



Management stratégique du **carbone**

Certificat interuniversitaire UCL-ULg

Capture, utilisation et stockage du CO₂
Grégoire Léonard



Sommaire

1. Contexte
2. Capture du CO₂
3. Valorisation du CO₂
4. Stockage du CO₂
5. Défis et conclusion



1. Contexte

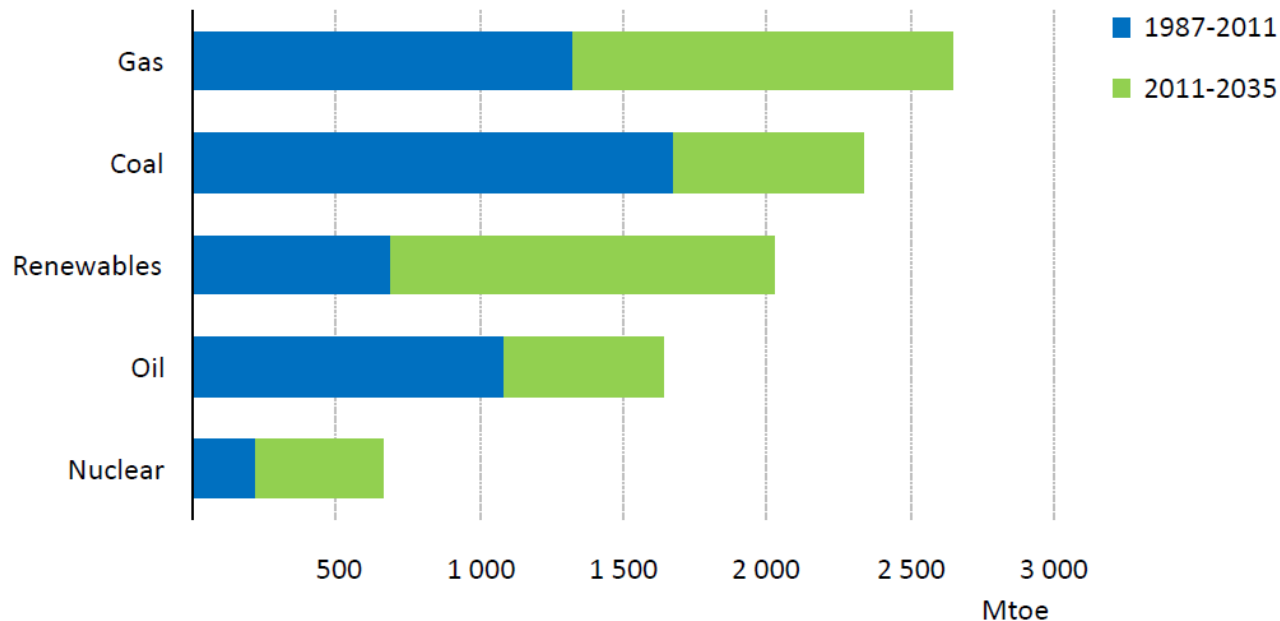


1. Contexte

=> 2 Objectifs difficilement conciliables

- Limiter les émissions de gaz à effet de serre (principalement le CO₂)
- Assurer l'approvisionnement énergétique (croissance de 33% d'ici 2035!, surtout non-OCDE), provenant à 82% d'énergies fossiles (75% en 2035).

Growth in total primary energy demand

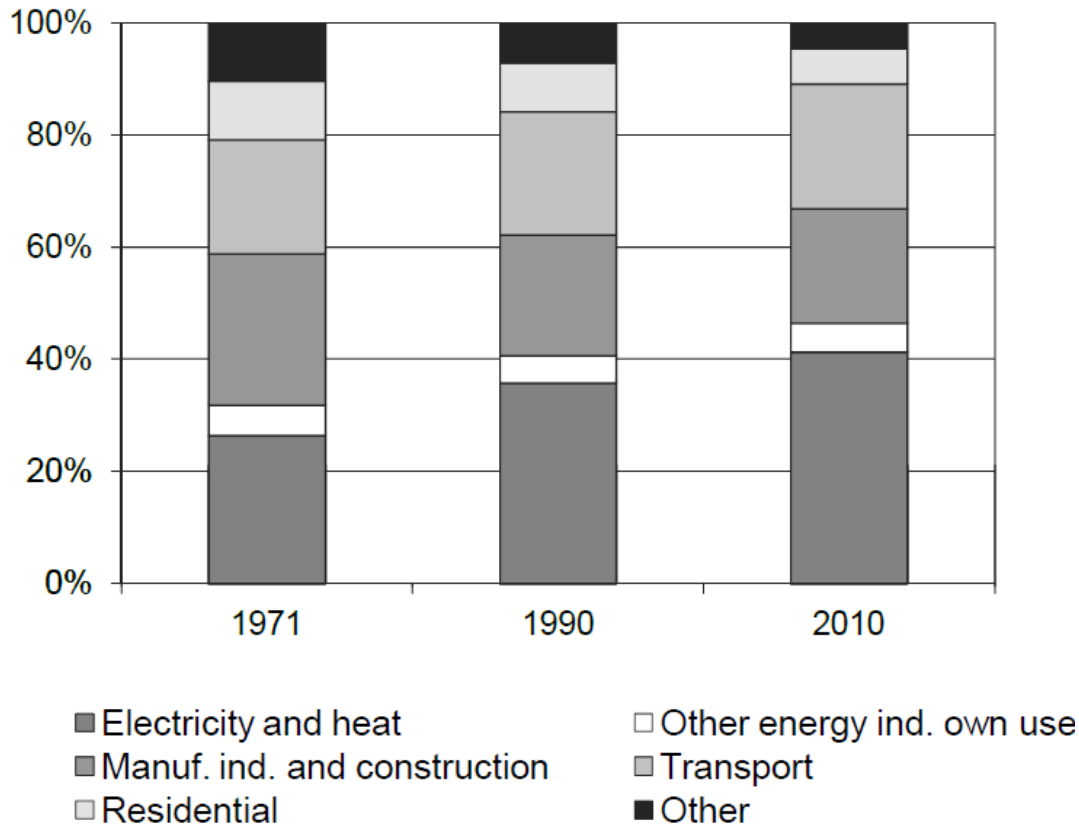


1. Contexte

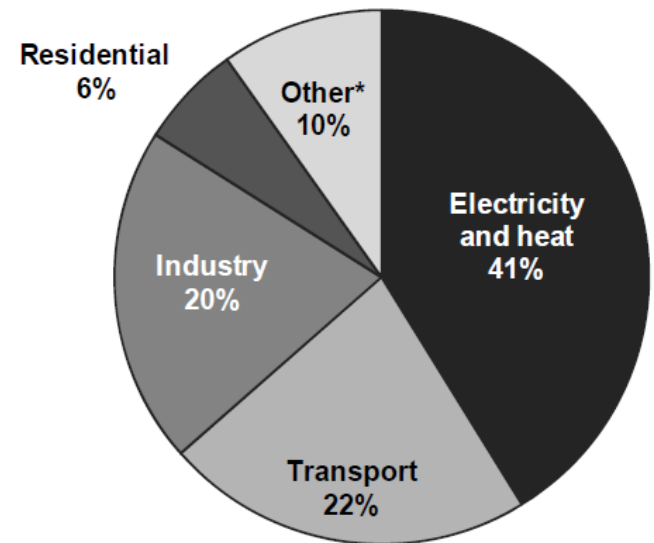
=> Techniques CCS (CCUS) de captage, stockage et/ou ré-utilisation du CO₂.

=> Capter/capturer le CO₂... bonne idée. Mais lequel?

World CO₂ emissions by sector



in 2010



1. Contexte

=> Émissions stationnaires et à grande échelle de CO₂

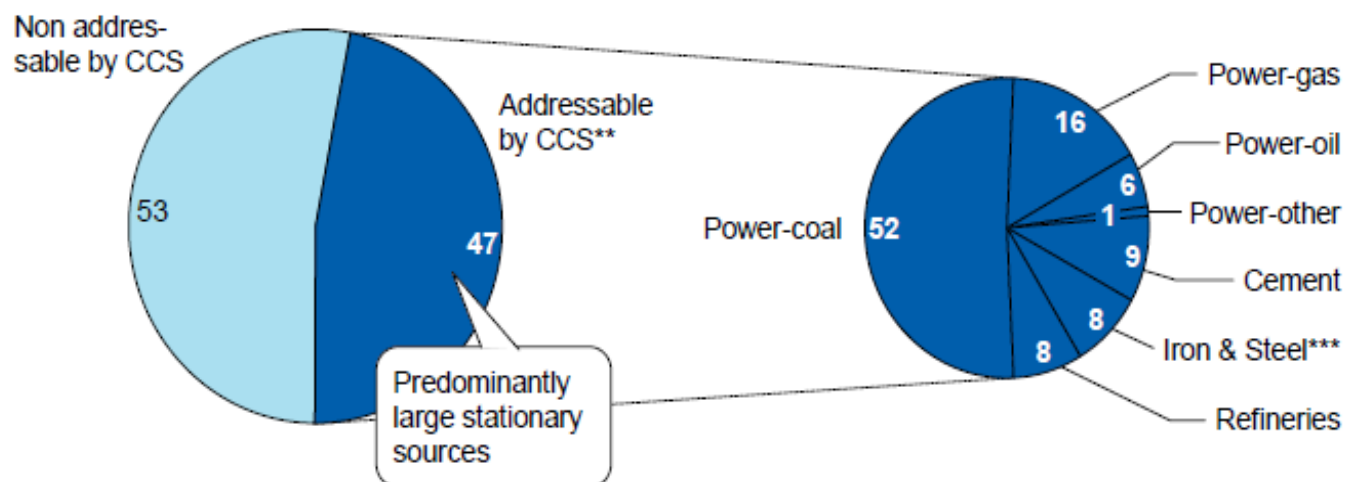
European CO₂ emissions from fuel combustion and industrial processes

Total emissions*

100% = 4.2 GtCO₂, 2007

CCS addressable emissions

100% = 2 GtCO₂, 2007



* IEA estimates of CO₂ emissions from fuel combustion and industrial processes in 2007. Does not include miscellaneous small CO₂ emitters and non-CO₂ emissions such as methane (e.g. forestry, farming, etc.)

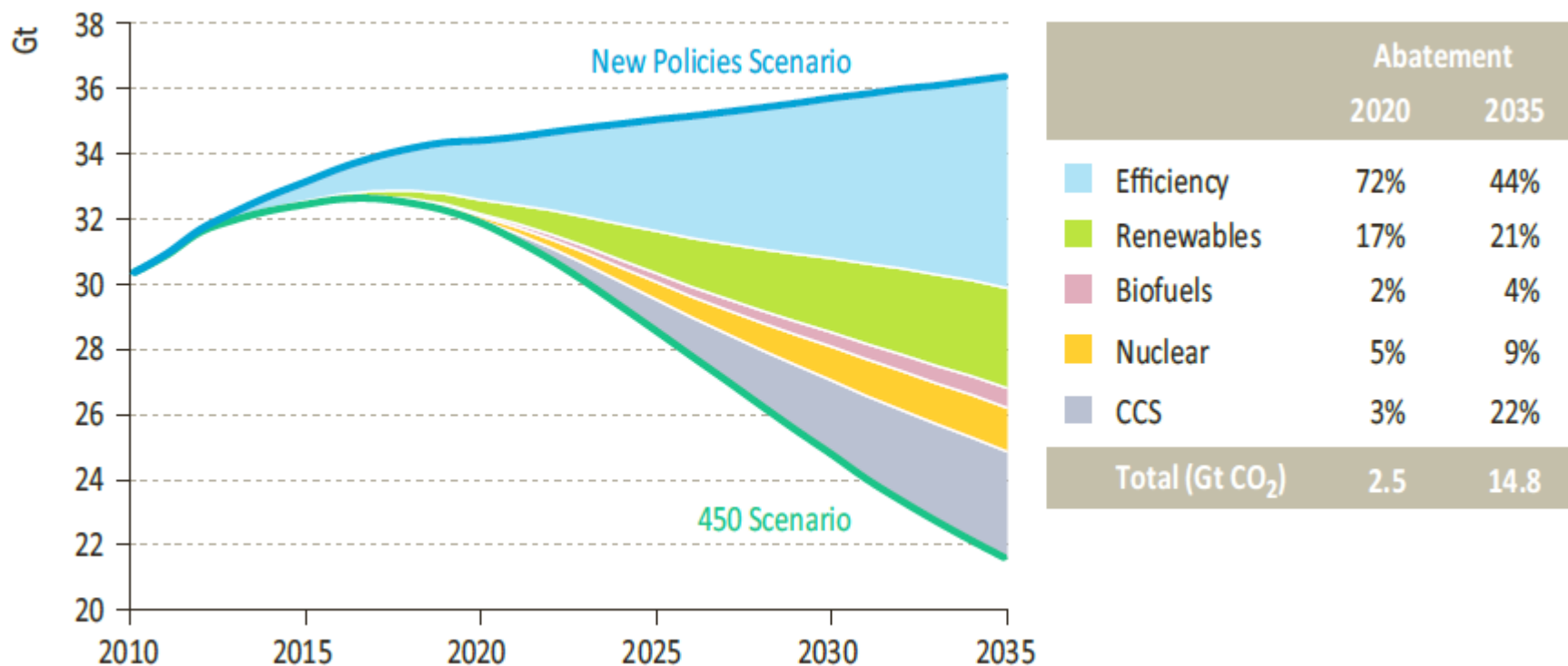
** Not including biomass, oil sands, paper mills, ammonia, ethanol, ethylene, hydrogen, and other industries

*** Includes metal ores processing



1. Contexte

Quel impact potentiel du CCS dans l'avenir?



Objectif Scenario 450ppm : limiter le réchauffement à 2°C

=> 22% de la réduction des émissions de CO₂ proviendrait du CCS

Tendance actuelle: 1 à 9% de la génération d'électricité d'ici 2035



2. Capture du CO₂



2. Capture du CO₂

La capture du CO₂ = technologie exploitée depuis des décennies

=> Installations commerciales de capture du CO₂

=> Quels usages?



1999 Malaysia
(200 T/D Max)
Urea Production



2005 Japan
(330 T/D max)
General Use



2006 India (2 locations)
(450 T/D x 2 units)
Urea Production

Mais...

- relativement petite échelle
- coût de capture très élevé! Le rendement de centrale perd 33%!



