'INCORPORATION



LE KEROSENE UN CARBURANT CERTIFIE

DES FILIERES SPECIFIQUES

• Les filières certifiées

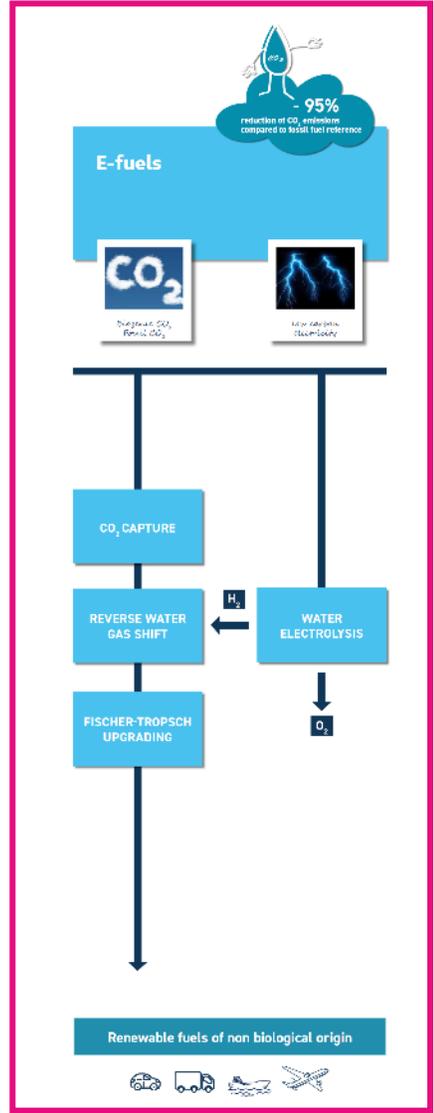
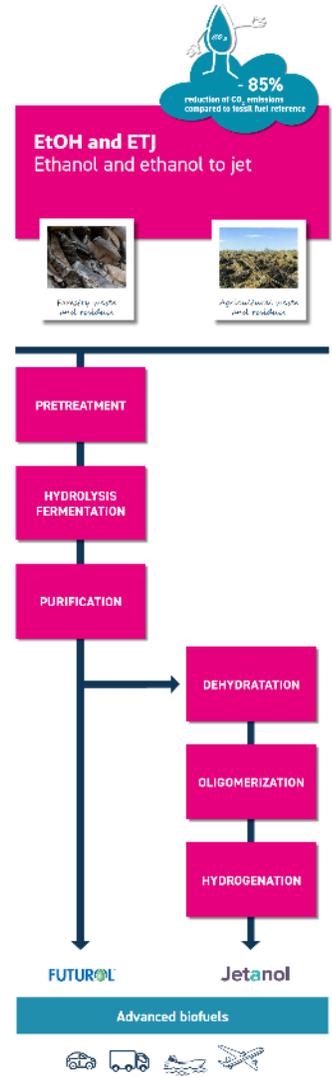
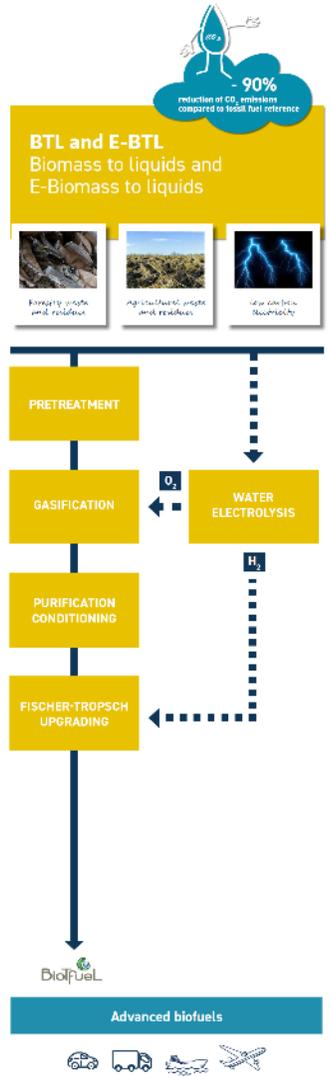
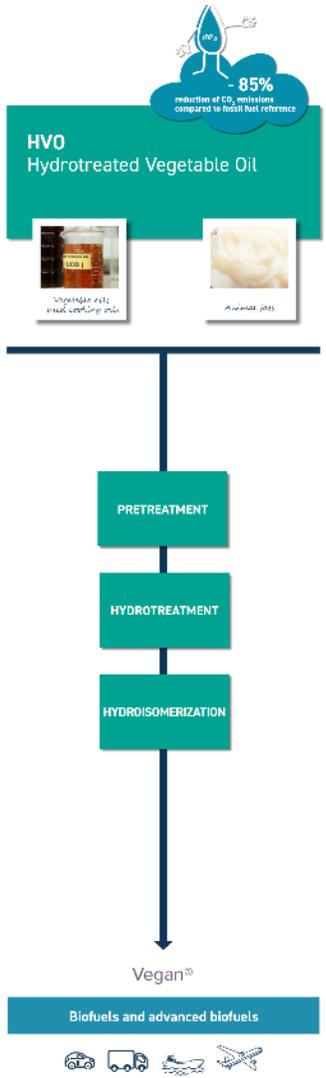
	ASTM reference	Conversion process	Abbreviation	Possible Feedstocks	Maximum Blend Ratio
JET SPK	ASTM D7566 Annex 1	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene	FT	Coal, natural gas, biomass	50%
	ASTM D7566 Annex 2	Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids	HEFA	Bio-oils, animal fat, recycled oils	50%
	ASTM D7566 Annex 3	Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars	SIP	Biomass used for sugar production	10%
	ASTM D7566 Annex 4	Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources	FT-SKA	Coal, natural gas, biomass	50%
	ASTM D7566 Annex 5	Alcohol to jet synthetic paraffinic kerosene	ATJ-SPK	Biomass from ethanol, isobutanol or isobutene	50%
	ASTM D7566 Annex 6	Catalytic hydrothermolysis jet fuel	CHJ	Triglycerides such as soybean oil, jatropha oil, camelina oil, carinata oil, and tung oil	50%
CO-PROCESSING	ASTM D7566 Annex 7	Synthesized paraffinic kerosene from hydrocarbon - hydroprocessed esters and fatty acids	HC-HEFA-SPK	Algae	10%
	ASTM D7566 Annex 8	ATJ derivative starting with the mixed alcohols	ATJ-SKA		
	ASTM D1655 Annex A1	co-hydroprocessing of esters and fatty acids in a conventional petroleum refinery	co-processed HEFA	Fats, oils, and greases (FOG) co-processed with petroleum	5%
	ASTM D1655 Annex A1	co-hydroprocessing of Fischer-Tropsch hydrocarbons in a conventional petroleum refinery	co-processed FT	Fischer-Tropsch hydrocarbons co-processed with petroleum	5%
	ASTM D1655 Annex A1	co-hydroprocessing of biomass	co-processed biomass		5%

