

Les méthodes d'élimination du CO2 anthropique (Carbon Dioxide Removal)

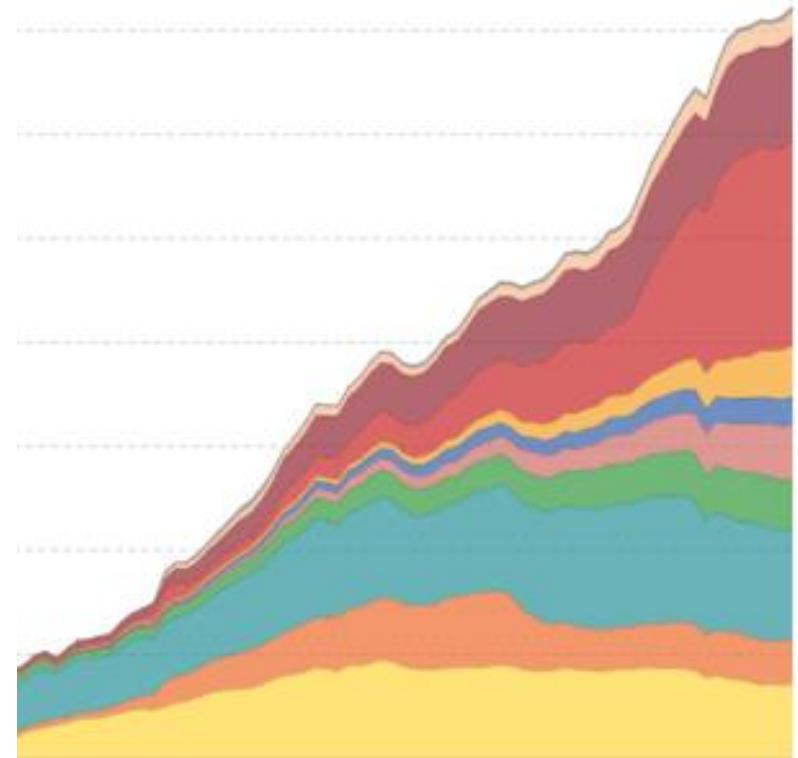
28/04/2020

Ludovic Bourdin
ludovic.bourdin@yahoo.fr

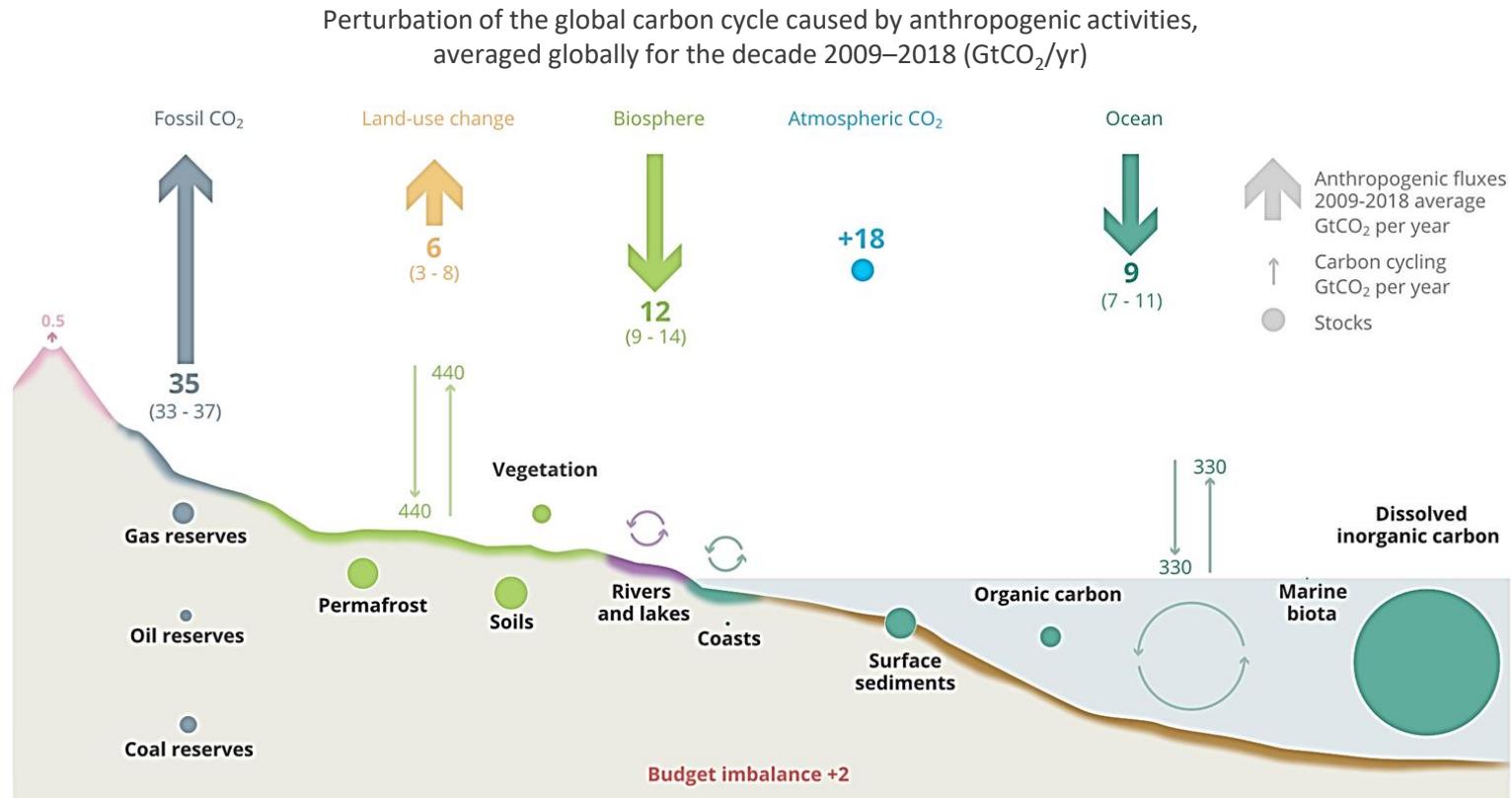


Agenda

- 1 CO₂ anthropique : les ordres de grandeur
- 2 Carbon Capture, Usage and Storage (CCUS)
- 3 Carbon Dioxide Removal (CDR)
- 4 Synthèse et conclusion

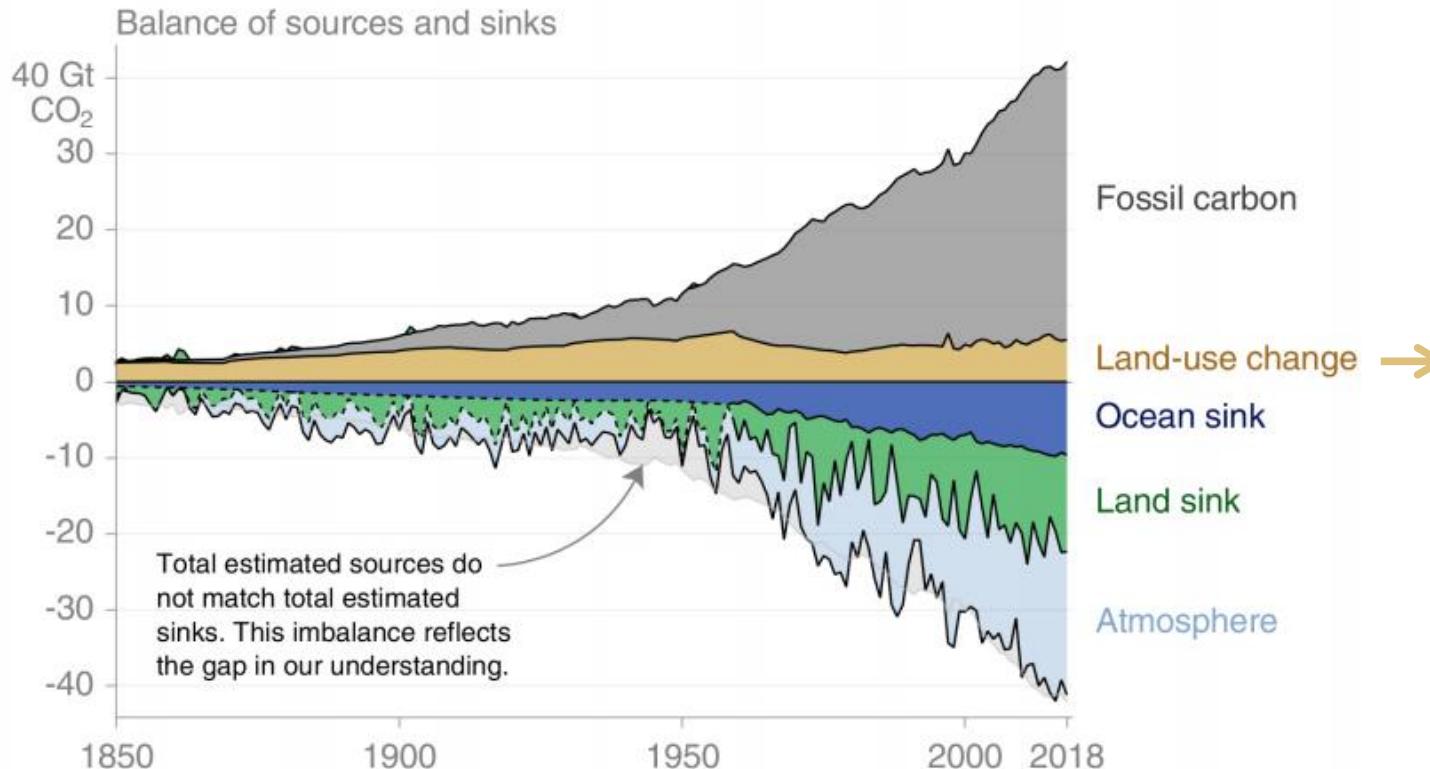


Actuellement, l'activité humaine émet ~41 GtCO₂/an*. Pour la France : ~0,35 GtCO₂/an.