2. Capture du CO₂

3 principales technologies:

1. Capter le CO₂ formé lors de la combustion dans les fumées (séparation du CO₂ des gaz de combustion = surtout l'azote de l'air)

=> Décarbonisation des fumées = **Capture post-combustion**

2. Enlever le C du combustible (séparation du CO₂ de l'hydrogène après gazéification du combustible solide)

=> Décarbonisation du combustible = **Capture pré-combustion**

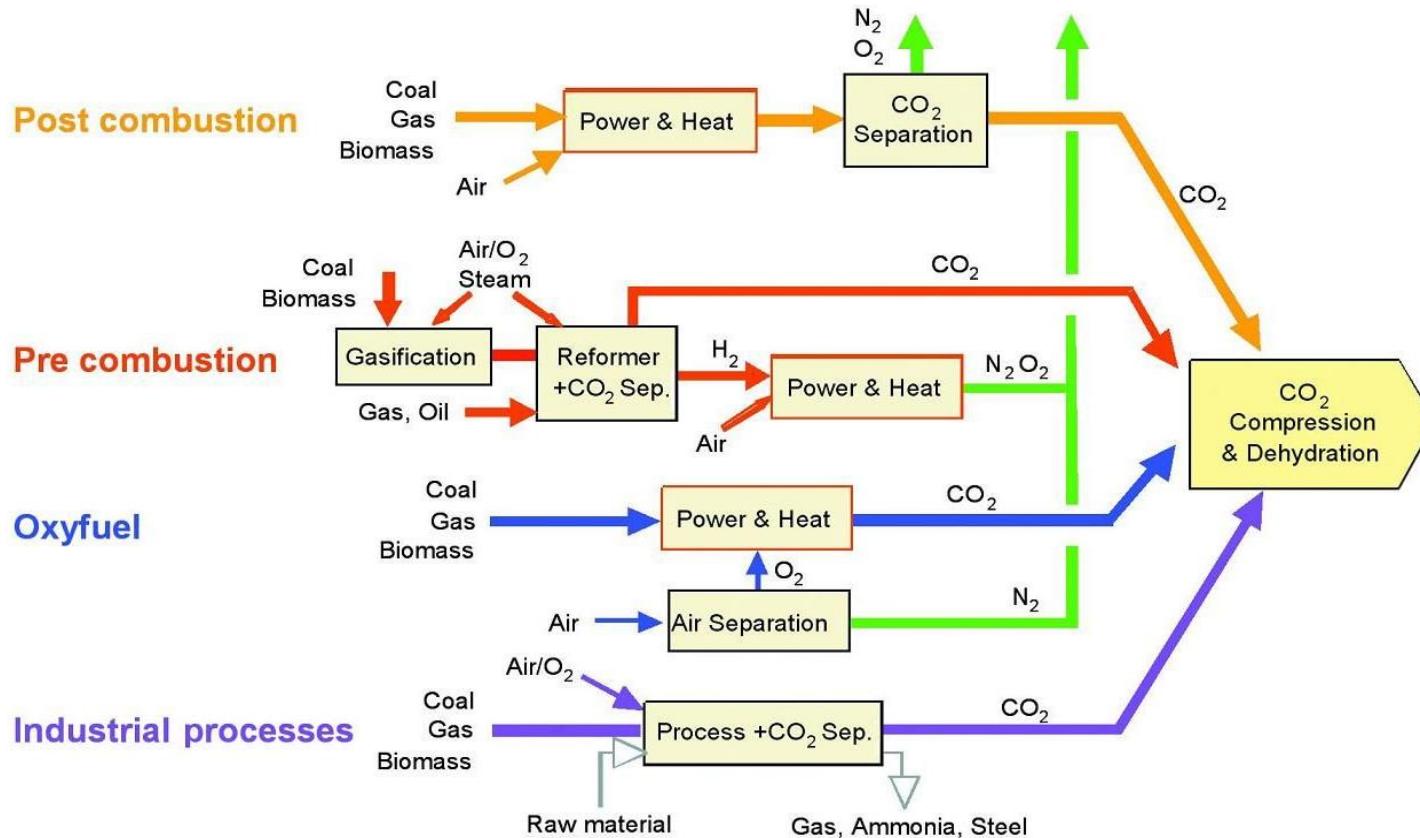
3. Brûler le combustible avec de l'oxygène pur (séparation du CO₂ de l'eau)

=> **Combustion Oxyfuel**



2. Capture du CO₂

Overview of CO₂ capture processes and systems

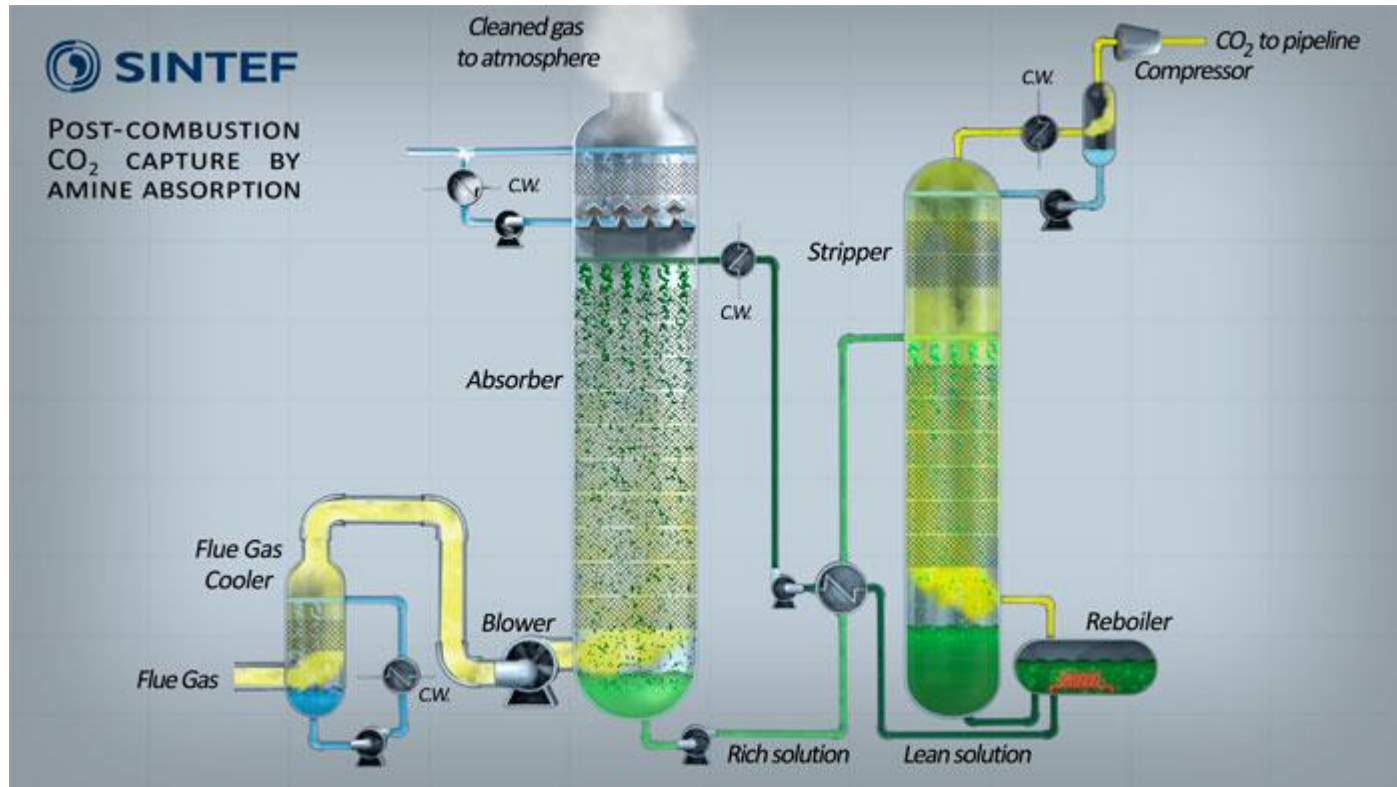


SRCCS Figure TS-3



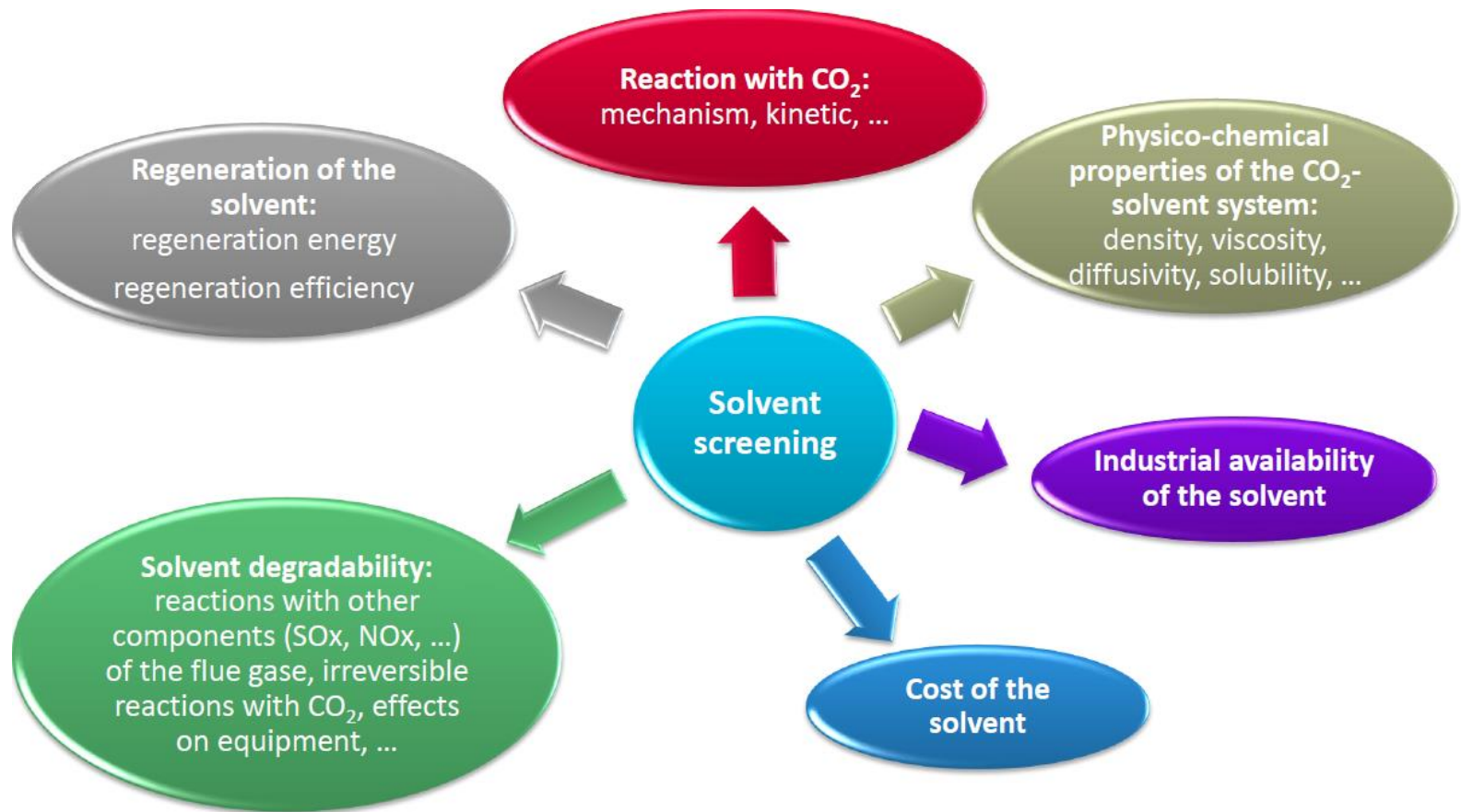
2. Capture du CO₂

Capture post-combustion



2. Capture du CO₂

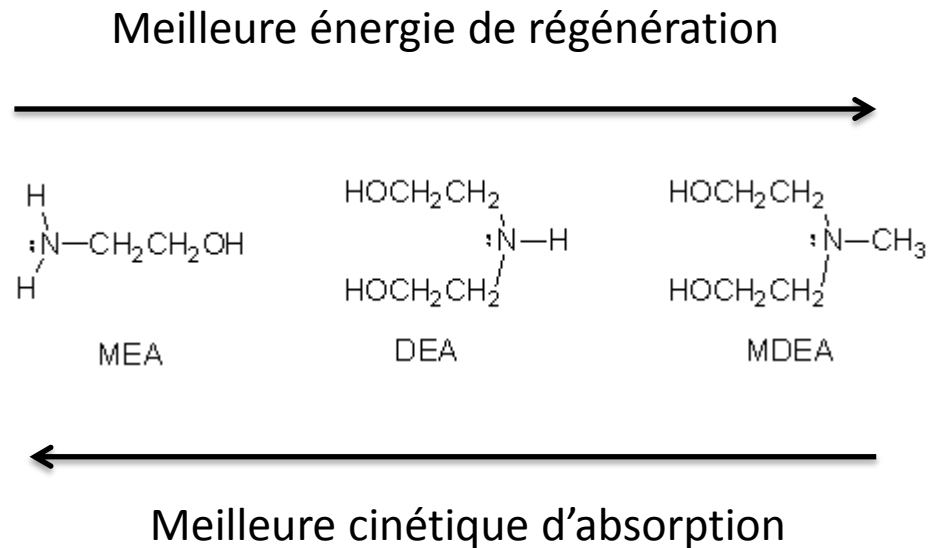
Caractéristiques d'un solvant chimique



2. Capture du CO₂

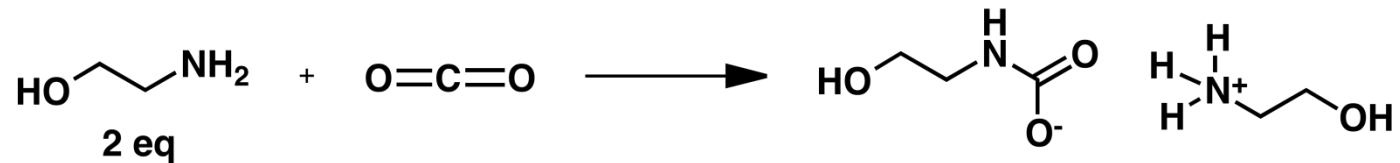
Principaux solvants employés: Amines

=> primaires, secondaires ou tertiaires (MEA, DEA, MDEA)



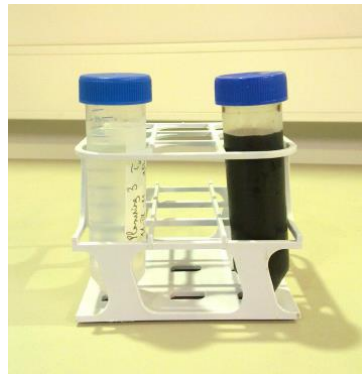
2. Capture du CO₂

Solvant de référence: Monoéthanolamine 30% en solution aqueuse



Avantages: cinétique d'absorption rapide, disponibilité, coût, maturité

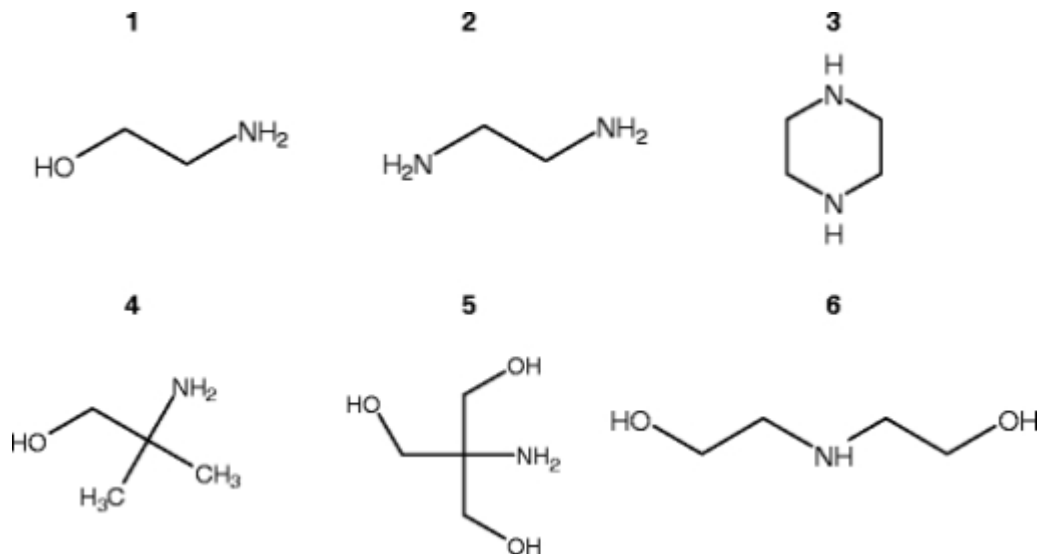
Inconvénients: grande énergie de régénération, dégradation, corrosion



2. Capture du CO₂

MEA, DEA et quelques solvants aminés alternatifs:

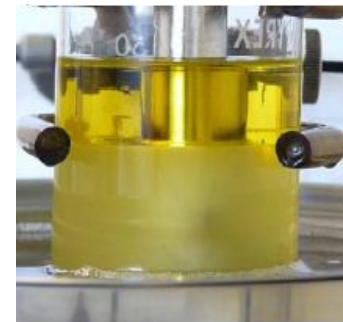
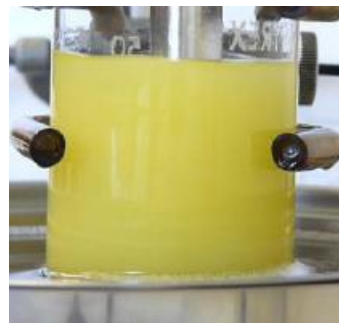
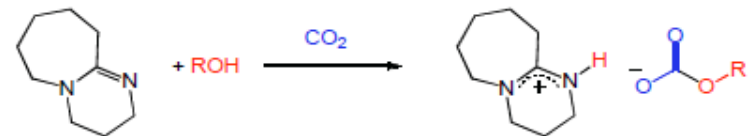
- 1 = ethanolamine, MEA
- 2 = ethylenediamine
- 3 = piperazine (PZ)
- 4 = 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP);
- 5 = 2-amino-2-(hydroxymethyl)propane-1,3-diol (Tris);
- 6 = 2,2'-iminodiethanol (diethanolamine, DEA)
- ...



