

CCUS ou le rôle clé du CO₂ dans la transition énergétique

Département de Chemical Engineering

Grégoire LEONARD, Chargé de cours

Sommaire

1. Contexte
2. Capture du CO₂
3. Stockage
4. Valorisation
5. Perspectives

1. Contexte

Développement durable

- Pollution locale
- Acidification des océans
- Perte de biodiversité
- Diminution des ressources
- Enjeux géopolitiques
- ...

Matériaux + Energie

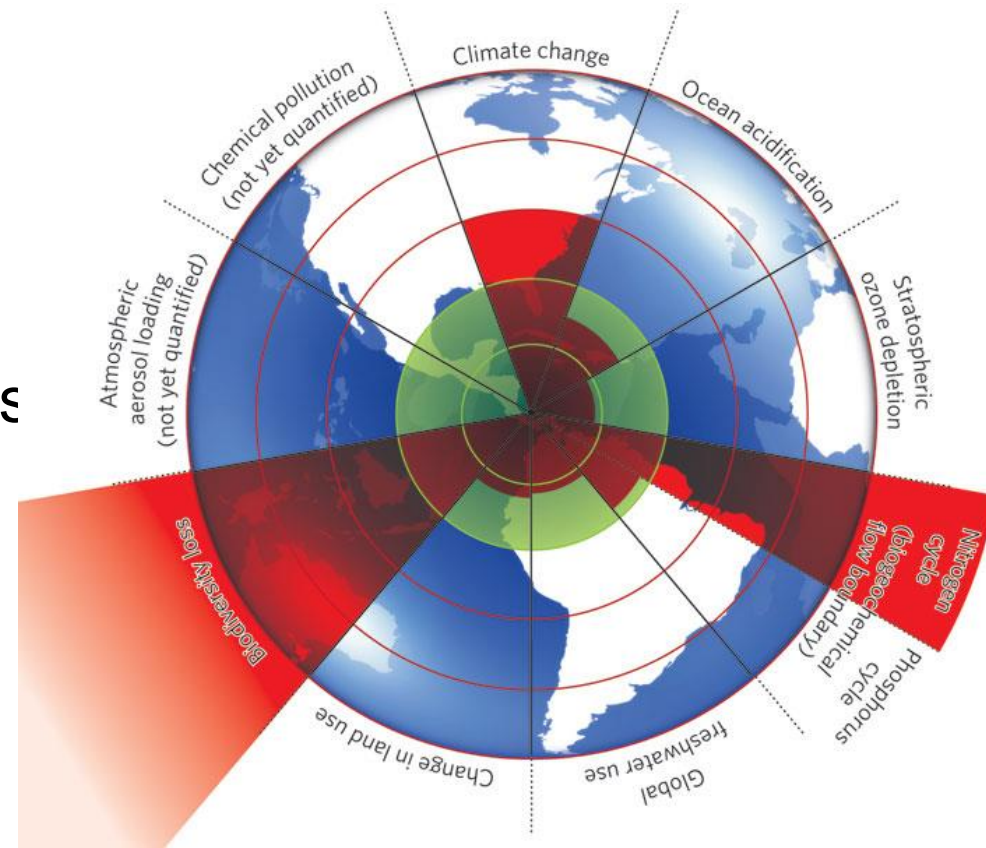


Figure 1 | Beyond the boundary. The inner green shading represents the proposed safe operating space for nine planetary systems. The red wedges represent an estimate of the current position for each variable. The boundaries in three systems (rate of biodiversity loss, climate change and human interference with the nitrogen cycle), have already been exceeded.

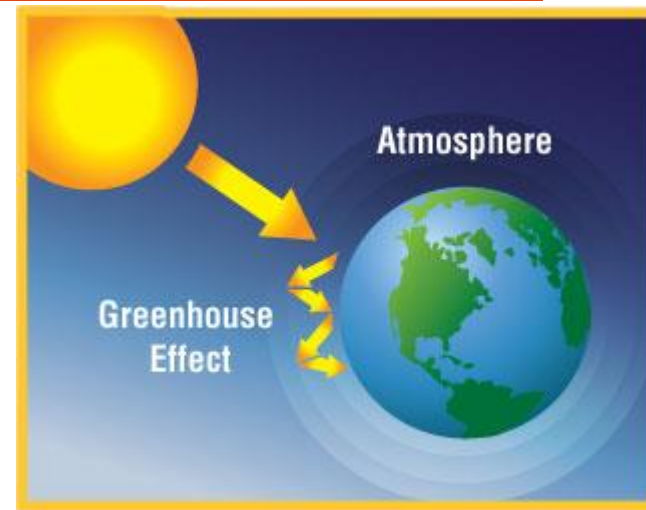
1. Contexte

Transition énergétique

- Gaz à effet de serre d'origine anthropique:

- Surtout (~2/3) du CO₂

- 40 GtCO_{2,eq} pour rester sous les 2°C
- 49 GtCO_{2,eq} en 2010
- 55 GtCO_{2,eq} annoncé pour 2030 à la COP 21



The Conference of the Parties [...] notes that much greater emission reduction efforts will be required than those associated with the intended nationally determined contributions [...]