* GtCO₂ : Gigatonne de CO₂ = 1 milliard de tonnes de CO₂

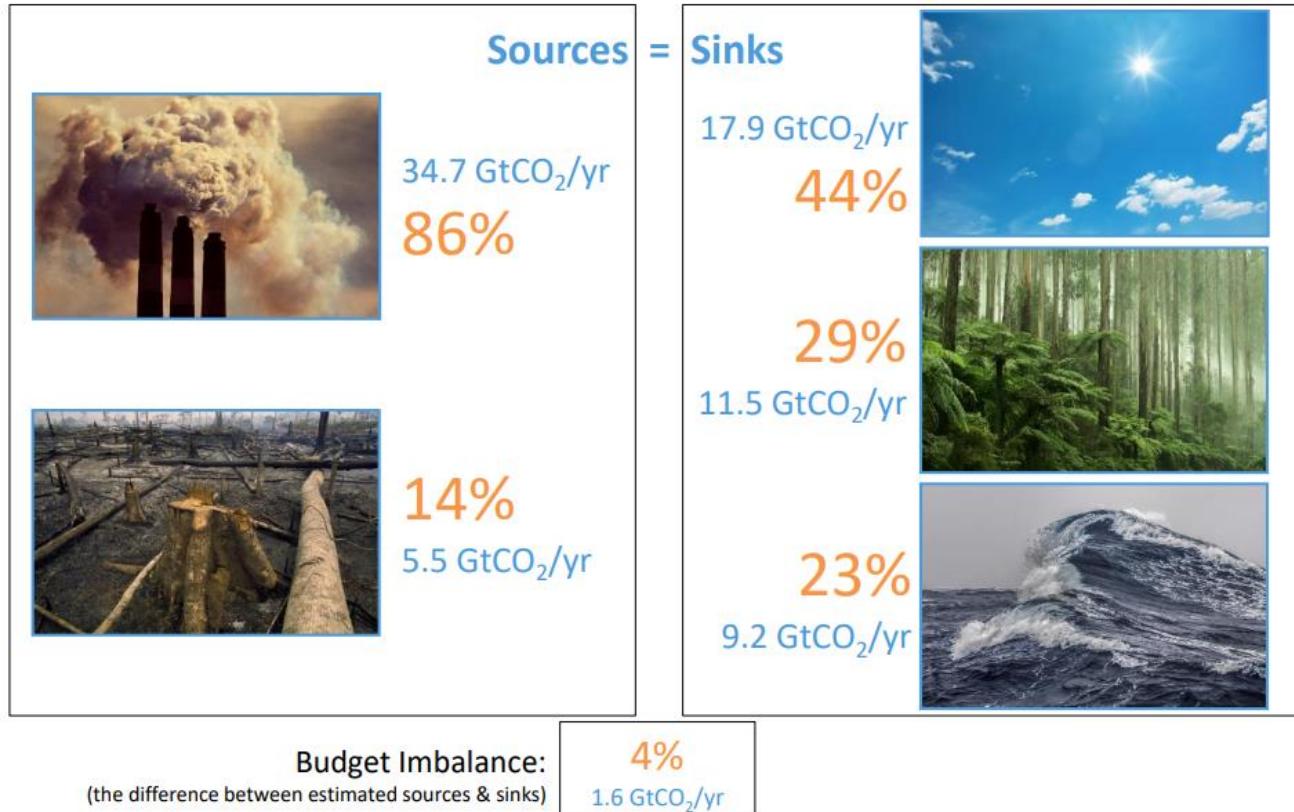
Les émissions dues aux combustibles fossiles sont prépondérantes depuis les années 1950.



Changement d'affectation des sols

La conversion de forêts en terres agricoles entraîne une perturbation du sol et une vitesse de décomposition accrue. Une partie du CO₂ stocké dans le sol est relâché dans l'atmosphère.

Le CO₂ anthropique est d'abord stocké dans l'atmosphère, puis la biosphère et les océans.



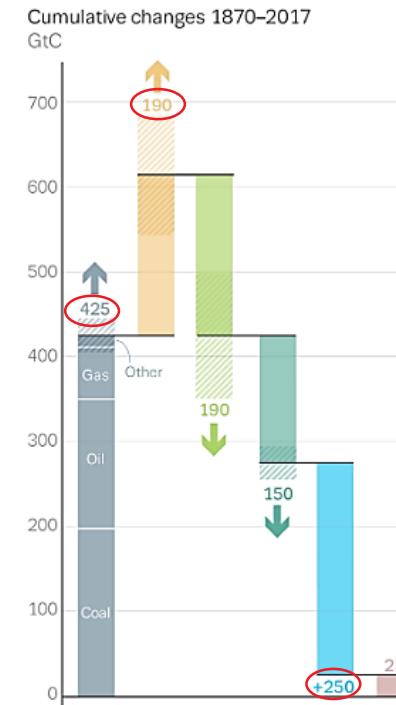
2250 GtCO₂* ont été émises entre 1870 et 2017.
 920 GtCO₂** restent présentes dans l'atmosphère.

Flux de carbone anthropogénique (cumulé)

$1\ tC = 3,67\ tCO_2$

- ↑ Fossil CO₂ E_{FF}
- ↗ Land-use change E_{LUC}
- ↓ Land uptake S_{LAND}
- ↓ Ocean uptake S_{OCEAN}

- + Atmospheric increase G_{ATM}
- ▨ Uncertainty values
- Budget Imbalance B_{IM}



* $(425 + 190) \times 3,67 = 2257$

** $250 \times 3,67 = 917$

Dans les scénarios <+2°C en 2100, il faudrait émettre <1180 GtCO₂ en cumulé entre 2011 et 2100 (30 ans d'émissions au rythme actuel).

Table SPM.1 Key characteristics of the scenarios collected and assessed for WGIII AR5. For all parameters, the 10th to 90th percentile of the scenarios is shown.^{1,2} [Table 6.3]

CO ₂ eq Concentrations in 2100 [ppm CO ₂ eq] Category label (concentration range) ⁹	Subcategories	Relative position of the RCPs ⁵	Cumulative CO ₂ emissions ³ [GtCO ₂]		Change in CO ₂ eq emissions compared to 2010 in [%] ⁴		Temperature change (relative to 1850–1900) ^{5,6}						
			2011–2050	2011–2100	2050	2100	2100 Temperature change [°C] ⁷	Likelihood of staying below temperature level over the 21st century ⁸					
								1.5 °C	2.0 °C	3.0 °C	4.0 °C		
< 430			Only a limited number of individual model studies have explored levels below 430 ppm CO ₂ eq										
450 (430–480)	Total range ^{1,10}	RCP2.6	550–1300	630–1180	–72 to –41	–118 to –78	1.5–1.7 (1.0–2.8)	More unlikely than likely	Likely				
500 (480–530)	No overshoot of 530 ppm CO ₂ eq		860–1180	960–1430	–57 to –42	–107 to –73	1.7–1.9 (1.2–2.9)	Unlikely	More likely than not	Likely	Likely	Likely	
	Overshoot of 530 ppm CO ₂ eq		1130–1530	990–1550	–55 to –25	–114 to –90	1.8–2.0 (1.2–3.3)		About as likely as not				
550 (530–580)	No overshoot of 580 ppm CO ₂ eq		1070–1460	1240–2240	–47 to –19	–81 to –59	2.0–2.2 (1.4–3.6)		More unlikely than likely ¹²				
	Overshoot of 580 ppm CO ₂ eq		1420–1750	1170–2100	–16 to 7	–183 to –86	2.1–2.3 (1.4–3.6)						
(580–650)	Total range	RCP4.5	1260–1640	1870–2440	–38 to 24	–134 to –50	2.3–2.6 (1.5–4.2)	Unlikely	More likely than not	Likely	Likely	Likely	
(650–720)	Total range		1310–1750	2570–3340	–11 to 17	–54 to –21	2.6–2.9 (1.8–4.5)		Unlikely				
(720–1000)	Total range	RCP6.0	1570–1940	3620–4990	18 to 54	–7 to 72	3.1–3.7 (2.1–5.8)		More unlikely than likely				
> 1000	Total range	RCP8.5	1840–2310	5350–7010	52 to 95	74 to 178	4.1–4.8 (2.8–7.8)	Unlikely ¹¹	Unlikely	More unlikely than likely			

Les scenarios du GIEC prennent déjà en compte la capture et séquestration du carbone (principalement afforestation et BECCS*).

Scenarios GIEC <+1,5°C en 2100

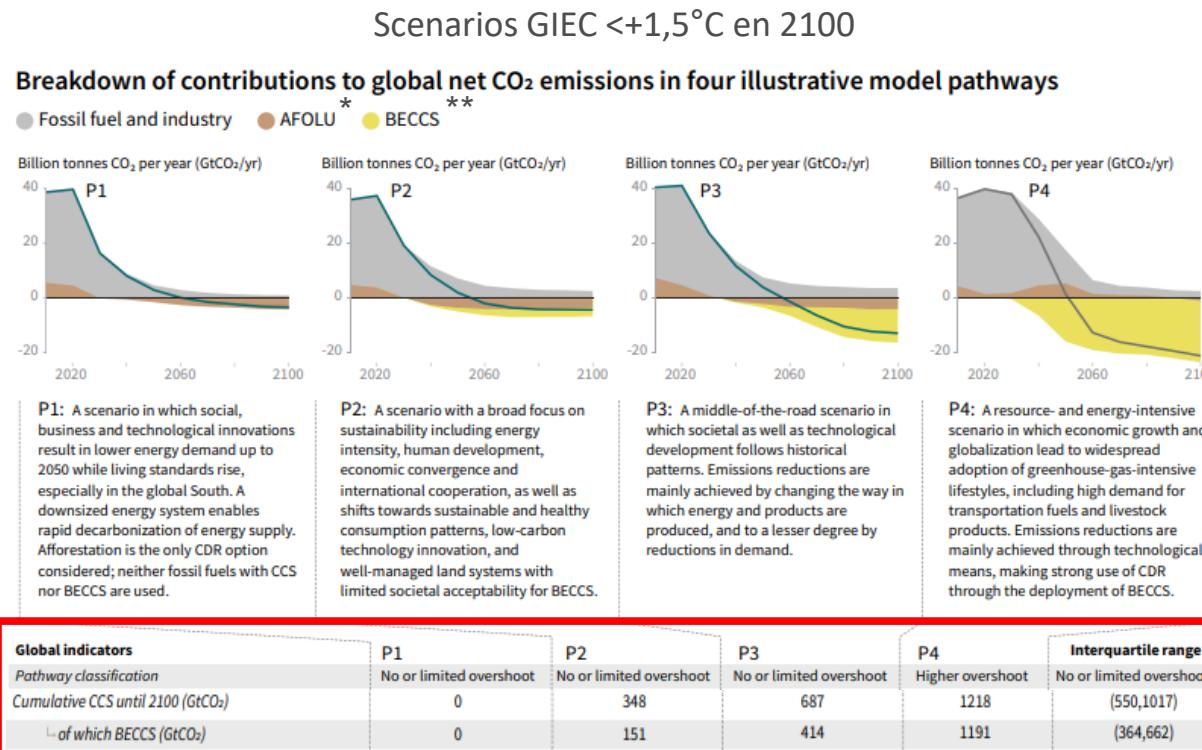
C.3 All pathways that limit global warming to 1.5°C with limited or no overshoot project the use of carbon dioxide removal (CDR) on the order of 100–1000 GtCO₂ over the 21st century. CDR would be used to compensate for residual emissions and, in most cases, achieve net negative emissions to return global warming to 1.5°C following a peak (*high confidence*). CDR deployment of several hundreds of GtCO₂ is subject to multiple feasibility and sustainability constraints (*high confidence*). Significant near-term emissions reductions and measures to lower energy and land demand can limit CDR deployment to a few hundred GtCO₂ without reliance on bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) (*high confidence*). {2.3, 2.4, 3.6.2, 4.3, 5.4}

C.3.1 Existing and potential CDR measures include afforestation and reforestation, land restoration and soil carbon sequestration, BECCS, direct air carbon capture and storage (DACCs), enhanced weathering and ocean alkalization. These differ widely in terms of maturity, potentials, costs, risks, co-benefits and trade-offs (*high confidence*). To date, only a few published pathways include CDR measures other than afforestation and BECCS. {2.3.4, 3.6.2, 4.3.2, 4.3.7}

C.3.2 In pathways limiting global warming to 1.5°C with limited or no overshoot, BECCS deployment is projected to range from 0–1, 0–8, and 0–16 GtCO₂ yr⁻¹ in 2030, 2050, and 2100, respectively, while agriculture, forestry and land-use (AFOLU) related CDR measures are projected to remove 0–5, 1–11, and 1–5 GtCO₂ yr⁻¹ in these years (*medium confidence*). The upper end of these deployment ranges by mid-century exceeds the BECCS potential of up to 5 GtCO₂ yr⁻¹ and afforestation potential of up to 3.6 GtCO₂ yr⁻¹ assessed based on recent literature (*medium confidence*). Some pathways avoid BECCS deployment completely through demand-side measures and greater reliance on AFOLU-related CDR measures (*medium confidence*). The use of bioenergy can be as high or even higher when BECCS is excluded compared to when it is included due to its potential for replacing fossil fuels across sectors (*high confidence*). (Figure SPM.3b) {2.3.3, 2.3.4, 2.4.2, 3.6.2, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.7, 4.4.3, Table 2.4}

* BECCS : Bio-Energy with Carbon Capture and Storage (description dans la suite du document)

Pour rester <+1,5°C et selon les scenarios, il pourrait être nécessaire de retirer >1200 GtCO₂ de l'atmosphère d'ici 2100.



