

Qu'est-ce que les CCUS?

- **CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage)** = projets de **capture des émissions de CO₂ industrielles**, afin de **réutiliser** le CO₂, utiles dans certains procédés, ou afin de le **stocker**
- Permettrait d'atteindre **0 émissions** même pour les procédés non décarbonables
- Possibilité de passer en **émissions négatives** en captant le CO₂ atmosphérique, ce sont les CDR (carbon dioxide removal). Pour atteindre le bilan 0 carbone en 2050, les **CCUS** pourraient représenter

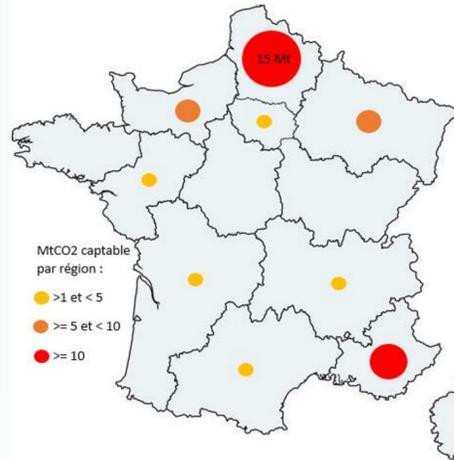
10 à 15% des efforts à faire



Les CCUS de nos jours

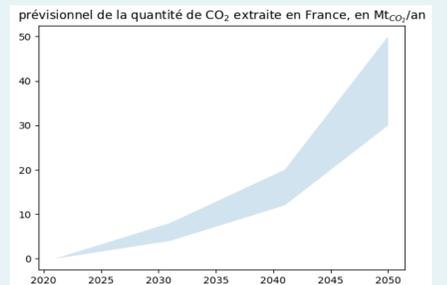
- Actuellement environ **40 MtCO₂ capté par an dans le monde** MAIS à multiplier par 50 ou 100 d'ici 2050
- Déjà beaucoup de **projets nationaux et internationaux en cours** dans l'Union Européenne + **règles et de financements** mis en place afin de favoriser les CCUS car ils ne sont **pas encore très viables économiquement**
- **Nombreux enjeux** : développer les technologies, les réseaux de transports, attirer les investisseurs, réguler, connaître les stockages, éviter les accidents comme les fuites, réduire leur consommation en énergie et en eau.

CO₂ captable par région :



Réserves en France

- **385 MtCO₂** équivalent émis en 2023
- Objectif : **capter 30 à 50 MtCO₂/an** d'ici 2050
- Stockage : **750 Mt onshore** et **400 Mt offshore** dans des réserves d'hydrocarbure vides.
- Plan d'action : prioriser les **grands hubs** et les **fumées très concentrées en CO₂**



Nom de la technologie	Principe	Concentration du CO ₂ dans les fumées	Pourcentage de CO ₂ capté	Pureté du CO ₂ post-captage	Coût en énergie
VSA (Vacuum Swing Adsorption)	Les gaz sont introduits dans des lits d'absorbant à carbone. Une fois le lit saturé, le carbone est libéré par l'application d'un vide.	10% à 30%	70% à 90%	>99,99%	3.7 GJ/tCO ₂
TSA (Temperature swing adsorption)	Les gaz sont absorbés grâce à leurs différentes propriétés lors de changement de température (long).	10% à 20%	>90%	>95%	3.2 GJ/tCO ₂
PSA et VPSA (Pressure swing adsorption)	Les gaz sont absorbés grâce à leurs différentes propriétés lors de changement de pression.	10% à 20%	>90%	>95%	2.4 GJ/tCO ₂
Membranaire	Utilisation d'une membrane en tant que filtre qui laisse passer le CO ₂ . La température du gaz est très élevée.	>30%	>70%	>90%	2 GJ/tCO ₂
Amine (MEA monoéthanolamine)	Un solvant à base d'amine absorbe le CO ₂ grâce à une faible pression et température. Le CO ₂ est ensuite relâché et le solvant est recyclé. Il existe différents types de solvants, principalement la monoéthanolamine (MEA), diéthanolamine (DEA) ou N-méthyl-diéthanolamine (MDEA).	5% à 15%	98%	99%	3 à 3.5 GJ/tCO ₂
Enzymatique	Utilisation d'enzymes en tant que catalyseur pour fixer du carbone dans des solvants écoénergétiques, réaction normalement trop lente. Il faut contrôler la température pour qu'elle reste inférieure à 80°C mais les produits sont écologiques et non toxiques.	Tout	65% à 95%	>99.95%	<2GJ/tCO ₂
Cryogénique	Mise sous pression et refroidissement de l'air afin de liquéfier le CO ₂ . Nécessite de descendre à de très basses températures mais la forme liquide simplifie le transport et le stockage tout en éliminant les polluants toxiques.	>10%	95% à 99%	>90%	2,4 à 5,2 GJ/tCO ₂

Les différentes méthodes de captage

- **post-combustion**: capture du CO₂ (peu concentré: entre 5 et 15%) à l'échappement. Il faut une infrastructure capable de traiter de grandes quantités de gaz. L'extraction se fait par solvants (gourmands en énergie pour leur régénération).
- **pré-combustion**: conversion du carburant carboné en gaz de synthèse (par vaporeformage, gazéification ou oxydation partielle, puis en réagissant cet air avec de l'eau). On obtient un mix de CO₂ et de H₂ sous haute pression (20-50 bar). On extrait le CO₂ (on réutilise le H₂ comme carburant ou comme agent de synthèse) en sortie d'échappement, concentré à 15-60%. On peut alors utiliser des solvants, qui demanderont ici beaucoup moins d'énergie de régénération.
- **oxy-combustion**: carburant brûlé uniquement à l'O₂, donc 100% de CO₂ en sortie en théorie (en pratique, plus de 90%, donc pas besoin de purification), mais la production d'O₂ pur est coûteuse en énergie et demande des mesures de sécurité strictes.

Études de cas

L'industrie du ciment

Pourquoi est-il intéressant d'installer des CCUS sur des cimenteries ?

- **8%** des émissions mondiales de CO₂.
- Source de CO₂ **inévitable**

Heidelberg Materials a lancé en 2024 un projet de CCUS sur sa cimenterie d'Airvault, ayant comme objectif de **capter 1 MtCO₂/an à partir de 2030**. Cela permettrait de réduire les émissions de CO₂ de plus de **30%**.

La méthanisation

- Principal gaz utilisé = **méthane fossile**, mais il existe des manières moins polluantes de fabriquer du méthane : la **méthanisation**
- Méthanisation : procédé qui réutilise les **déchets de biomasses agricoles** et le transforme grâce des bio-organismes en un mélange de **60% de méthane** et **40% de CO₂**
- Pour utiliser ce gaz, il faut séparer les 2 espèces chimiques => donne **biométhane + CO₂**, le CO₂ éventuellement **réutilisable** pour fabriquer du **méthane de synthèse**.
- **Moins d'émissions car on utilise du carbone émis** au lieu d'en émettre de nouveau.

=> Ainsi les techniques de capture du carbone sont **utiles pour séparer les deux espèces**, ce qui est une utilisation différente des CCUS habituels qui servent simplement à récupérer le CO₂ relâché.

Actuellement, la technologie **la plus rentable est la capture membranaire**, même si pour l'instant **la plus utilisée est la technique cryogénique**.

Perspectives d'avenir et potentiel technico-économique

Dans notre modélisation, les **VSA, TSA et PSA** semblent pouvoir devenir **les plus rentables à l'horizon 2050** :

