



# Management stratégique du **carbone**

Certificat interuniversitaire UCL-ULg

Capture, utilisation et stockage du CO<sub>2</sub>  
*Grégoire Léonard*



# Sommaire

---

1. Contexte
2. Capture du CO<sub>2</sub>
3. Valorisation du CO<sub>2</sub>
4. Stockage du CO<sub>2</sub>
5. Défis et conclusion



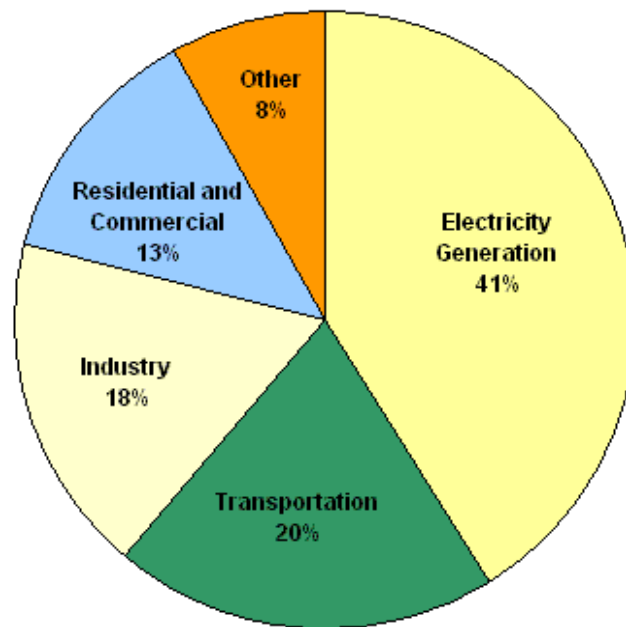
# 1. Contexte



# 1. Contexte

---

Capter/capturer le CO<sub>2</sub>... bonne idée. Mais lequel?



CO<sub>2</sub> Emissions from fossil fuel burning by sector



# 1. Contexte

=> Émissions stationnaires et à grande échelle de CO<sub>2</sub>

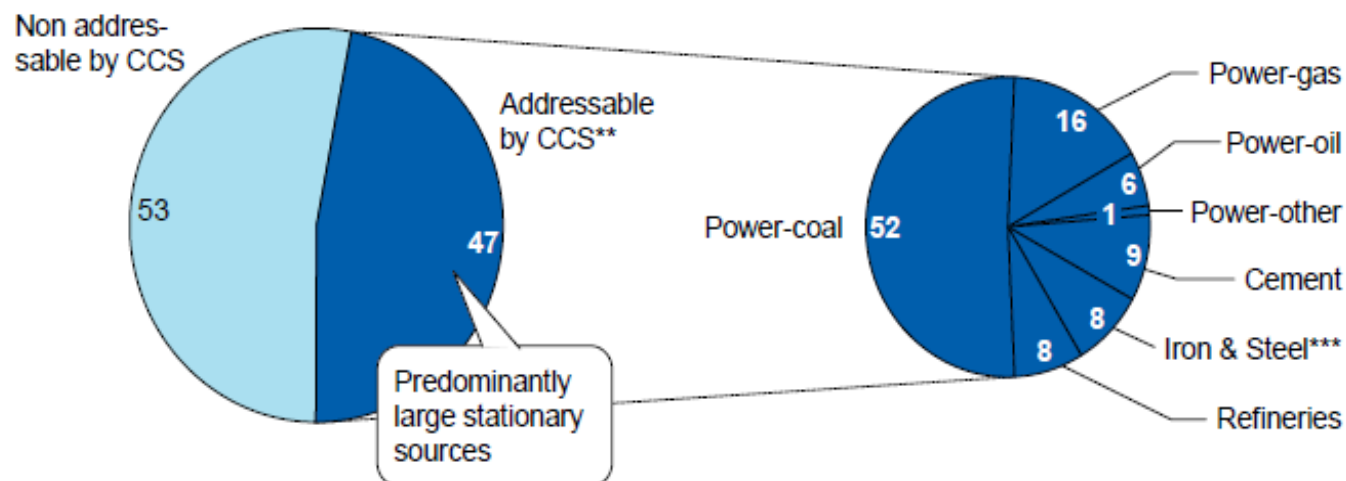
## European CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial processes

### Total emissions\*

100% = 4.2 GtCO<sub>2</sub>, 2007

### CCS addressable emissions

100% = 2 GtCO<sub>2</sub>, 2007



\* IEA estimates of CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial processes in 2007. Does not include miscellaneous small CO<sub>2</sub> emitters and non-CO<sub>2</sub> emissions such as methane (e.g. forestry, farming, etc.)

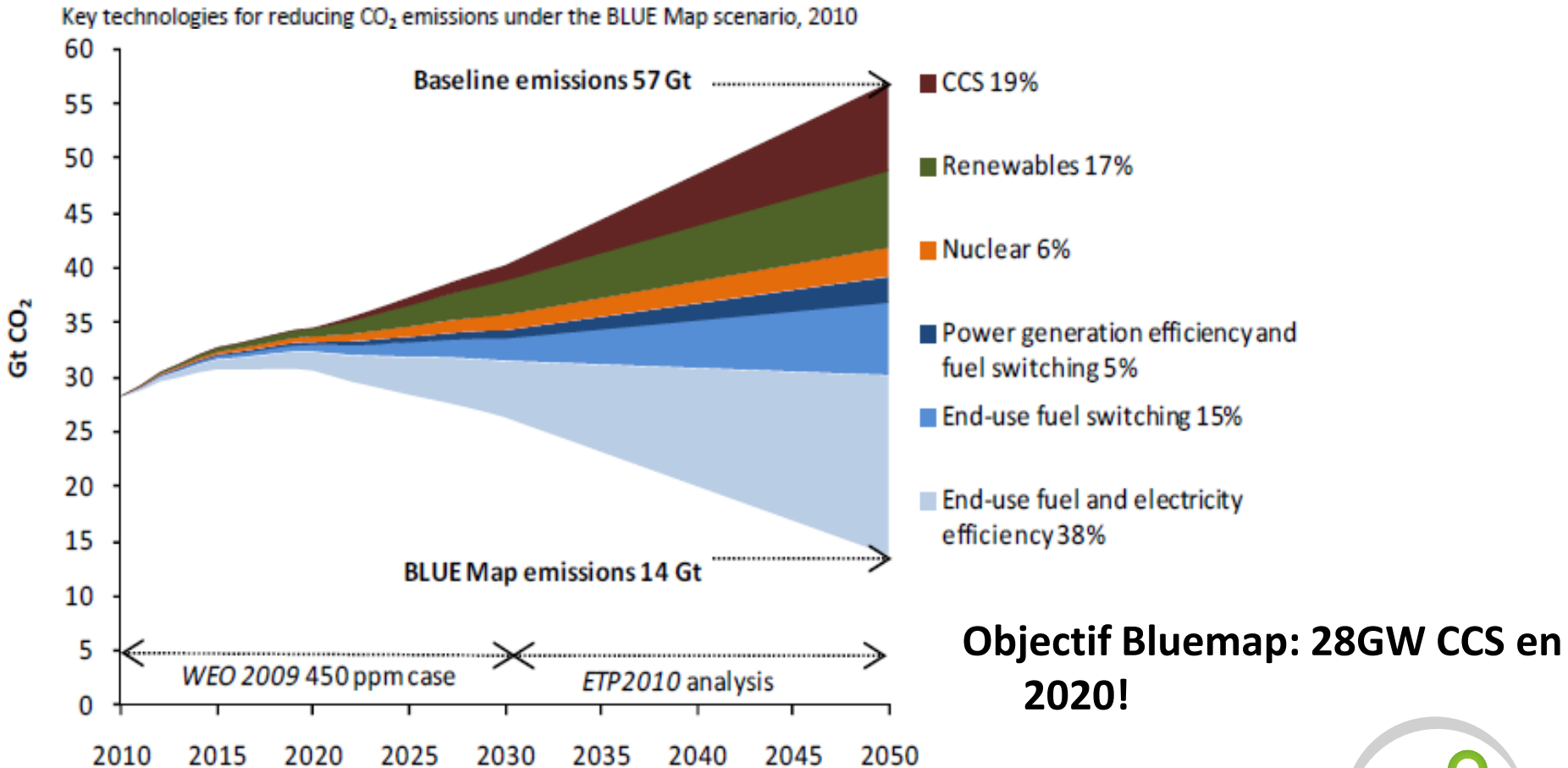
\*\* Not including biomass, oil sands, paper mills, ammonia, ethanol, ethylene, hydrogen, and other industries

\*\*\* Includes metal ores processing



# 1. Contexte

Quel impact potentiel du CCS dans l'avenir?



# 1. Contexte

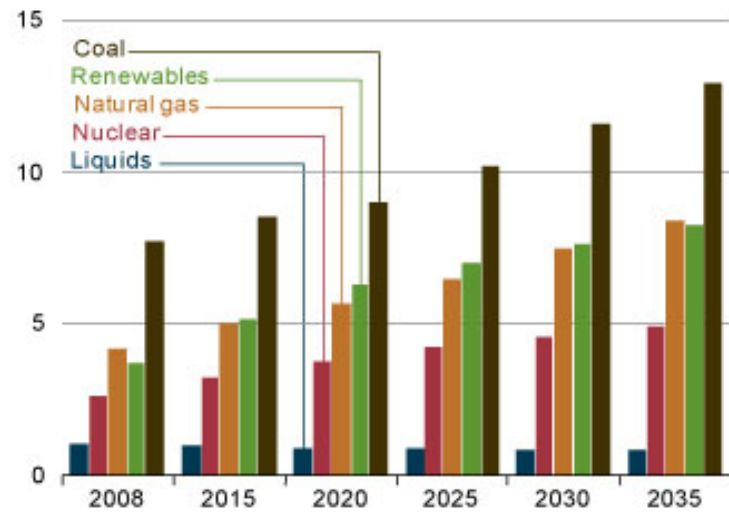
## => 2 Constats

- Importance du charbon (et du gaz) pour la production d'électricité et dans l'industrie
- Préoccupations environnementales

## => 3 Réponses possibles

- Efficacité énergétique
- Biomasse
- Capture et stockage du CO<sub>2</sub> (CCS)

Figure 75. World net electricity generation by fuel, 2008-2035  
(trillion kilowatthours)



International Energy Outlook 2011



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>





## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

---

La capture du CO<sub>2</sub> = technologie exploitée depuis des décennies

=> Installations commerciales de capture du CO<sub>2</sub>

=> 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 CO<sub>2</sub>

---

3 principales technologies:

1. Capter le CO<sub>2</sub> formé lors de la combustion dans les fumées (séparation du CO<sub>2</sub> des gaz de combustion = surtout l'azote de l'air)

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

2. Enlever le C du combustible (séparation du CO<sub>2</sub> de l'hydrogène après gazéification du combustible solide)

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

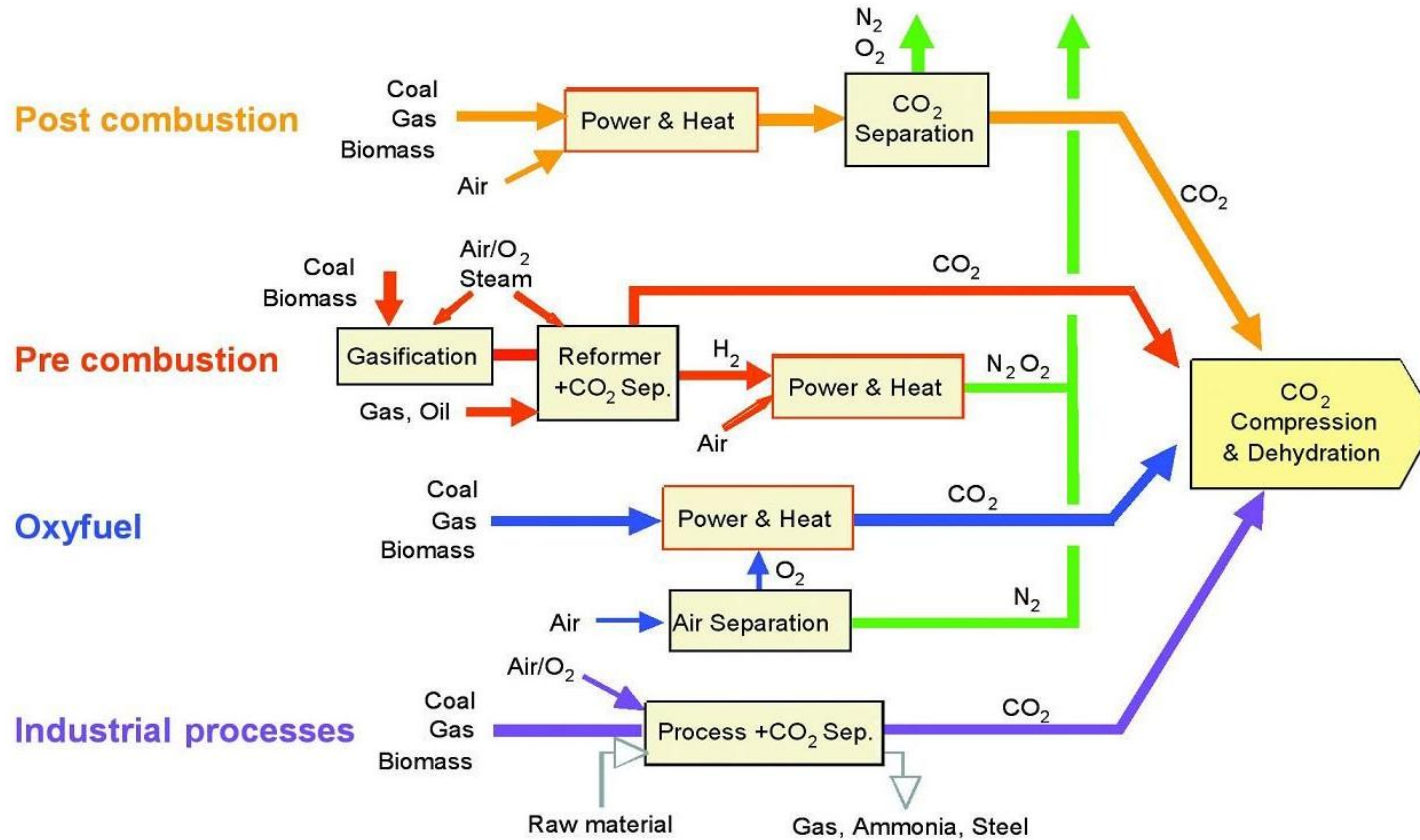
3. Brûler le combustible avec de l'oxygène pur (séparation du CO<sub>2</sub> de l'eau)