• Les filières en cours d'évaluation

Conversion process under evaluation	Abbreviation	Lead developers
synthesized aromatic kerosene	SAK	Virent
Integrated hydropyrolysis and hydroconversion	IH2	Shell
Alcohol-to-Jet (ATJ) derivative utilising biochemical production of isobutene	-	Global Bioenergies
Single Reactor HEFA (Drop-in Liquid Sustainable Aviation and Automotive Fuel)	DILSAAF	Indian CSIR-IIP
Pyrolysis of non-recyclable plastics	ReOIL	OMV
Co-processing of pyrolysis oil from used tires		
Methanol to jet		ExxonMobil

LES CARBURANTS BAS CARBONE

LES QUATRE PRINCIPALES VOIES POUR 2030



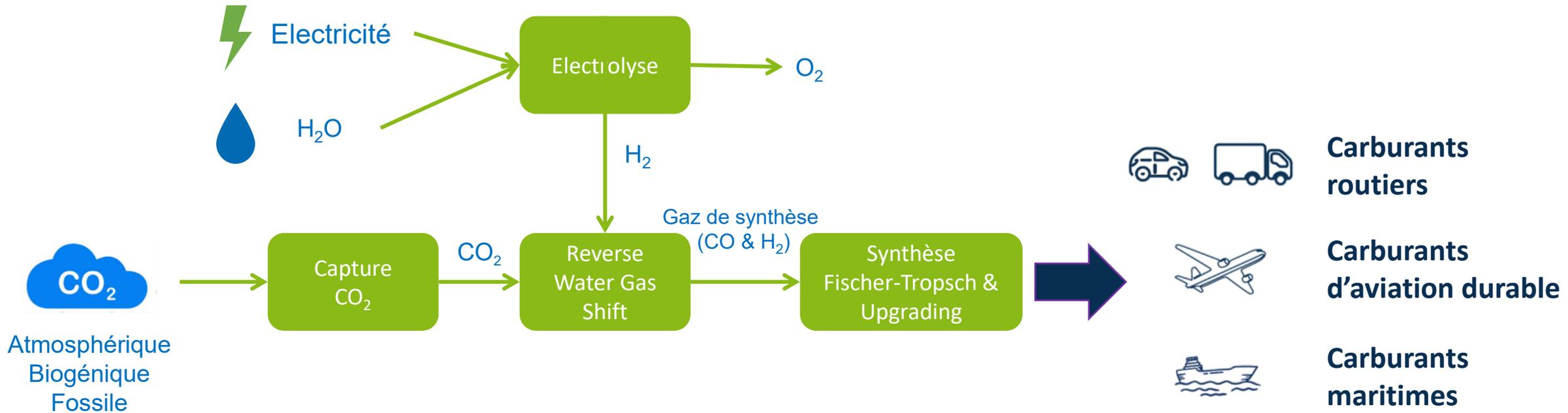
Des premières
industrielles
en France





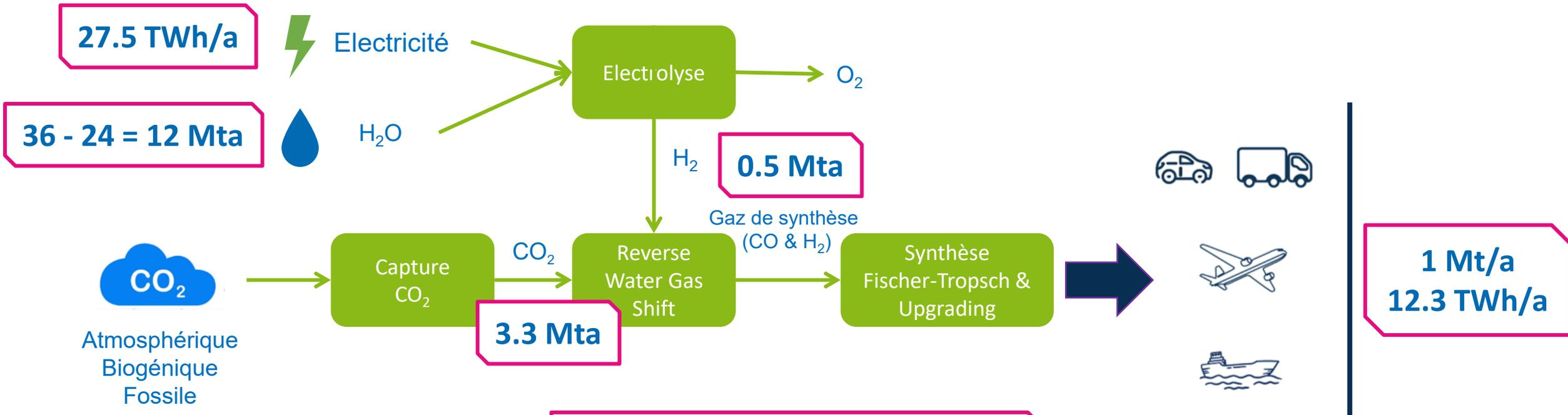
LA CONVERSION DU CO₂ EN CARBURANTS

LES ÉTAPES CLÉS



LA CONVERSION DU CO₂ EN CARBURANTS

QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR



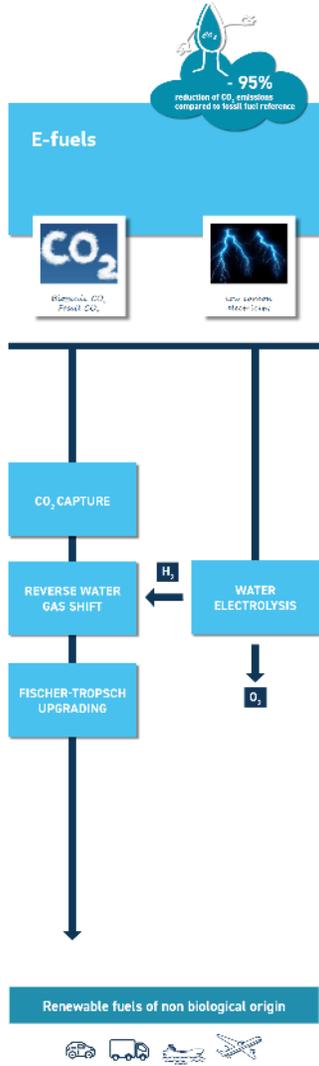
1/3 du CO₂ (en masse) est converti en carburants
≈ 45 % de rendement énergétique

LE PROJET FRANÇAIS TAKE KAIR

LES ÉLÉMENTS CLES



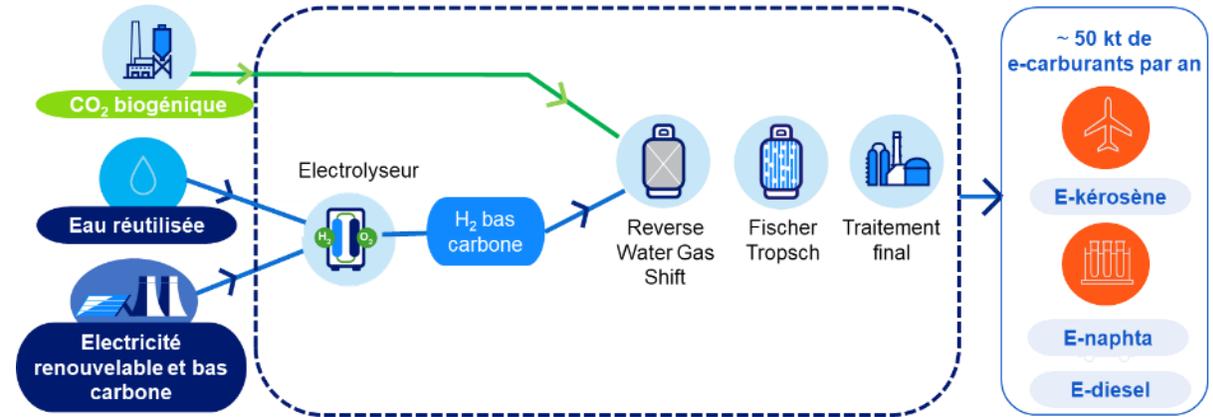
Climat,
Environnement
et Économie
circulaire