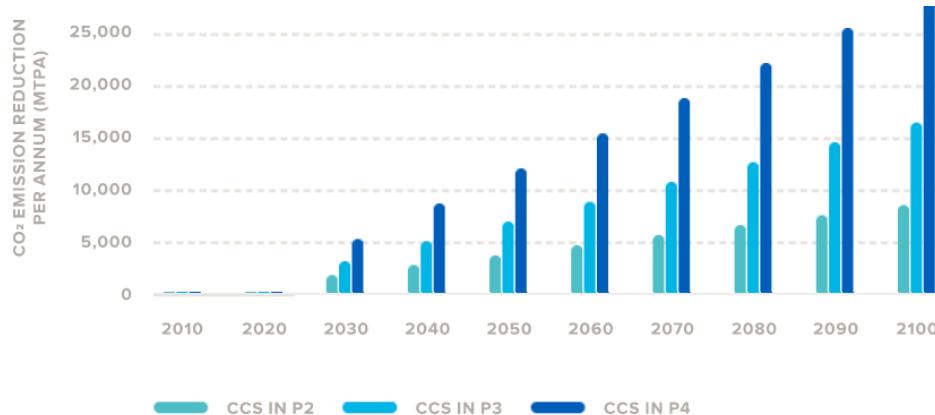
* AFOLU : Agriculture, Forestry and Other Land Use

** BECCS : Bio-Energy with Carbon Capture and Storage

Hors scenario P1 (le moins crédible), la contribution des CCS* serait comprise entre 8 et 30 GtCO₂/an en 2100.

FIGURE 1: CCS contribution in CO₂ emission reduction in IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C.

Data analysis based on the Global CCS Institute CO₂RE database¹ and IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C².



P2: A SUSTAINABILITY-ORIENTED SCENARIO WHERE EMISSION REDUCTIONS ARE MAINLY ACHIEVED BY HIGH HUMAN AND LOW-CARBON TECHNOLOGY DEVELOPMENT, AND LOW DEMAND IN ENERGY AND PRODUCTS

P3: A MIDDLE-OF-THE-ROAD SCENARIO WHERE EMISSIONS REDUCTIONS ARE MAINLY ACHIEVED BY CHANGING THE PRODUCTION WAY OF ENERGY AND PRODUCTS, AND TO A LESSER DEGREE BY DEMAND REDUCTIONS

P4: A RESOURCE-AND ENERGY-INTENSIVE SCENARIO WHERE EMISSIONS REDUCTIONS ARE MAINLY ACHIEVED THROUGH TECHNOLOGICAL MEANS, MAKING STRONG USE OF CARBON DIOXIDE REMOVAL THROUGH THE DEPLOYMENT OF BIOENERGY WITH CCS

* CCS : Carbon Capture and Storage. Méthodes de capture et de stockage du carbone

Capter et stocker plusieurs dizaines de GtCO₂, ce n'est pas rien...

CDR at the Gigaton Scale



1 Gigaton is Approximately Equal to:

Volume



9 billion barrels of supercritical CO₂, which is twice as much as 2018 U.S. domestic oil production of 4 billion barrels

Weight



12x the amount of steel manufactured in the U.S. in 2017

Emissions



CO₂ emissions from entire U.S. light-duty vehicle fleet in 2017 (250 million vehicles)

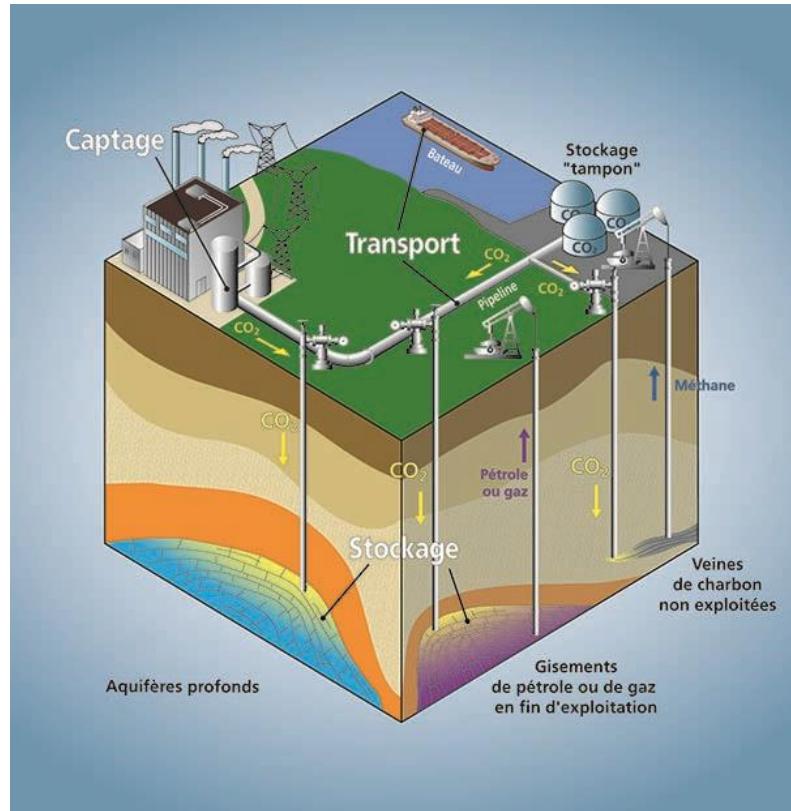
Un peu de vocabulaire : ne pas confondre CCS, CCU et CDR

	Carbon Capture & Storage CCS	Carbon Capture & Use CCU	Carbon Dioxide Removal CDR
Source de CO2	Concentrée (industries de l'acier, du ciment, de l'ammoniac, des déchets, centrales à charbon et gaz...)		Diffuse (atmosphère, océan)
Objectif	Diminuer les émissions nettes d'un site polluant	Récupérer et valoriser le CO2 d'un site polluant (plastiques, biofuel...)	Créer des puits de carbone à des fins environnementales
Émissions négatives ?	Non		Oui

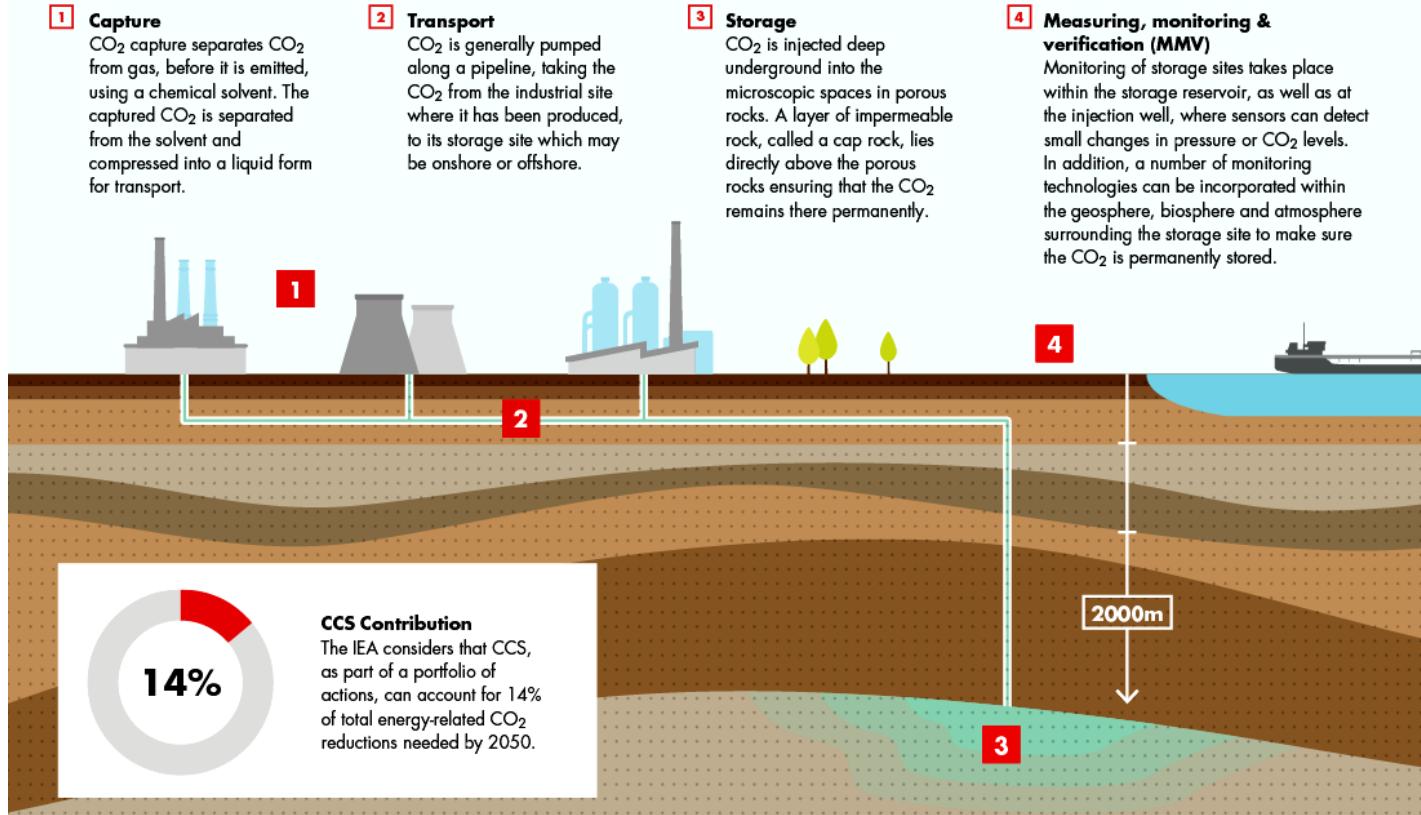
- Les industriels gros émetteurs de CO2 (Oil & Gas, métallurgie, cimenterie...) s'intéressent de près aux CCU/S qui leur permettraient d'améliorer leur bilan carbone.
- Les BECCS, bien que faisant appel au CCS, sont à ranger dans la catégorie CDR car elles ont un bilan CO2 global négatif.
- Les pouvoirs publics qui se fixent des objectifs climatiques (et pousseront les CDR dont les BECCS) et les industries CO2 intensives qui devront verdier leur activité ont donc une convergence d'intérêt autour du CCS.

Agenda

- 1 CO₂ anthropique : les ordres de grandeur
- 2 Carbon Capture, Usage and Storage (CCUS)
- 3 Carbon Dioxide Removal (CDR)
- 4 Synthèse et conclusion



Le CCS se déroule en 3 phases : capture du carbone, transport et stockage.



La phase de capture est encore trop coûteuse en capital et en énergie pour être rentable.

1

Capture du CO₂

3 procédés possibles :

- **Postcombustion** : un solvant se lie aux molécules de CO₂ en fin de combustion, puis est régénéré dans un autre compartiment pour libérer le CO₂ fixé.
- **Oxycombustion** : l'O₂ remplace l'air dans la combustion pour éviter d'avoir à séparer l'azote et les NOx du CO₂ dans les fumées. Il suffit alors de laver (impuretés) et déshydrater (H₂O) les fumées pour isoler le CO₂.
- **Précombustion** : on gazifie le combustible pour obtenir un mélange (CO + H₂O) ; suite à une transformation chimique on obtient un mélange (CO₂ + H₂) ; on extrait le CO₂ par solvant et on produit de l'énergie avec le H₂.

Selon les procédés, on peut capturer jusqu'à 99% du CO₂ émis.