=> **Combustion Oxyfuel**



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

### Overview of CO<sub>2</sub> capture processes and systems

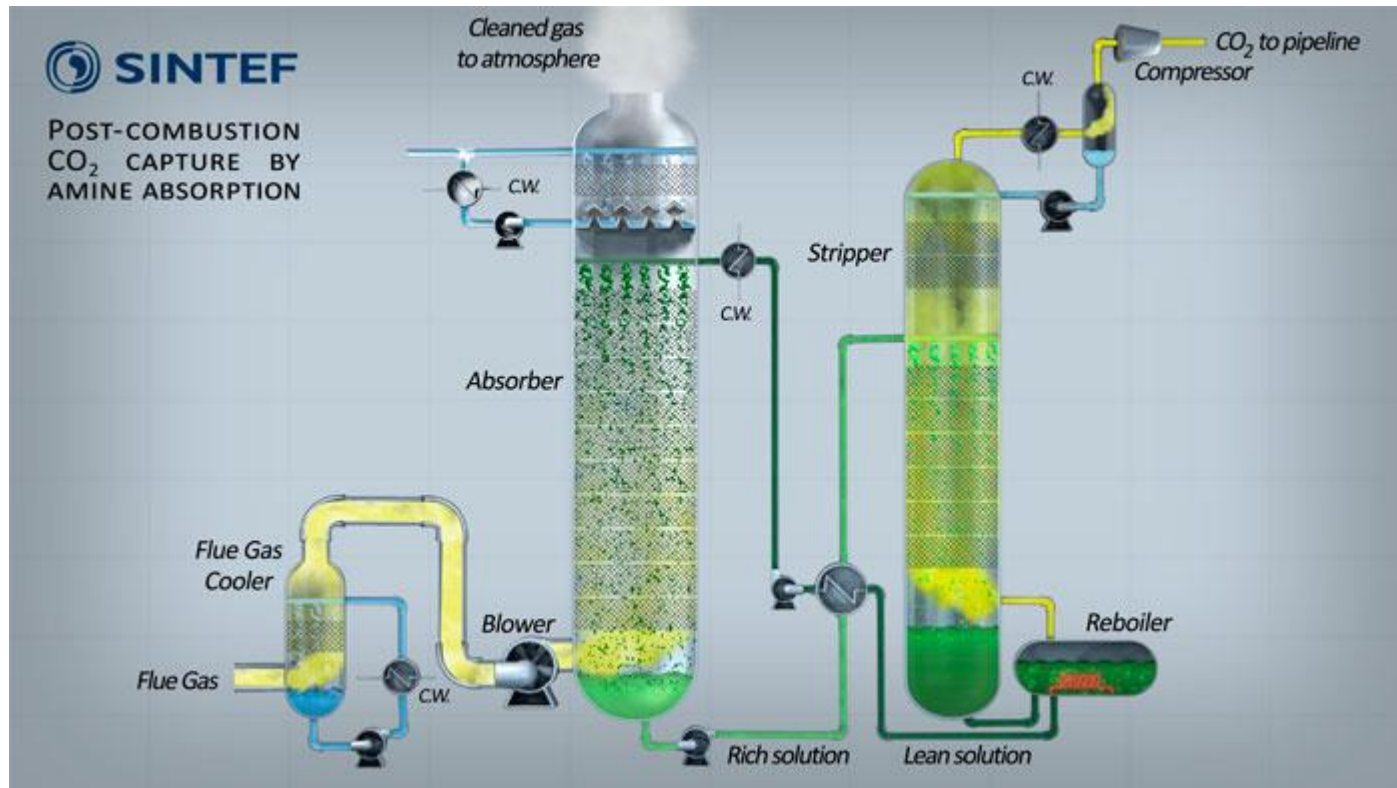


SRCCS Figure TS-3



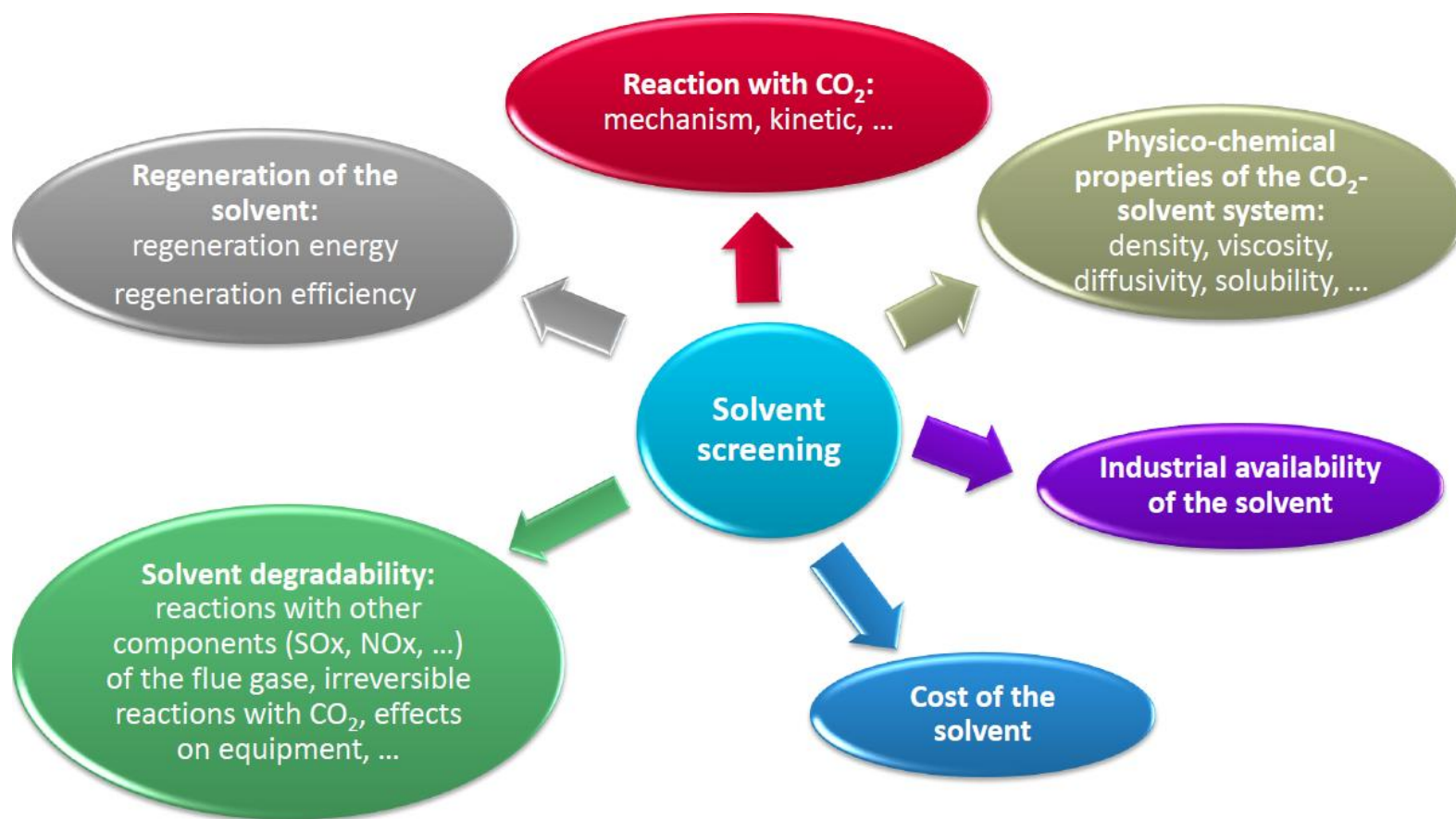
## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

### Capture post-combustion



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

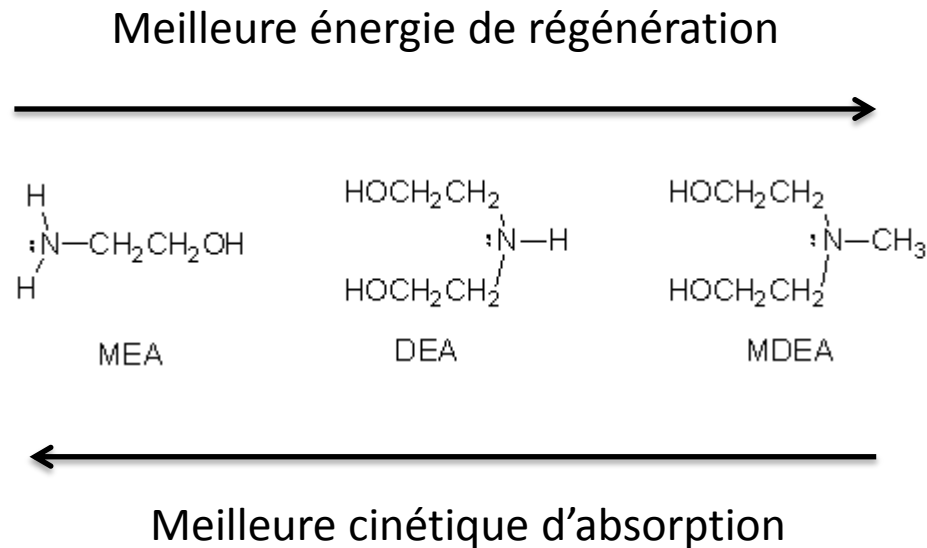
### Caractéristiques d'un solvant chimique



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

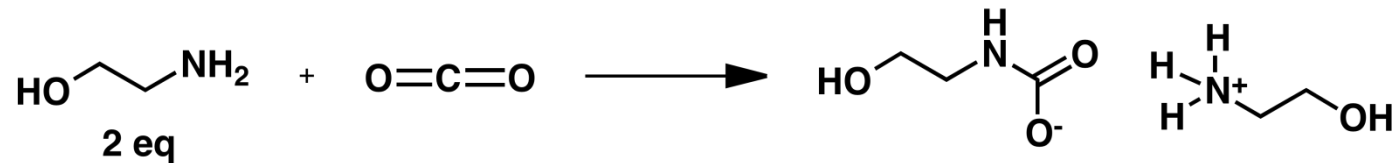
Principaux solvants employés: Amines

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



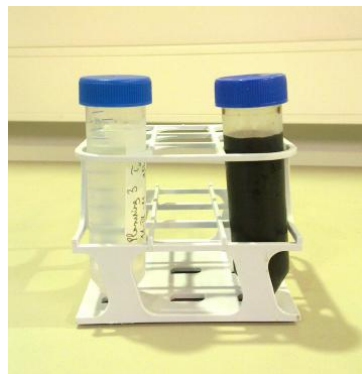
## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

Solvant de référence: Monoéthanolamine 30% en solution aqueuse



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

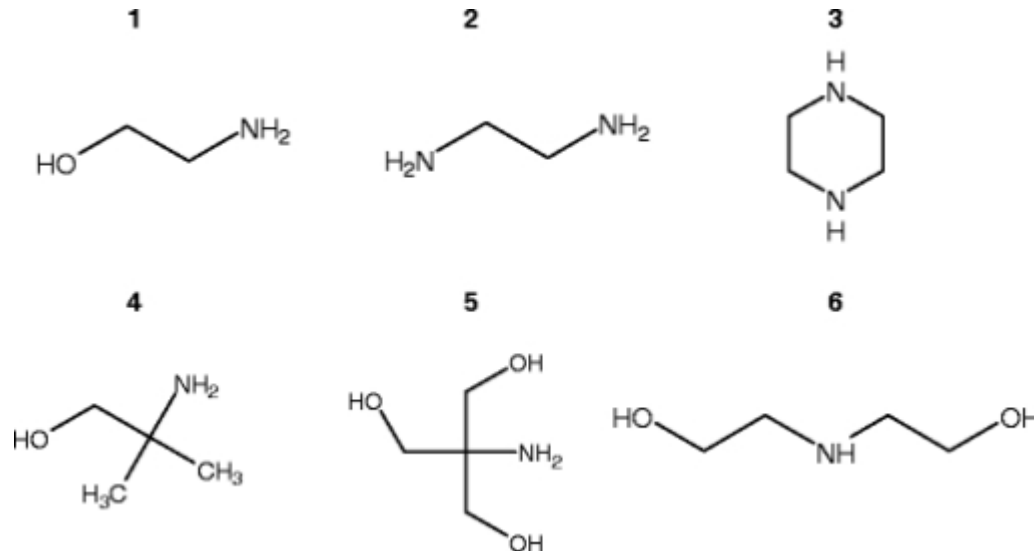
Inconvénients: grande énergie de régénération, dégradation, corrosion



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

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)
- ...

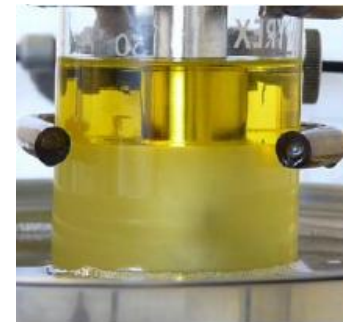
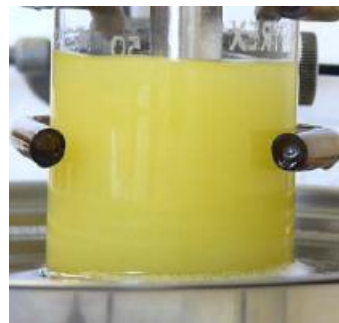
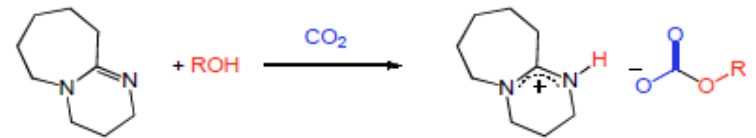




## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

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

- Chilled Ammonia: NH<sub>3</sub> à basse température
- Carbonate de potassium : K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- Acides aminés
- Liquides organiques (en absence d'eau)
- Solvants démixants



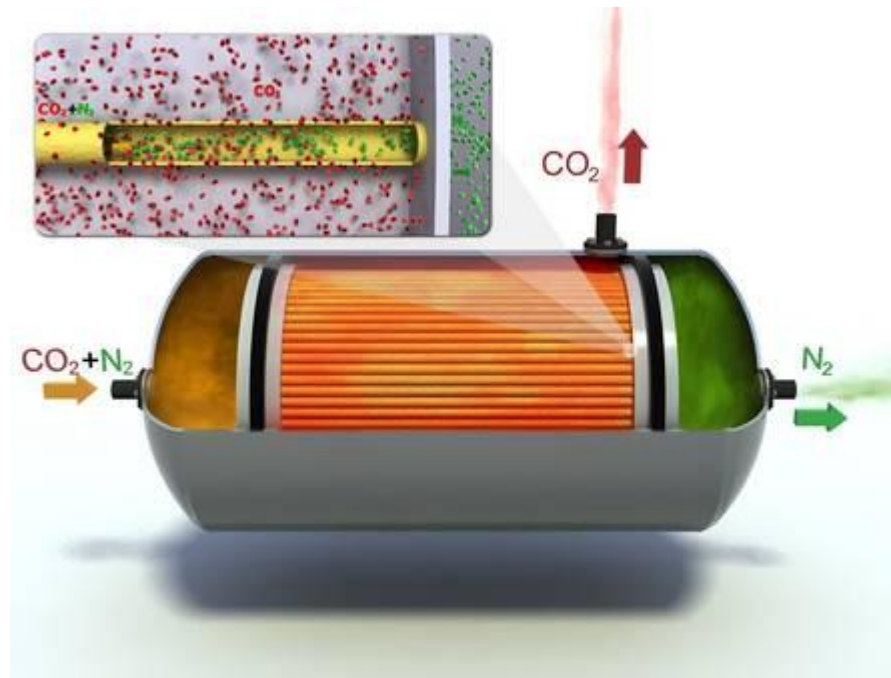
=> à la recherche du graal...