Les partenaires



Quelques chiffres



Le budget
≈ 850 M€



LES PROJETS EN EUROPE

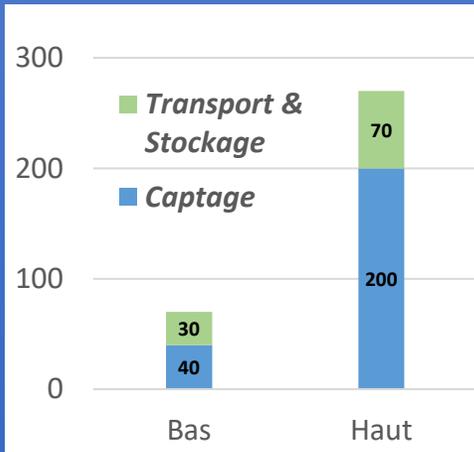
LE PANORAMA DES PROJETS E-SAF



- Des atouts en France pour le déploiement à l'échelle industrielle
 - Des ressources en CO₂
 - Des écosystèmes industriels et des infrastructures sur le territoire qui peuvent porter des unités industrielles
 - Des technologies issues des travaux de recherche français pour la production de carburants bas carbone prêtes à être industrialisées
 - Une électricité bas carbone
- Un déploiement industriel en France de la technologie
 - En soutenant les premières usines de production industrielle de e-carburants par une aide à l'investissement dès les phases d'ingénierie des projets, les plus risquées
 - En ayant une réglementation stable dans le temps et avec une vision long terme

CONCLUSION

Réduire les coûts sur l'ensemble de la chaîne CCUS... en particulier le captage



EU @ 2030 : 70-270 €/t CO₂

Stimuler les investissements

- Stratégies/politiques nationales (Fr CCUS 2023) et européennes (NZIA 2023, Indus. C Managem^t Strategy 2024) 
- Financements publics (EU-Innov. Fund, France 2030, USA-IRA) & mécanismes financiers (CCfd) 
- **Réglementation du marché carbone (EU-ETS : fin des quotas gratuits, MACF-CBAM)** 
- Nouveaux marchés pour valoriser le CO₂ comme une ressource 

Développer les infrastructures de transport & de stockage

- Clusters & Hubs – mutualisation 
- Accélérer le développement de sites de stockage 
- Coordination / synergie requise entre les différents acteurs de la chaîne 

Sécuriser l'ensemble de la chaîne CCUS

- Stockage du CO₂ sûr et pérenne – Maîtrise des risques 
- Monitoring sur toute la chaîne 
- Perception sociétale 