Challenges capture (cas centrale charbon)

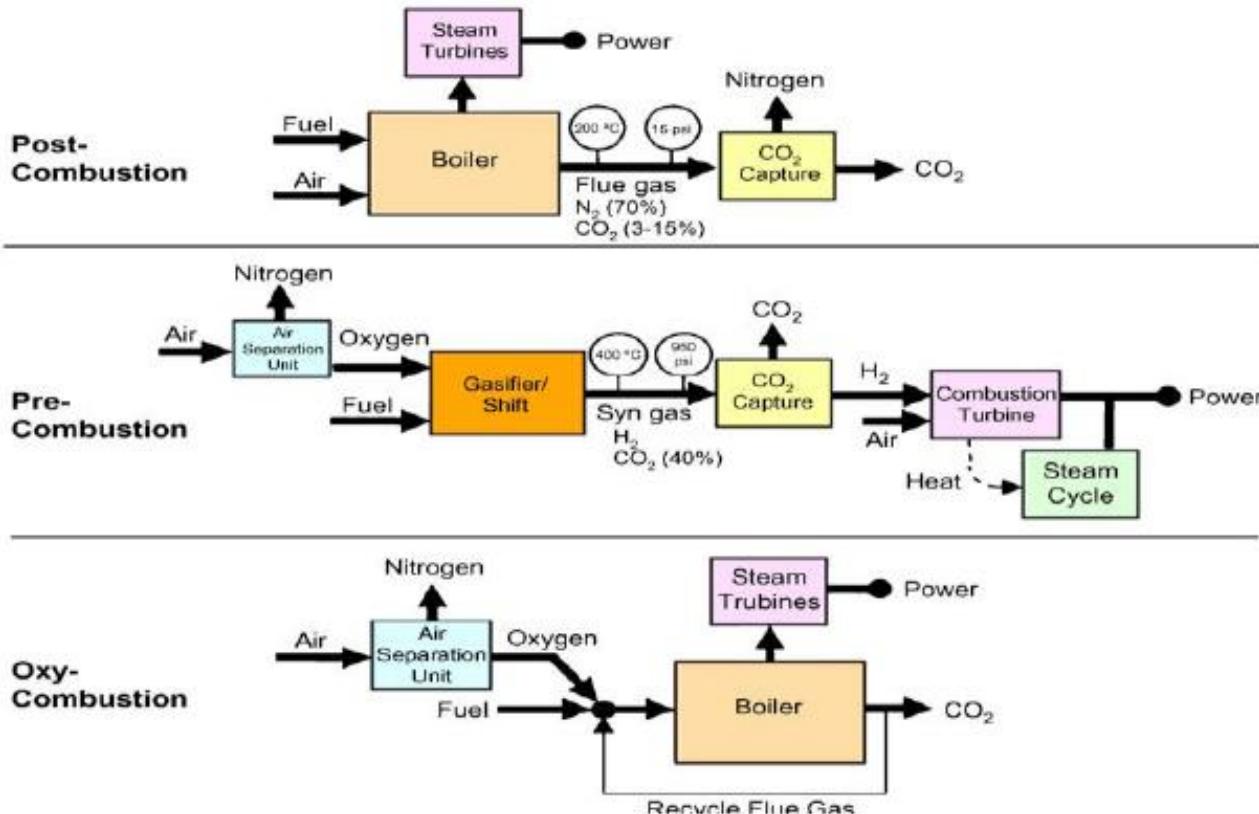
Pénalité coût :

- Coût de capital : ajouter la capture du carbone sur une centrale engendre un surcoût très important (45 à 70% en moyenne, de l'ordre de \$1B supplémentaire). Ce coût est répercuté sur l'énergie produite. Le surcoût pour des centrales conçues nativement avec ce dispositif serait bien moindre.
- Coût : \$60/tonne captée selon le DOE. Objectif \$40 en 2020-2025 et \$30 après 2030.
- Un rétrofit des centrales n'est pas rentable avec le prix du carbone actuel.

Pénalité énergétique :

- L'étape de capture du CO₂ est coûteuse en énergie. Pour une centrale électrique, cette pénalité énergétique peut représenter plus de 25% de l'énergie produite.
- La 2ème génération de CCS vise 15 % de pénalité énergétique.

Présentation visuelle des 3 procédés de capture du CO₂.



Le transport et la séquestration présentent des challenges techniques et économiques qui ne sont a priori pas insurmontables.

2

Transport

Par pipeline ou bateau.

Challenges transport

- Pas de challenge technologique, ces procédés sont maîtrisés
- Problèmes réglementaires et économiques
- Droits de passage
- Corrosion due à la présence d'impuretés
- Coût

3

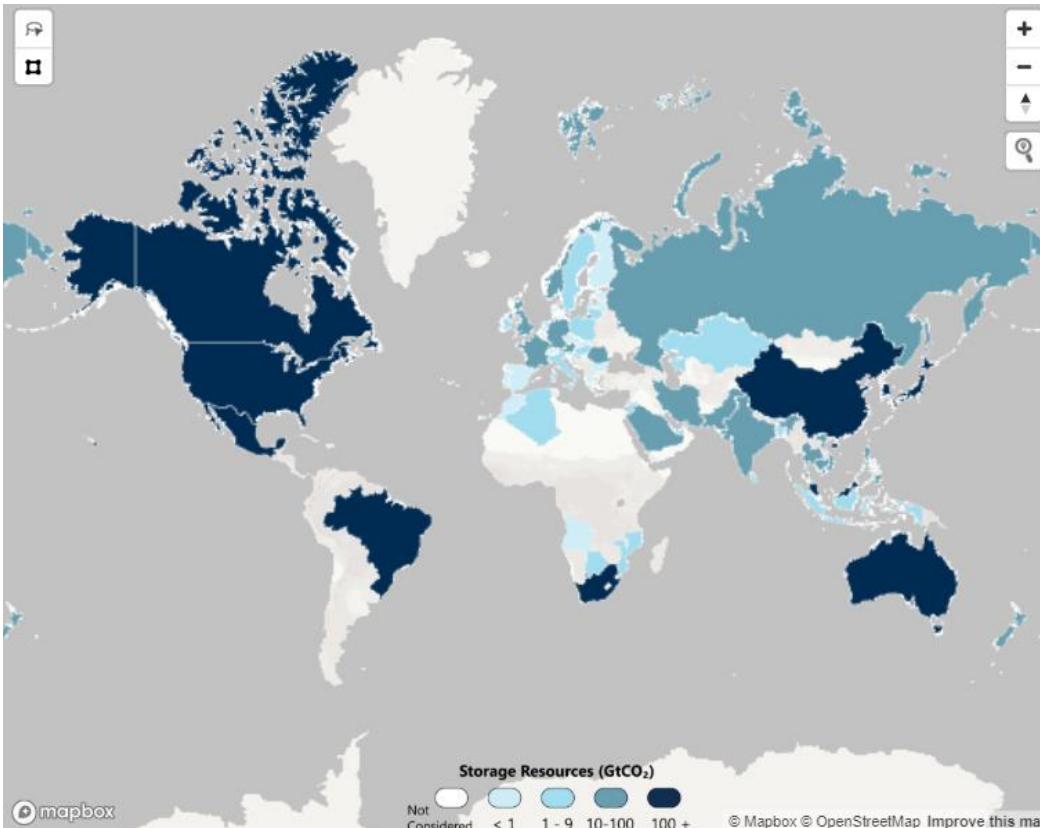
Séquestration du CO₂

- Stockage géologique (champs pétroliers, veines de charbon non exploitables, aquifères salins)
- Stockage dans les océans
- Carbonatation minérale
- Potentiel : il y a assez de réservoirs pour stocker 10'000 GtCO₂ dans des réservoirs souterrains

Challenges séquestration

- La recherche de sites de stockage pourra être chronophage et donc chère
- Permanence de la séquestration
- Stabilité géologique
- Risque de fuite
- Pollution par des métaux
- Propriété et responsabilité du CO₂ stocké
- Acceptabilité sociale

Estimations des ressources en stockage de CO₂.



En CCU, le CO₂ est surtout utilisé pour l'extraction pétrolière mais il a d'autres débouchés. Le recyclage permet de réduire son utilisation.



Construction Materials

- Cement and concrete
- Asphalt
- Aggregate
- Timber/super hardwood



Fuel

- Synthetic (methanol, butanol, natural gas, syngas, etc.)
- Micro-algae fuel
- Macro-algae fuel



New materials

- Carbon fiber
- Carbon nanotubes and fullerenes
- Graphene



Industrial gas & fluids

- Enhanced oil recovery *
- Enhanced coal bed methane recovery
- Enhanced water recovery
- Semiconductor fabrication
- Power cycles



Polymers

- Polyurethane foams
- Polycarbonate (glass replacement)
- Acrylonitrile butadiene styrene
- Many more



Agriculture & food

- Algae-based food or animal feed
- Microbial fertilizer
- Biochar, bio-pesticides, bio-cosmetics



Chemicals

- Preservatives (formic acid)
- Medicinal
- Antifreeze (ethylene glycol)
- Carbon black
- Many more

Source: Independent study commissioned by CO₂ Sciences

* Enhanced Oil Recovery (EOR) = Récupération assistée du pétrole. L'injection de CO₂ dans un gisement permet d'augmenter la quantité extraite. Il peut s'agir dans ce cas de CCUS puisque le CO₂ injecté reste sous terre. C'est le principal usage du CO₂ en CCU.

L'industrie du pétrole et du gaz a créé l'OGCI, un fonds de \$1B+ dédié en partie au CCUS.



OUR MEMBERS STRATEGY & POLICY CLIMATE INVESTMENTS NEWS & RESOURCES CONTACT

Our Focus

Our investments are focused on three objectives:

Reducing Methane Leakage



Reducing Carbon Dioxide



Recycling Carbon Dioxide (ccus)



سaudiarabia
saudi aramco



Les 6 dernières news de l'OGCI concernent les CCS ou les CCU (ou CCUS, la combinaison des 2).

 <p>OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE</p> <p>Oil and Gas Climate Initiative announces progress towards methane target and new CCUS initiative to scale up actions towards climate goals</p> <p>September 23, 2019</p> <p>CCUS</p>	 <p>OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE</p> <p> CARBON CAPTURE, UTILIZATION & STORAGE ACCELERATING CCUS TOGETHER AN INITIATIVE OF THE CLEAN ENERGY MINISTERIAL</p> <p>Oil and Gas Climate Initiative and key governments crystallise commitment to develop a commercial CCUS industry worldwide</p> <p>September 23, 2019</p> <p>CCUS</p>	 <p>OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE</p> <p>11 selected proposals present to OGCI Climate Investments, investors and OGCI member companies to help jumpstart global CCUS industry</p> <p>September 12, 2019</p> <p>CCUS</p>
 <p>OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE</p> <p>OGCI Climate Investments announces a new investment in Wabash Valley Resources' carbon capture and sequestration project</p> <p>May 21, 2019</p> <p>CCS</p>	 <p>OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE</p> <p>OGCI Climate Investments announces progression of the UK's first commercial full-chain Carbon Capture, Utilization and Storage Project</p> <p>November 28, 2018</p> <p>CCUS</p>	 <p>OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE</p> <p>Oil and Gas Climate Initiative holds workshop on the potential of Carbon Capture, Use and Storage in the Gulf Region</p> <p>November 6, 2018</p> <p>CCUS</p>

Total et l'IFPEN ont engagé un partenariat à 40M€ dans les CCUS.

Total and IFPEN Team Up to Accelerate Carbon Reduction R&D

 2019/07/09

Paris — IFP Energies Nouvelles (IFPEN) and Total announce that they signed a strategic R&D partnership yesterday, that includes an agreement to endow a chair at the IFP School, on carbon capture, utilization and storage (CCUS) and technologies to curb CO₂ emissions. The roughly €40 million partnership covers a period of five years.