2. Capture du CO₂

D'autres alternatives qui ont fait/font l'objet d'études:

- Chilled Ammonia: NH₃ à basse température
- Carbonate de potassium : K₂CO₃
- Acides aminés (non volatiles, insensibles à l'O₂)
- Liquides organiques (en absence d'eau)
- Solvants démixants



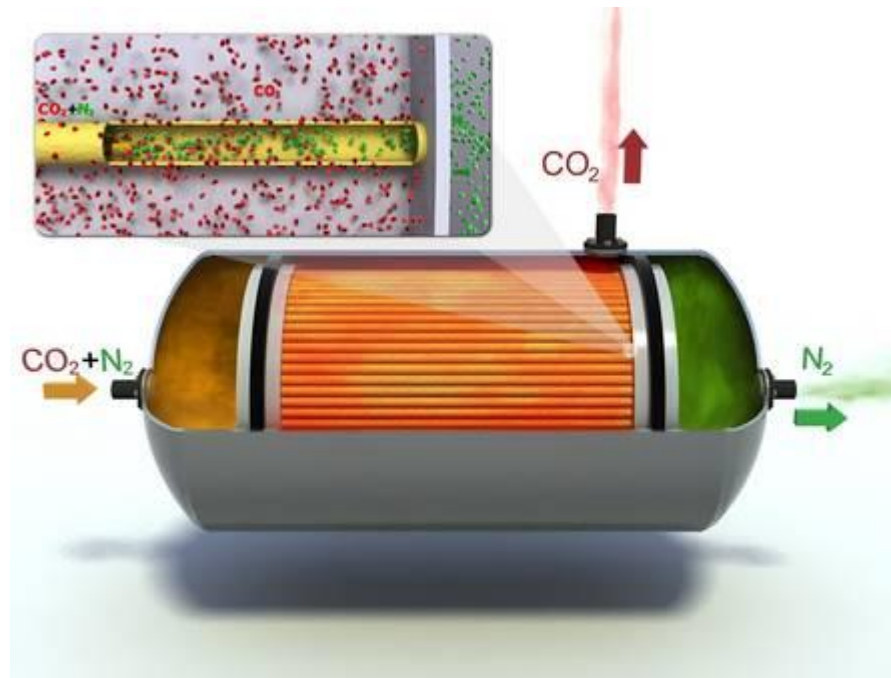
=> à la recherche du graal...



2. Capture du CO₂

Technologies de 3^{ème} génération : Alternatives aux solvants chimiques

=> Les membranes



Défis: Coût, échelle, impuretés dans les fumées, ...

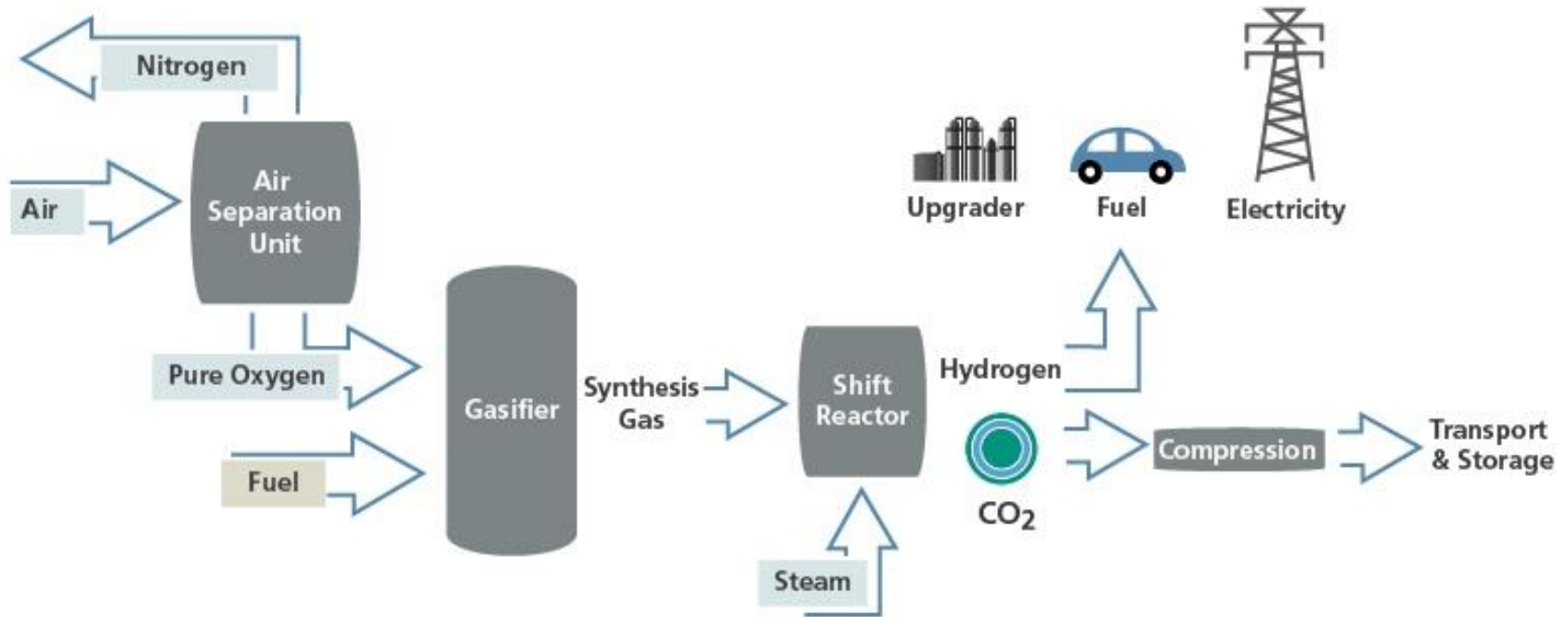
=> R&D en cours pour réduire le coût de la capture post-combustion du CO₂ à différentes échelles



2. Capture du CO₂

Capture pré-combustion

Pre Combustion Capture

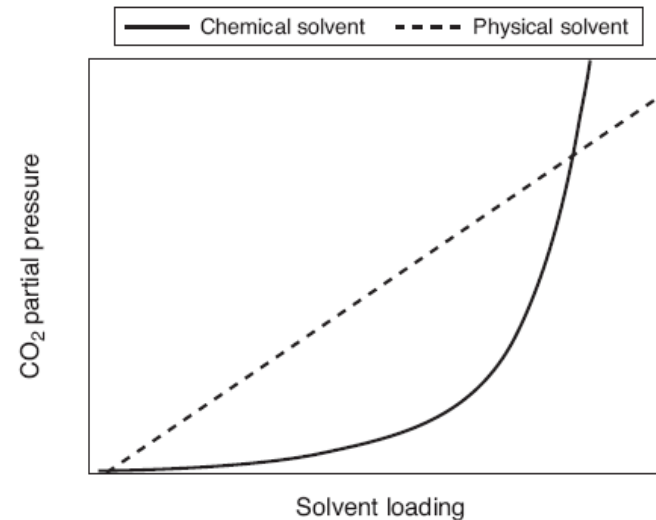


2. Capture du CO₂

Principales réactions en jeu:

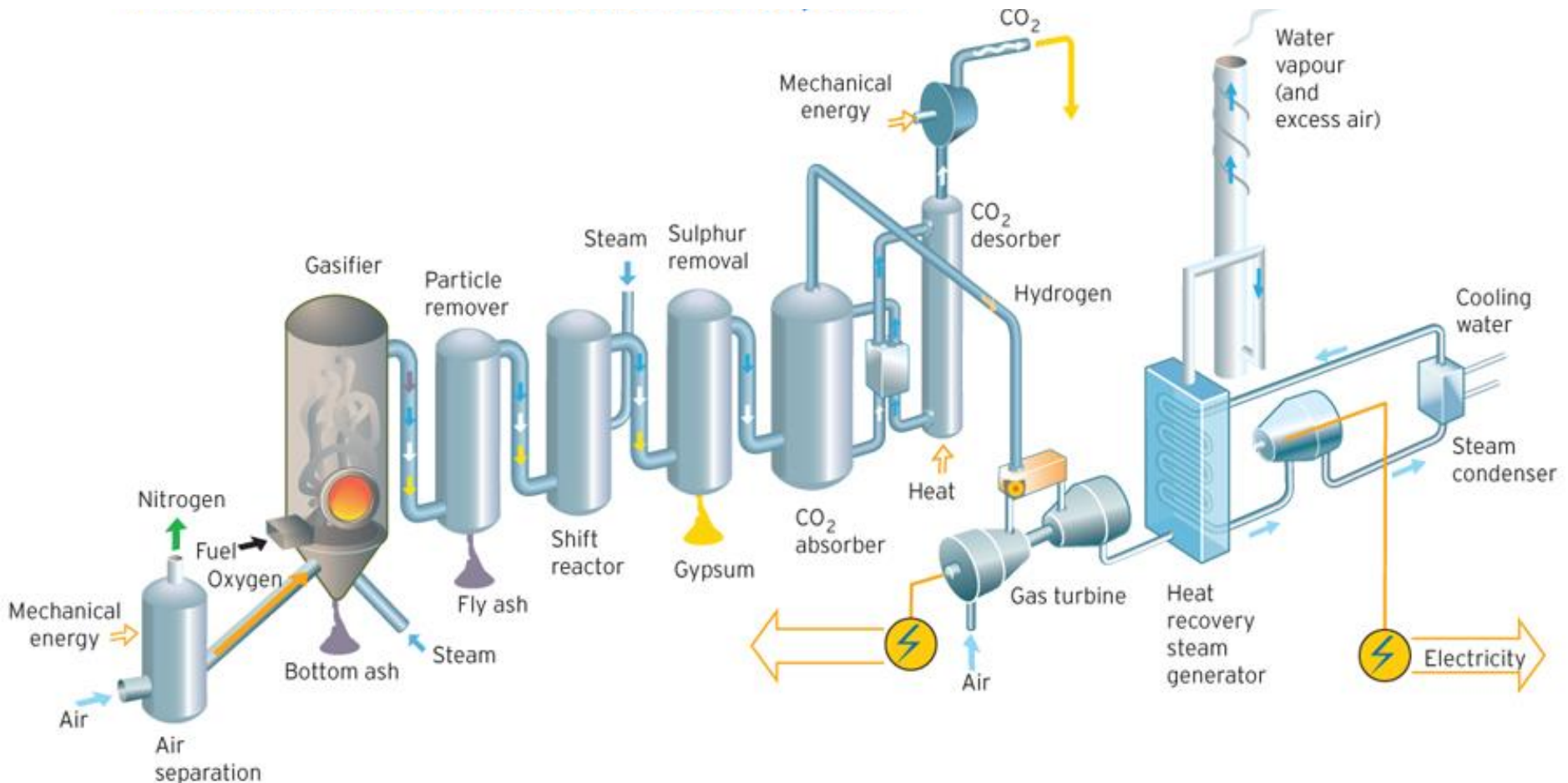
Reaction	Name	Equation	Reaction enthalpy (MJ/kmol CH ₄)
1	Steam reforming	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	206,2
2	Partial oxidation	$\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \Leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	-35,7
3	Water-shift reaction	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41

A noter: La teneur en CO₂ du gaz à traiter étant plus élevée, la capture peut ici se faire à l'aide de solvants physiques



2. Capture du CO₂

Cas particulier: IGCC (integrated gasification combined cycle)



2. Capture du CO₂

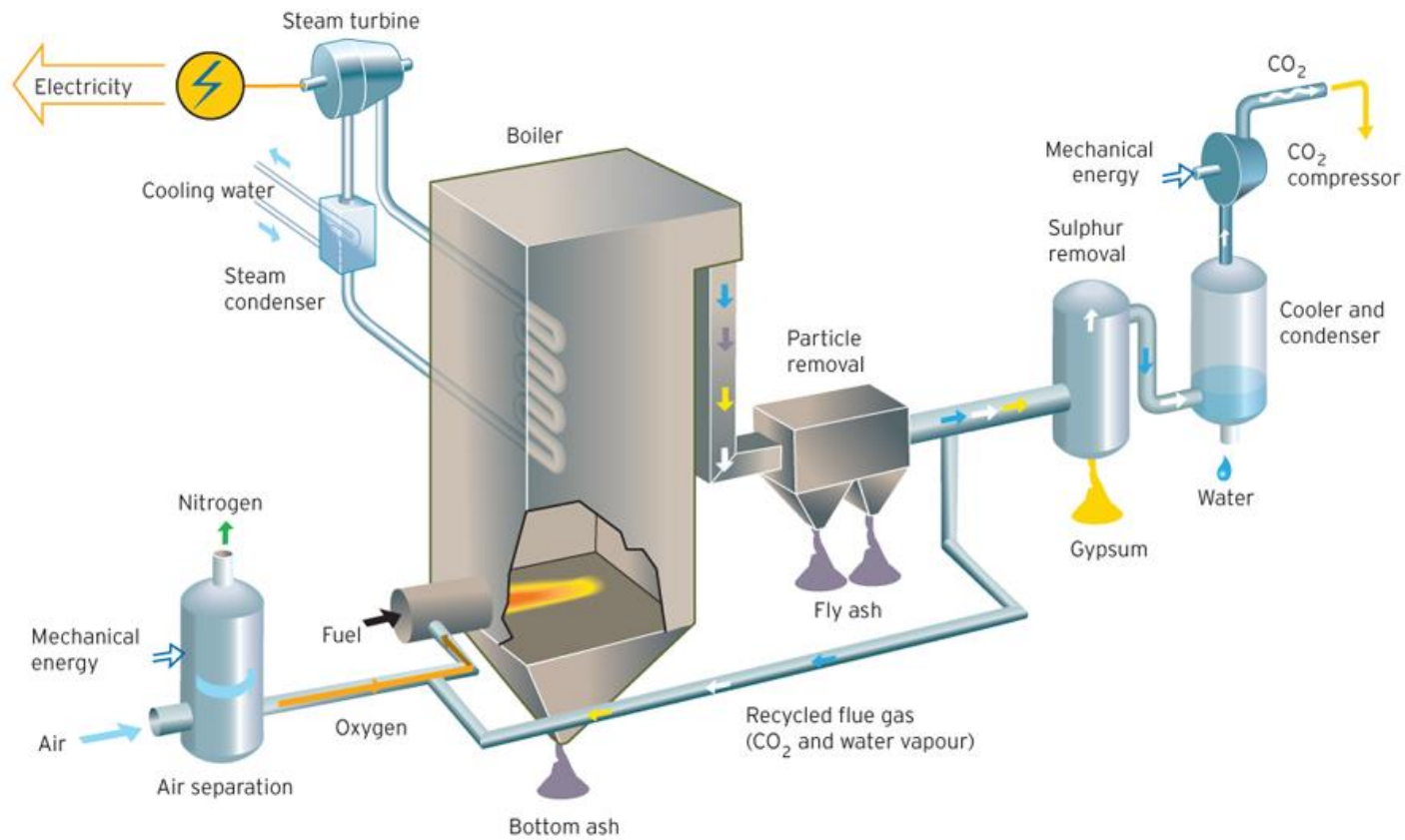
Capture pré-combustion

- Technologie en développement, assez proche de la maturité
- Combustion partielle entraîne la présence d'oxydes d'azote dans les fumées
- Hydrogène comme vecteur énergétique
- Turbines à gaz sous hydrogène doivent être améliorées



2. Capture du CO₂

Oxy-combustion / Combustion Oxy-fuel



2. Capture du CO₂

Oxy-combustion: défis

- Séparation de l'air: Coût et débits (14Mt/j – 3.6Mt/j actuellement)
- Environnement enrichi en oxygène => matériaux spécifiques à développer!
- Température et caractéristiques de flamme
- ...