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

Technologies de 3<sup>ème</sup> génération : Alternatives aux solvants chimiques

=> Les membranes



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

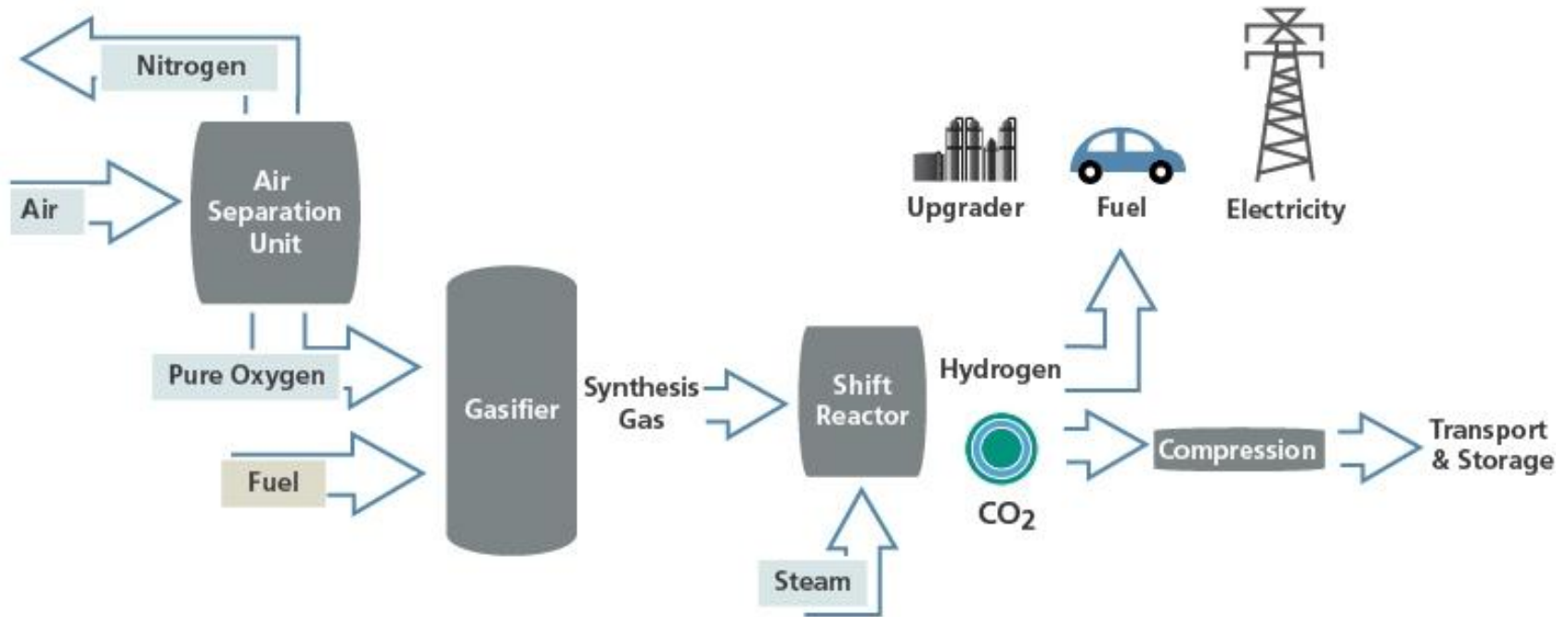
=> R&D en cours pour réduire le coût de la capture post-combustion du CO<sub>2</sub> à différentes échelles



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

### Capture pré-combustion

#### Pre Combustion Capture

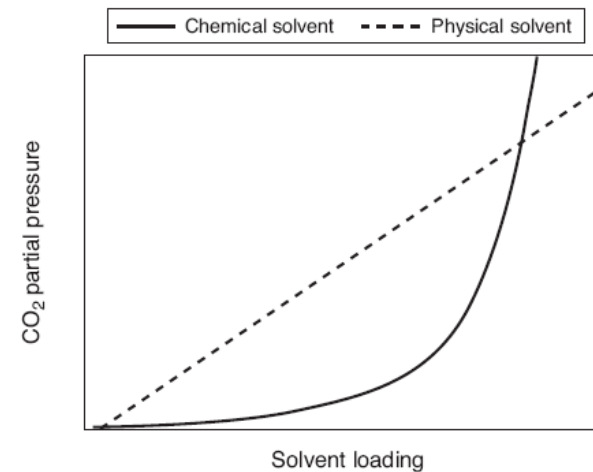


## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

Principales réactions en jeu:

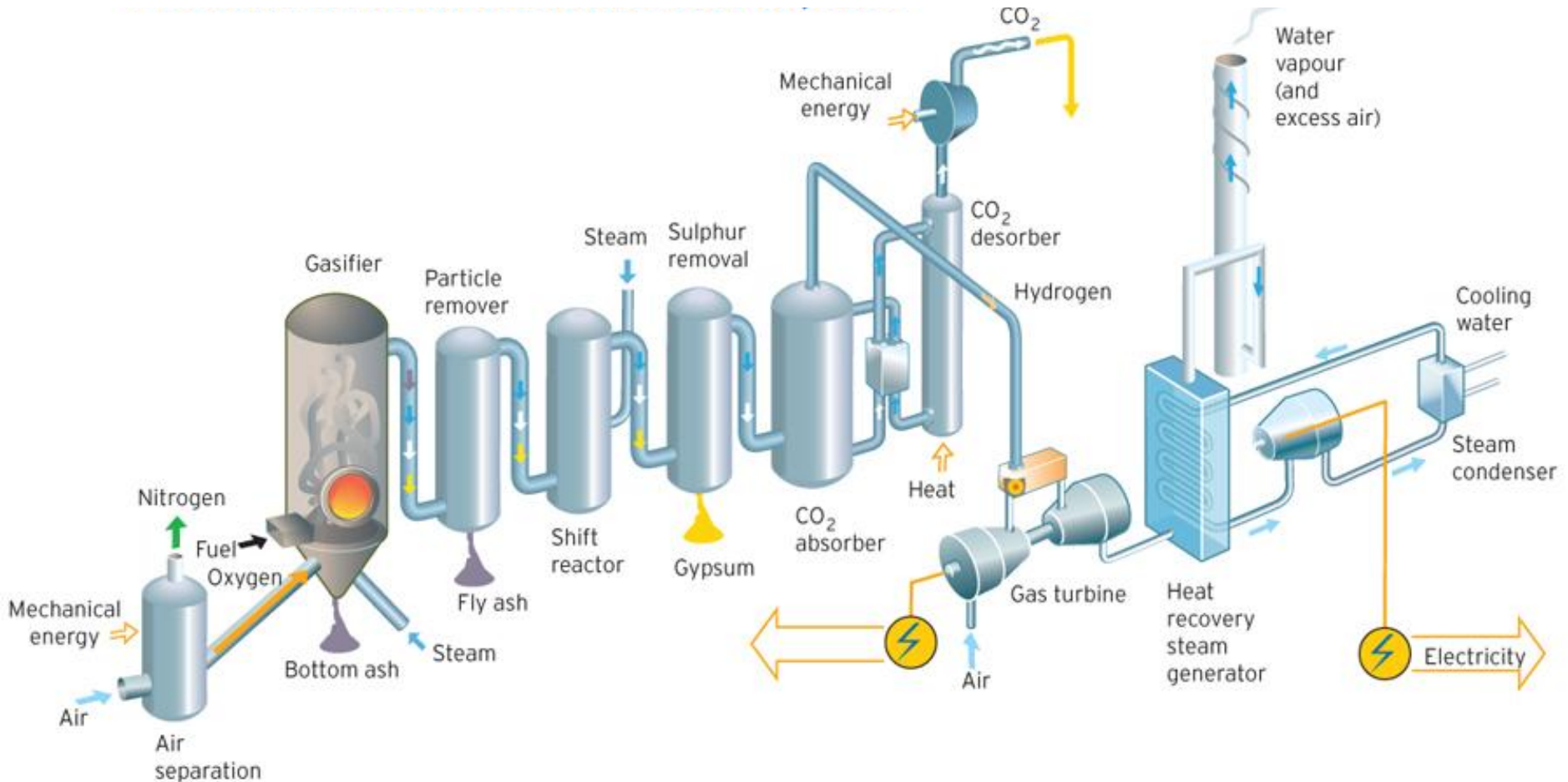
Reaction	Name	Equation	Reaction enthalpy (MJ/kmol CH <sub>4</sub> )
1	Steam reforming	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	206,2
2	Partial oxidation	$\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \Leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	-35,7
3	Water-shift reaction	$\text{CO}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

A noter: La teneur en CO<sub>2</sub> du gaz à traiter étant plus élevée, la capture peut ici se faire à l'aide de solvants physiques



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

Cas particulier: IGCC (integrated gasification combined cycle)



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

---

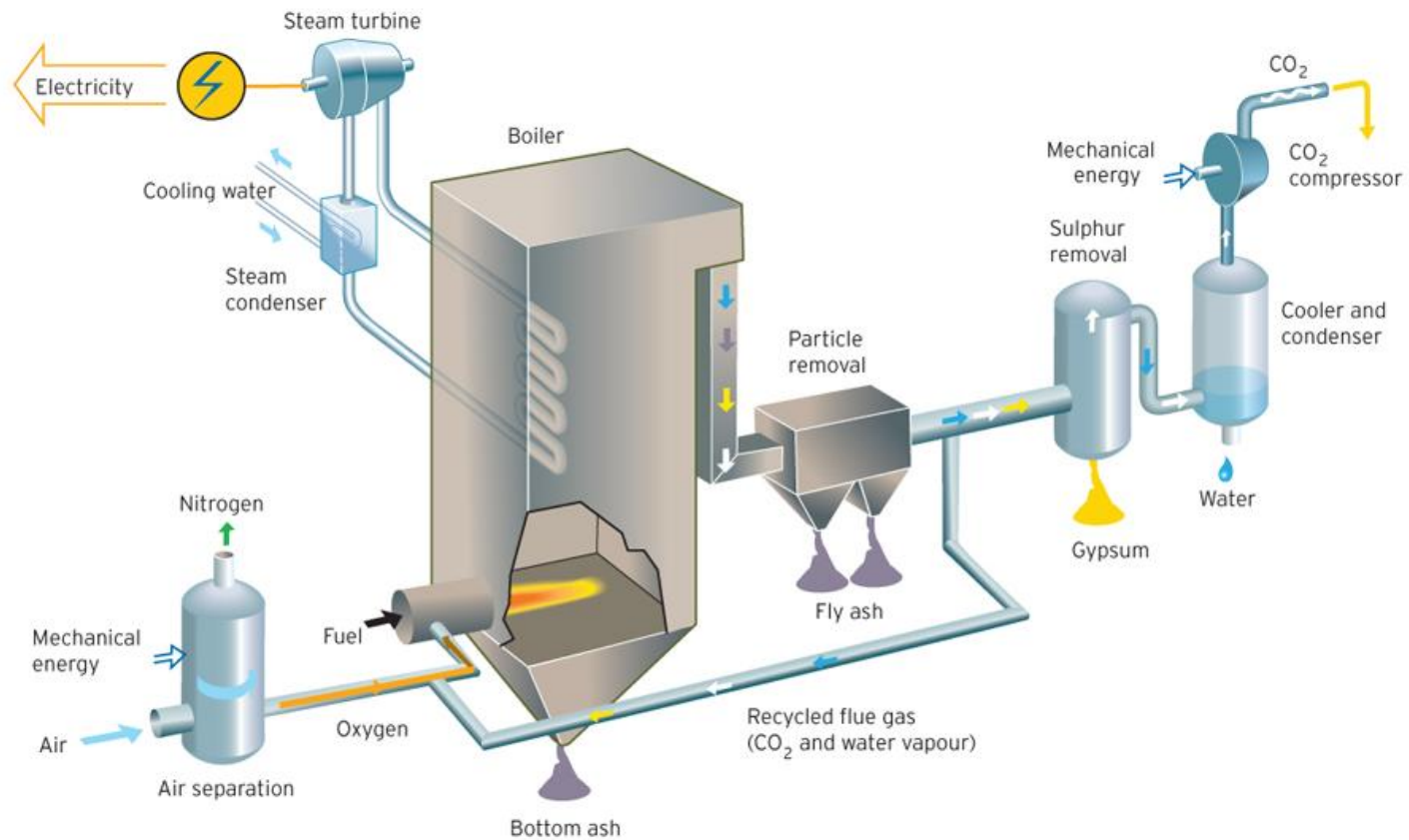
### Capture pré-combustion

- 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 CO<sub>2</sub>

### Oxy-combustion / Combustion Oxy-fuel



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

---

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
- ...



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

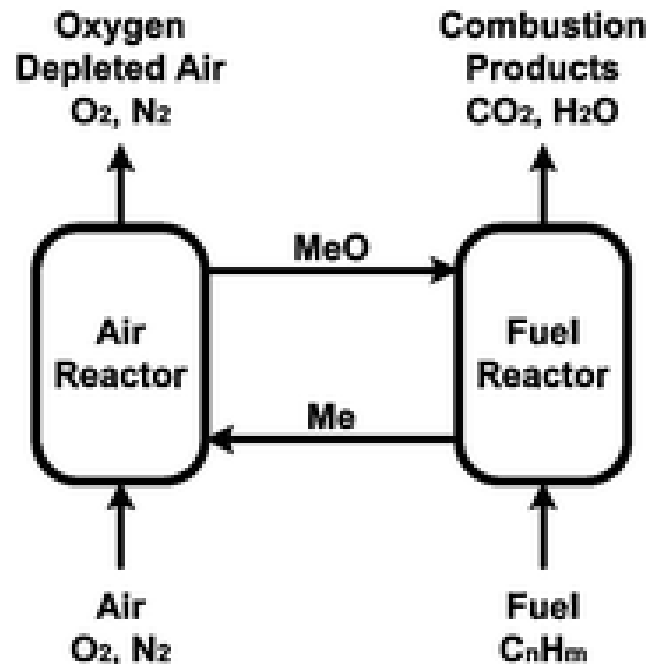




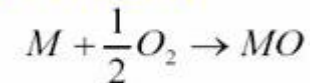
## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