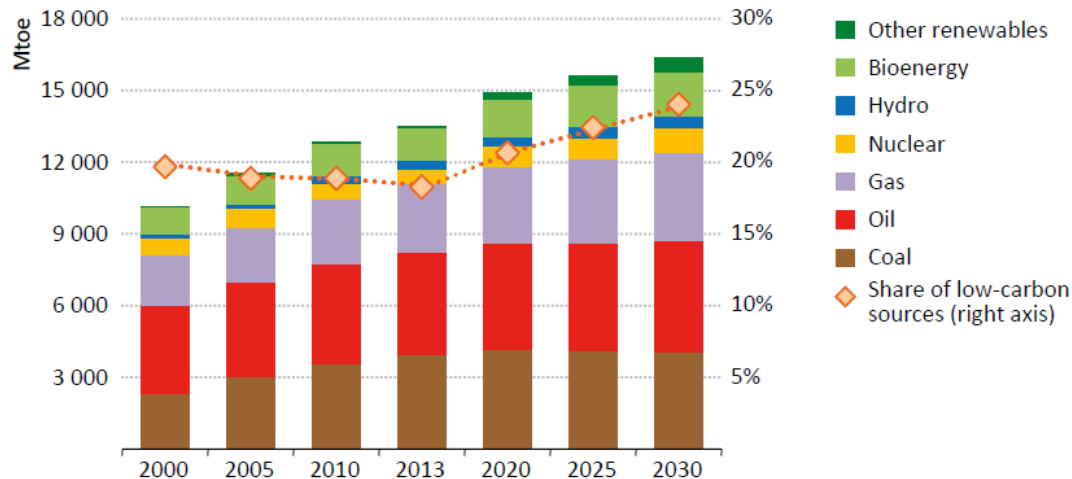
Sources : IPCC, AR5; COP21, FCCC/CP/2015/10/Add.1, 2015

1. Contexte

Transition énergétique => 2 Objectifs contradictoires!

- Limiter les émissions de gaz à effet de serre
- Faire face à la demande croissante en énergie
 - +33% en 2035, surtout dans les pays non-OCDE
 - Énergie provient à 82% de ressources fossiles (75% en 2030)