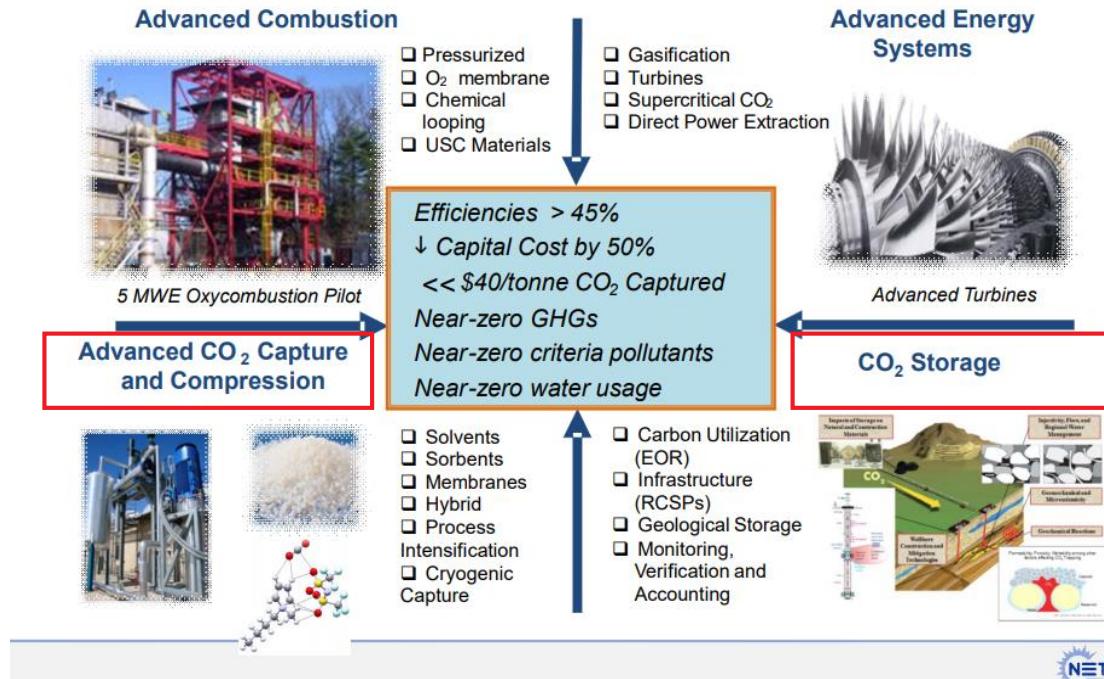
The agreement has two parts:

- A **strategic R&D partnership on carbon capture, utilization and storage (CCUS)** aims to reduce the cost of infrastructure and improve the CCUS chain's energy efficiency to secure its large-scale deployment. The partnership steps up the long-standing collaboration between Total and IFPEN by marshaling additional resources. The research will focus on fields related to new materials, process scale-up, underground carbon storage in deep saline aquifers, technical and economic feasibility studies and the quantification of environmental benefits for the entire CCUS chain.
- The **Carbon Management and Negative CO₂ Emissions Technologies to Net-Zero Carbon Future Chair** will help train a new generation of international researchers and experts who will develop technologies to reduce carbon in the atmosphere. Overseen by a scientific committee comprised of world-renowned, independent experts, the chair will bring together seven doctoral and five post-doctoral researchers for five years.

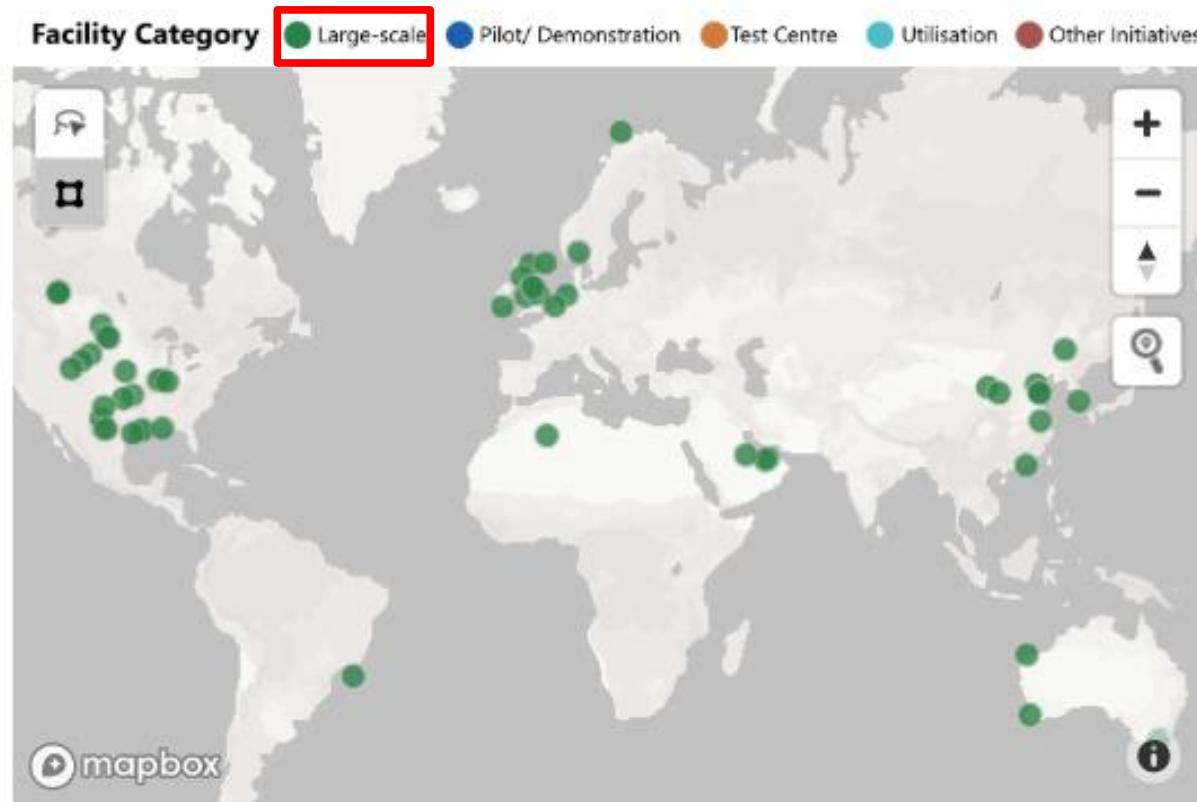
Le CCS est aussi à l'agenda des industriels du charbon.

Coal R&D: Integrated Solutions are Essential to meet Objectives

Source: US DOE



Il y a aujourd’hui une cinquantaine d’installations CCU/S « à grande échelle », avec généralement des objectifs de capture <5 MtCO₂/an.



Exemple de projet pilote en France dans le secteur de la métallurgie (objectif 0,5 MtCO2/an).

ArcelorMittal équipe son aciéries de Dunkerque d'un système de captage-stockage de CO₂

Le sidérurgiste s'allie à Total, Axens et l'Institut français du pétrole énergies nouvelles pour un pilote qui sera opérationnel en 2021.

Par Philippe Jacqué - Publié le 28 mai 2019 à 10h04 - Mis à jour le 28 mai 2019 à 10h10



C'est un pas supplémentaire dans la lutte contre le réchauffement climatique. Mardi 28 mai, le sidérurgiste Arcelor, le pétrolier Total, l'ingénieriste Axens et l'Institut français du pétrole énergies nouvelles (Ifpen) ont annoncé le lancement d'un pilote industriel de captage et de stockage de dioxyde de carbone (CO₂) à Dunkerque (Nord). Ce projet, d'un coût de vingt millions d'euros, sera financé aux trois quarts par l'Union européenne.

C'est la deuxième grande initiative de cette nature après celle d'Air Liquide, qui a mis en place en 2015 une unité de capture de CO₂ dans son usine d'hydrogène du Havre (Seine-Maritime). « *En 2021, le pilote devra capter 0,5 tonne de CO₂ issu du gaz sidérurgique*, explique Eric Niedziela, le patron des activités françaises d'Arcelor. A l'horizon 2025, nous accélérerons et un démonstrateur industriel devra capter près de 125 tonnes de CO₂ par heure, soit plus d'un million de tonnes par an. » D'ici à 2035, le futur pôle européen de Dunkerque se fixe pour ambition de traiter 10 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an.

Le Green New Deal européen encouragera les technologies de capture du CO₂



EUROPEAN
COMMISSION

Brussels, 11.12.2019
COM(2019) 640 final

COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS

The European Green Deal

The transition to climate neutrality also requires smart infrastructure. Increased cross-border and regional cooperation will help achieve the benefits of the clean energy transition at affordable prices. The regulatory framework for energy infrastructure, including the TEN-E Regulation¹², will need to be reviewed to ensure consistency with the climate neutrality objective. This framework should foster the deployment of innovative technologies and infrastructure, such as smart grids, hydrogen networks or carbon capture, storage and utilisation, energy storage, also enabling sector integration. Some existing infrastructure and assets will require upgrading to remain fit for purpose and climate resilient.

¹¹ Regulation (EU) 2018/1999 on the Governance of the Energy Union and Climate Action

¹² Trans-European Networks - Energy (TEN-E) Regulation

Access to resources is also a strategic security question for Europe's ambition to deliver the Green Deal. Ensuring the supply of sustainable raw materials, in particular of critical raw materials necessary for clean technologies, digital, space and defence applications, by diversifying supply from both primary and secondary sources, is therefore one of the pre-requisites to make this transition happen.

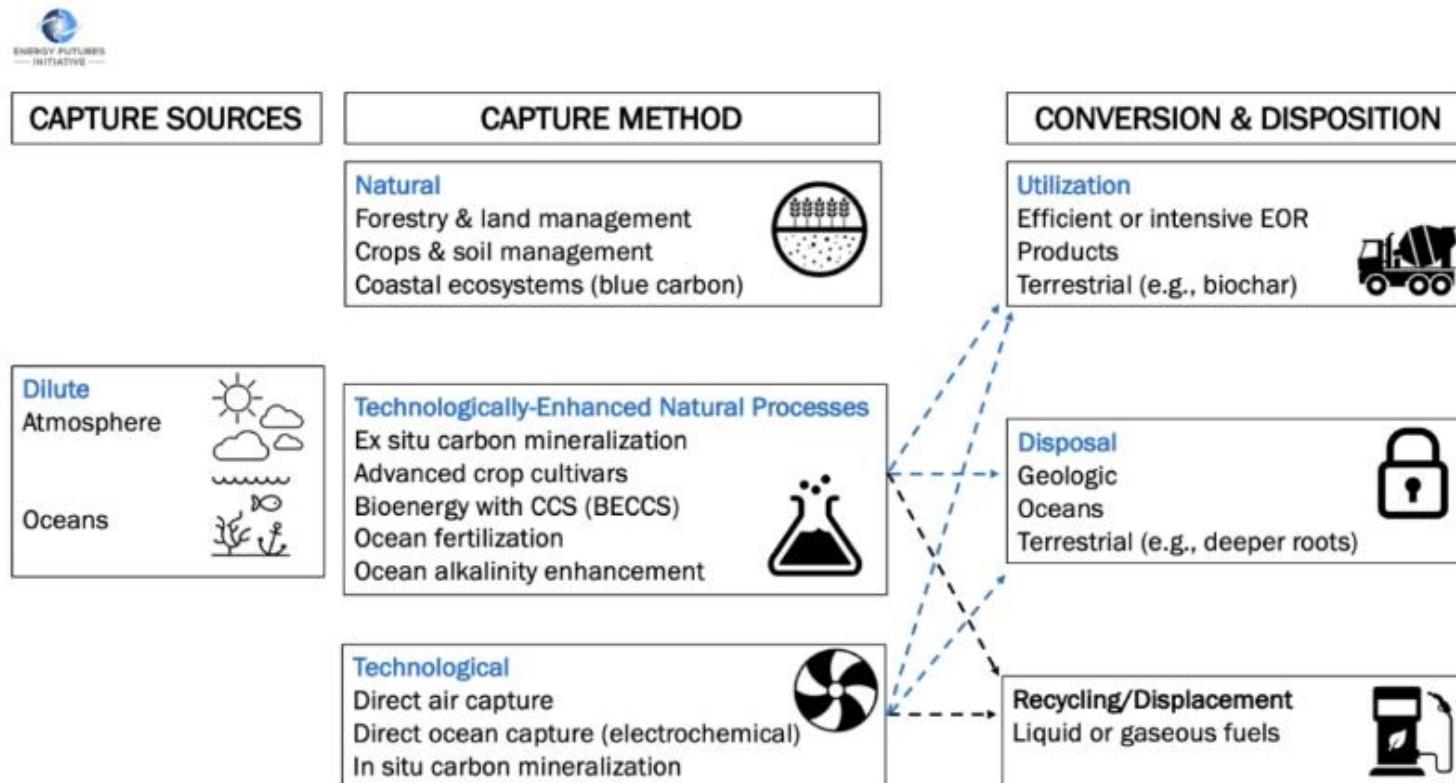
EU industry needs 'climate and resource frontrunners' to develop the first commercial applications of breakthrough technologies in key industrial sectors by 2030. Priority areas include clean hydrogen, fuel cells and other alternative fuels, energy storage, and carbon capture, storage and utilisation. As an example, the Commission will support clean steel breakthrough technologies leading to a zero-carbon steel making process by 2030 and will explore whether part of the funding being liquidated under the European