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

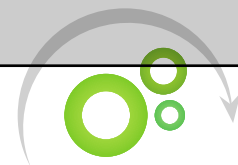


**M** : metal, **MO** : metal oxide

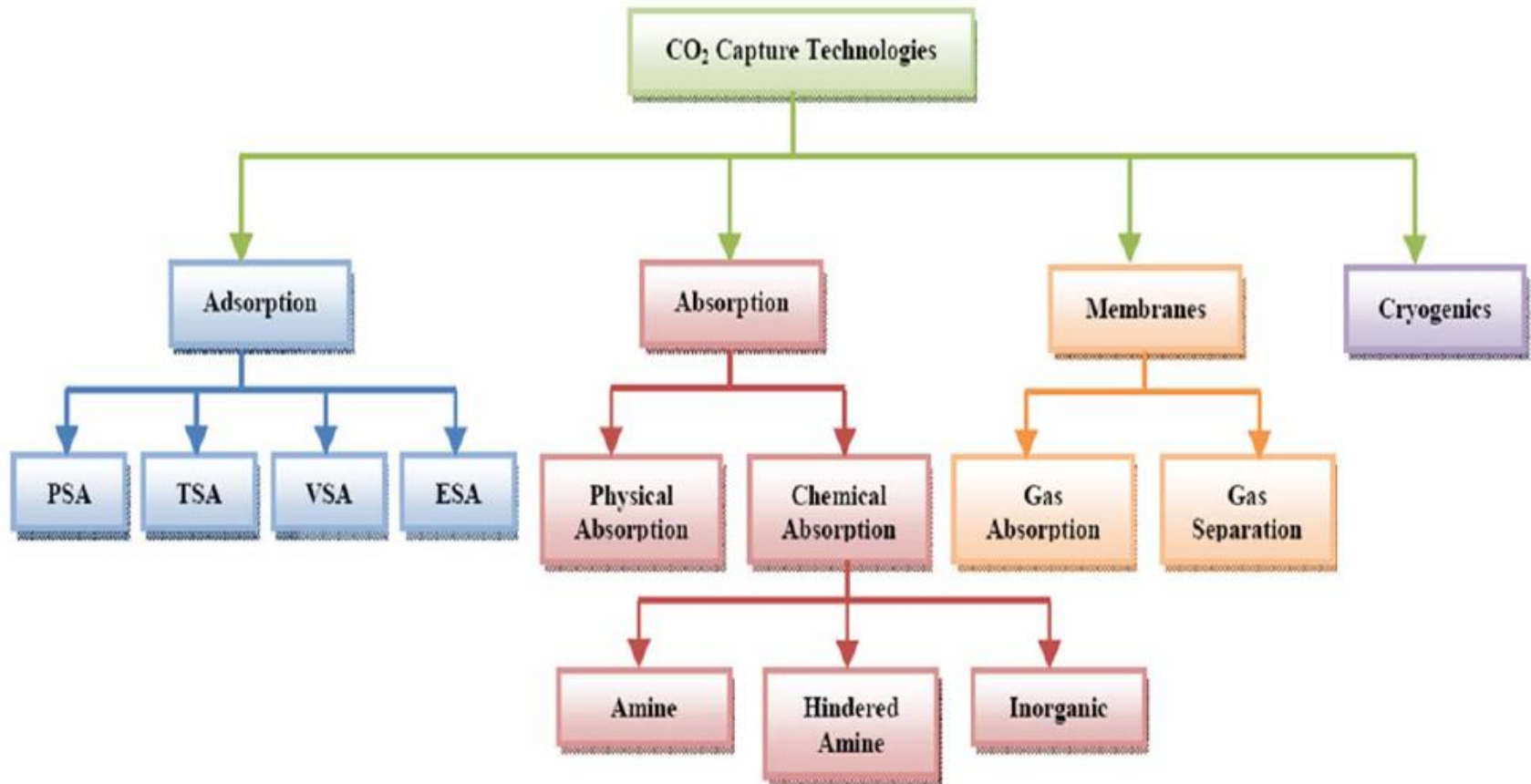


## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

Méthode	Avantages	Défis
Post-combustion	<ul style="list-style-type: none"><li>• Maturité</li><li>• Rétrofit (CCR)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coût énergétique</li><li>• Emissions secondaires</li></ul>
Pré-combustion	<ul style="list-style-type: none"><li>• H<sub>2</sub></li><li>• Coût intéressant</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pas de rétrofit</li><li>• NOx</li><li>• Turbines à gaz H<sub>2</sub></li></ul>
Oxycombustion	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coût intéressant</li><li>• Simplicité du procédé</li><li>• Qualité de la combustion</li><li>• 100% de capture</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Séparation de l'air</li><li>• Rétrofit difficile</li><li>• Milieu oxygène (matériaux)</li></ul>
Chemical looping	<ul style="list-style-type: none"><li>• Avantage énergétique</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Choix du métal (cinétique de réaction)</li><li>• Cendres</li><li>• Maturité</li></ul>
Autres techniques	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coûts réduits?</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Maturité</li></ul>



## 2. Capture du CO<sub>2</sub>



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



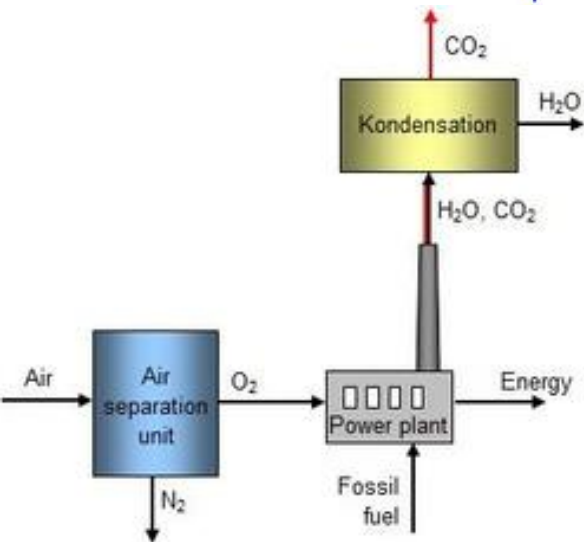
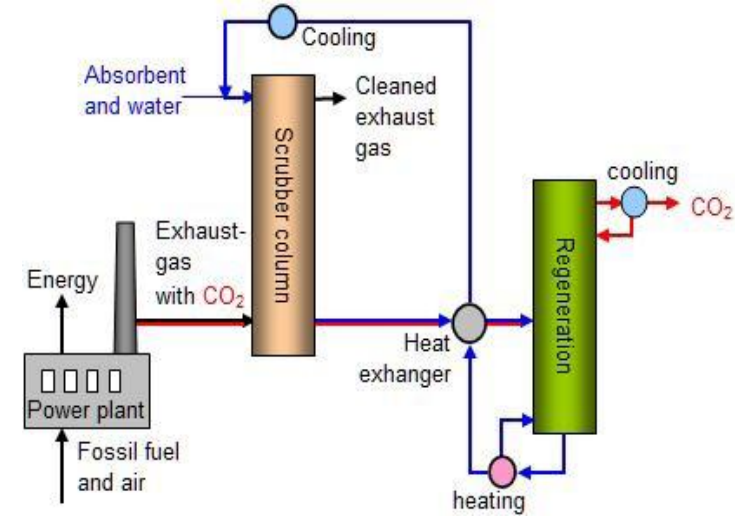
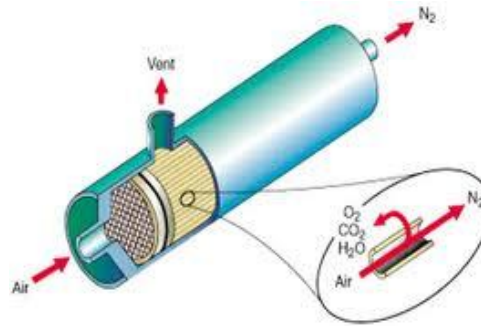
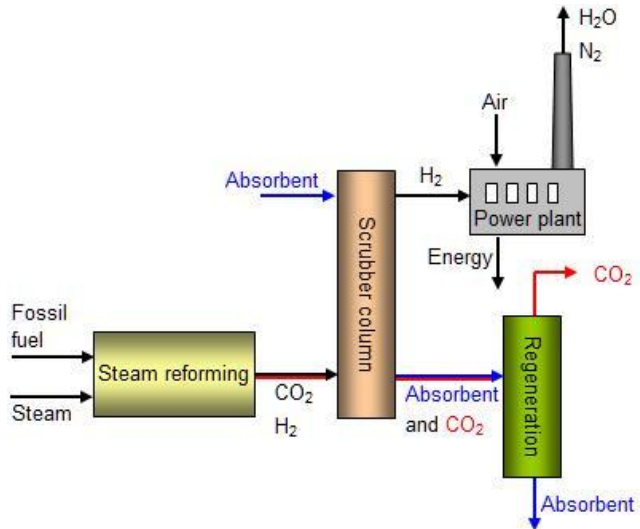
## 2. Capture du CO<sub>2</sub>

---



# 2. Capture du CO<sub>2</sub>

Quiz: quel type de capture?



Chilled Ammonia Process for CO<sub>2</sub> capture

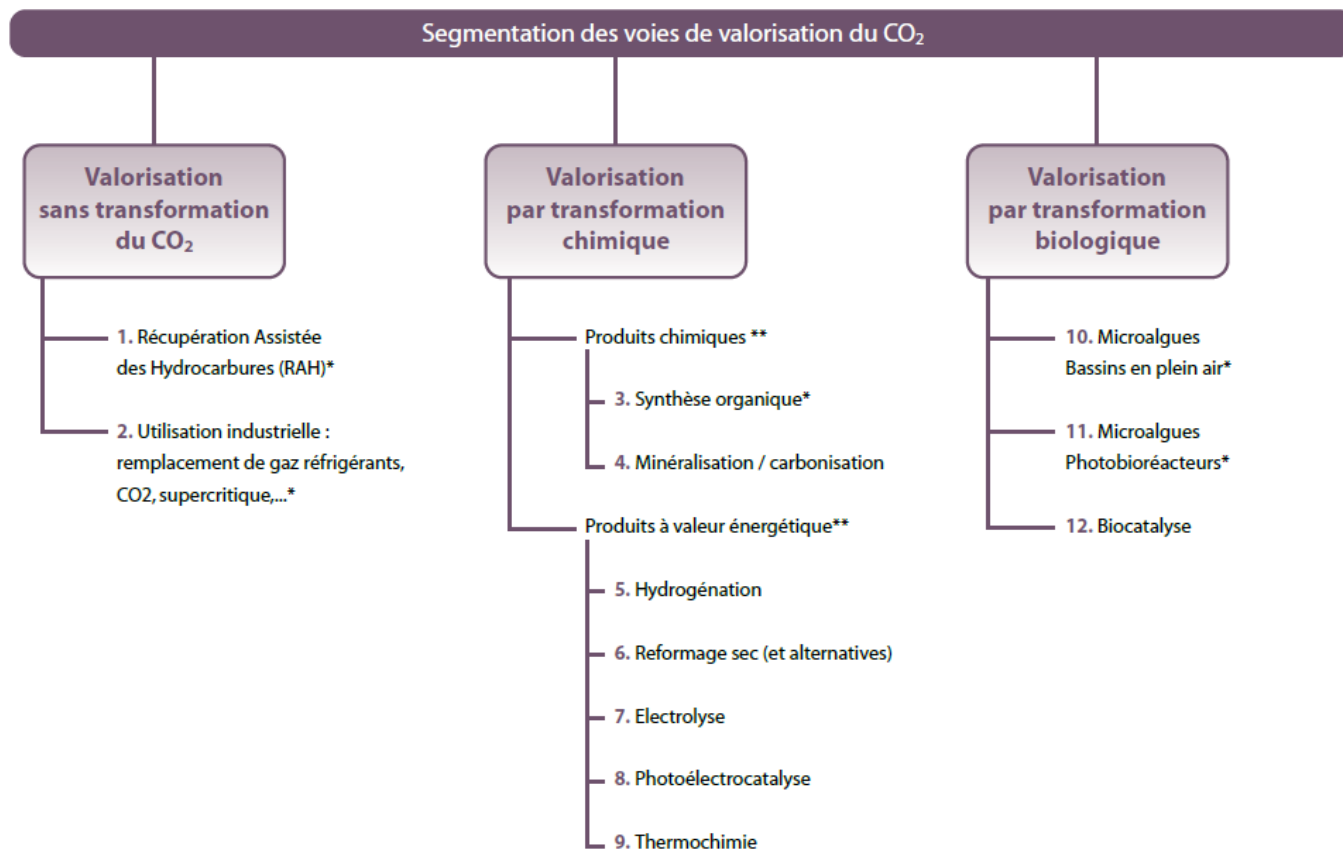


### 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>



# 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

Le CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>

Panorama des voies de valorisation du CO<sub>2</sub>, Rapport ADEME, France, 2010

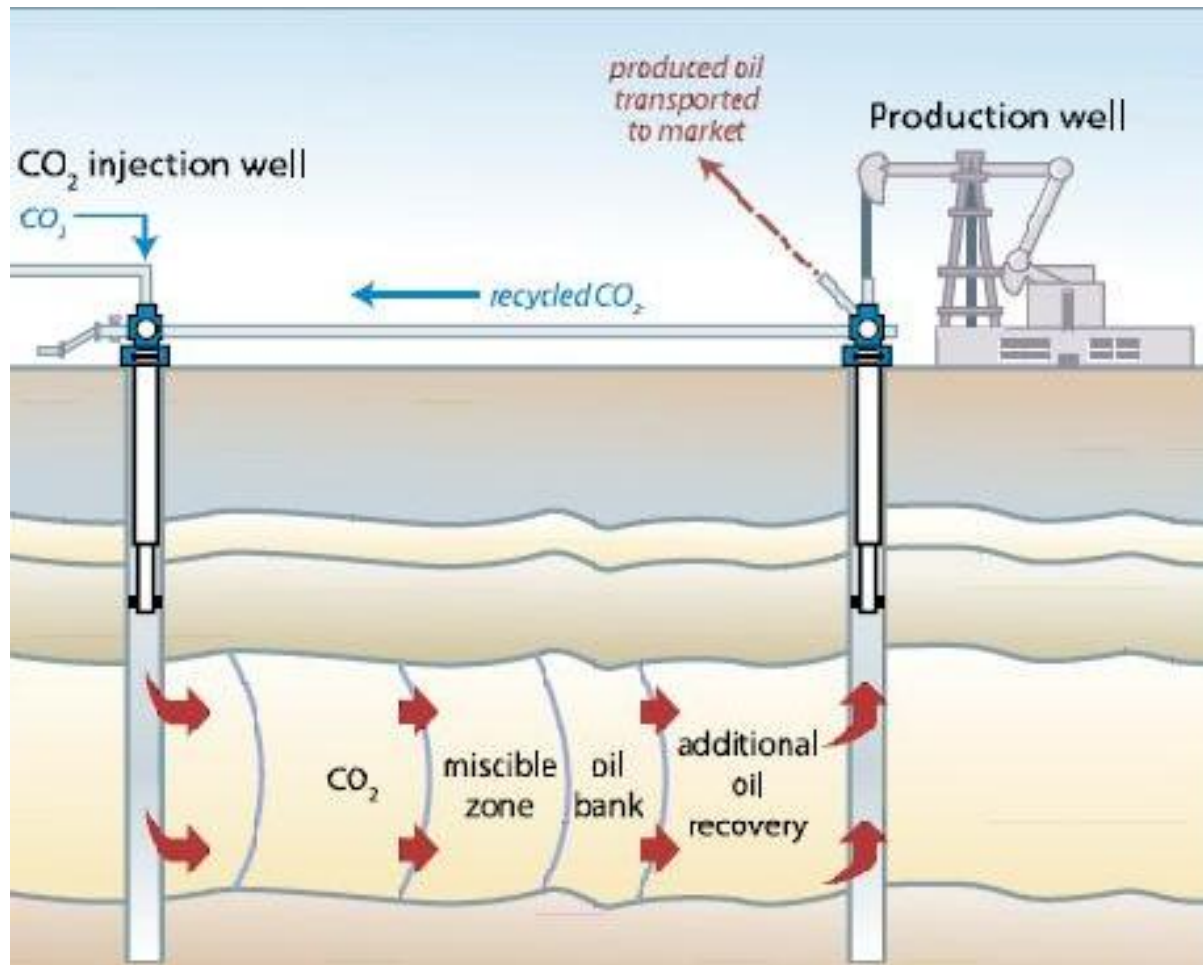
	Déjà industrialisé			Court-terme		Moyen-terme		Long-terme				
	RAH	Utilisation industrielle	Synth. Org. (polycarb.)	Hydrogénéation	Algues-Bassins	Reformage sec	Algues-Réacteurs	Minéralisation	Thermo chimie	Electrolyse	Photo Electro catalyse	Biocatalyse
Potentiel d'émergence	4	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1
Perspectives 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 <sub>2</sub>	2	2	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4
Durée de séquestration du CO <sub>2</sub>	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 CO<sub>2</sub>