Combustion à l'air



Combustion oxyfuel

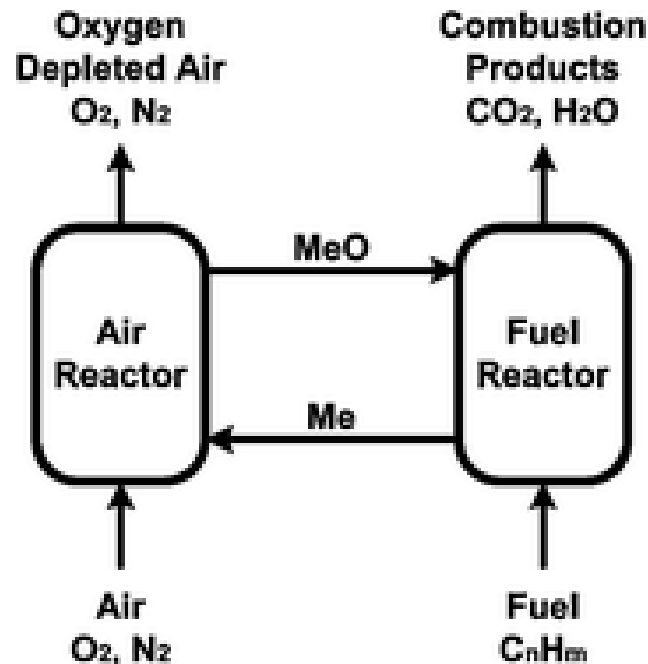
=> Pilote en Allemagne (30 MWth) en activité depuis 2008



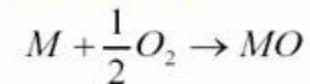
2. Capture du CO₂

Cas particulier: chemical looping

- Pas d'installation de séparation d'air au sens classique
- La combustion n'implique que de l'oxygène



- **Oxidation** : exothermic



- **Reduction** : endothermic

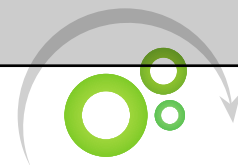


M : metal, **MO** : metal oxide

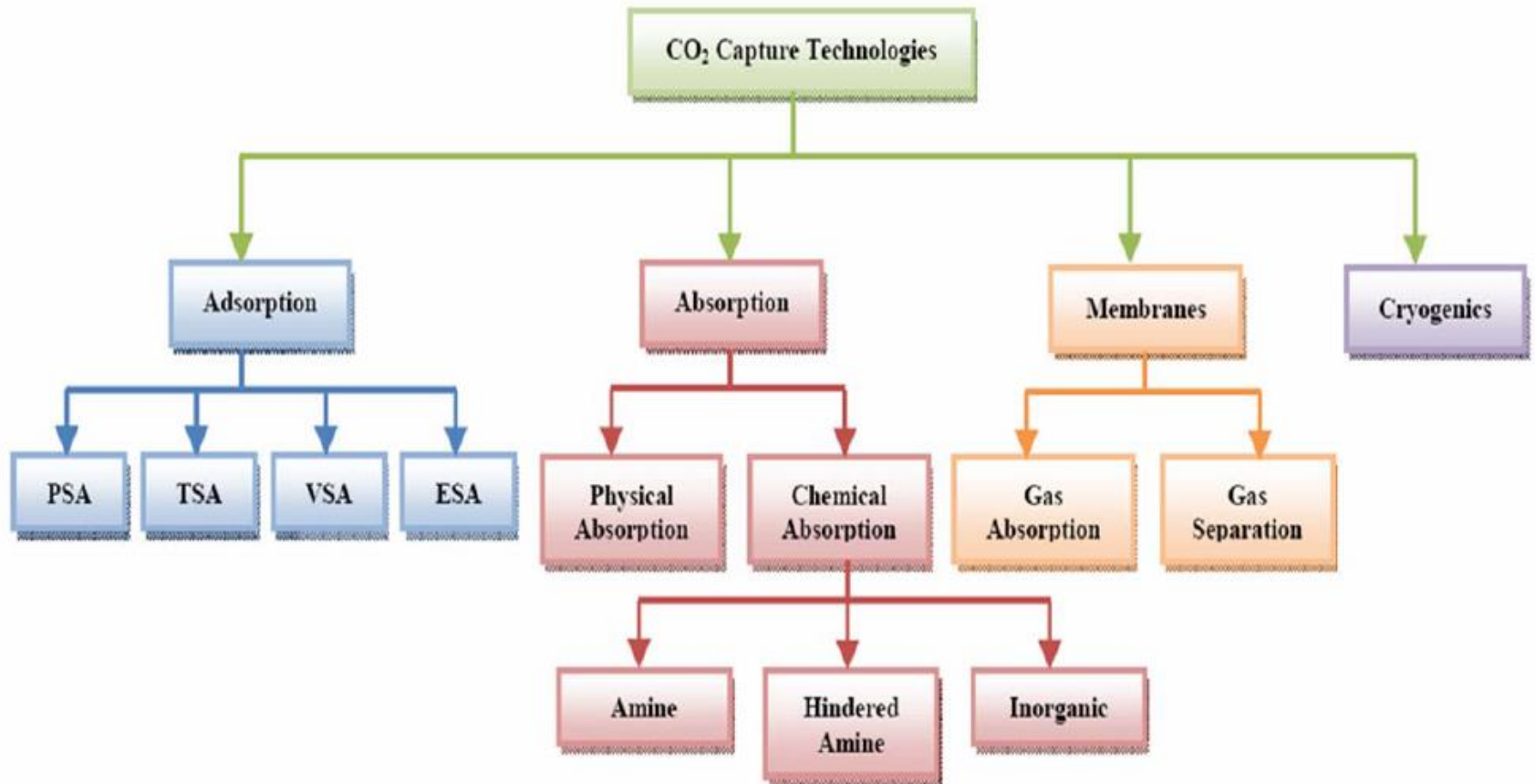


2. Capture du CO₂

Méthode	Avantages	Défis
Post-combustion	<ul style="list-style-type: none">• Maturité• Rétrofit (CCR)	<ul style="list-style-type: none">• Coût énergétique• Emissions secondaires
Pré-combustion	<ul style="list-style-type: none">• H₂• Coût intéressant	<ul style="list-style-type: none">• Pas de rétrofit• NOx• Turbines à gaz H₂
Oxycombustion	<ul style="list-style-type: none">• Coût intéressant• Simplicité du procédé• Qualité de la combustion• 100% de capture	<ul style="list-style-type: none">• Séparation de l'air• Rétrofit difficile• Milieu oxygène (matériaux)
Chemical looping	<ul style="list-style-type: none">• Avantage énergétique	<ul style="list-style-type: none">• Choix du métal (cinétique de réaction)• Cendres• Maturité
Autres techniques	<ul style="list-style-type: none">• Coûts réduits?	<ul style="list-style-type: none">• Maturité



2. Capture du CO₂



+ biotechnologies: algues, micro-organismes, ...

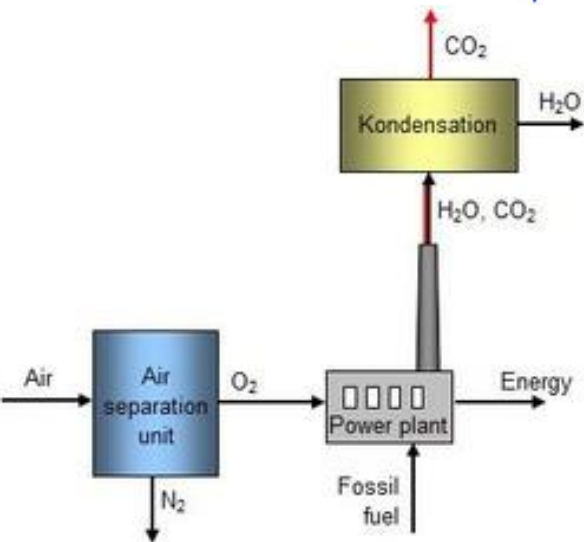
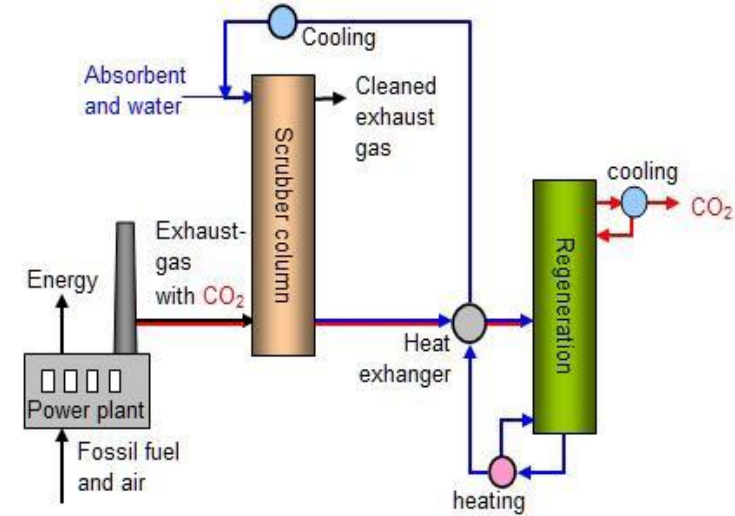
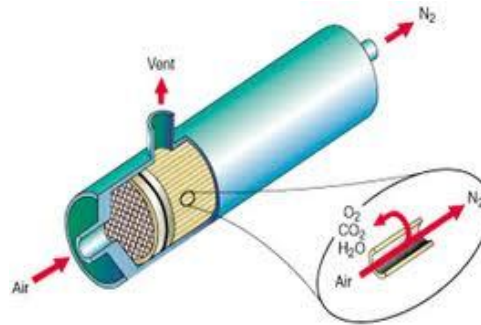
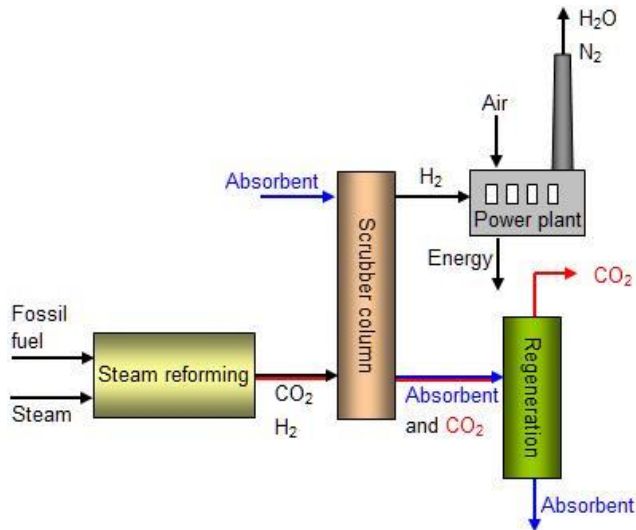


2. Capture du CO₂

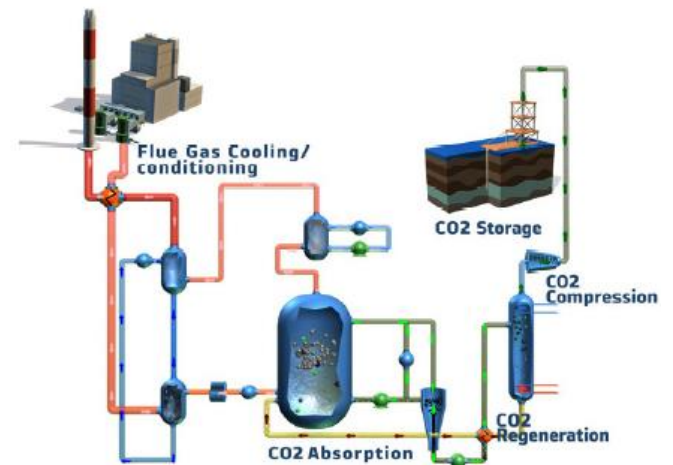


2. Capture du CO₂

Quiz: quel type de capture?



Chilled Ammonia Process for CO₂ capture

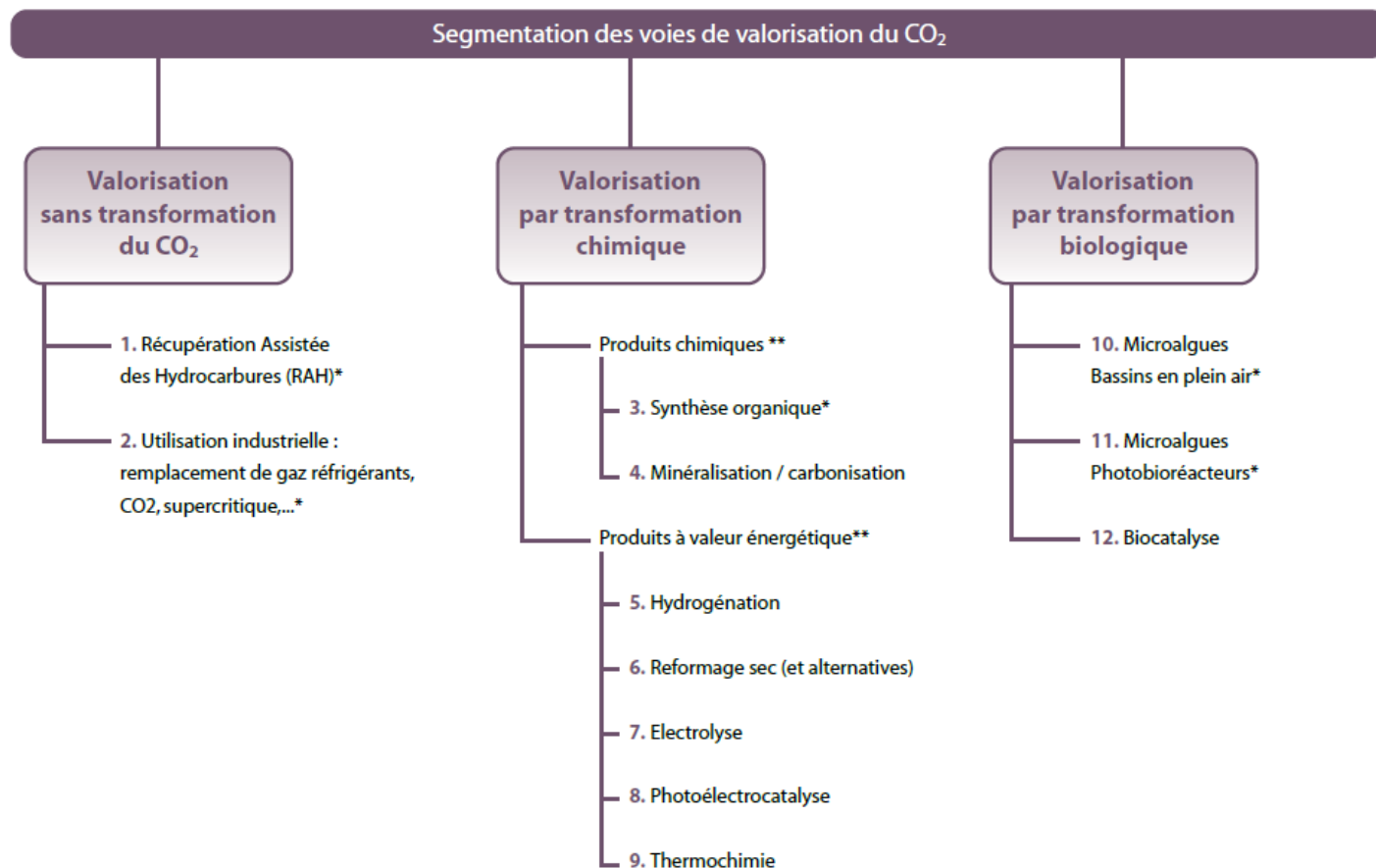


3. Valorisation du CO₂



3. Valorisation du CO₂

Le CO₂, un déchet ou une matière première?