Global primary energy demand by type in the INDC Scenario

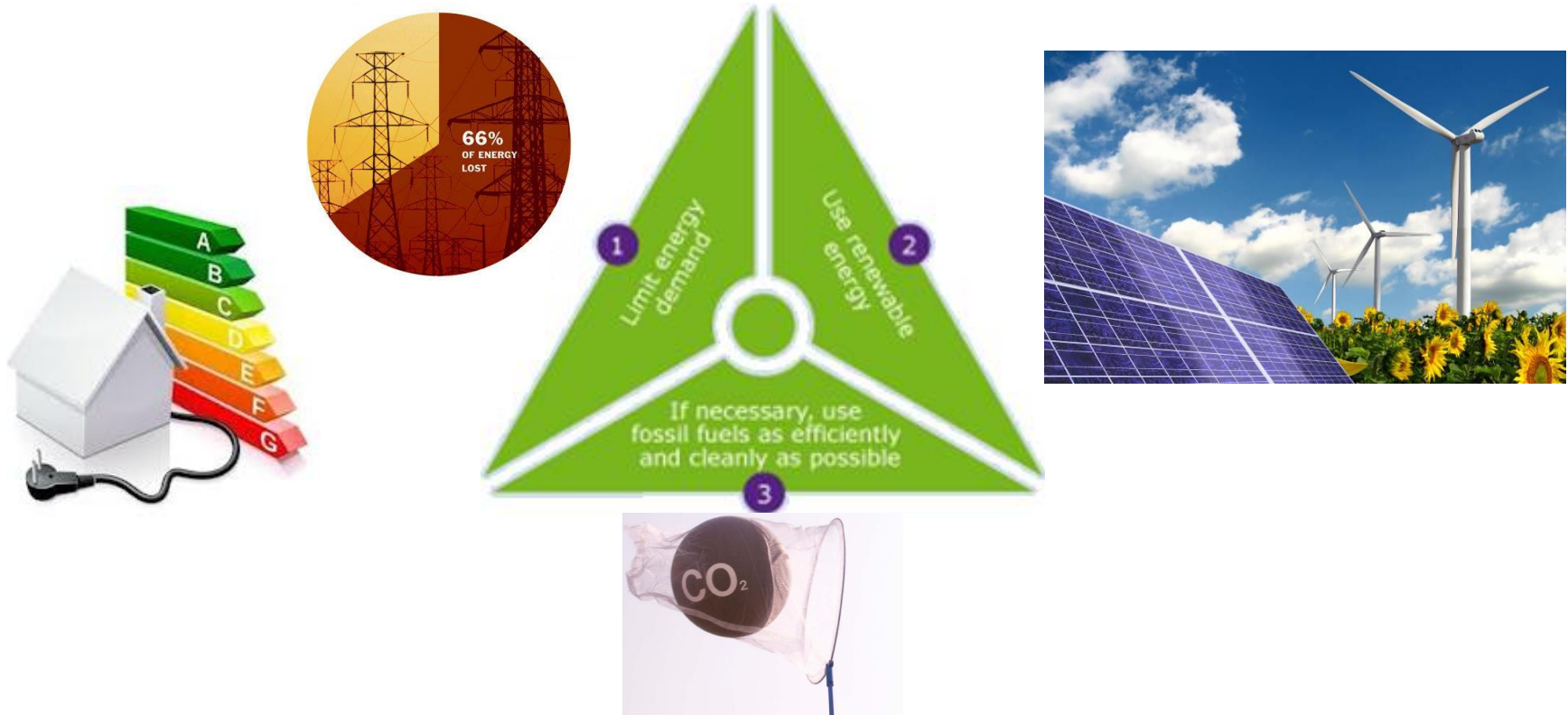


Note: "Other renewables" includes wind, solar (photovoltaic and concentrating solar power), geothermal, and marine.

Source : IEA 2015, WEO special report, Energy & Climate Change

1. Contexte

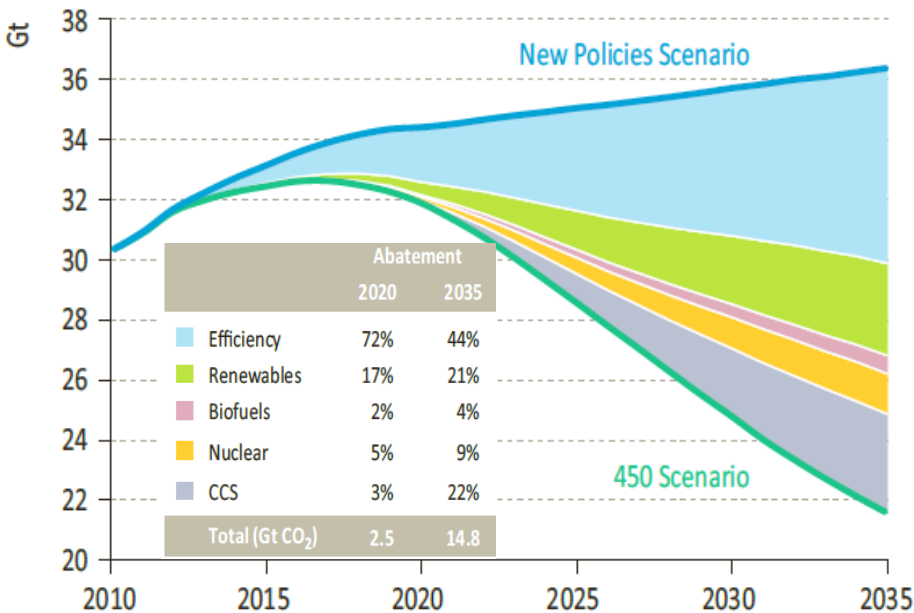
- Réponses possibles: TRIAS ENERGICA



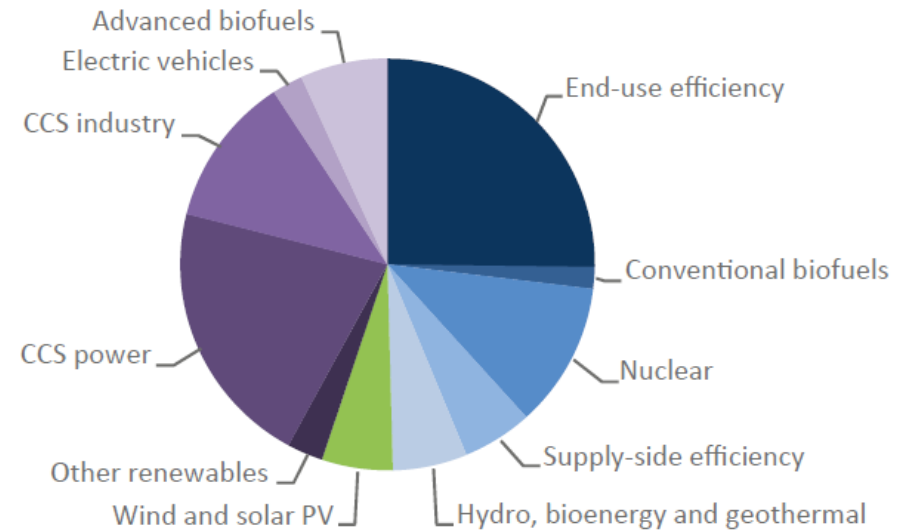
Lysen E., The Trias Energica, Eurosun Conference, Freiburg, 1996

1. Contexte

- ⇒ CCUS = Carbon Capture, Utilization and Storage
- ⇒ La capture est commerciale et flexible (retrofit + dynamique)
- ⇒ Prévisions pour le futur (proche) ?