*Innover pour un monde
décarboné et durable*

www.ifpenergiesnouvelles.fr

IFP Energies nouvelles

1 - 4 avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex - France

Tél. : +33 1 47 52 60 00



IFP Energies nouvelles-Lyon

Rond-point de l'échangeur de Solaize
BP 3 - 69360 Solaize - France

Tél. : +33 4 37 70 20 00

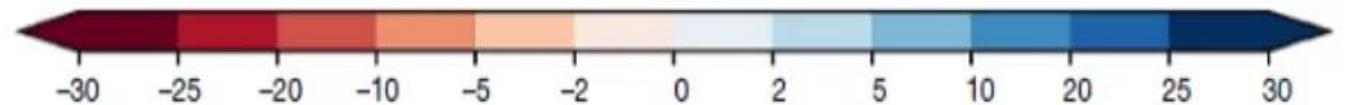
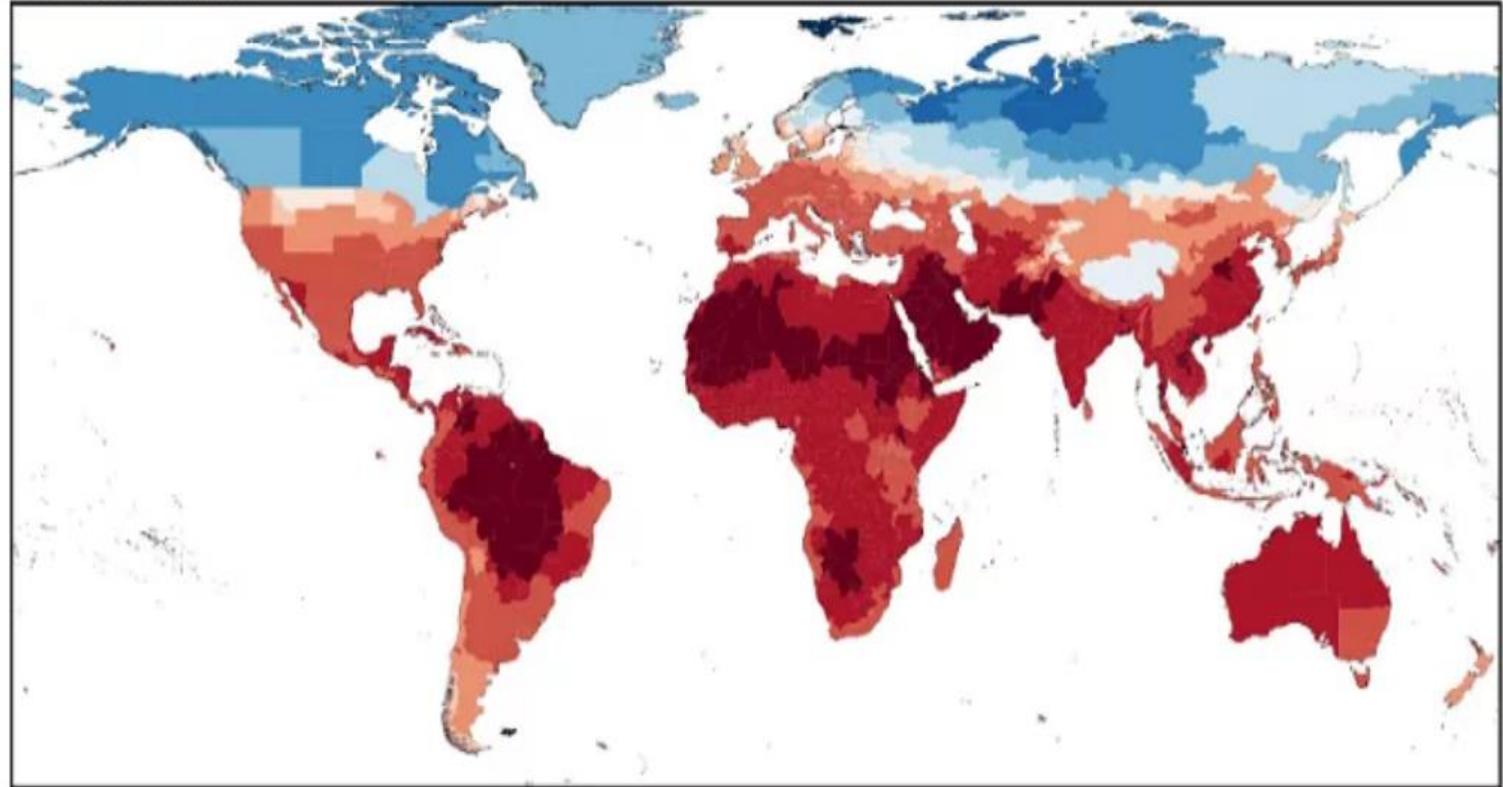


UN PEU DE REcul : ACTION VERSUS INACTION CLIMATIQUE

DES ESTIMATIONS DE COÛTS

	Références	Inaction	Action
Monde 	M. Kotz, Anders Levermann, Leonie Wenz (2024): The economic commitment of climate change. Nature. Rapport Stern (2006)	38 000 milliards \$ dommages @ 2050	6 fois moins que l'inaction
France 	Etude ADEME 2023 Rapport Pisany-2023	Entre 5 et 7 points PIB d'ici 2100 soit plus de 260 milliards \$/an Reduction 13% du revenu médian @2050	Estimation 66 milliards \$/an @2030