* Voies pour lesquelles il existe déjà certaines applications à un stade industriel

** Certains produits comme le méthanol sont utilisés comme produits énergétiques ou comme produits intermédiaires de l'industrie chimique



3. Valorisation du CO₂

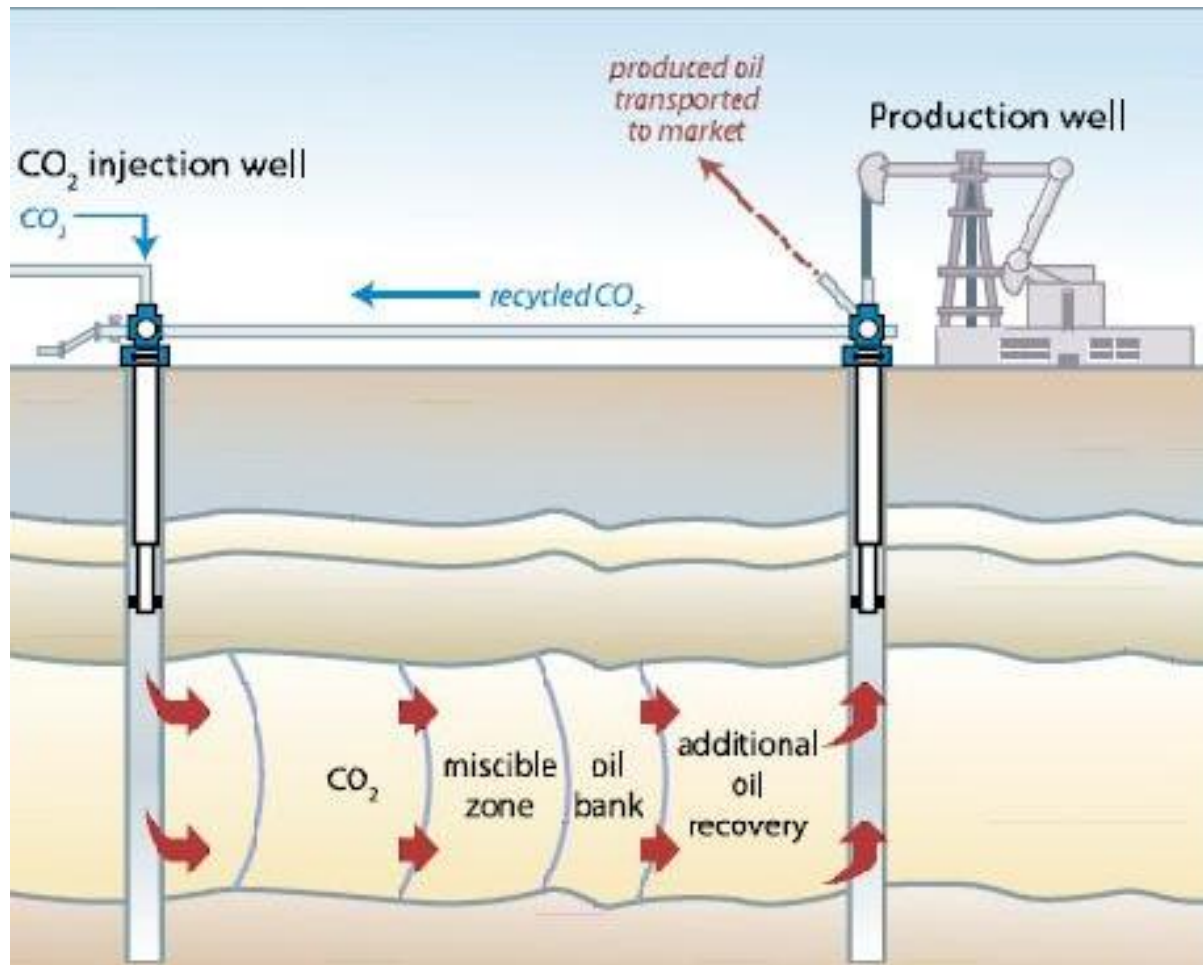
Panorama des voies de valorisation du CO₂, Rapport ADEME, France, 2010

	Déjà industrialisé			Court-terme		Moyen-terme		Long-terme				
	RAH	Utilisation industrielle	Synth. Org. (polycarb.)	Hydrogénation	Algues-Bassins	Reformage sec	Algues-Réacteurs	Minéralisation	Thermo chimie	Electrolyse	Photo Electro catalyse	Biocatalyse
Potentiel d'émergence	4	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1
Perspectives économiques	4	4	3	3	3	Non noté	2	1	2	Non noté	Non noté	Non noté
Consommation énergétique externe	3	3	2	2	4	1	4	1	4	2	4	4
Volume potentiel de CO ₂	2	2	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4
Durée de séquestration du CO ₂	4	1.5	3	2	2	2	2	4	2	2	2	2
Autres impacts environnementaux	4	4	3	3	4	1	4	3	3	2	2	3



3. Valorisation du CO₂

Récupération assistée d'hydrocarbures



3. Valorisation du CO₂

Récupération assistée d'hydrocarbures:

- 40 Mtonnes de CO₂/an (2008)
- Consommation énergétique pour la compression et l'injection du CO₂

	RAH
Potentiel d'émergence	4
Perspectives économiques	4
Consommation énergétique externe	3
Volume potentiel de CO ₂	2
Durée de séquestration du CO ₂	4
Autres impacts environnementaux	4



3. Valorisation du CO₂

Utilisations industrielles du CO₂



3. Valorisation du CO₂

Utilisations industrielles du CO₂:

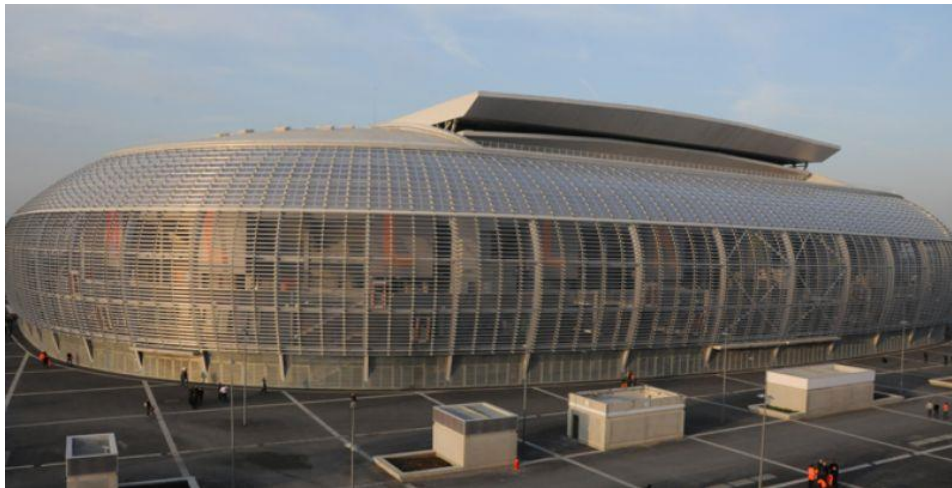
- Haut niveau de pureté exigé (99,99%)
- Potentiel de croissance de cette filière moins important (20 Mtonnes de CO₂/an)
- Le CO₂ n'est pas stocké durablement

	Utilisation industrielle
Potentiel d'émergence	4
Perspectives économiques	4
Consommation énergétique externe	3
Volume potentiel de CO ₂	2
Durée de séquestration du CO ₂	1.5
Autres impacts environnementaux	4



3. Valorisation du CO₂

Synthèse organique:



3. Valorisation du CO₂

Synthèse organique:

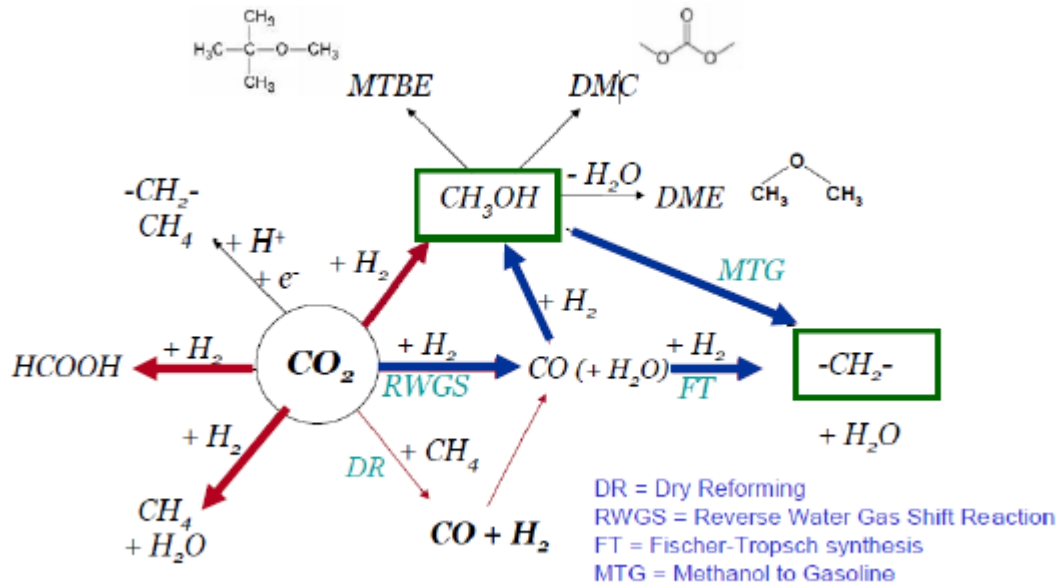
- Déjà largement utilisée pour la production d'urée (100Mtonnes CO₂/an)
- Potentiel présent, mais limité: actuellement, seulement 6-7% du pétrole est utilisé pour la pétrochimie
- Energie nécessaire aux synthèses constitue un frein

	Synthèse organique
Potentiel d'émergence	4
Perspectives économiques	3
Consommation énergétique externe	2
Volume potentiel de CO ₂	3
Durée de séquestration du CO ₂	3
Autres impacts environnementaux	3



3. Valorisation du CO₂

Autres cas où le CO₂ est revalorisé chimiquement:



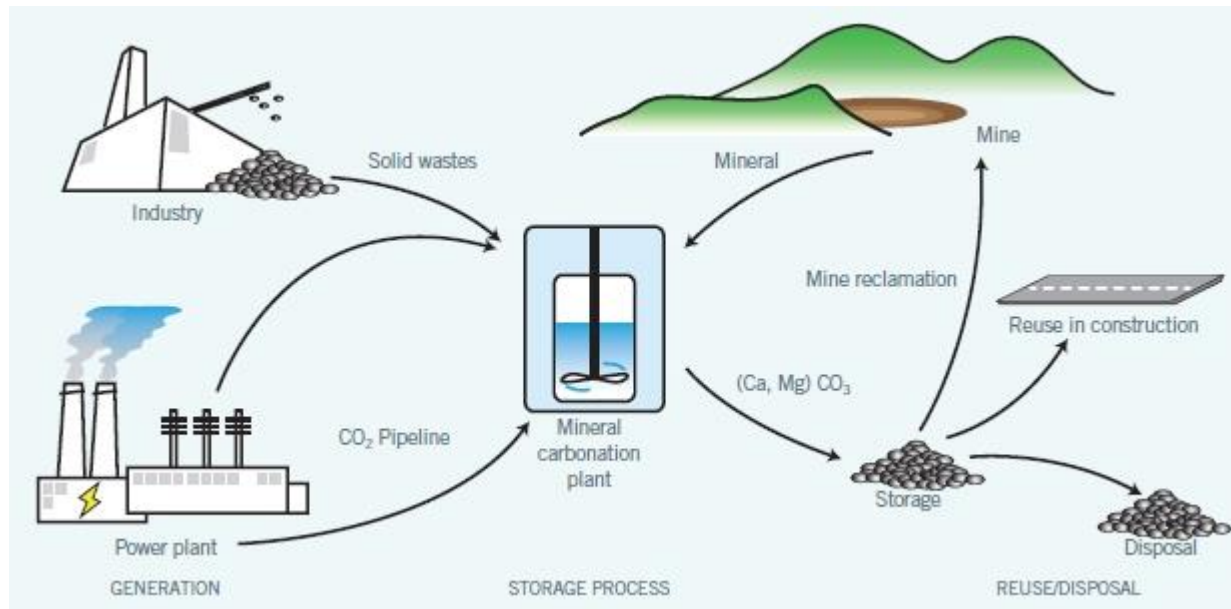
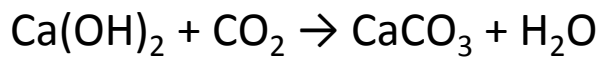
Mais...

- de toutes ces molécules, c'est le CO₂ qui contient le moins d'énergie
- source d'énergie renouvelable nécessaire pour la viabilité de tels procédés



3. Valorisation du CO₂

Minéralisation du CO₂



- Utilisation de minerai ou de déchets industriels comme matières premières
- Réaction spontanée, mais lente
- Les carbonates servent de base à la production de ciment



3. Valorisation du CO₂

Culture de microalgues

=> Photosynthèse



	Algues-bassins
Potentiel d'émergence	3
Perspectives économiques	3
Consommation énergétique externe	4
Volume potentiel de CO ₂	4
Durée de séquestration du CO ₂	2
Autres impacts environnementaux	4

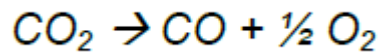
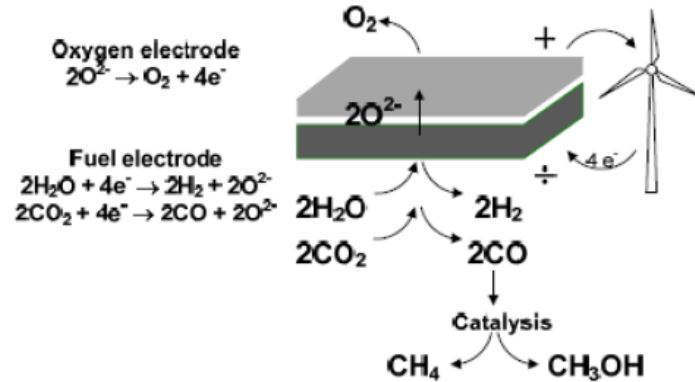
- Limitations :
- surface pour les cultures (12t CO₂/an pour Niederaussem)
 - énergie nécessaire pour reprocessing



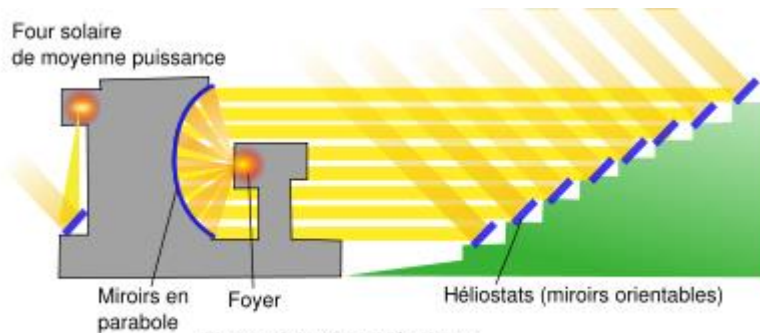
3. Valorisation du CO₂

Autres voies en exploration:

- Electrolyse
- Thermochimie
- Biocatalyse
- Reformage sec
- ...