World CO₂ emissions abatement in the 450 Scenario (New Policies Scenario), IEA **2011**, WEO2011.



World CO₂ emissions abatement in the 450 Scenario (Bridge Scenario 2015-2040), IEA **2015**, WEO special report, Energy & Climate Change

2. Capture du CO₂

<https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>

2. Capture du CO₂

La capture du CO₂ = technologie exploitée depuis des décennies
=> Installations commerciales de capture du CO₂



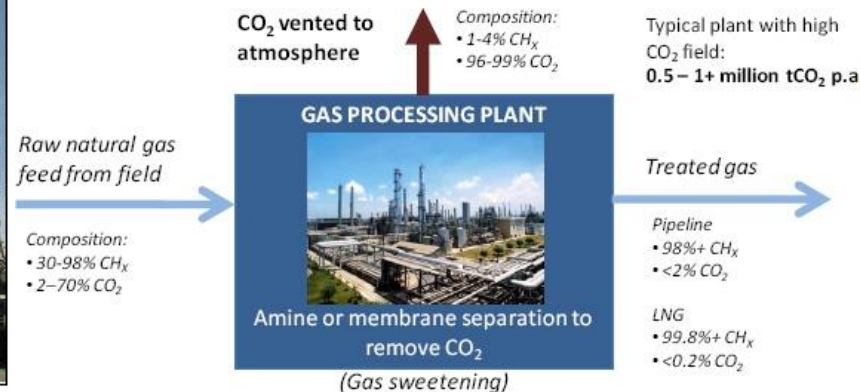
1999 Malaysia
(200 T/D Max)
Urea Production



2005 Japan
(330 T/D max)
General Use



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



Mais...

- Relativement petite échelle, sauf traitement de gaz naturel (BD3–2700 t/j)
- Coût de capture très élevé! En centrale, le rendement perd 33%!

2. Capture du CO₂

Principales technologies:

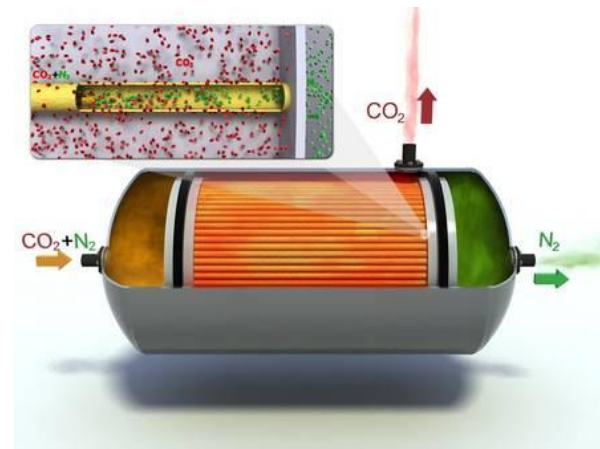
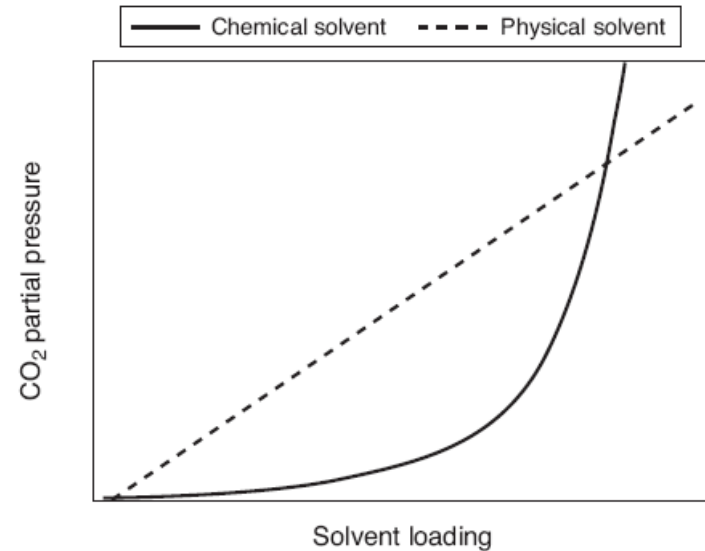
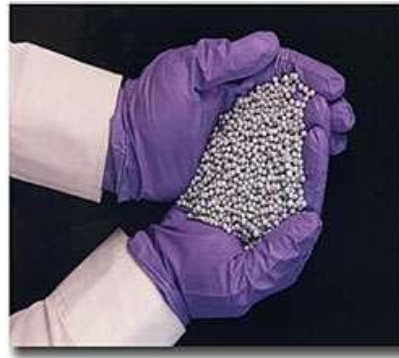
1. Capturer le CO₂ formé lors de la combustion dans les fumées
=> Décarbonisation des fumées = **Capture post-combustion**
2. Enlever le C du combustible par gazéification du combustible solide
=> Décarbonisation du combustible = **Capture pré-combustion**
3. Brûler le combustible avec de l'oxygène pur
=> **Combustion Oxyfuel**
4. Procédés industriels (cimenteries, aciéries...)
=> CO₂ produit **hors combustion**