All climate variables



Percentage change in income per capita relative to a baseline without climate impacts

Estimations de la réduction médiane projetée du revenu infranational par habitant selon les scénarios d'émissions (SSP2-RCP2.6 et SSP2-RCP8.5). @Nature



IMPACTS ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) DE LA CHAÎNE CCS (1/2)



Émissions de CO₂ à minimiser tout au long de la chaîne



Critères de durabilité à respecter

Changement d'usage des sols, impact sur la biodiversité, préservation du stock de carbone



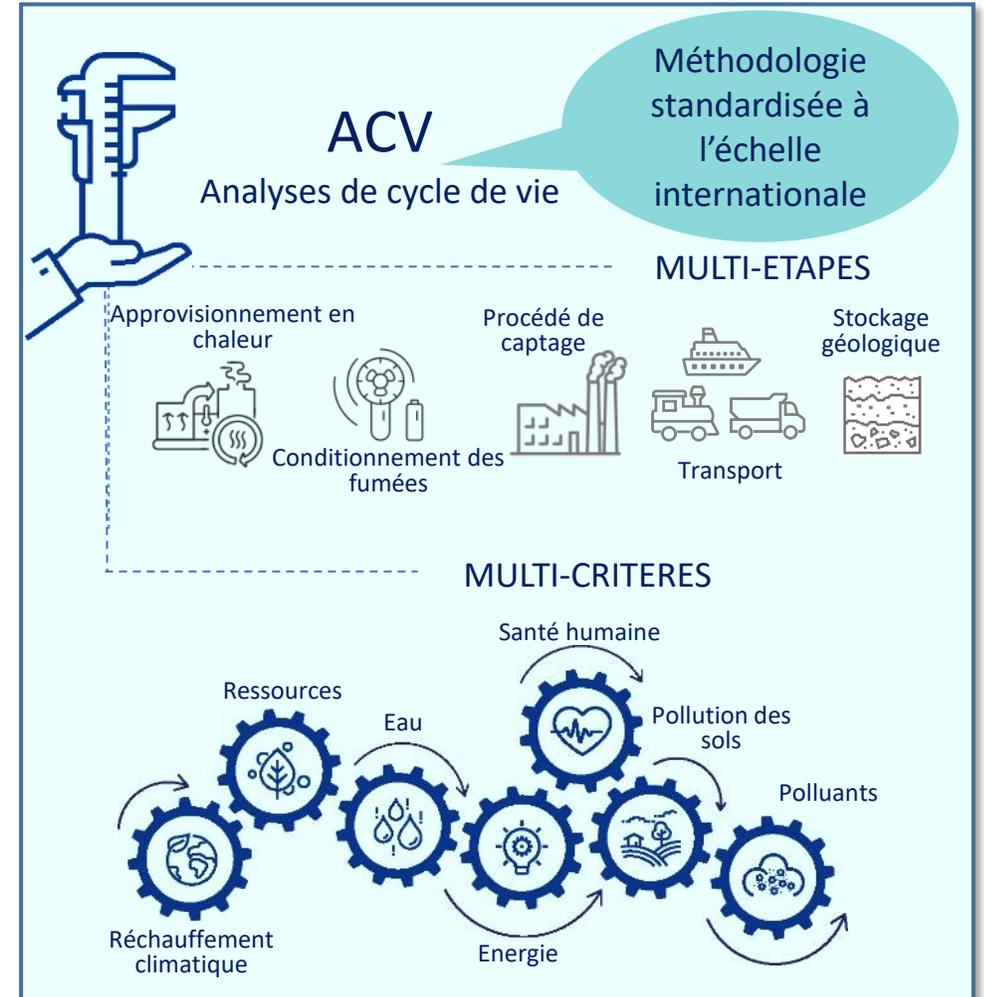
Consommation d'eau à minimiser

Depuis le procédé industriel à décarboner jusqu'au traitement de l'eau issue des procédés de transformation