#### Récupération assistée d'hydrocarbures



### 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

---

Récupération assistée d'hydrocarbures:

- 40 Mtonnes de CO<sub>2</sub>/an (2008)
- Consommation énergétique pour la compression et l'injection du CO<sub>2</sub>

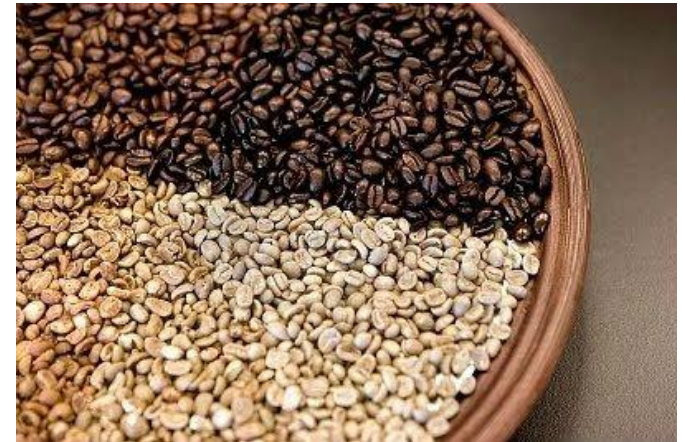
	RAH
Potentiel d'émergence	4
Perspectives économiques	4
Consommation énergétique externe	3
Volume potentiel de CO <sub>2</sub>	2
Durée de séquestration du CO <sub>2</sub>	4
Autres impacts environnementaux	4



### 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

---

Utilisations industrielles du CO<sub>2</sub>



### 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

---

Utilisations industrielles du CO<sub>2</sub>:

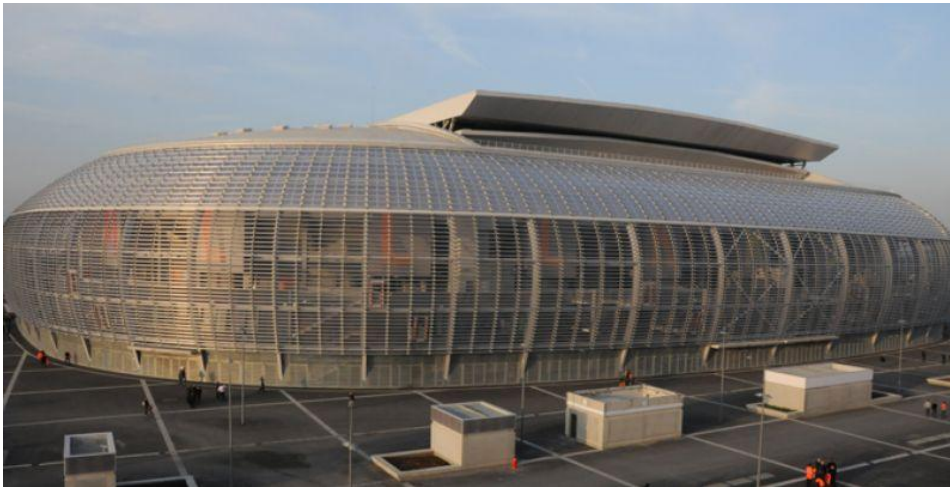
- Haut niveau de pureté exigé (99,99%)
- Potentiel de croissance de cette filière moins important (20 Mtonnes de CO<sub>2</sub>/an)
- Le CO<sub>2</sub> n'est pas stocké durablement

	Utilisation industrielle
Potentiel d'émergence	4
Perspectives économiques	4
Consommation énergétique externe	3
Volume potentiel de CO <sub>2</sub>	2
Durée de séquestration du CO <sub>2</sub>	1,5
Autres impacts environnementaux	4



# 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

Synthèse organique:



### 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

---

Synthèse organique:

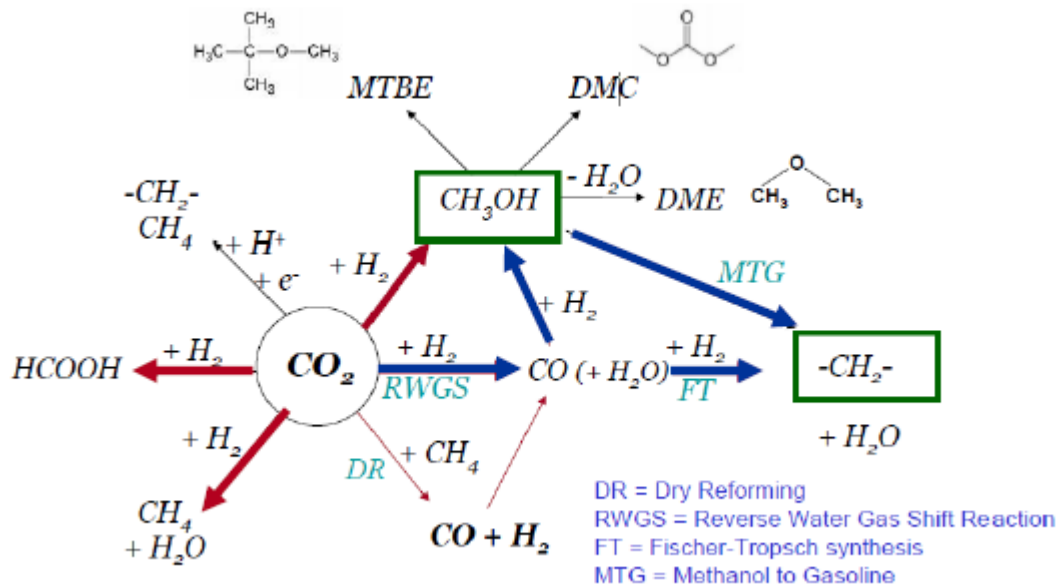
- Déjà largement utilisée pour la production d'urée (100Mtonnes CO<sub>2</sub>/an)
- Potentiel présent, mais limité: actuellement, seulement 6-7% du pétrole est utilisé pour la pétrochimie
- Energie nécessaire aux synthèses constitue un frein

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



### 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

Autres cas où le CO<sub>2</sub> est revalorisé chimiquement:



Mais...

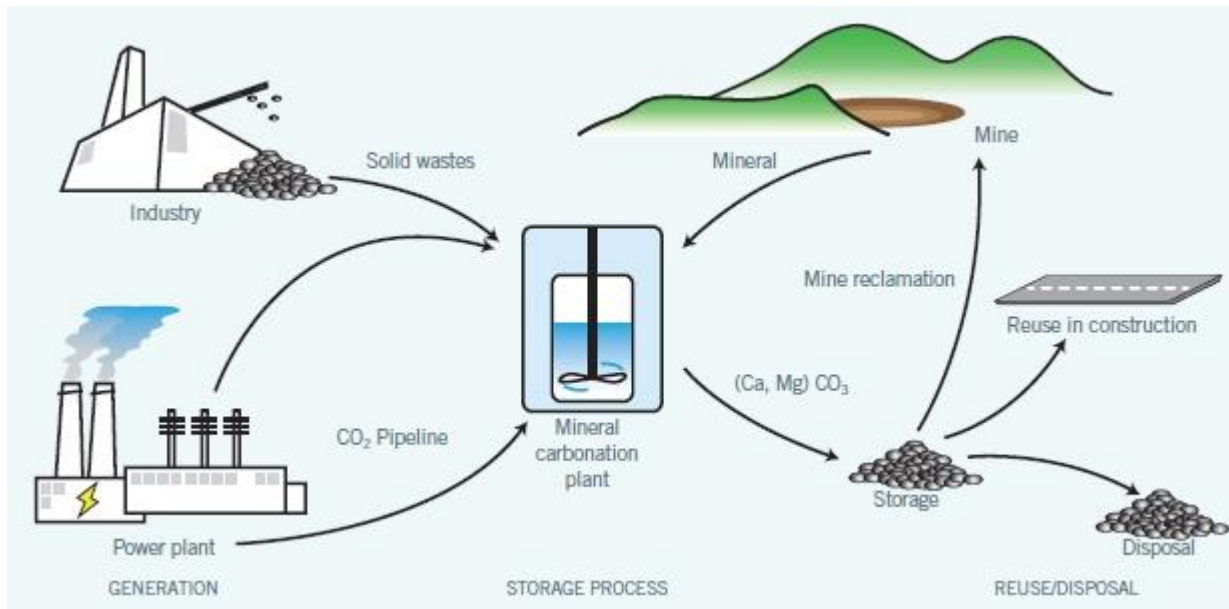
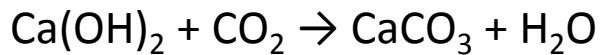
- de toutes ces molécules, c'est le CO<sub>2</sub> qui contient le moins d'énergie
- source d'énergie renouvelable nécessaire pour la viabilité de tels procédés





### 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

Minéralisation du CO<sub>2</sub>



- 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 CO<sub>2</sub>

Culture de microalgues

=> Photosynthèse



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

Limitation : surface nécessaire pour les cultures (12t CO<sub>2</sub>/an pour Niederaussem)

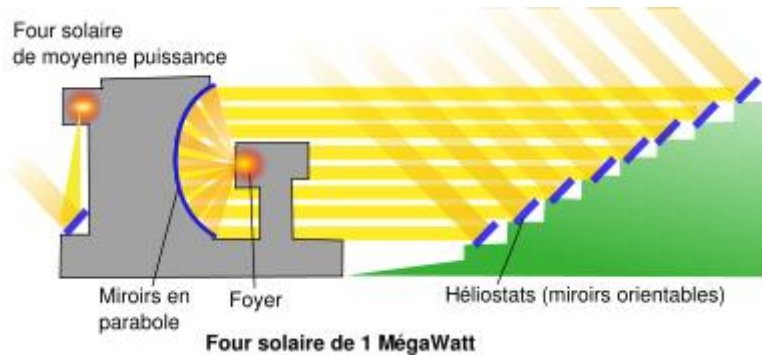




## 3. Valorisation du CO<sub>2</sub>

Autres voies en exploration:

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

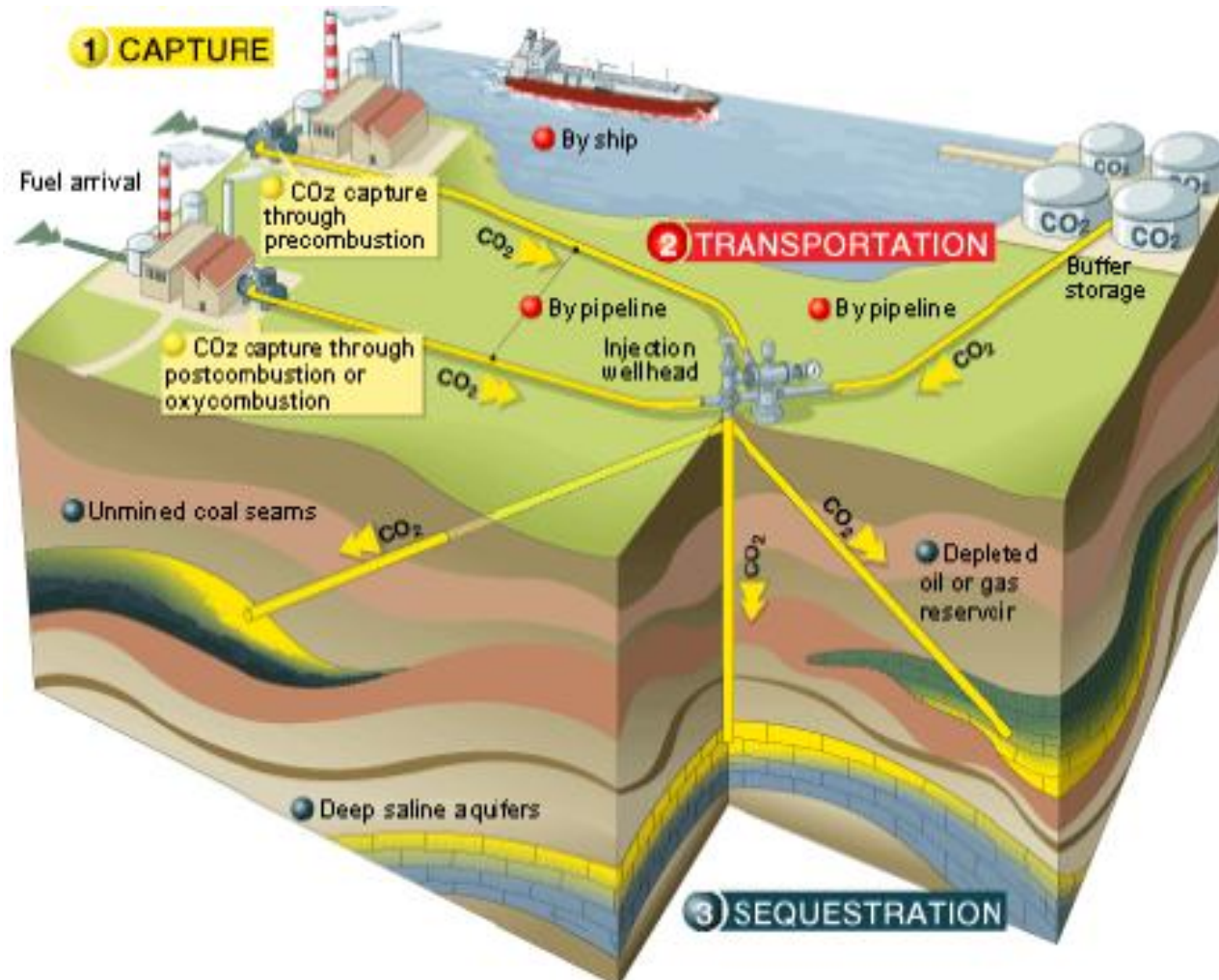


## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

Capture – Transport – Stockage





## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

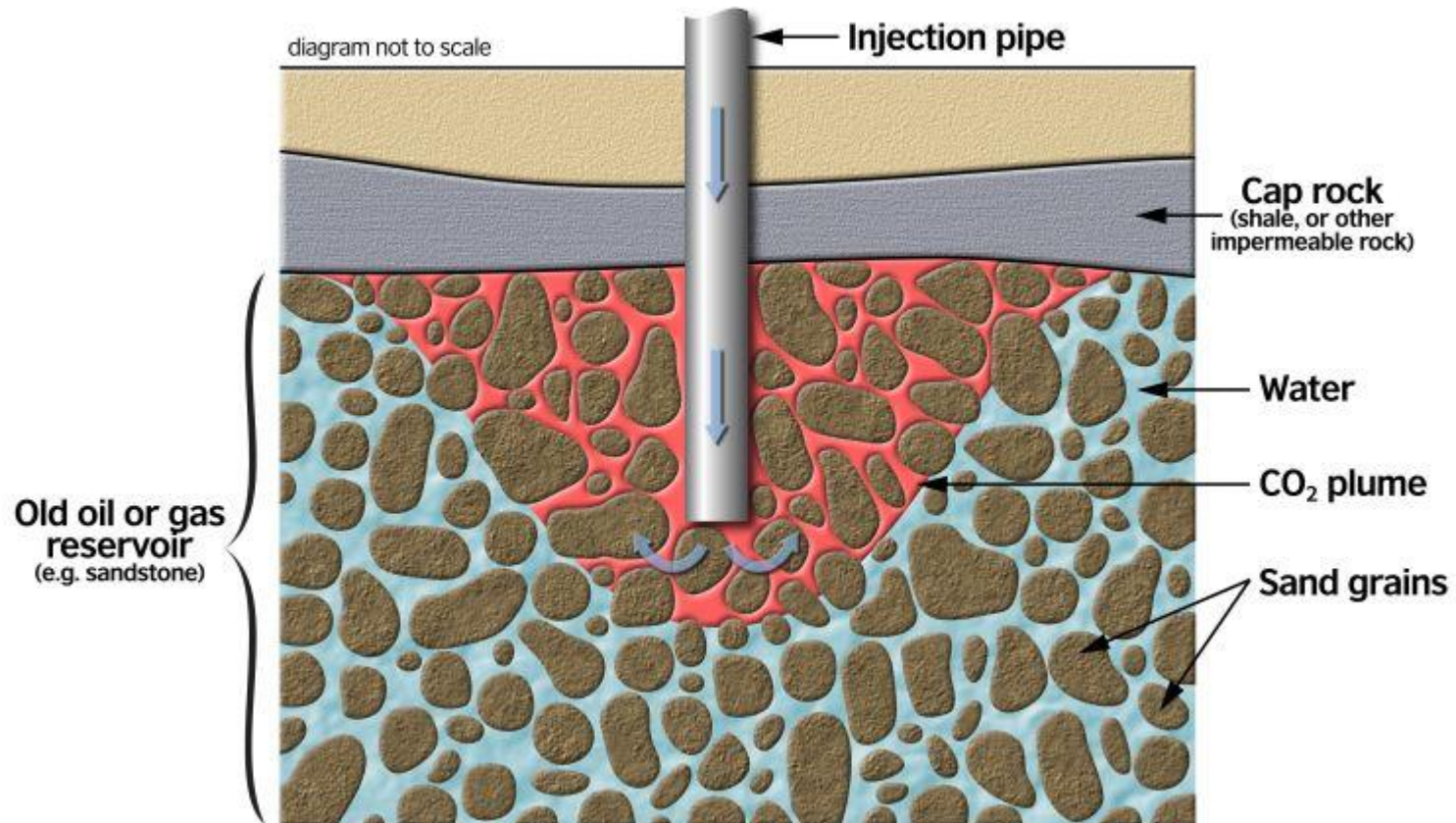
---

### Transport du CO<sub>2</sub>

- Par bateau:
  - 100 000 tonnes transportées/an (~1000t CO<sub>2</sub>/bateau)
  - Technologie similaire au LPG, mais à améliorer
  - CO<sub>2</sub> liquéfié (-30°C, 15 bar)
- Par pipeline:
  - CO<sub>2</sub> supercritique (100bar)
  - 3000 km de pipeline aux USA depuis les années 1970 pour la RAH
  - Attention à la formation d'hydrates

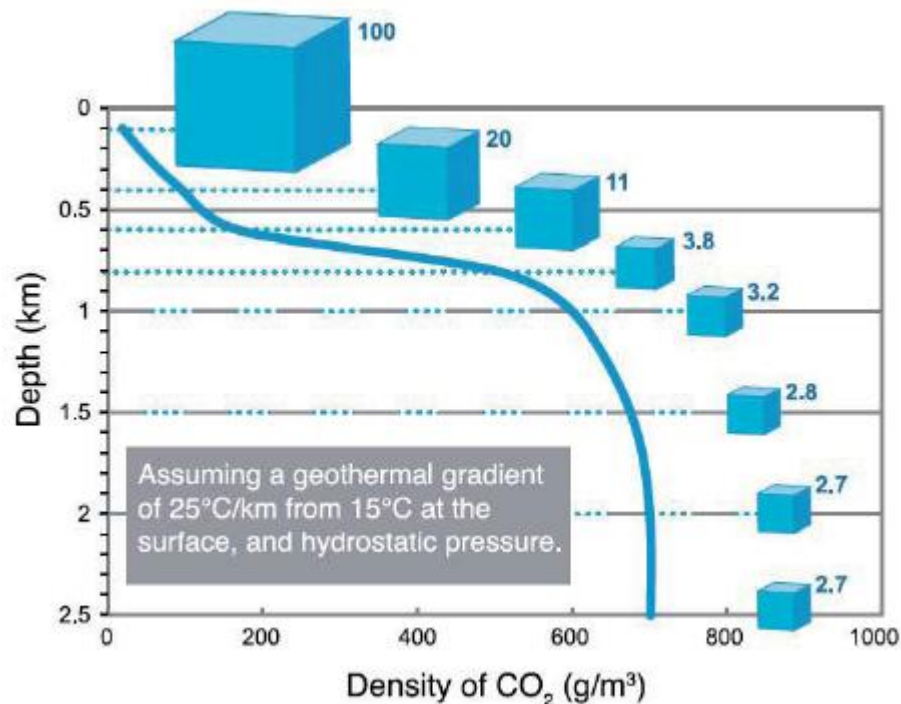


## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

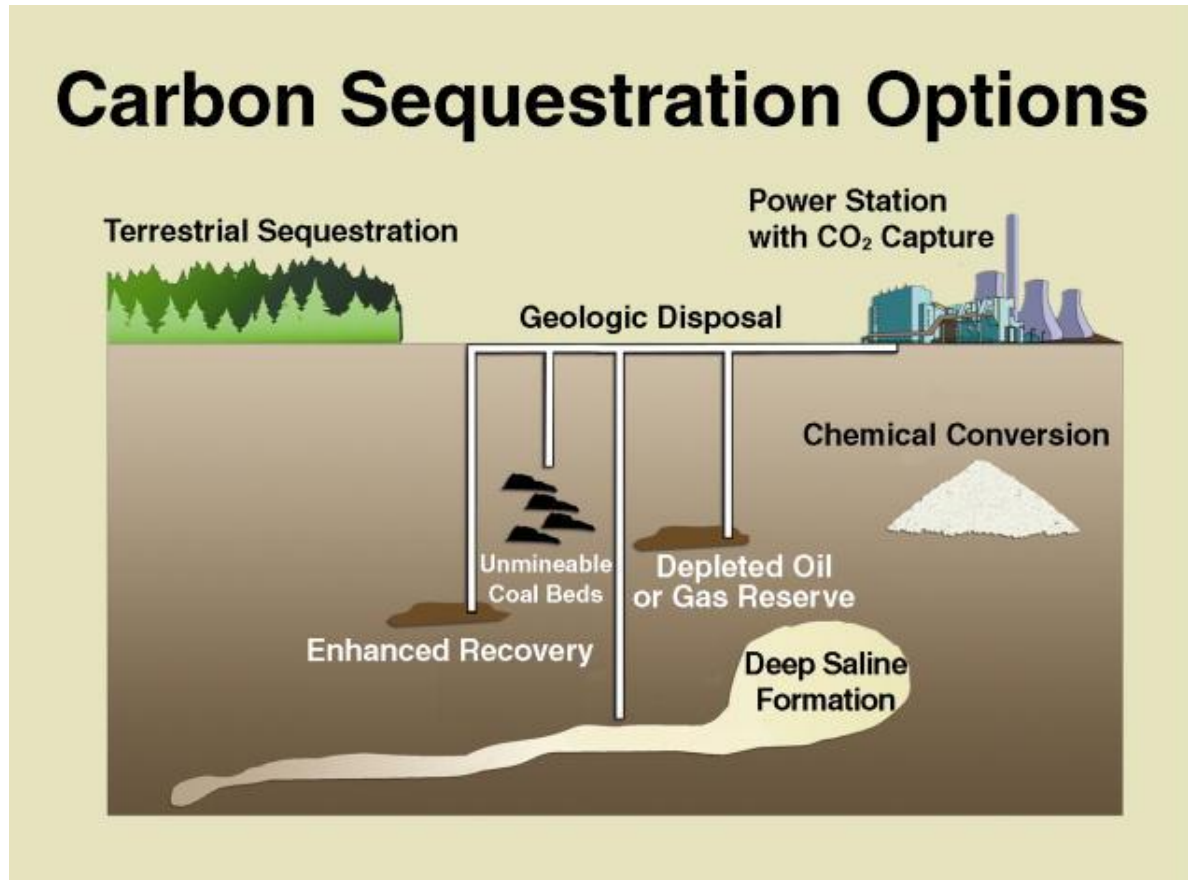
Effet de la profondeur sur la densité du CO<sub>2</sub>





## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

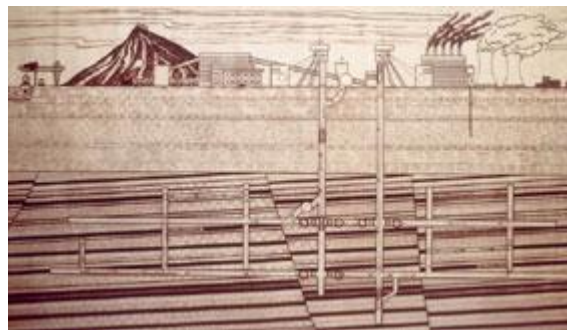
Différentes méthodes de stockage du CO<sub>2</sub>