Source : Ph. Mathieu, ULg, 2011

2. Capture du CO₂

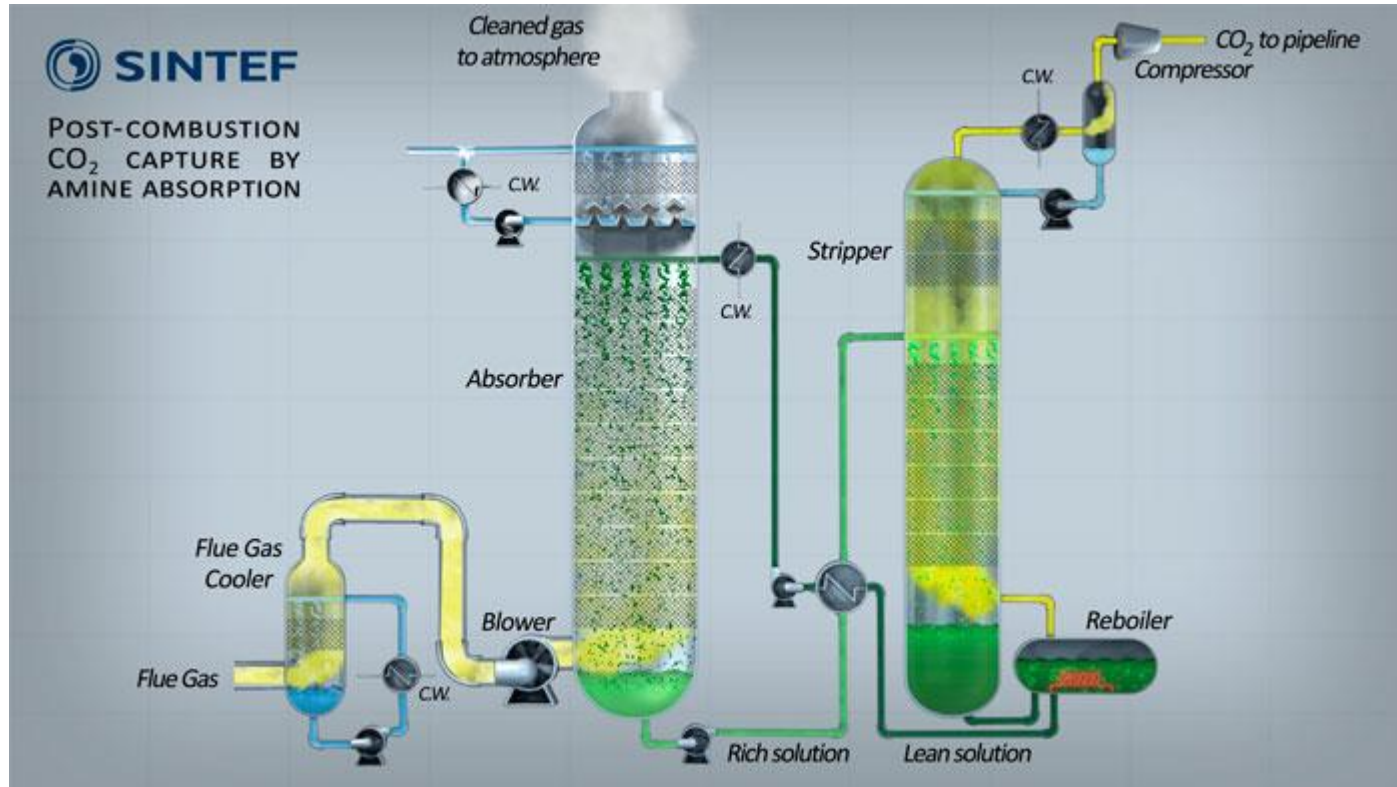
Capture post-combustion

- Techniques matures:
 - Solvants physiques ($[CO_2] \gg$)
 - Solvants chimiques
- En développement:
 - Adsorbants solides
 - Membranes
 - ...