Impact sur les polluants atmosphériques à caractériser

Notamment les polluants liés à la production d'énergie pour l'approvisionnement en chaleur





IMPACTS ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) DE LA CHAÎNE CCS (2/2)



- Le Mix énergétique est un point critique quant à l'impact environnemental de la chaîne CCS
- Comparaison Mix français « énergie nucléaire » / Mix orienté « charbon » → Réduction des émissions de CO₂ de 93 % à 64 %

16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-16, 2022, Lyon, France
 Insights from life-cycle assessment of the carbon capture and storage supply chain from the DMX™ Demonstration in Dunkirk (3D) project

La construction d'un pont – C'est quoi l'impact du CCS ?

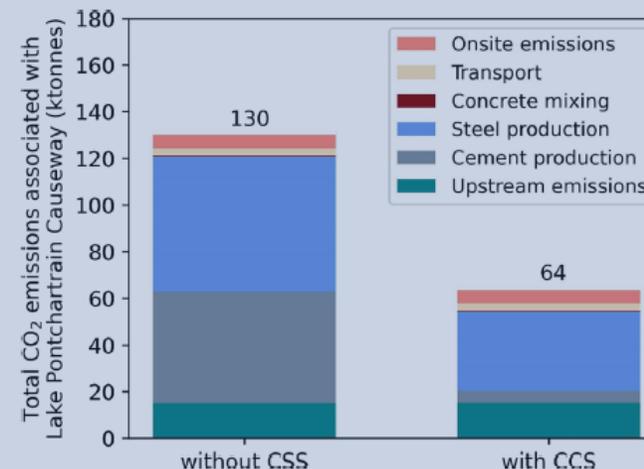
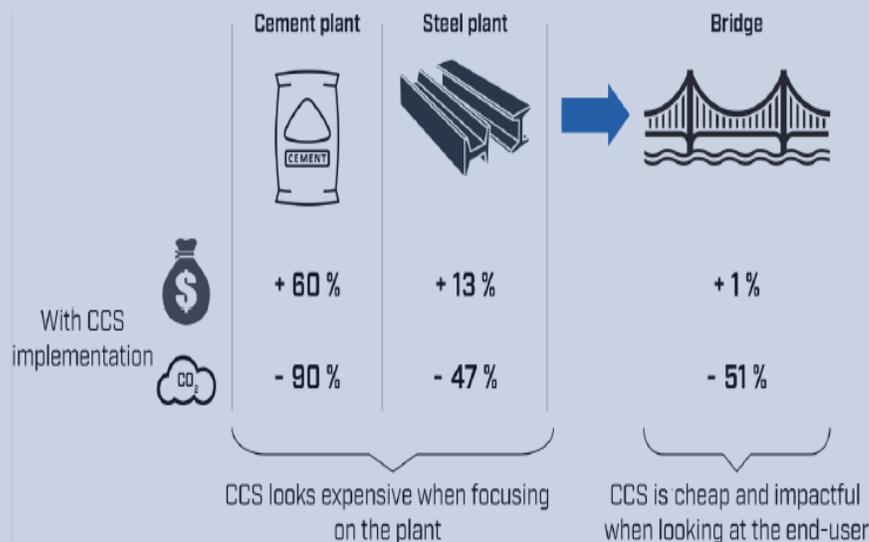


Figure 2. Breakdown of the total CO₂ emissions for constructing Lake Pontchartrain Causeway with and without CCS scenarios.

Sai Gokul Subraveti, Elda Rodríguez Angel, Andrea Ramírez, and Simon Roussanaly*
 Cite This: Environ. Sci. Technol. 2023, 57, 2595–2601