Four solaire de moyenne puissance



Four solaire de 1 Mégawatt

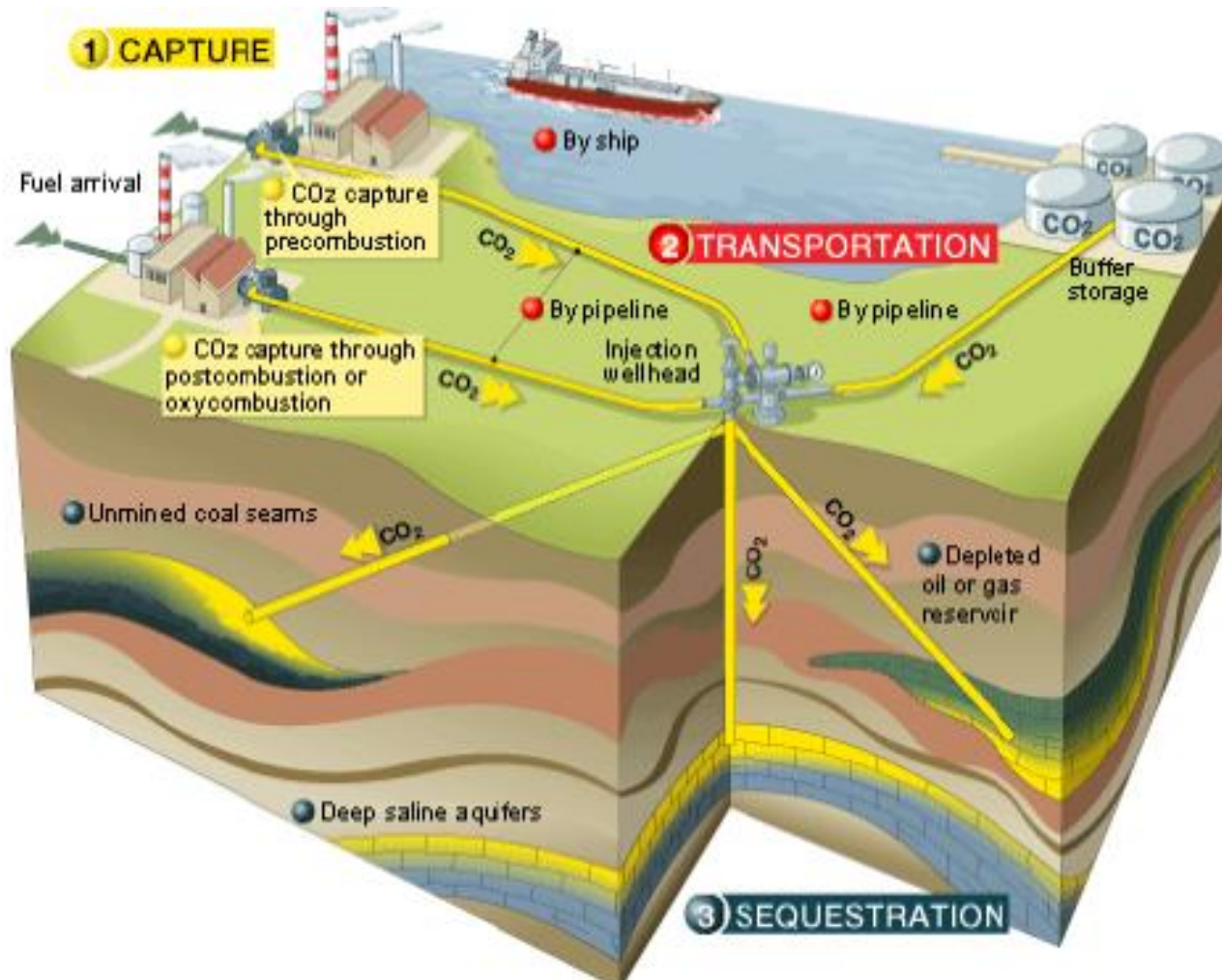


4. Stockage du CO₂



4. Stockage du CO₂

Capture – Transport – Stockage



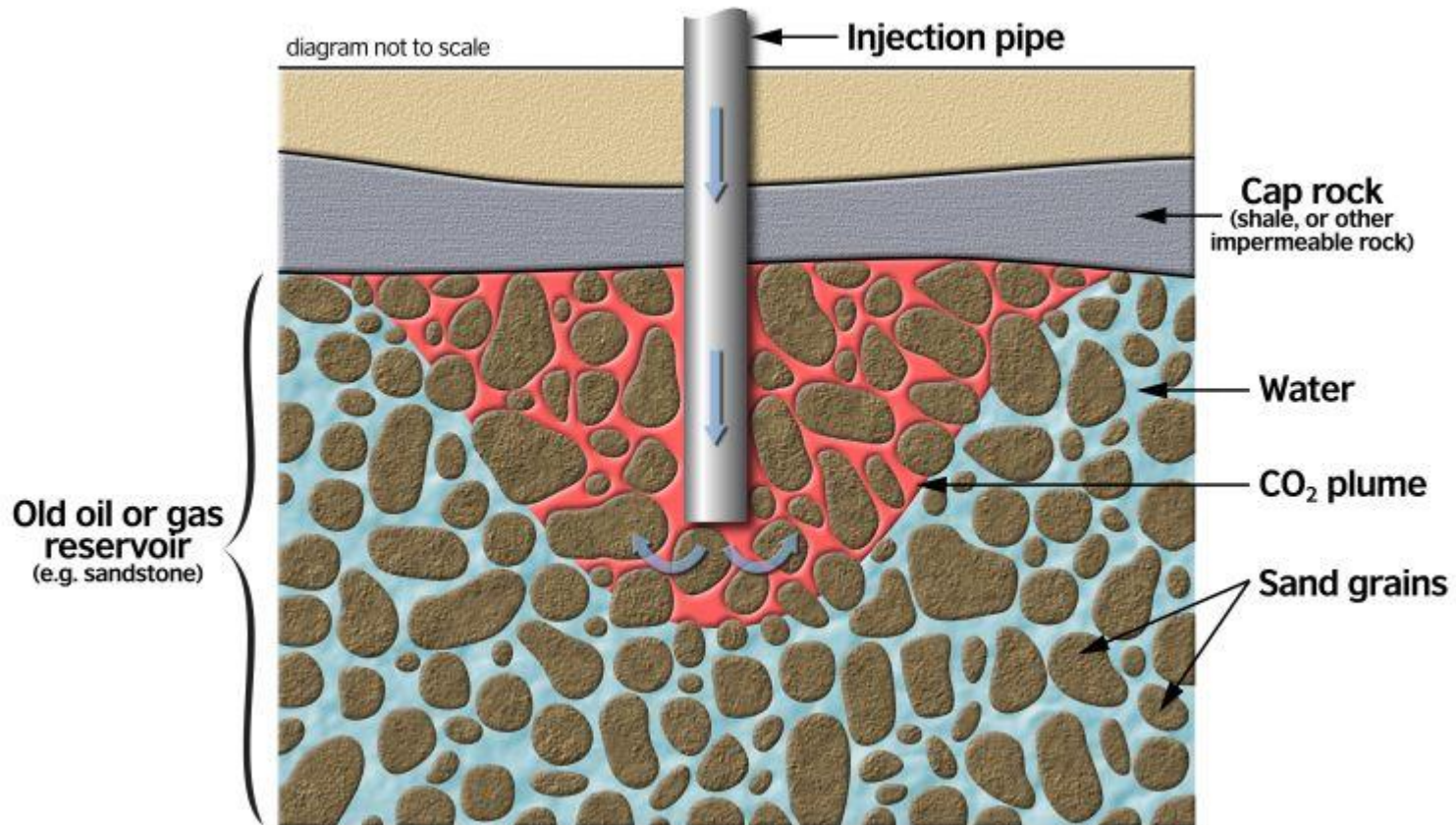
4. Stockage du CO₂

Transport du CO₂

- Par bateau:
 - 100 000 tonnes transportées/an (~1000t CO₂/bateau)
 - Technologie similaire au LPG, mais à améliorer
 - CO₂ liquéfié (-30°C, 15 bar)
- Par pipeline:
 - CO₂ supercritique (100bar)
 - 3000 km de pipeline aux USA depuis les années 1970 pour la RAH
 - Attention à la formation d'hydrates

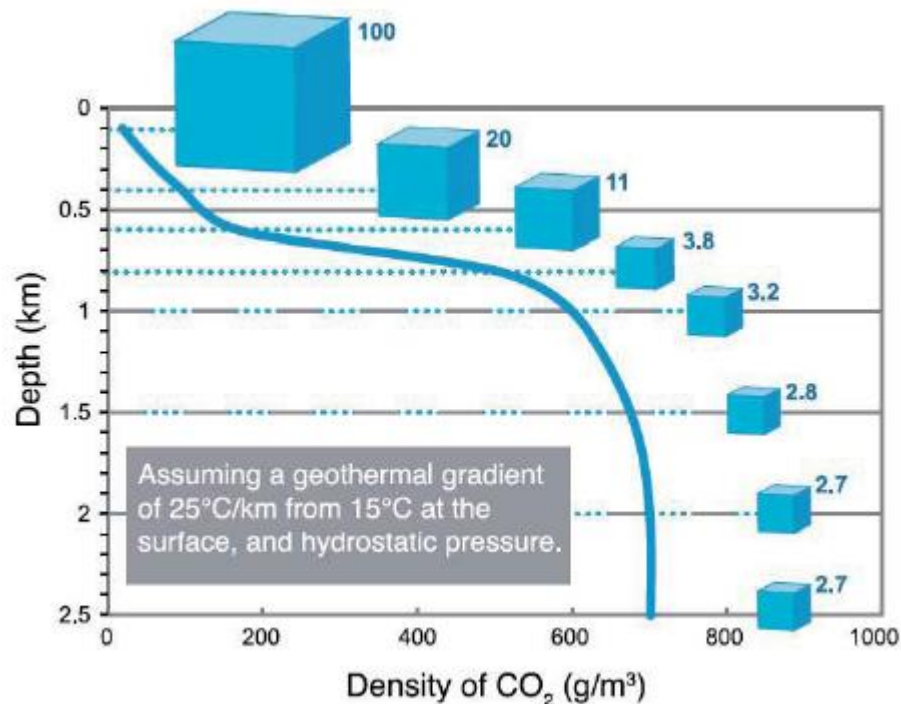


4. Stockage du CO₂



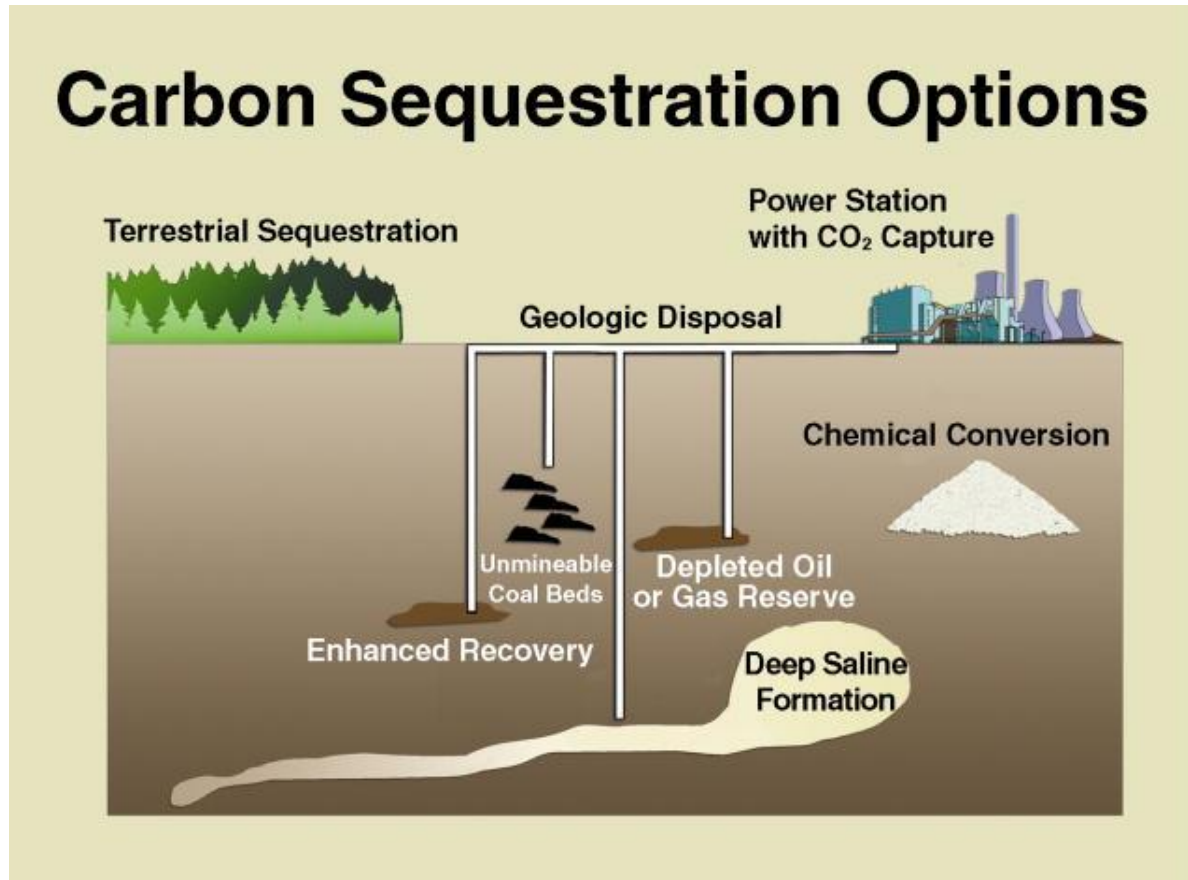
4. Stockage du CO₂

Effet de la profondeur sur la densité du CO₂



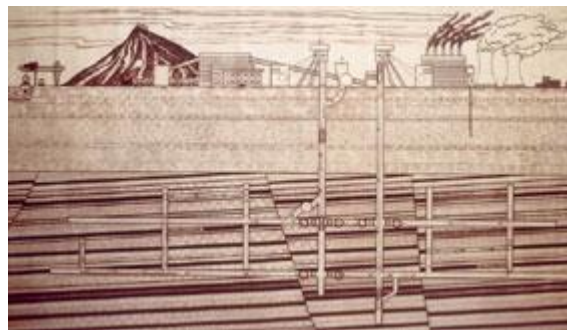
4. Stockage du CO₂

Différentes méthodes de stockage du CO₂



4. Stockage du CO₂

- Aquifères salins: grande capacité, mais géologie encore peu connue et donc incertitudes sur les propriétés de tels réservoirs
- Champs de gaz et de pétrole: Capacité limitée, mais géologie connue, et efficacité du stockage démontrée
- Mines de charbon: capacité très limitée, perméabilité faible, mais possibilité de récupération de méthane