2. Capture du CO₂

Absorption dans solvants chimiques



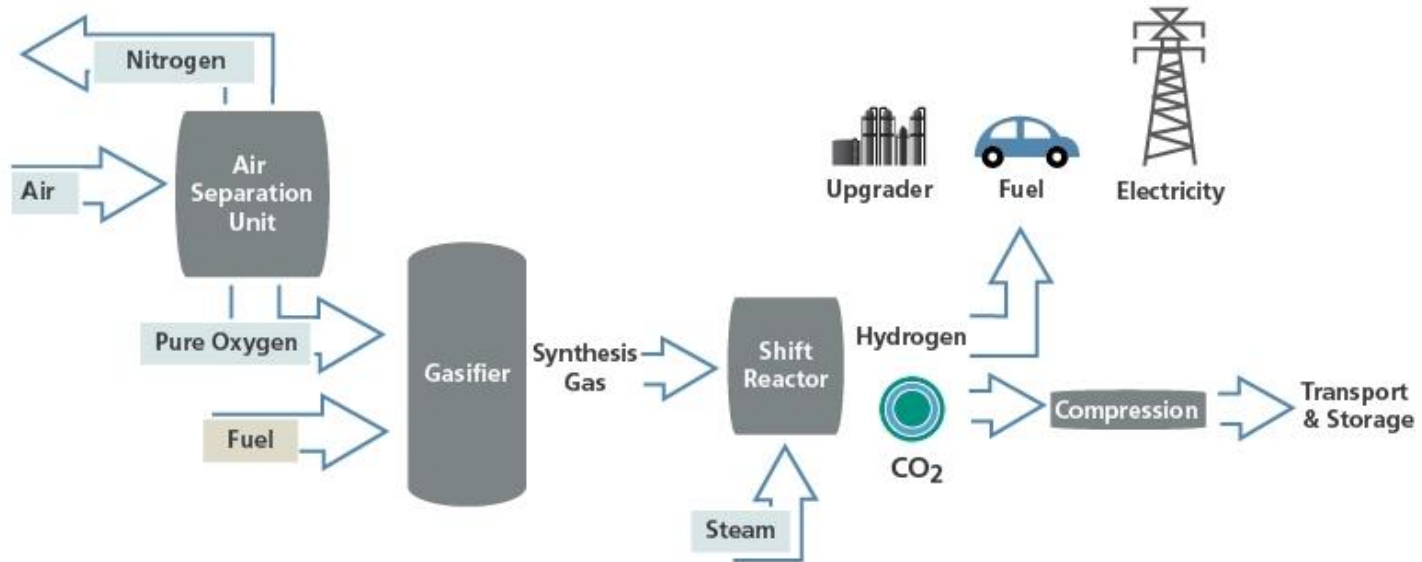
2. Capture du CO₂

- Exemple: Boundary Dam
 - En opération depuis Octobre 2014; 2700 T/D (1 Mtpa)
 - Centrale charbon 160 MWe;
 - Gaz de fumée: 180 Nm³/s ; Solvant: 550 L/s
 - Première au monde (2^{ème} unité, 240 MW fin 2016, Texas)



2. Capture du CO₂

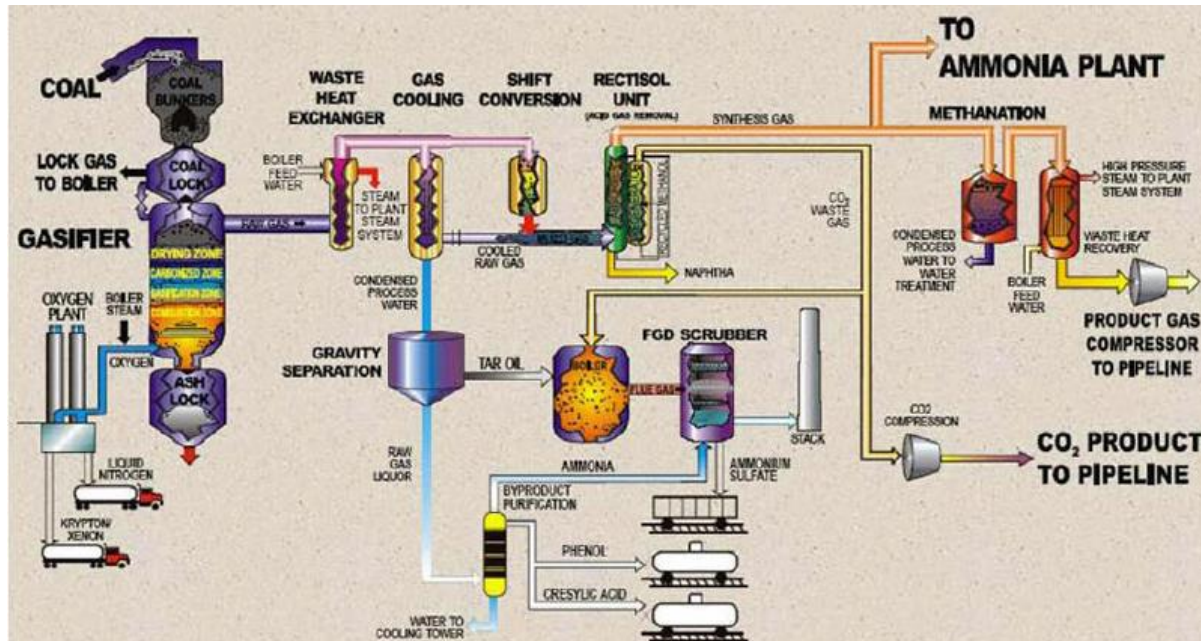
Capture pré-combustion



Réactions principales	Nom	Equation	Enthalpie de réaction (MJ/kmol)
1	Réformage à la vapeur	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$	206,2
2	Oxidation partielle	$\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + 2\text{H}_2$	-35,7
3	Réaction Water-shift	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41