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

---

- 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

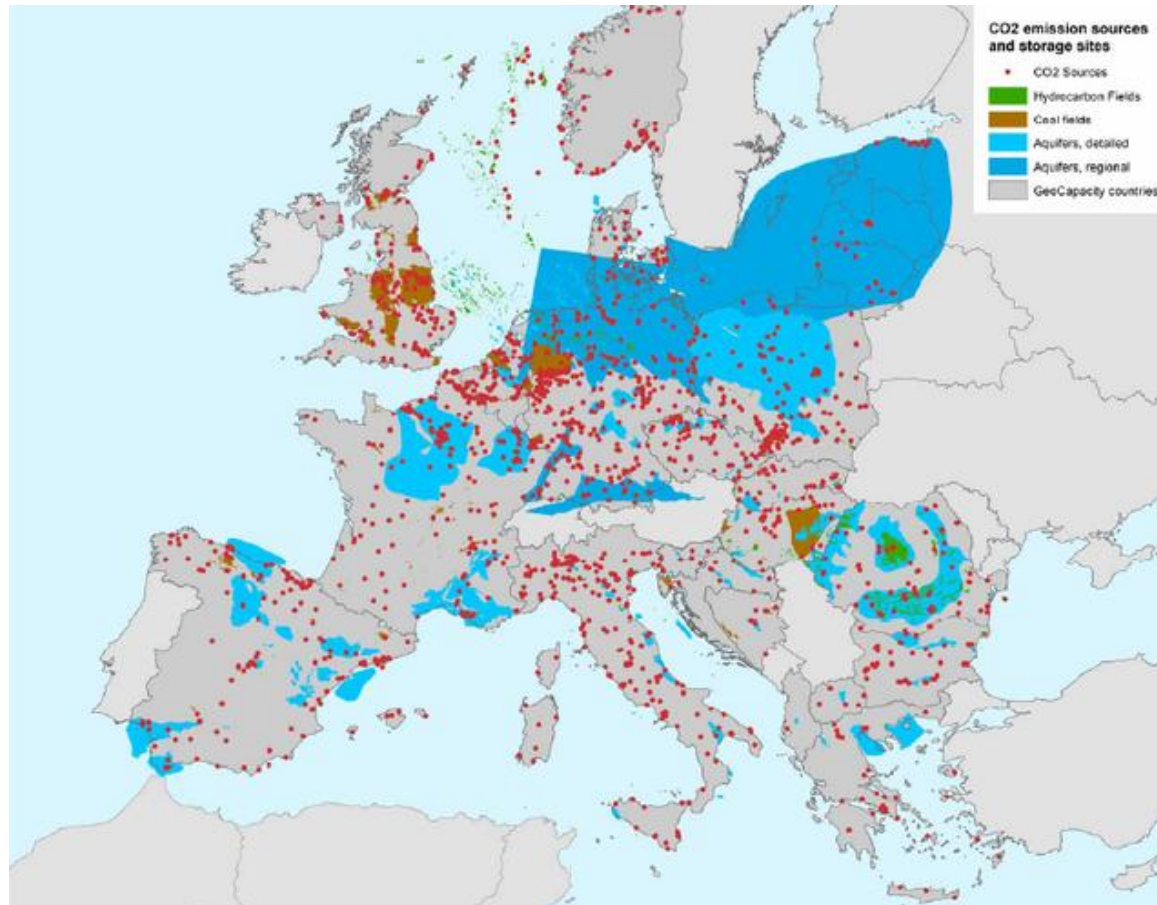


Ancien charbonnage d'Eisden



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

### Potentiel de stockage en Europe

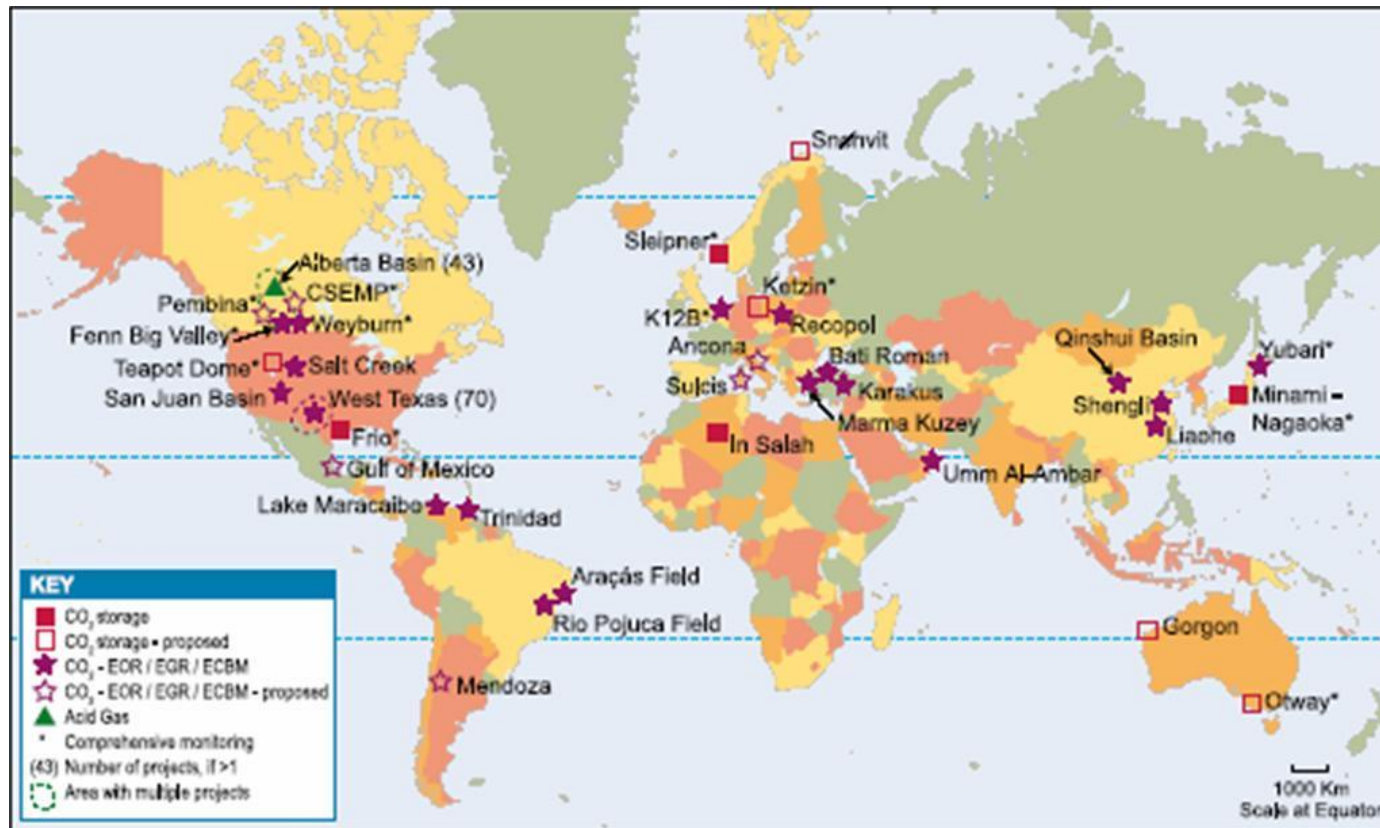


Sleipner : 1Mtonne/an depuis 1996



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

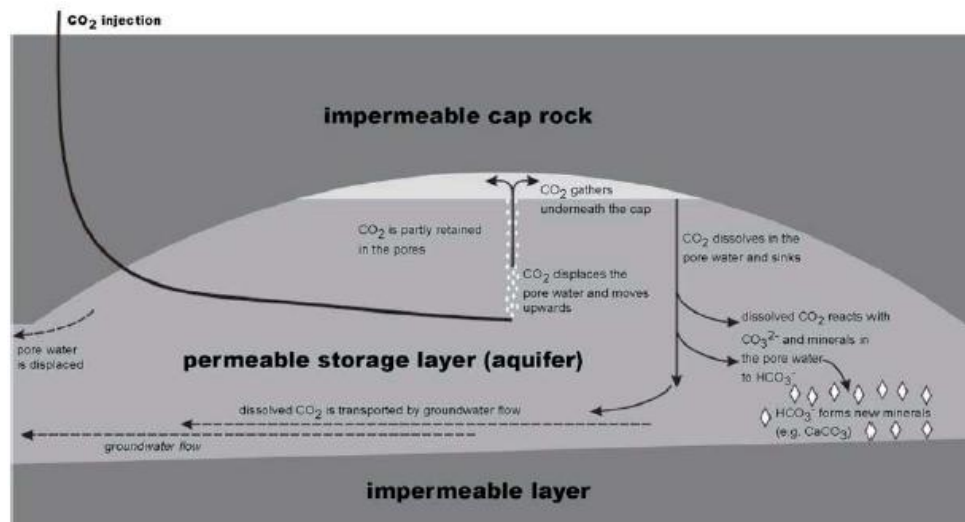
Et dans le monde...



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

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 CO<sub>2</sub>



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

---

Paramètres pour le choix du lieu de stockage:

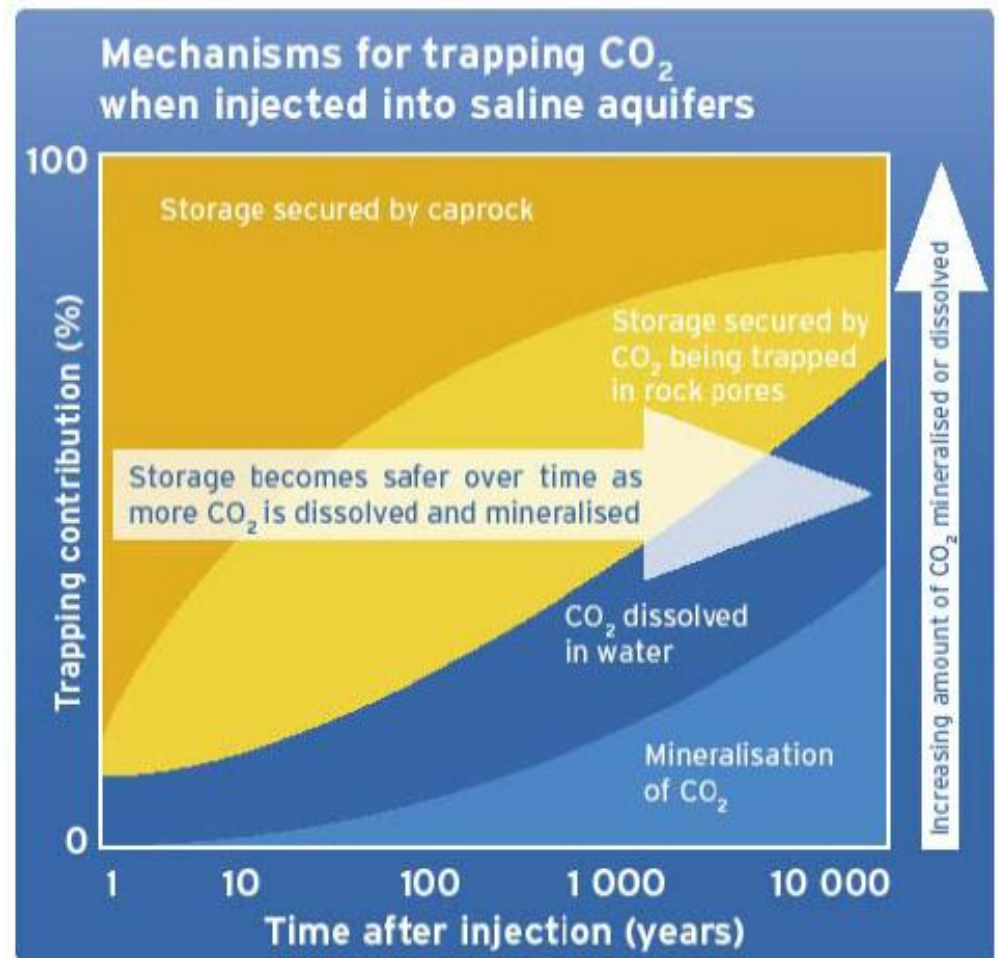
- Profondeur supérieure à 800m (CO<sub>2</sub> supercritique)
- Profondeur inférieure à 1500m (pour une perméabilité et porosité suffisantes)
- Capacité minimale: 100Mtonnes de CO<sub>2</sub>
- Proximité des lieux d'émissions de CO<sub>2</sub>





## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

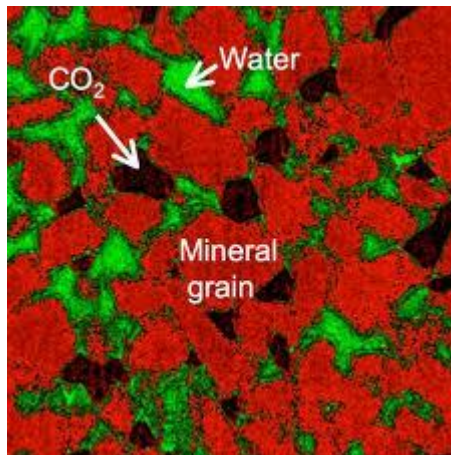
- Au début, le CO<sub>2</sub> diffuse jusqu'aux parois et est piégé par le couvercle
- Puis le CO<sub>2</sub> est de plus en plus piégé dans les porosités
- Enfin il est dissous et minéralisé
- Échelle de temps très longue!



## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

---

### Minéralisation in-situ

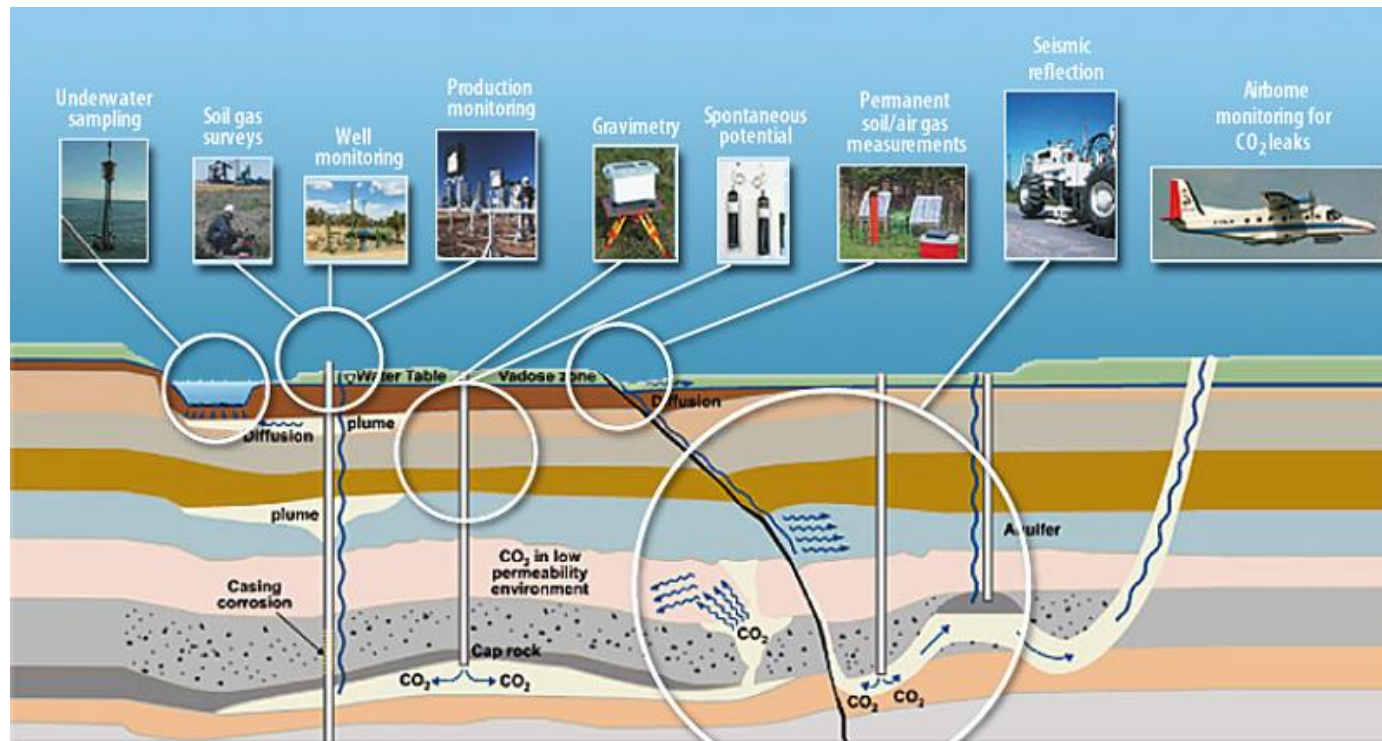




## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

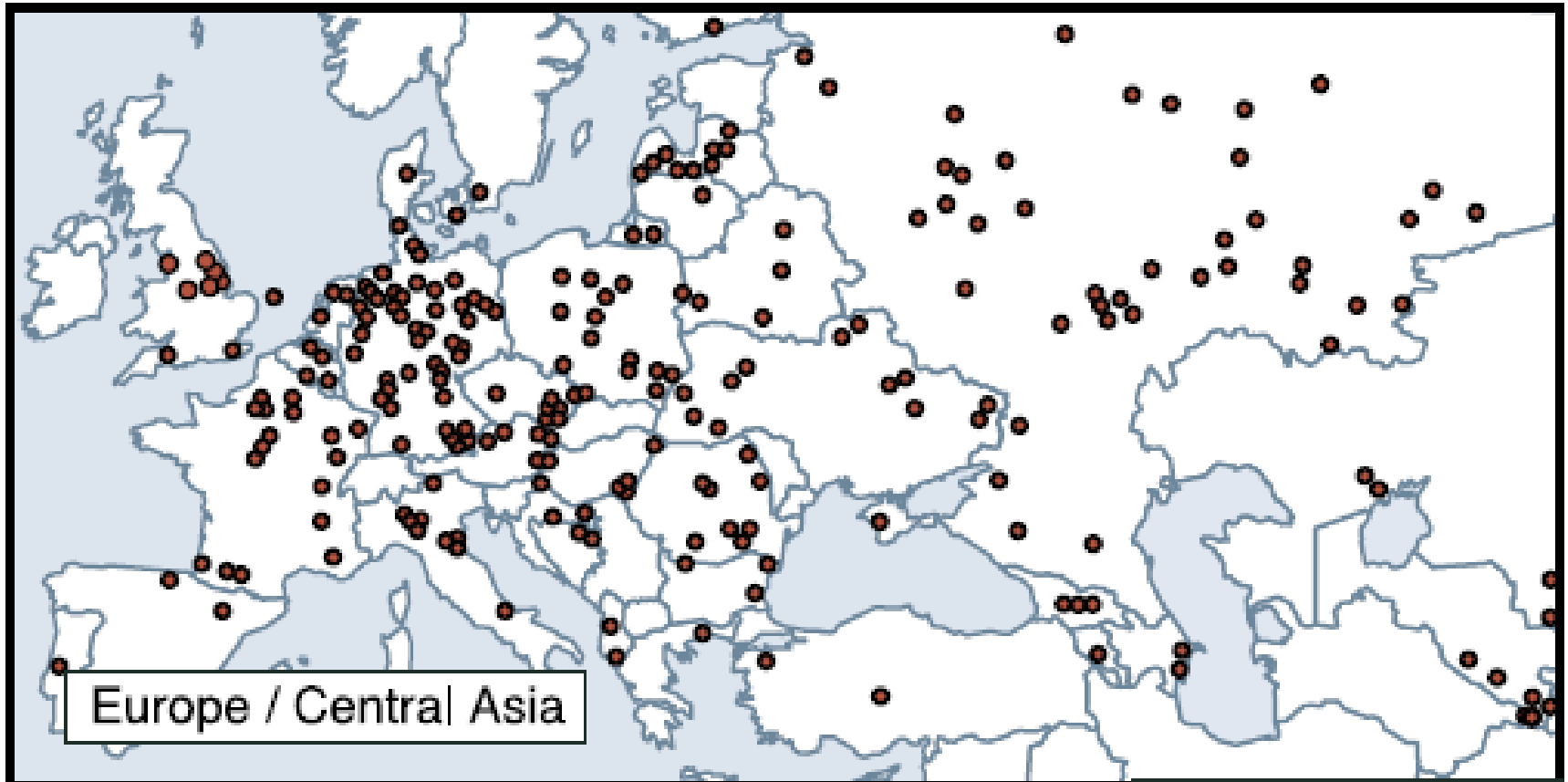
Monitoring des sites de stockage nécessaire