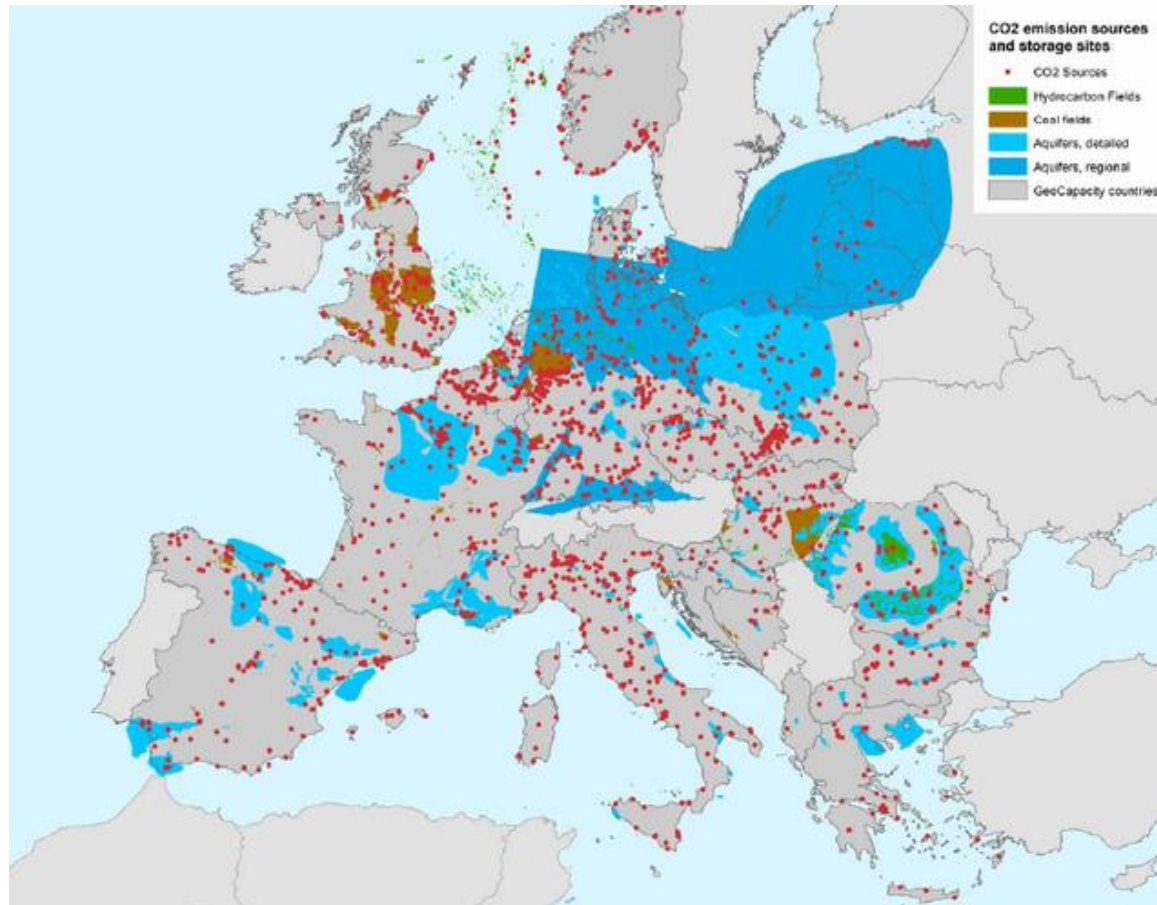


Ancien charbonnage d'Eisden



4. Stockage du CO₂

Potentiel de stockage en Europe

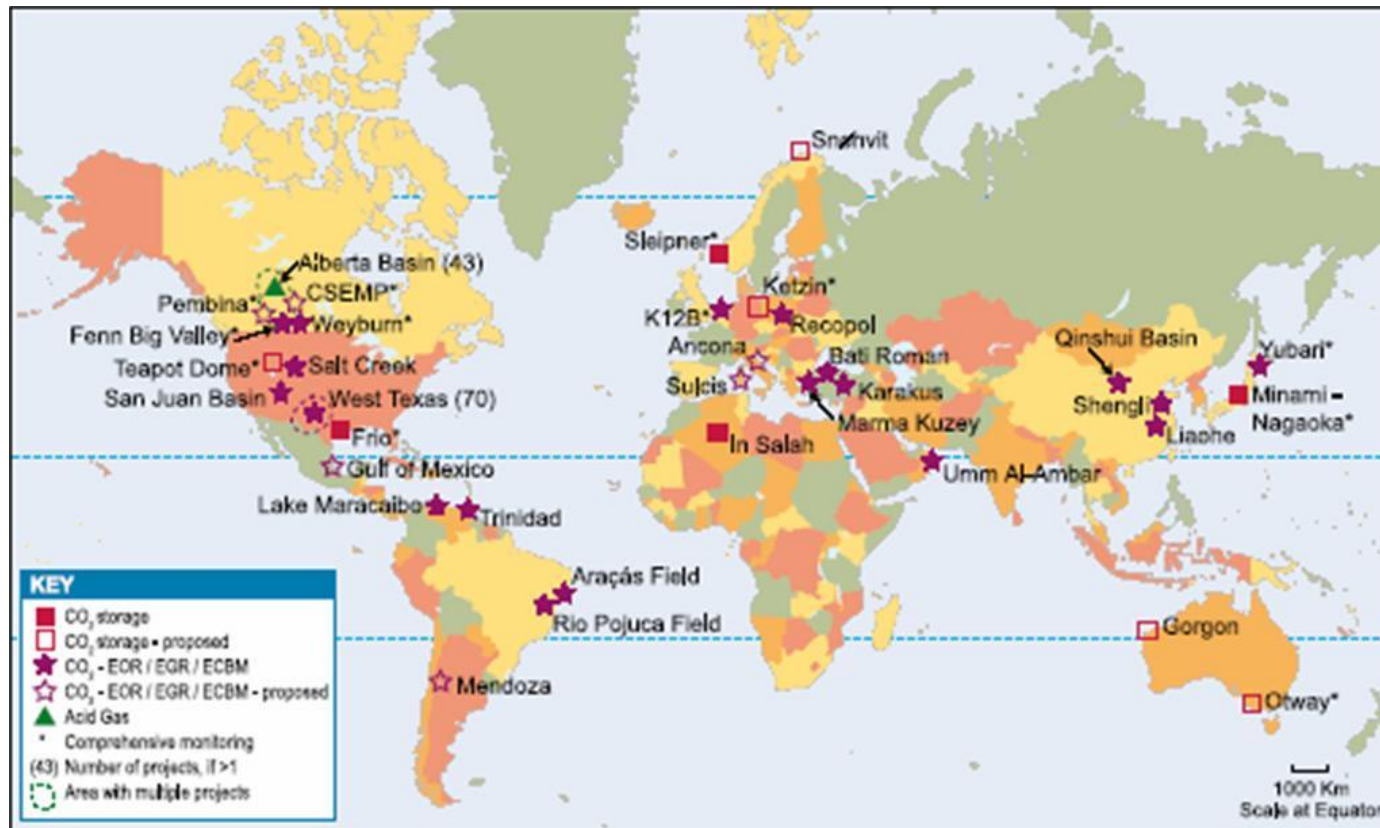


Sleipner : 1Mtonne/an depuis 1996



4. Stockage du CO₂

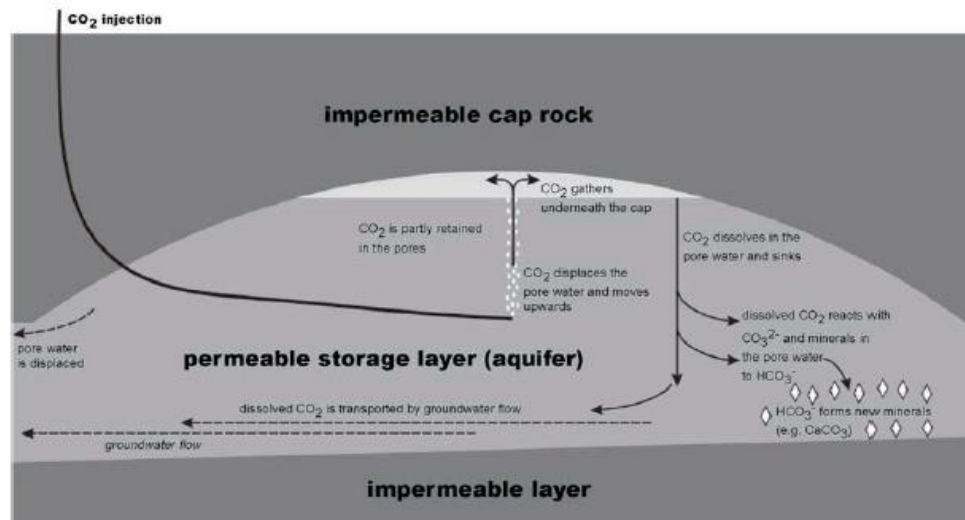
Et dans le monde...



4. Stockage du CO₂

Paramètres pour le choix du lieu de stockage:

- Capacité: liée à la taille de la formation géologique, et surtout à sa porosité
- Injectabilité: liée à la perméabilité des roches
- Stabilité: il est nécessaire qu'il y ait une formation imperméable située au-dessus du réservoir de CO₂



4. Stockage du CO₂

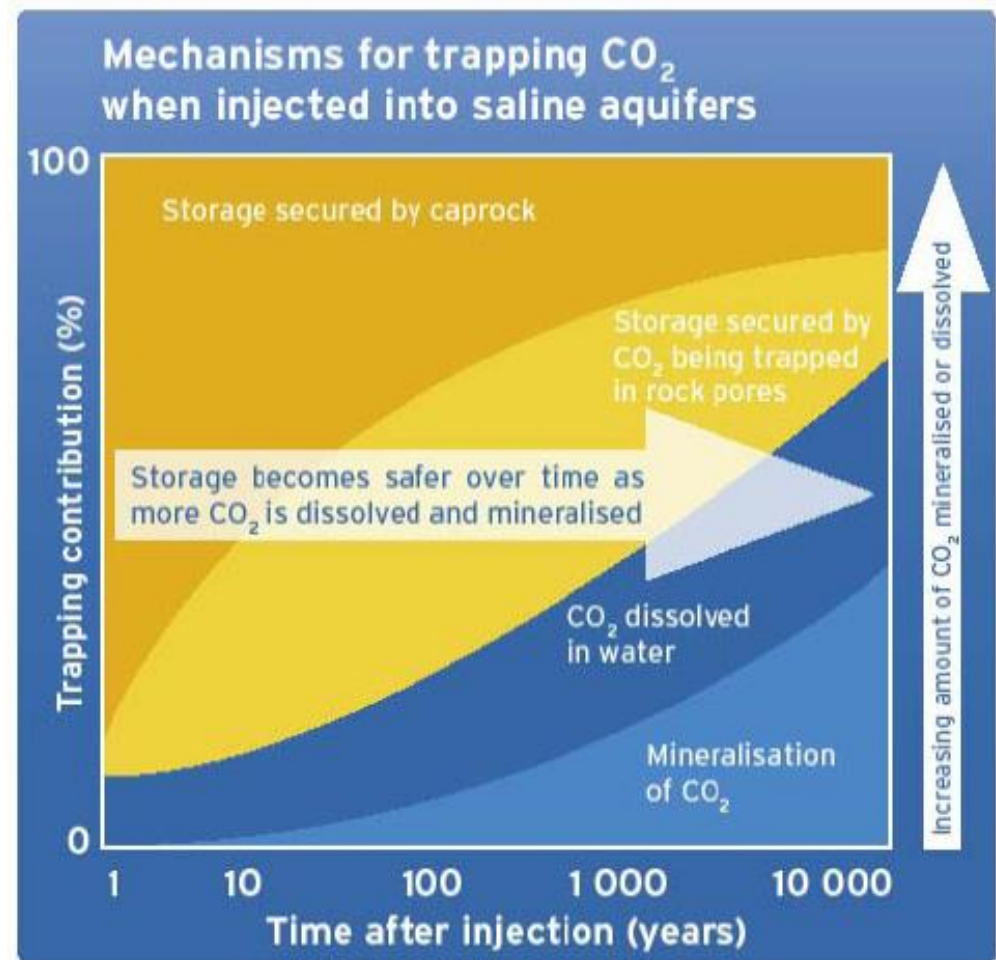
Paramètres pour le choix du lieu de stockage:

- Profondeur supérieure à 800 m (CO₂ supercritique)
- Profondeur inférieure à 1500 m (pour une perméabilité et porosité suffisantes)
- Capacité minimale: 100 Mtonnes de CO₂
- Proximité des lieux d'émissions de CO₂



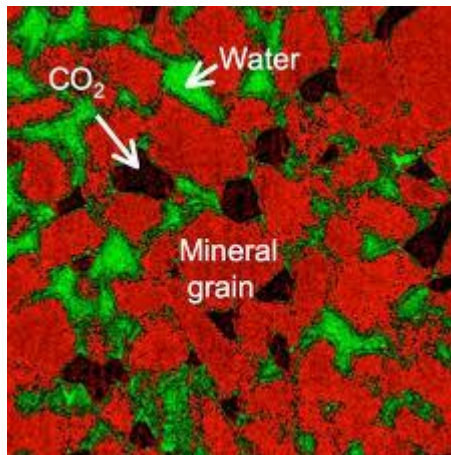
4. Stockage du CO₂

- Au début, le CO₂ diffuse jusqu'aux parois et est piégé par le couvercle
- Puis le CO₂ est de plus en plus piégé dans les porosités
- Enfin il est dissous et minéralisé
- Échelle de temps très longue!



4. Stockage du CO₂

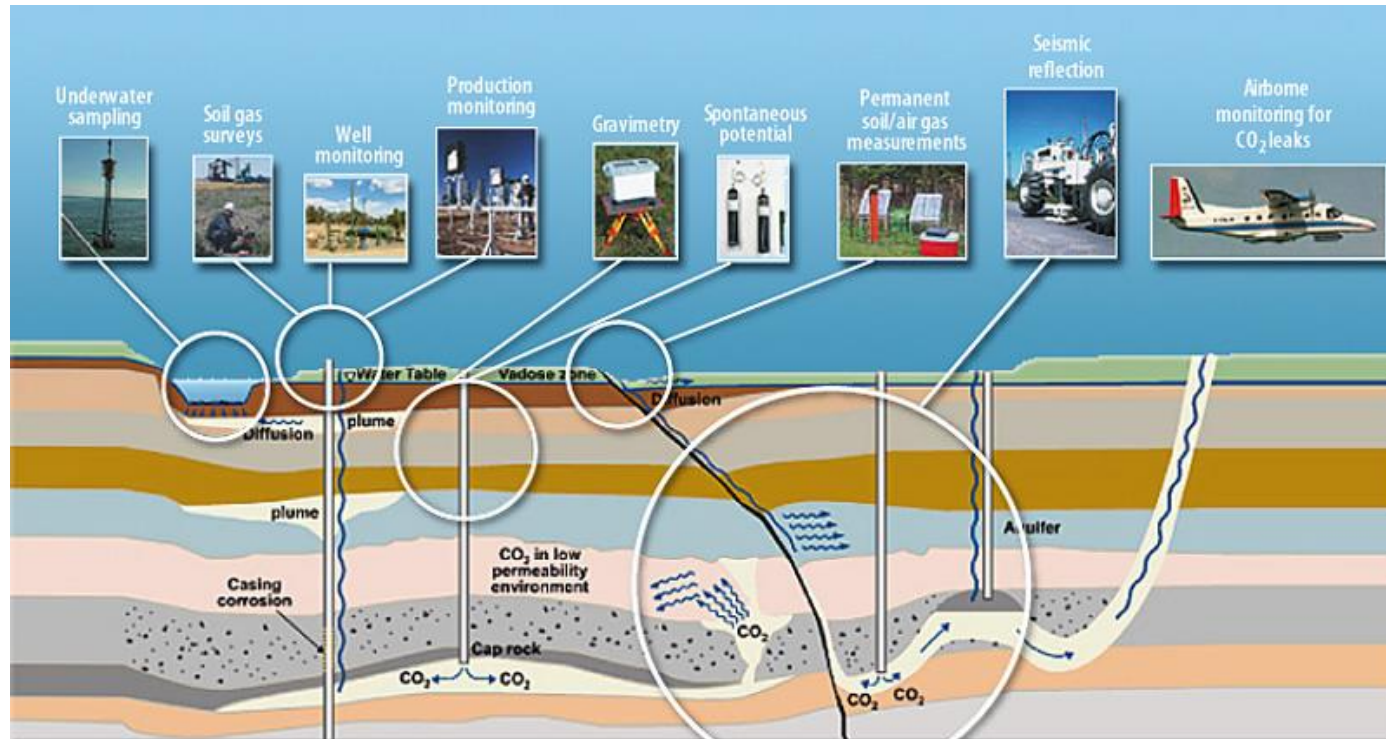
Minéralisation in-situ



4. Stockage du CO₂

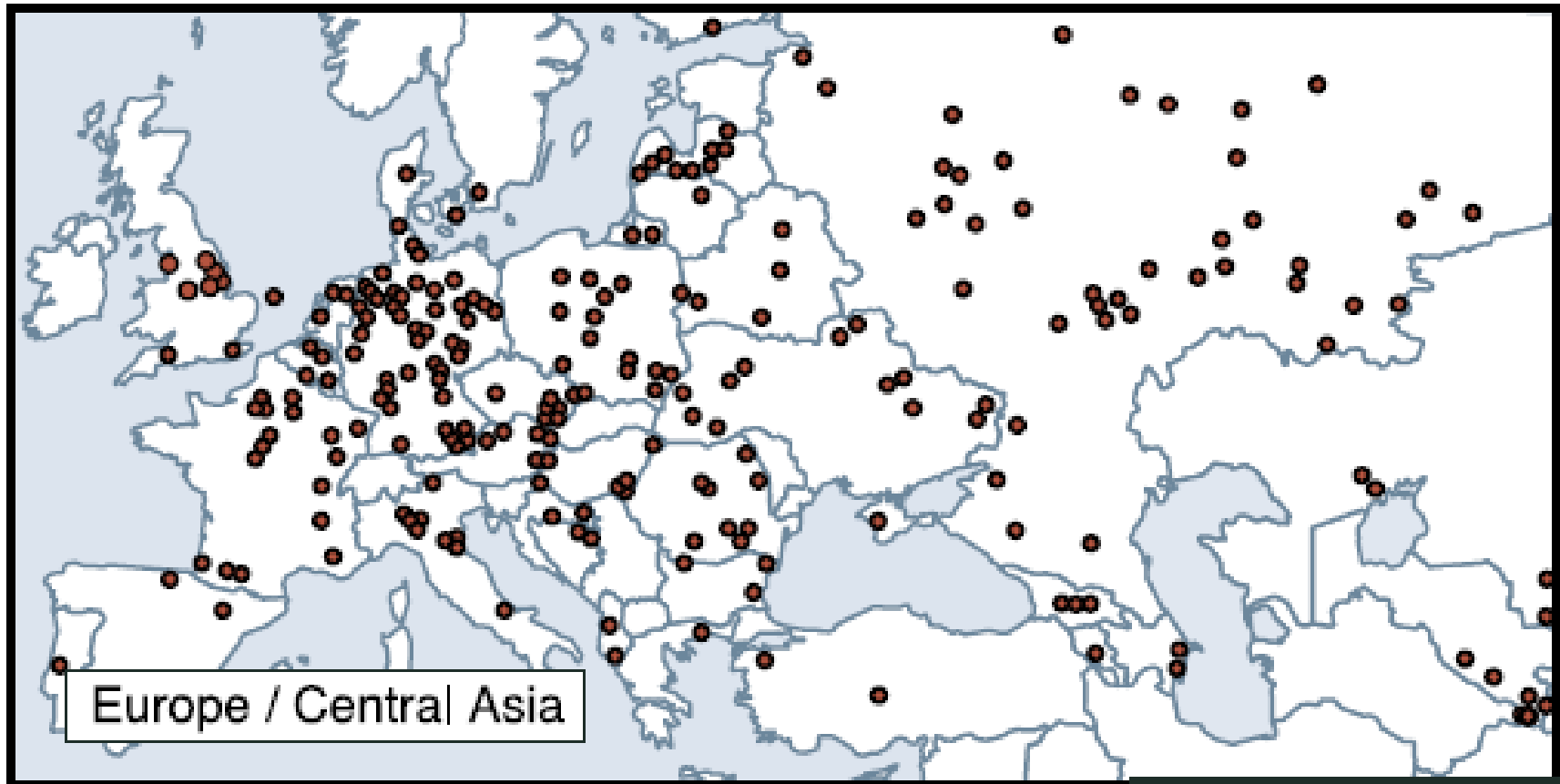
Monitoring des sites de stockage nécessaire

- Imagerie sismique 3D et 4D
- Gravimétrie
- Monitoring par satellite (détecte les mouvements à la surface de la terre)
- ...