Agenda

- 1 CO₂ anthropique : les ordres de grandeur
- 2 Carbon Capture, Usage and Storage (CCUS)
- 3 Carbon Dioxide Removal (CDR)
- 4 Synthèse et conclusion



Il y a 3 types d'approches pour le CDR : naturelles, technologiques et hybrides.



Note : seules les principales méthodes CDR sont présentées ici

Les forêts ont un rôle important à jouer sur la capture du carbone mais des surfaces importantes sont nécessaires.



Description

Principe : étendre et gérer les forêts avec un objectif CO₂.

- **Afforestation** : plantation d'arbres sur une surface longtemps restée déboisée (ou n'ayant jamais été boisée)
- **Reforestation** : plantation d'arbres dans le but de reboiser une surface déboisée par l'homme
- **Gestion forestière optimisée** :
 - Extension du temps entre le plantage et l'abattage pour obtenir de plus gros arbres
 - Pratiques sylvicoles visant à accélérer la pousse
 - Traitement anti-insectes ou maladies pour protéger les arbres
- **Décharges optimisées** : stockage de déchets forestiers dans des décharges limitant la décomposition afin de conserver le CO₂ captif.

Impacts négatifs potentiels & limitations

- Disponibilité des terres : 1 GtCO₂/an nécessite entre 3,4 Mha et 17,8 Mha de terrain (~1/3 de la France) convertis à la forêt.
- Modification de l'albédo
- Changement des rythmes hydrologiques
- Perte de biodiversité en cas de monoculture

Potentiel 2050

- 0,5 – 3,6 GtCO₂/an*
- [0,5 – 7 GtCO₂/an]**

Coûts à l'échelle

- \$100 - \$200/tCO₂*
- [\$15 - \$400/tCO₂]**

* Estimations Sabine Fuss et al 2018

** Valeurs extrêmes trouvées dans la littérature

La séquestration du carbone dans les sols possède un potentiel intéressant pour un coût réduit.



Description

La teneur en carbone organique dans le sol est un équilibre entre :

- Des apports en carbone (via les racines, le fumier, les résidus végétaux...)
- Des pertes en carbone (principalement par la respiration, + perturbation du sol)

Les pratiques qui augmentent les intrants ou réduisent les pertes permettent de séquestrer le carbone dans le sol. Plusieurs approches sont envisageables (avec des effets positifs sur les rendements et la résilience des sols) :

- **Gestion orientée CO₂ des cultures et des prairies** : absence de labour, cultures de couverture, compost, fumier comme amendement, réduction du surpâturage...)
- **Création de tourbières ou de marais**
- **Inversion profonde des sols** : inversion par labourage profond de la couche superficielle riche en carbone et de la couche profonde plus pauvre en carbone et ainsi disponible pour du captage.
- **Cultures à haut apport en carbone** : développement d'espèces ayant des racines plus grosses et plus profondes pour un stockage accru.

Impacts négatifs potentiels & limitations

- Complexité technique de certaines méthodes de gestion.
- Potentielle augmentation des émissions de NO₂.
- Saturation à terme des puits de carbone et réversibilité si les pratiques de gestion cessent.

Potentiel 2050

- **2 – 5 GtCO₂/an***
- **[0,5 – 11 GtCO₂/an]****

Coûts à l'échelle

- **\$0 – \$100/tCO₂***
- **[-\$45 – \$100/tCO₂]****

* Estimations Sabine Fuss et al 2018

** Valeurs extrêmes trouvées dans la littérature

Le biochar présente de nombreux avantages pour les sols mais son potentiel reste réduit.



Description

Le biochar (« *bio-charcoal* ») est un charbon d'origine végétale obtenu par pyrolyse de biomasse végétale d'origines diverses, généralement des déchets de scierie ou des résidus agricoles.

La biomasse capte du CO₂ pendant sa croissance. Celui-ci est fixé sous une forme solide très stable dans le biochar lors de la pyrolyse, conduisant à un bilan CO₂ atmosphérique négatif.

Le biochar, qui se présente sous la forme de petits fragments noirs, sert à amender les sols. Il peut avoir **plusieurs effets positifs**, parmi lesquels :

- Augmentation des rendements
- Diminution des émissions de NO₂ et CH₄ de certains types de sols
- Augmentation du pH des sols acides
- Diminution du lessivage des nutriments, notamment des nitrates

La pyrolyse permet également de produire des biocarburants.

Impacts négatifs potentiels & limitations

- Dégagement de produits toxiques pendant la pyrolyse (composés aromatiques, par ex.) dont l'impact sur la biologie des sols est inconnu.
- Mécanismes d'action sur les sols et selon les climats mal connus.
- Compétition sur les matières végétales (BECCS)

Potentiel 2050

- 0,5 – 2 GtCO₂/an*
- [1 – 35 GtCO₂/an]**

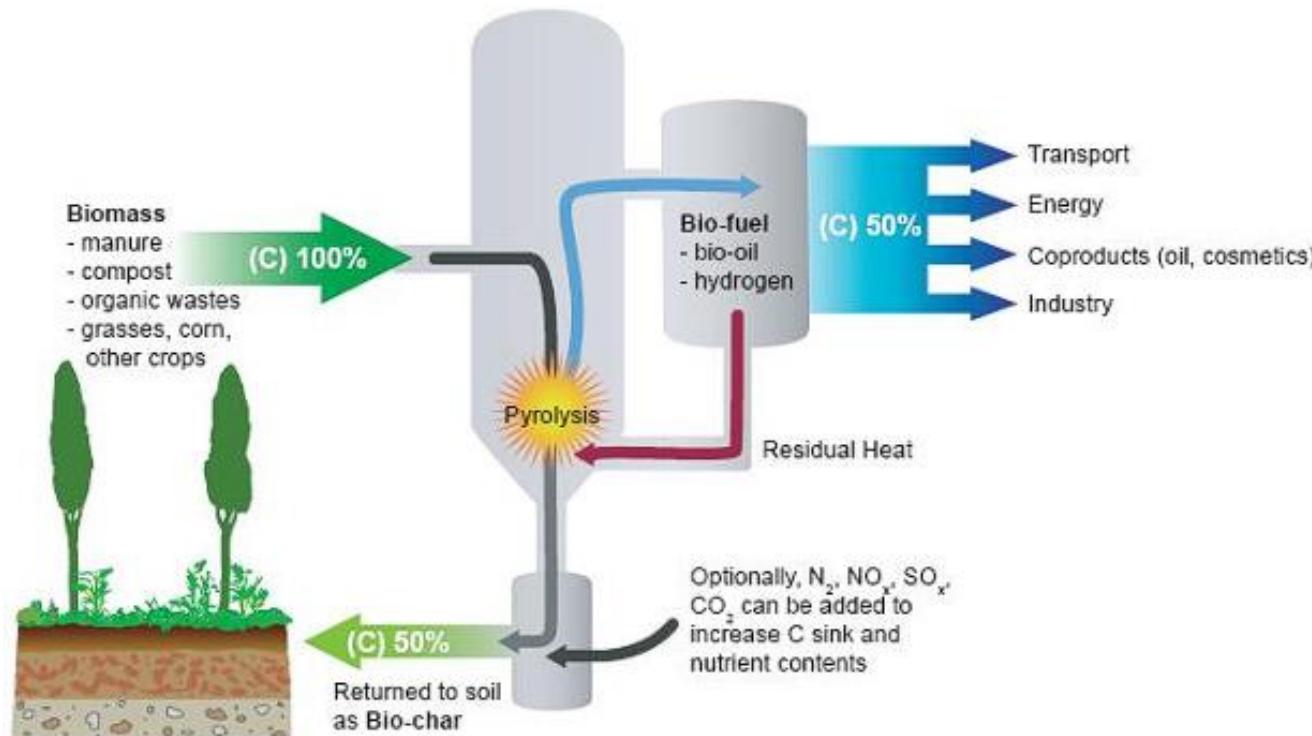
Coûts à l'échelle

- \$30 - \$120/tCO₂*
- [\$10 - \$345/tCO₂]**

* Estimations Sabine Fuss et al 2018

** Valeurs extrêmes trouvées dans la littérature

Présentation visuelle du procédé de fabrication de biochar.



La pyrolyse est une réaction chimique de décomposition d'un corps organique sous l'action de la chaleur (300 – 800°C) et sans autres réactifs.

Cette transformation, distincte de la combustion qui fait intervenir un comburant comme l'oxygène, crée de nouveaux produits suite à un réarrangement atomique ou moléculaire.

Les BECCS ont un potentiel important et un coût relativement réduit, mais nécessitent d'énormes surfaces dédiées.



Description

Le terme BECCS (Bio Energie with Carbon Capture and Storage) recouvre 2 concepts :

- **Bioélectricité avec CCS** : combustion de biomasse dans une chaudière afin de générer de la vapeur pour la production d'électricité, associée à la capture du CO₂ et à son stockage.
- **Bio-fuel avec CCS** : conversion de biomasse en carburant (liquide et/ou gazeux) par différents procédés, potentiellement accompagnée de production de biochar (+ capture et stockage).

Comme les plantes absorbent du CO₂ pendant leur croissance, leur conversion en énergie ou carburant tout en captant et séquestrant le CO₂ peut amener à une émission négative.

Les sources de biomasse comprennent les résidus et les déchets agricoles, les résidus et les déchets forestiers, les déchets industriels et municipaux et les cultures énergétiques spécifiquement cultivées. Les algues représentent une autre alternative.