2. Capture du CO₂

- Capture pré-combustion: exemple
 - Great Plains Synfuel Plant, Dakota du nord (US)
 - Gazéification de 16000 T/D de lignite
 - 3 Mtpa CO₂ depuis 2000 (8200 T/D)

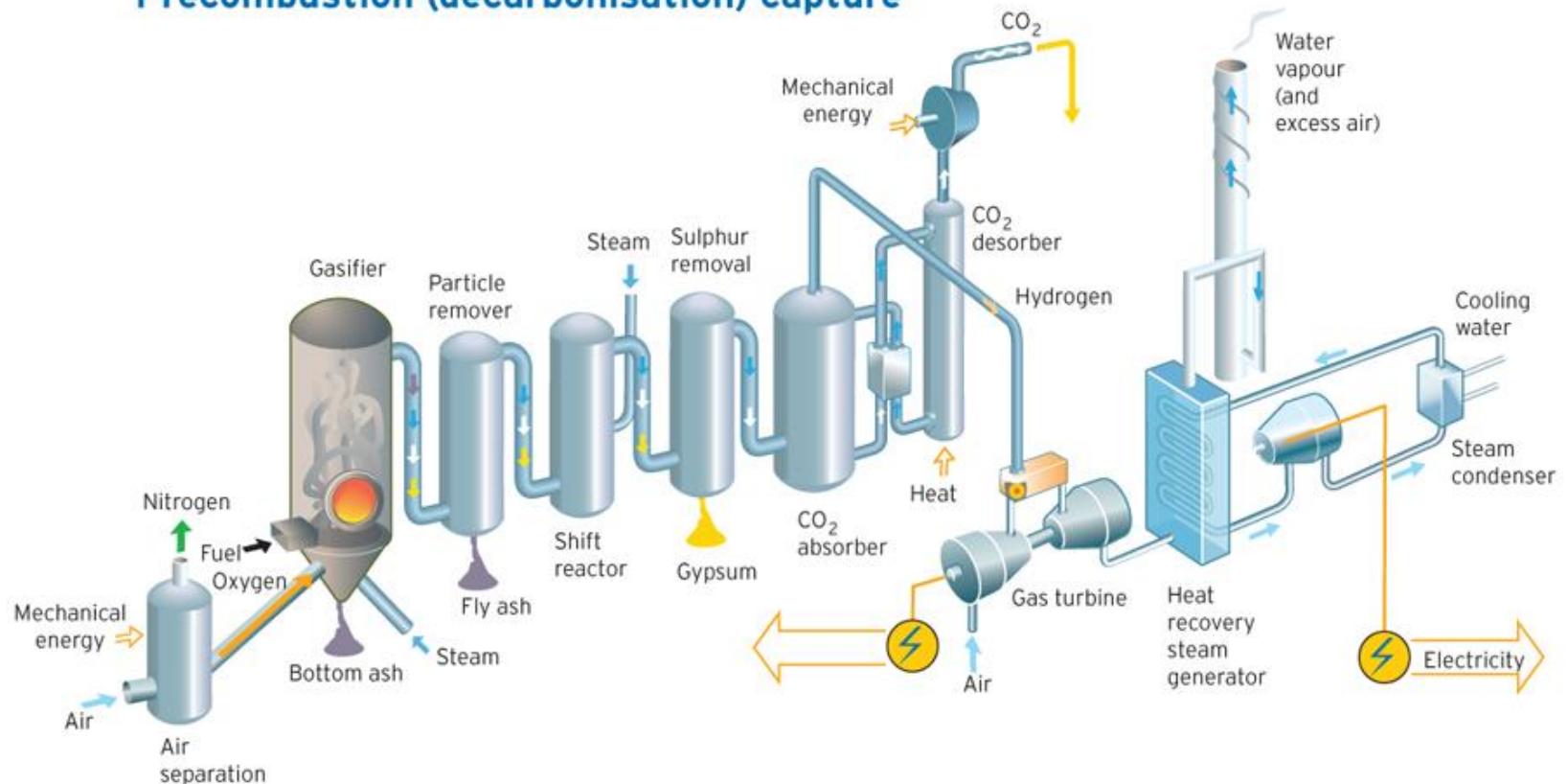


Source: <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/great-plains>

2. Capture du CO₂

Cas particulier: IGCC (integrated gasification combined cycle)