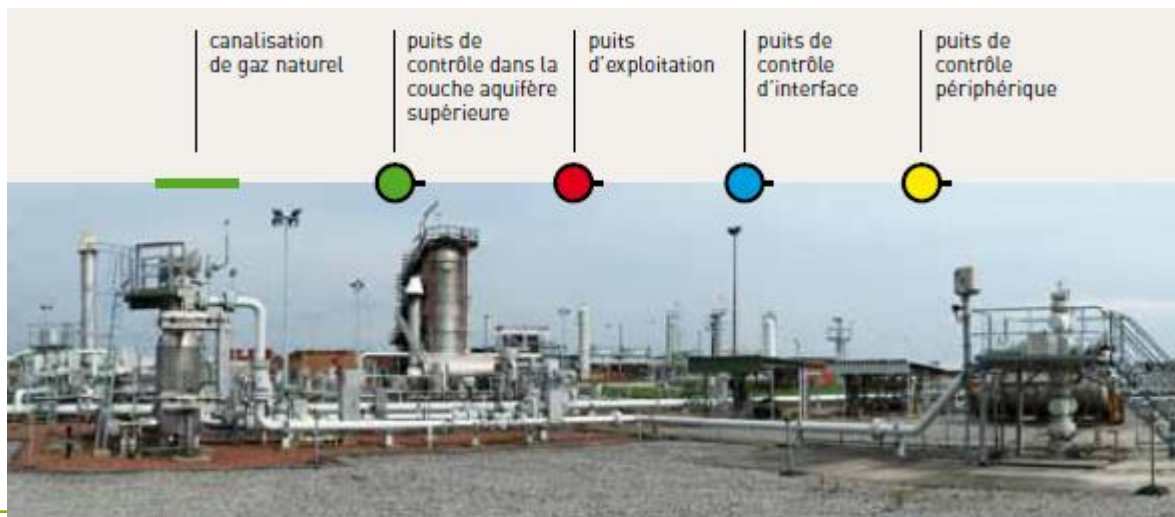
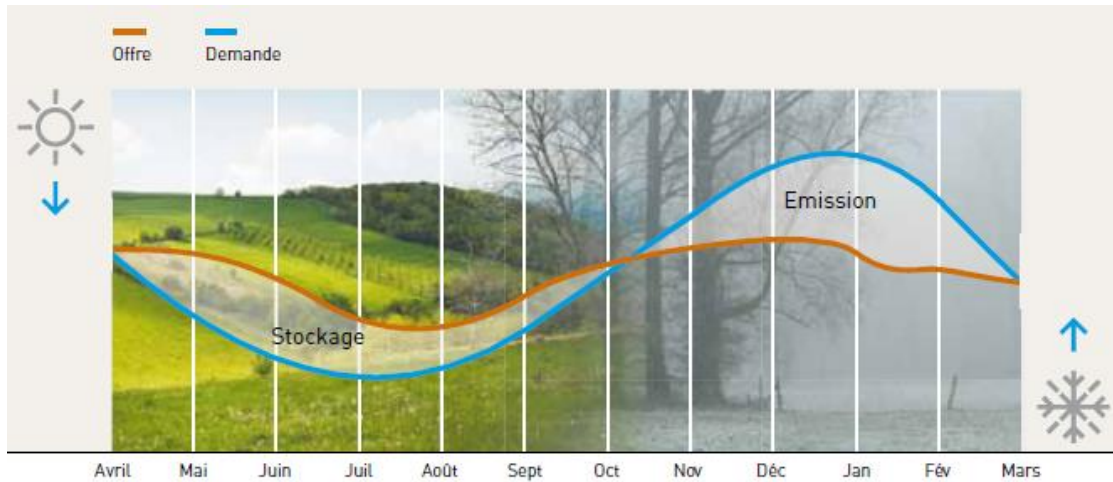
4. Stockage du CO₂

Le principe n'est pas neuf : stockage saisonnier du gaz naturel



4. Stockage du CO₂

Site de stockage saisonnier de Loenhout (Anvers)

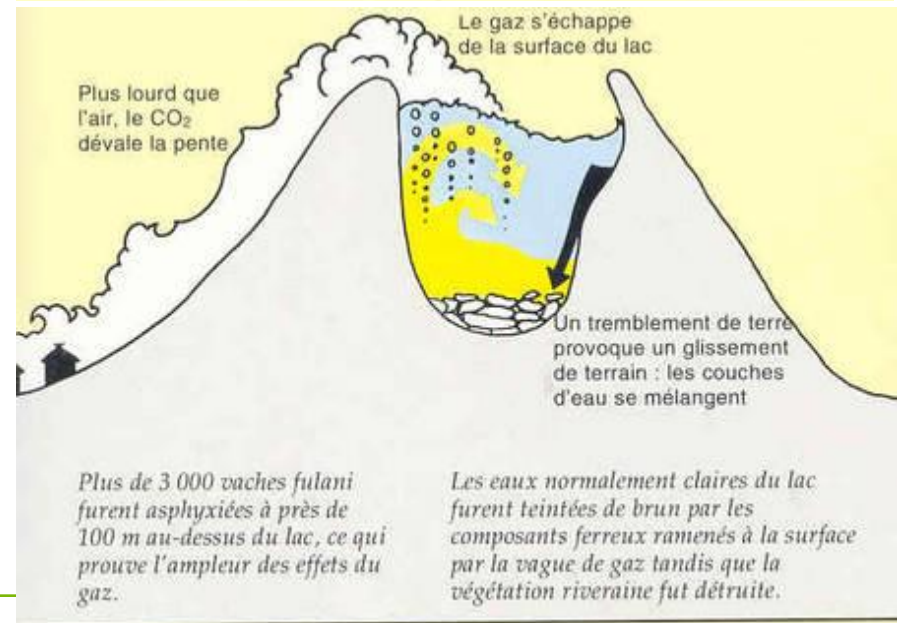
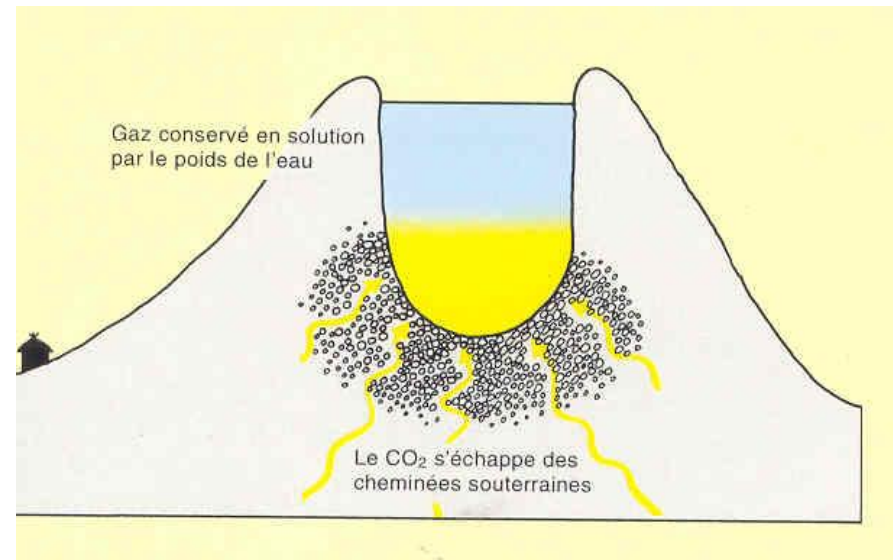


4. Stockage du CO₂

Cas du lac Nyos (Cameroun, 1986):

- CO₂ d'origine volcanique
- Près de 1700 victimes en une nuit!

=> Gestion du risque!

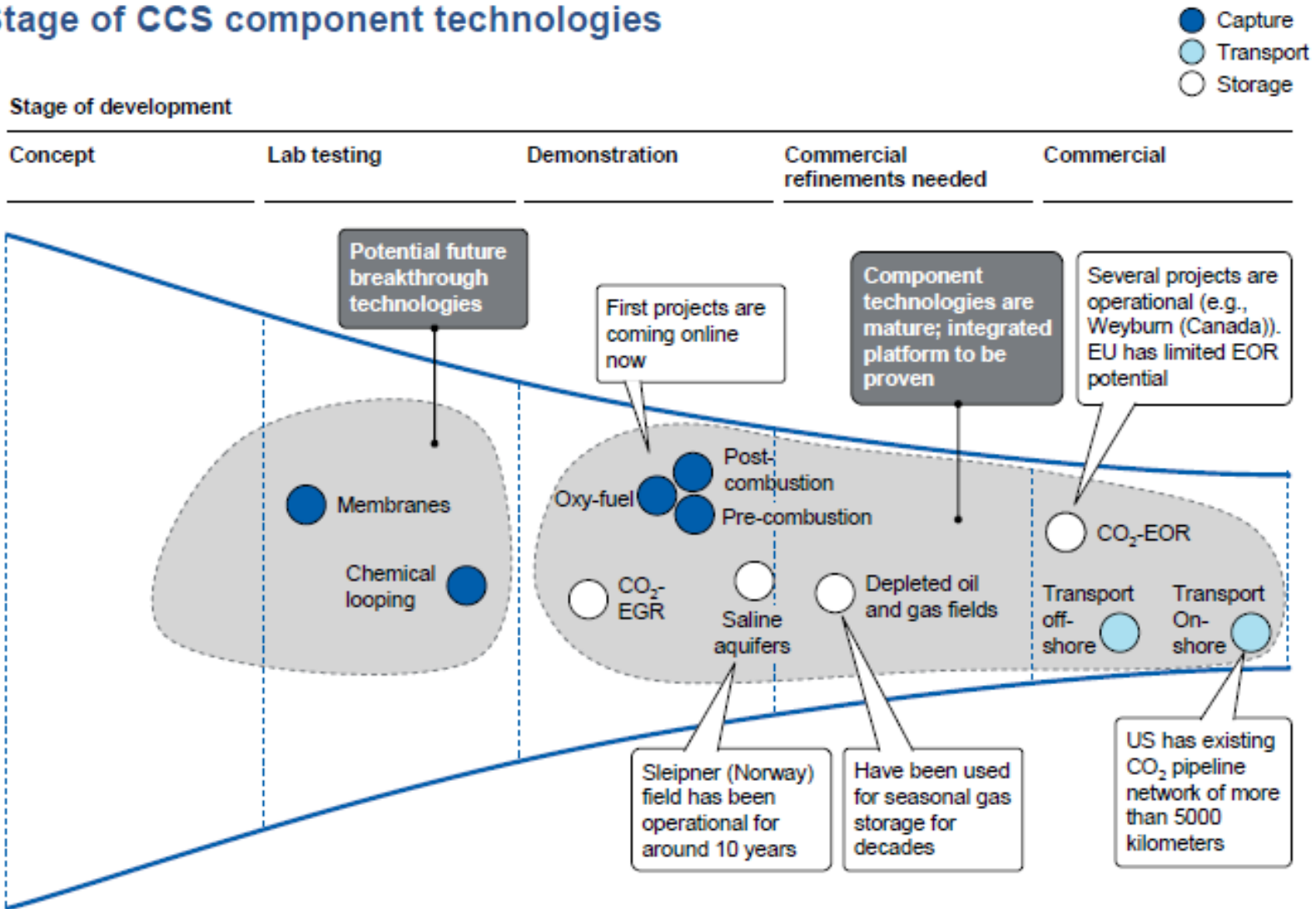


5. Défis et conclusions



5. Défis scientifiques

Stage of CCS component technologies



5. Défis techniques

De nombreux défis technologiques à relever, ne fut-ce qu'en fonction des quantités de CO₂ émises quotidiennement!

=> ~ 8Mtonnes CO₂ sur le temps de cette présentation

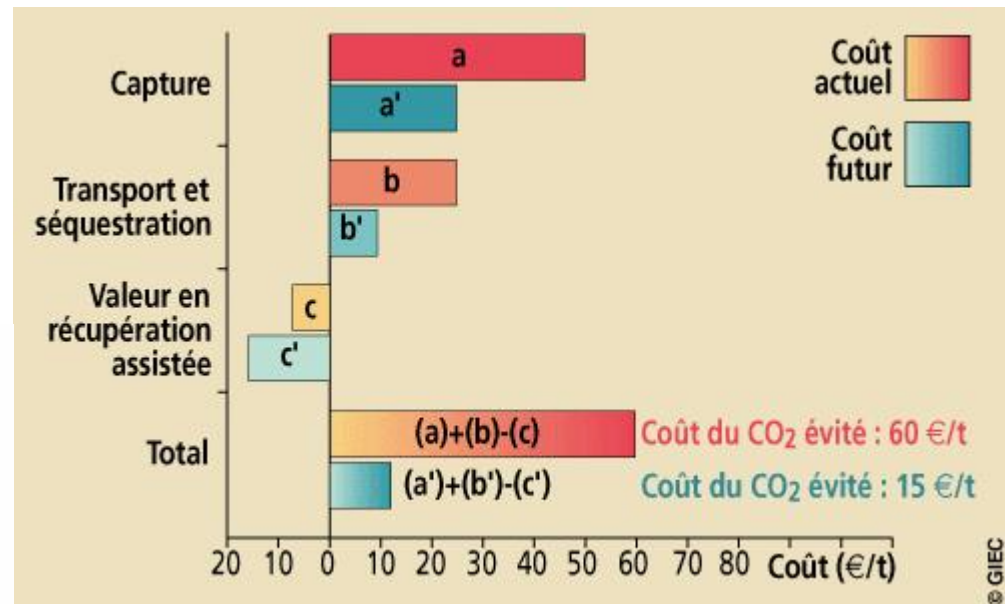
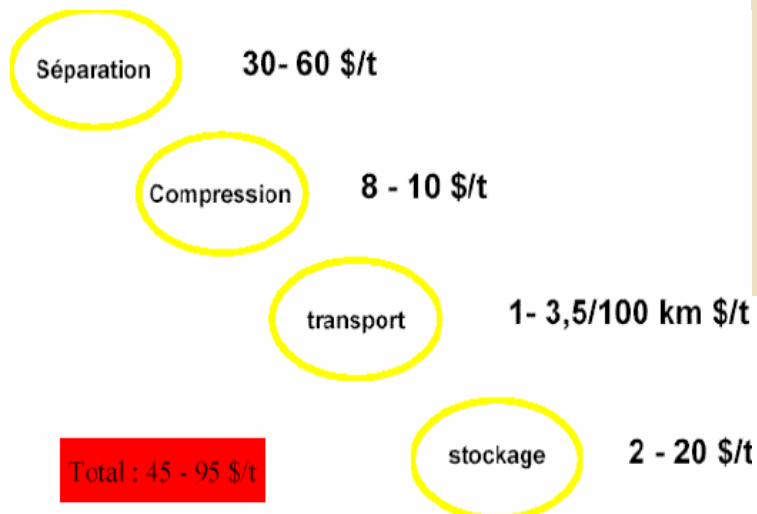


5. Défis économiques

- Implémentation des technologies CCS prévue au départ à partir de 2020
- Technologie transitoire

- Coût actuel :

50-60\$/tonne CO₂
=> 20\$/tonne CO₂



5. Défis politiques

2008: appel de la commission européenne à la construction de 12 installations de démonstration de la technologie pour 2015

Cadre législatif à créer

- Directive européenne date de 2009 concernant le stockage de CO₂
- Transposée dans le droit de différents pays

Mais :

- Investissements sont trop lourds pour le secteur privé seul
- Soutien demandé aux états
- Revenus censés provenir en partie de l'ETS
- Prix de la tonne de CO₂ trop bas!



5. Défis politiques

Décisions avant tout politiques...

Visions 2050

	Fortes contraintes techniques et/ou sociétales	Faibles contraintes techniques et/ou sociétales
Mesures incitatives et réglementaires faibles	Vision 1 : déploiement marginal du CSC	Vision 2 : CSC réservé à quelques gros émetteurs et secteurs industriels ne pouvant appliquer des mesures alternatives de réduction des émissions de CO ²
Mesures incitatives et réglementaires fortes	Vision 3 : forte mutualisation et stockage géologique du CO ₂ en mer privilégié	Vision 4 : déploiement du CSC à grande échelle à terre et en mer

A trancher:

- ⇒ agir maintenant pour favoriser l'implémentation du CCS?
- ⇒ ou prendre le risque d'attendre 5-10 ans que les technologies s'améliorent, "une fois la crise financière passée" ...?

A vous de vous faire votre avis!



Merci pour votre attention !



**D'autres questions?
g.leonard@ulg.ac.be**