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



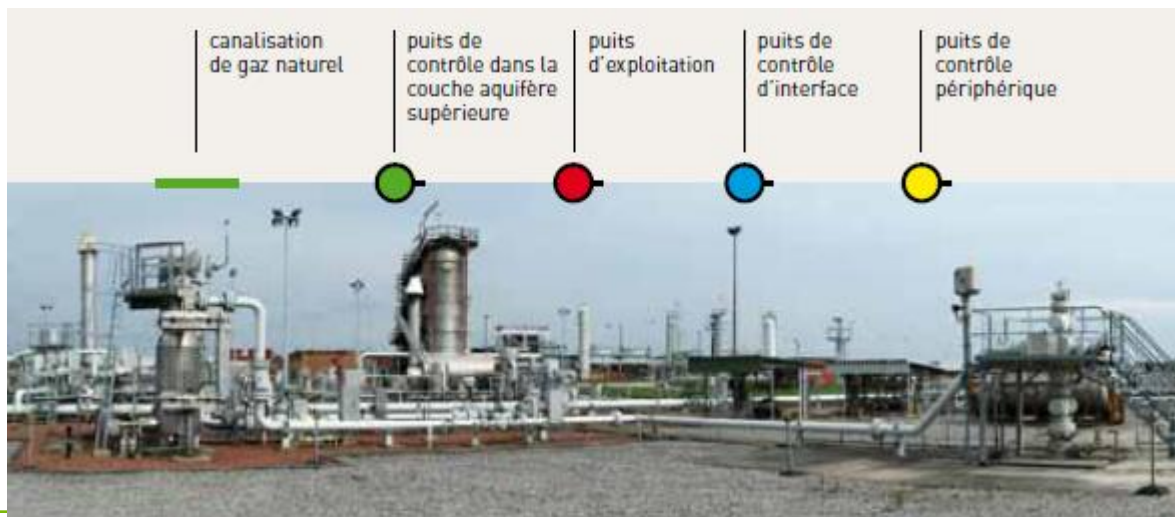
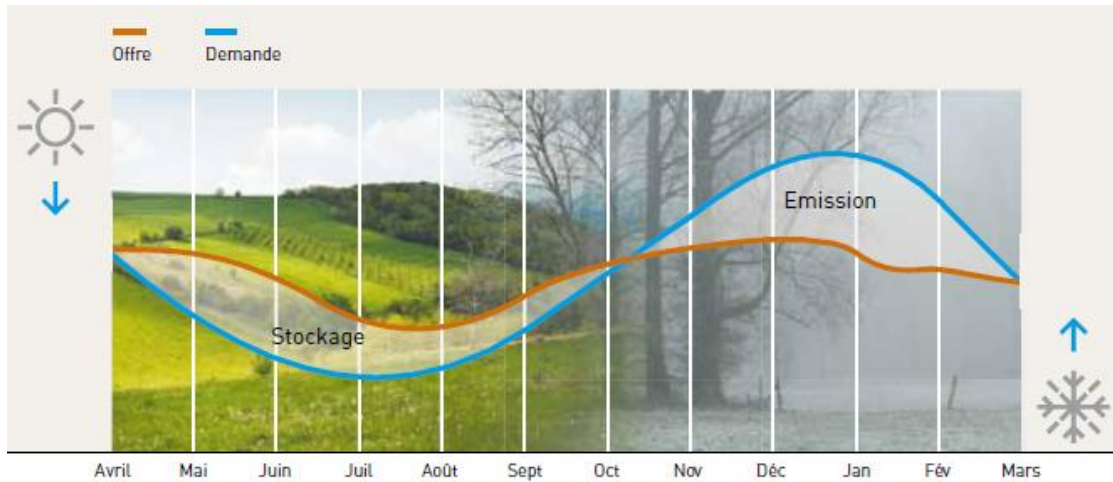
## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

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



# 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

## Site de stockage saisonnier de Loenhout (Anvers)

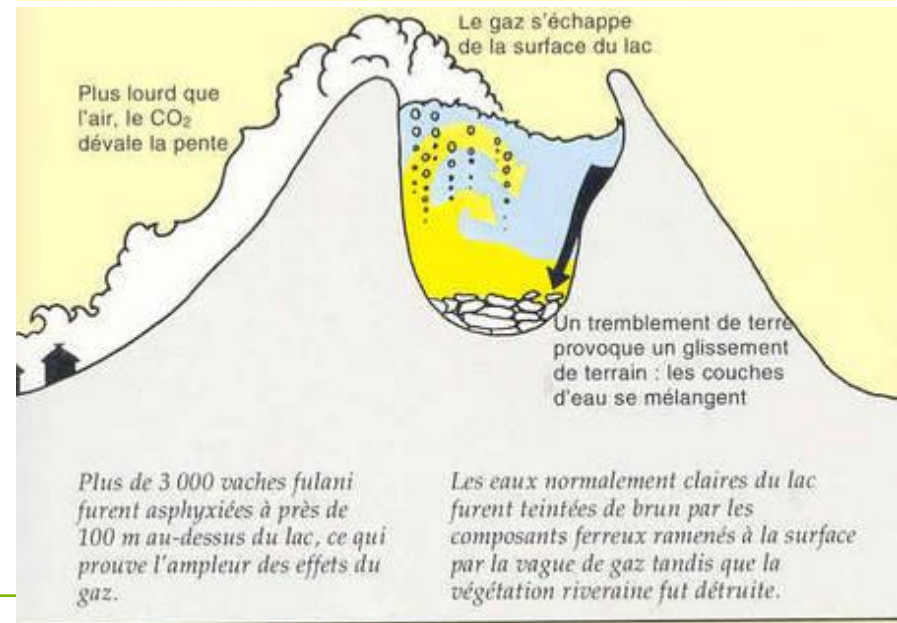
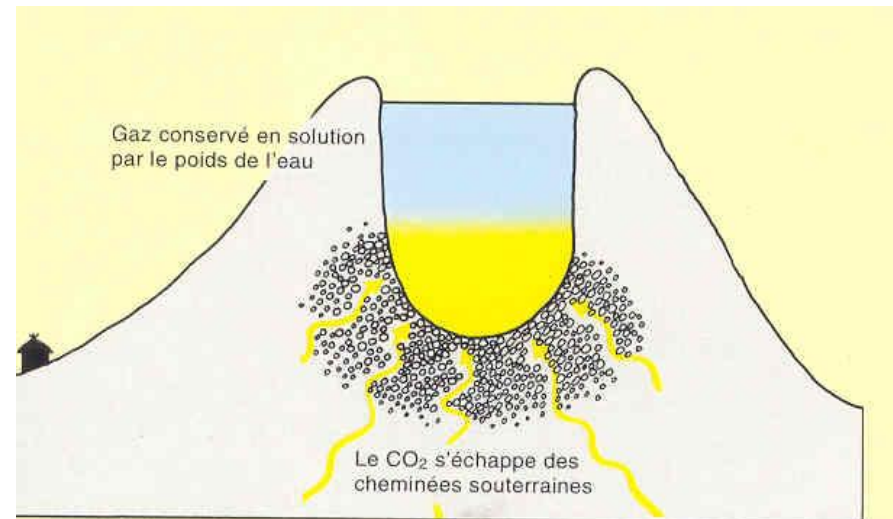


## 4. Stockage du CO<sub>2</sub>

Cas du lac Nyos (Cameroun, 1986):

- CO<sub>2</sub> d'origine volcanique
- Près de 1700 victimes en une nuit!

=> Gestion du risque!



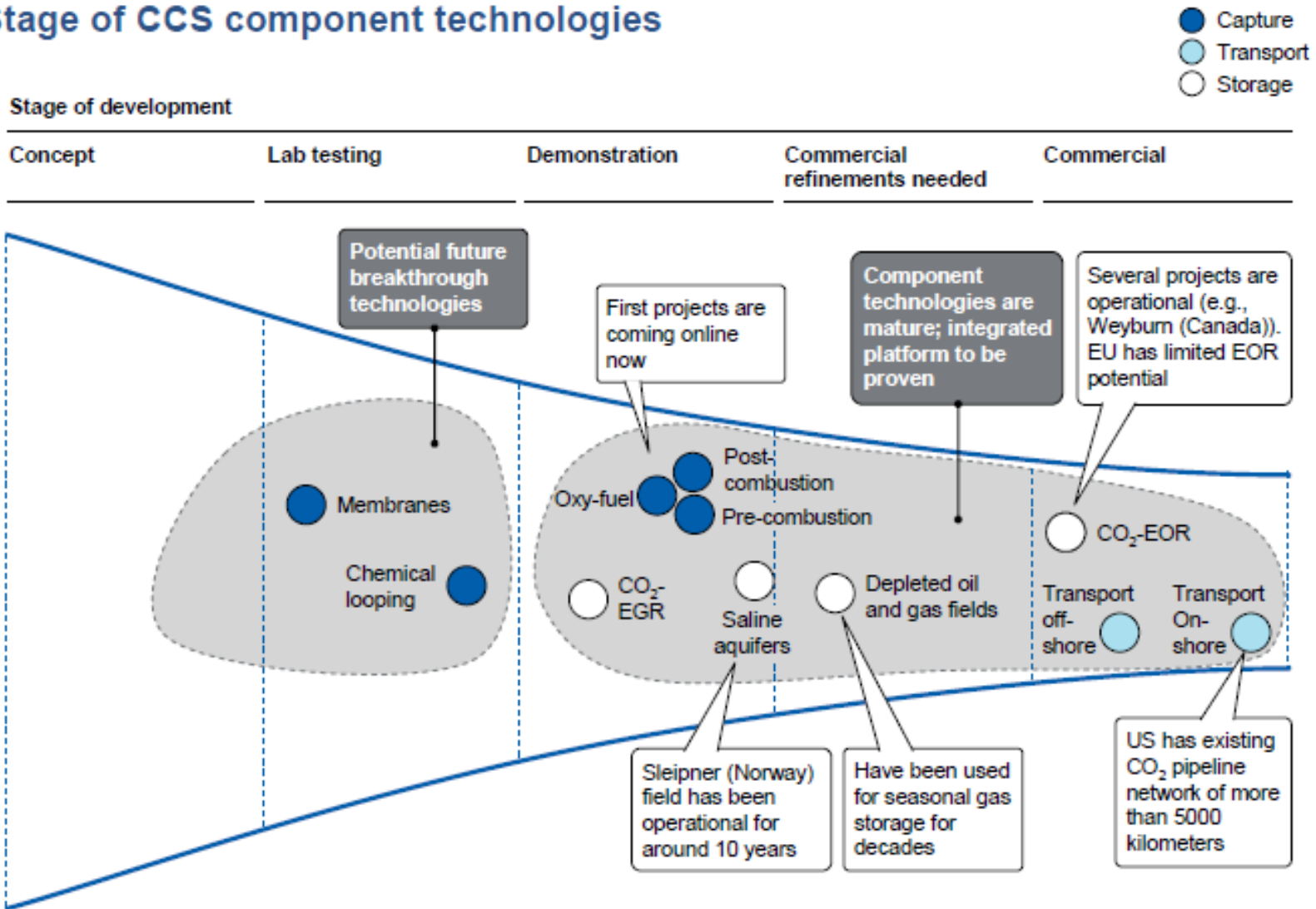
## 5. Défis et conclusions





# 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 CO<sub>2</sub> émises quotidiennement!

=> ~ 8Mtonnes CO<sub>2</sub> sur le temps de cette présentation

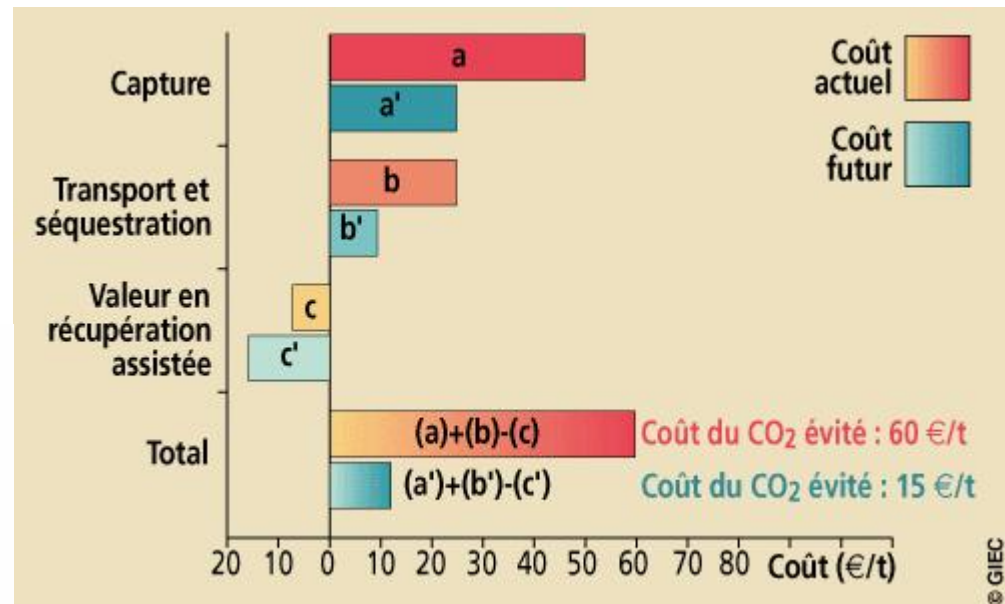
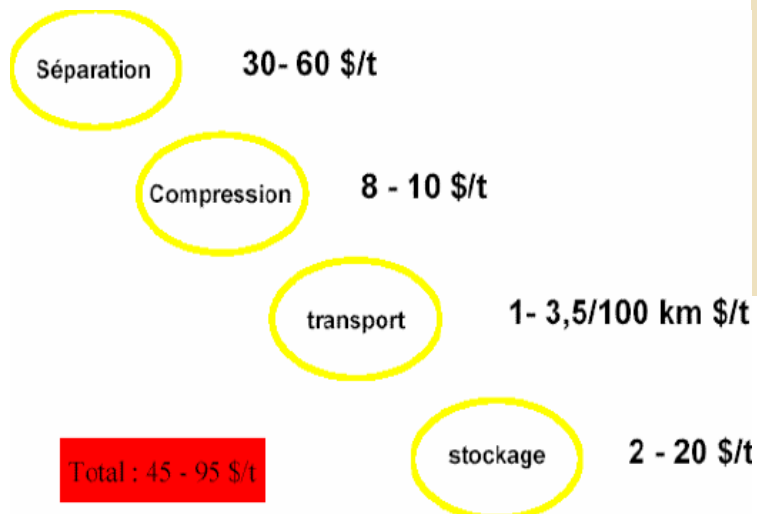


## 5. Défis économiques

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

- Coût actuel :

50-60\$/tonne CO<sub>2</sub>  
=> 20\$/tonne CO<sub>2</sub>







## 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 CO<sub>2</sub>
- 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 CO<sub>2</sub> 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 <sup>2</sup>
Mesures incitatives et réglementaires fortes	Vision 3 : forte mutualisation et stockage géologique du CO <sub>2</sub> 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**