Impacts négatifs potentiels & limitations

- Disponibilité des terres : 1 GtCO₂/an nécessite 78 Mha de terrain (1,5 fois la surface de la France).
- Modification de l'albédo
- Changement des rythmes hydrologiques
- Perte de biodiversité en cas de monoculture
- Nécessité de construire l'installation de combustion proche des cultures (pour éviter le transport)

Potentiel

- 0,5 – 5 GtCO₂/an*
- [1 – 85 GtCO₂/an]**

Coûts à l'échelle

- \$100 – \$200/tCO₂*
- [\$15 – \$400/tCO₂]**

* Estimations Sabine Fuss et al 2018

** Valeurs extrêmes trouvées dans la littérature

Les trajectoires avec beaucoup de BECCS sont incompatibles avec la biodiversité

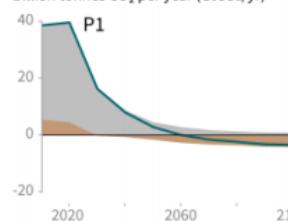


Scenarios GIEC <+1,5°C en 2100

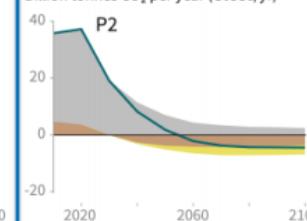
Breakdown of contributions to global net CO₂ emissions in four illustrative model pathways

- Fossil fuel and industry
- AFOLU
- BECCS

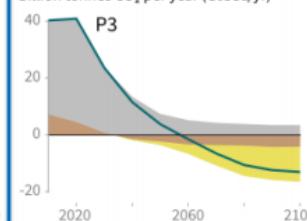
Billion tonnes CO₂ per year (GtCO₂/yr)



Billion tonnes CO₂ per year (GtCO₂/yr)



Billion tonnes CO₂ per year (GtCO₂/yr)



Billion tonnes CO₂ per year (GtCO₂/yr)

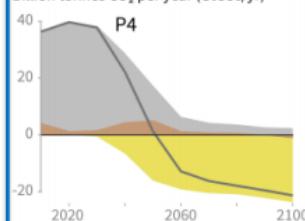


Figure SPM3, IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels*

Déploiement limité de CDR/BECCS

En 2050, 7% des terres agricoles mondiales dédiées aux cultures de bioénergie

= Moindre impact sur la biodiversité et la sécurité alimentaire

Très grand déploiement de CDR/BECCS

En 2050, 1/3 des terres agricoles mondiales dédiées aux cultures de bioénergie (taille de l'Inde)

= Grand impact sur la biodiversité et la sécurité alimentaire

L'impact biodiversité du BECCS (BioEnergy with Carbon Capture & Storage) à grande échelle est lié à (1) la vaste étendue (2) sur des zones de haute biodiversité (tropiques), (3) avec monocultures et pesticides.

Il y a très peu d'installations à grande échelle sur les BECCS.
La plus grosse retire 1 MtCO₂/an.



Figure 2. Bioenergy and carbon capture and storage facilities worldwide (Global CCS Institute, 2019)

La fertilisation des océans est une approche hautement incertaine tant sur le potentiel que sur les mécanismes en jeu.



Description

La technique de fertilisation des océans consiste à ensemencer les zones des océans pauvres en biomasse avec les nutriments qui limitent le développement de cette biomasse. Il s'agit le plus souvent du fer. Lors d'expérimentations, des bateaux ont donc déversé des tonnes de fer dans ces zones pour provoquer une efflorescence de phytoplancton.

Ces organismes sont censés fixer le CO₂ par photosynthèse et le transférer vers le fond des océans par sédimentation de la matière organique, comme cela se produit dans les zones océaniques riches en biomasse. La théorie est que l'opération de fertilisation stimule ainsi la pompe biologique à carbone là où elle est peu active.

Impacts négatifs potentiels & limitations

- Disruption des écosystèmes marins
- Appauvrissement en oxygène à la surface des zones traitées
- Augmentation des émissions de NO₂ et CH₄
- Fortes incertitudes sur mécanismes en jeu et les impacts
- Une étude du MIT (2020) tend même à montrer que l'impact global serait nul.

Potentiel

- Très limité*
- [0,5 – 44 GtCO₂/an]**

Coûts à l'échelle

- ?*
- [\$0 – \$460/tCO₂]**

* Estimations Sabine Fuss et al 2018

** Valeurs extrêmes trouvées dans la littérature

L'altération forcée (Enhanced Weathering) pourrait avoir un impact important, mais les besoins en matériaux sont grands.



Description

L'altération est un processus naturel lent dans lequel certaines roches sont décomposées et dissoutes à la surface de la terre au contact de CO₂ et d'eau pour former d'autres minéraux.

En broyant des carbonates ou des silicates à une taille de grain donnée, on optimise la surface réactive et on accélère cette altération (et donc la capture de CO₂).

- **Sur terre** : des silicates sont broyés et déposés en surface terrestre (terres agricoles par ex.) où ils captent du CO₂ pour former des minéraux carbonatés sur place et/ou des ions bicarbonates qui sont transportés par les rivières jusqu'aux océans.
- **En mer** : des carbonates sont broyés et dispersés en surface afin d'augmenter l'alcalinité et de permettre la capture du CO₂ atmosphérique par l'océan jusqu'à l'équilibre.

Impacts négatifs potentiels & limitations

- Besoin d'énormes quantités de silicates/carbonates (opérations minières massives + transport avec fortes conséquences environnementales, sociales et sanitaires).
- Risque de libération de métaux lourds sur les sols.
- Augmentation locale du pH des sols.
- Effets sur les écosystèmes des rivières

Potentiel

- **2 – 4 GtCO₂/an***
- **[0 – 100 GtCO₂/an]****

Coûts à l'échelle

- **\$50 - \$200/tCO₂***
- **[\$15 – \$3460/tCO₂]****

* Estimations Sabine Fuss et al 2018

** Valeurs extrêmes trouvées dans la littérature

Le Direct Air Capture (DAC) est à ce jour la technique la plus chère, car très énergivore.



Description

Principe : capture du CO₂ dans l'air ambiant, couplée à un système de séquestration ou d'utilisation (le plus souvent pour l'instant). Les procédés utilisant la cryogénie ou les membranes sont rares ; l'approche chimique est plus répandue. Elle présente 2 méthodes :

- **Low temperature solid sorbent (LTSS)** : des amines (dérivés de l'ammoniac) adsorbent le CO₂ d'un flux d'air envoyé par des ventilateurs. Lorsqu'elles sont saturées, le flux est stoppé et les amines sont chauffées (entre 80° et 120°C) pour relâcher le CO₂ en forme concentrée (99% pur). Elles sont ensuite refroidies et le flux d'air reprend.
- **High temperature liquid sorbent (HTLS)** : l'air est envoyé par des ventilateurs sur une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (NaOH). Le CO₂ de l'air réagit pour former du carbonate de sodium (Na₂CO₃). La solution réagit ensuite avec de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) pour former du carbonate de calcium (CaCO₃) qui est envoyé dans un calcinateur à 900°C pour libérer du CO₂ concentré (99% pur) et régénérer l'hydroxyde de calcium.

Impacts négatifs potentiels & limitations

- Procédés très énergivores (à la fois pour brasser l'air et pour capter le CO₂), d'autant plus que le CO₂ est présent dans l'air à une très faible concentration.
- Pour capter 1 GtCO₂/an avec LTTS (procédé le moins énergivore), besoin d'électricité >1300 TWh (2,5 fois la production annuelle d'électricité en France). Des optimisations sont prévues.

Potentiel

- . 0,5 – 5 GtCO₂/an*
- . [1 – 85 GtCO₂/an]**

Coûts à l'échelle

- . \$100 - \$300/tCO₂*
- . [\$25 – \$1000/tCO₂]**

* Estimations Sabine Fuss et al 2018

** Valeurs extrêmes trouvées dans la littérature

Représentation schématique des principales approches DAC

Basic Steps in DAC Process for Solid Sorbent-Based Systems



Step 1: Air Contactor



- Ambient air (primarily N₂ and O₂) enters air contactor and interacts with solid adsorbent
- CO₂ is adsorbed onto solid adsorbent to a point of saturation

Step 2: Temperature and/or Vacuum Swing Adsorption



- Solid adsorbent exposed to heat via temperature swing adsorption (with possible addition of vacuum swing adsorption) to release CO₂ from adsorbent
- Concentrated stream of CO₂ is produced

Step 3: Cooling



- Solid sorbent is cooled in a cooling unit and regenerated for subsequent reuse in the air contactor

Basic Steps in DAC Process for Liquid Solvent-Based Systems



Step 1: Air Contactor



- Ambient air (primarily N₂ and O₂) enters air contactor and interacts with potassium hydroxide aqueous solution
- CO₂ reacts with solution to produce potassium carbonate

Step 3: Calciner



- Calcium carbonate precipitate is heated in a circulating fluid bed calciner to produce calcium oxide (lime) and high-purity CO₂
- CO₂ can be compressed and is available for utilization or sequestration

Step 2: Causticizer (Pellet Reactor)



- Potassium carbonate reacted with calcium hydroxide to form small pellets of calcium carbonate precipitate
- Water is removed from the calcium carbonate precipitate

Step 4: Slaker



- Calcium oxide (lime) is hydrated and returned to pellet reactor to regenerate the potassium hydroxide capture solution for subsequent reuse in the air contactor

Une poignée de sociétés européennes et nord-américaines se positionnent sur cette technologie.

Table 2-1

Technology Characteristics of DAC Companies

Company	Location	Capture Type		Capture Method			Regeneration Temperature
		Liquid Solvent	Solid Sorbent	Absorption	Adsorption (Temperature Swing)	Adsorption (Moisture Swing)	
 Carbon Engineering	Canada	✓		✓			900 °C
 Antecy B.V.	Netherlands		✓		✓		80-100 °C
 CLIMEWORKS Capturing CO ₂ from air	Switzerland		✓		✓		100 °C
 globalthermostat a carbon negative solution	United States		✓		✓		85-95 °C
 hydrocell	Finland		✓		✓		70-80 °C
 INFINITREE	United States		✓			✓	Moisturizing
 skytree®	Netherlands		✓			✓	Moisturizing at 80-90 °C

There are several DAC companies globally, most of which employ solid sorbent-based capture systems. Note that Antecy B.V. was acquired by Climeworks in September 2019. Source: EFI, 2019. Compiled using data from Fasih et al., 2019.

A court terme, les plus grosses installations de DAC pourront capter (seulement) 1MtCO₂/an.



DIRECT AIR CAPTURE

Carbon Engineering's Direct Air Capture technology removes carbon dioxide directly from the atmosphere.

Unlike capturing emissions from industrial flue stacks, our technology captures carbon dioxide (CO₂) – the primary greenhouse gas responsible for climate change – directly out of the air around us. This can help counteract today's CO₂ emissions, and remove the large quantities of CO₂ emitted in the past that remains trapped in our atmosphere.

From our pilot facility in Squamish, Canada, we have fully demonstrated our Direct Air Capture technology and are now commercializing. Our team and partners are working to build industrial-scale Direct Air Capture facilities that will each capture one million tons of CO₂ per year – which is equivalent to the work of 40 million trees.

Note : le CO₂ capté par cette société est destiné à un usage EOR (Enhanced Oil Recovery)

Agenda

1 CO₂ anthropique : les ordres de grandeur

2 Carbon Capture, Usage and Storage (CCUS)

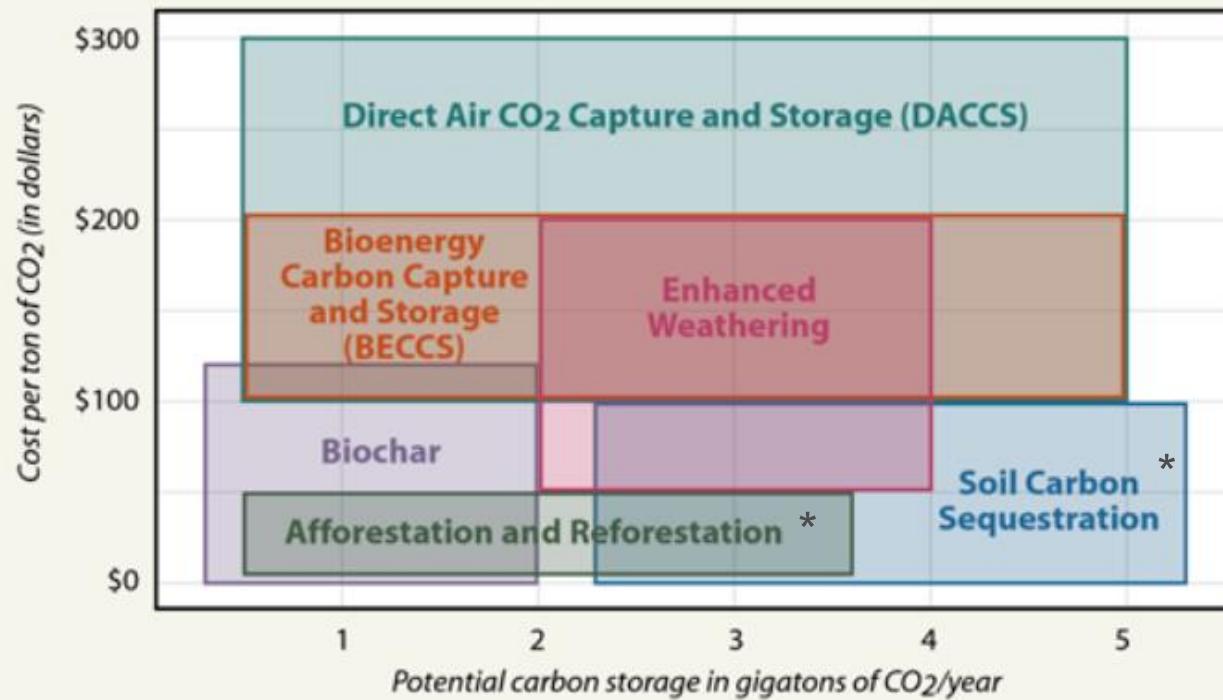
3 Carbon Dioxide Removal (CDR)

4 Synthèse et conclusion



Les approches naturelles sont à court terme efficace et relativement peu chères... mais arriveront rapidement à saturation.

Potentiel & coût estimés en 2050

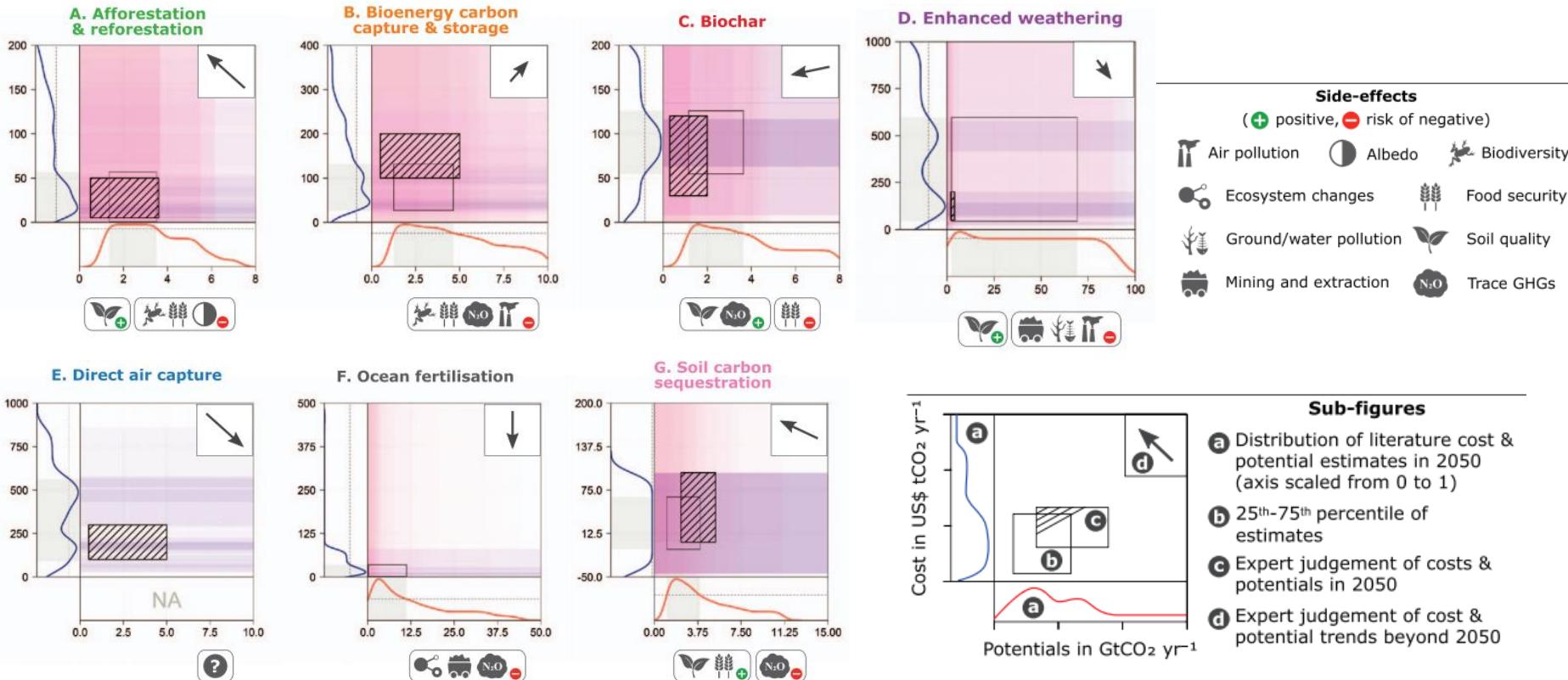


SOURCE:IPCC

InsideClimate News

* Soutenabilité limitée (saturation des puits de carbone)

Évaluation de chaque méthode : coût, potentiel, effets secondaires positifs et négatifs, évolution après 2050.



Les CDR auront un effet positif sur l'économie, mais leurs impacts environnementaux, sociaux et sanitaires doivent être considérés

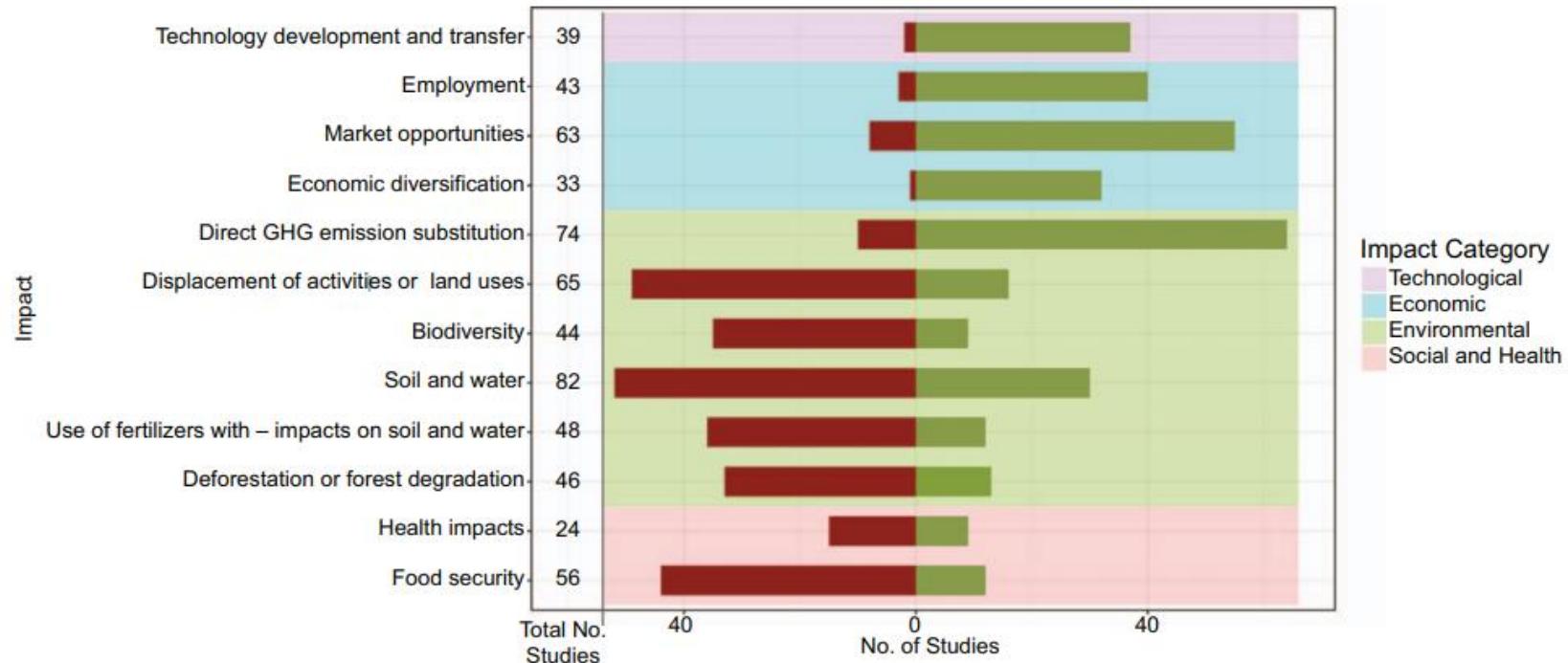


Figure 7. Distribution studies discussing negative and positive impacts for key side-effects. Adapted from Robledo-Abad *et al* (2017).

Les CDR sont des approches nouvelles qui doivent encore être largement étudiées et améliorées.

Avantages

- Potentiel de capture du CO₂ élevé
- Approches diverses et complémentaires
- Technologies nouvelles et sujettes à de fortes optimisations en efficacité et en coût
- Afflux de financement vers ces technologies, multiplication des projets
- Pas de contrainte technologique sur le transport et le stockage de CO₂
- Pas de limitation sur le stockage géologique du CO₂

Inconvénients

- Connaissances imparfaites des conséquences sur les systèmes
- De nombreux impacts négatifs sur l'environnement et la santé.
- Prix généralement élevés actuellement (plus que celui du CO₂), qui n'incitent pas les industriels à considérer ces solutions. Pour l'instant, seuls les Etats sont susceptibles d'investir.
- Aucune installation de grande envergure à ce jour

Quelques messages pour terminer...

- Vu la dynamique d'émission, les CDR sont indispensables si l'on veut espérer rester sous les +2°C en 2100 (et probablement même sous les +3°C).
- Plus on attend, plus le recours à ces approches deviendra nécessaire et moins ce sera tenable car elles ont potentiellement des inconvénients majeurs (en particulier l'occupation des sols ou la consommation d'énergie).
- Des efforts considérables de R&D sont nécessaires : capture, stockage, minéralisation, agronomie, conversion de la biomasse, analyse des systèmes, optimisation énergétique...
- Pour l'instant, il n'y a quasiment que des démonstrateurs, rien qui puisse capter plus que quelques MtCO2/an. C'est très loin de ce qui est nécessaire pour atteindre les objectifs de neutralité.
- La plupart des procédés technologiques de capture visent à réutiliser le CO2 et pas forcément le séquestrer, diminuant ainsi l'impact sur le climat.
- Il faudrait une baisse drastique du coût des approches CDR, combinée à une hausse du prix de la tonne de CO2 (>\$50) pour envisager un déploiement à large échelle.
- Les CDR sont un outil dans la lutte contre le réchauffement mais il est illusoire de croire qu'elles puissent remplacer les efforts de sobriété et de transition énergétique.

Merci