Precombustion (decarbonisation) capture



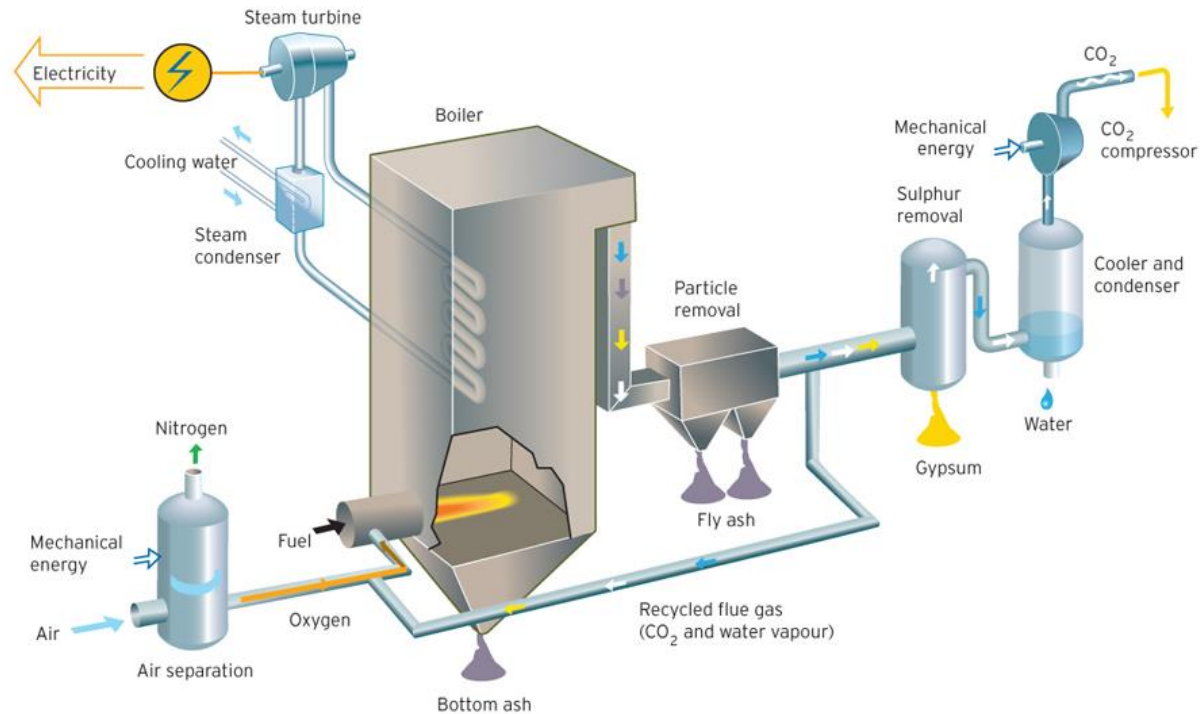
2. Capture du CO₂

- Cas particulier: IGCC (integrated gasification combined cycle)
 - Exemple: Kemper County (Mississippi): Gazéification de charbon (582 MW)
 - Capture de ~ 9500 T/D (3 Mtpa) , démarrage prévu en 10/2016
 - Estimation des coûts: ~ 6 milliards USD (évolue encore)



2. Capture du CO₂

Oxy-combustion / Combustion Oxy-fuel



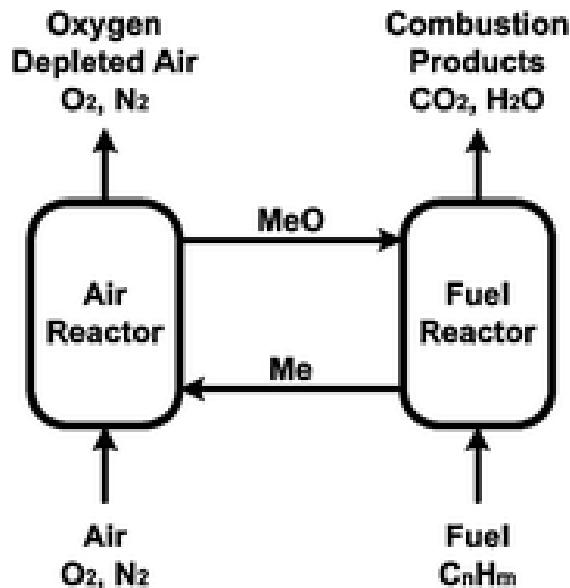
Principaux défis: séparation de l'air et combustion à l'O₂ pur

Projets à grande échelle: plusieurs annulations récentes:

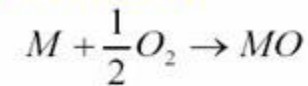
White Rose UK 5000T/D; FutureGen US 2700 T/D

2. Capture du CO₂

- Cas particulier d'oxyfuel: chemical looping combustion (CLC)
 - Deux réacteurs: un avec de l'air, l'autre avec le fuel
 - Un porteur métallique d'oxygène tourne dans la boucle



- **Oxidation : exothermic**



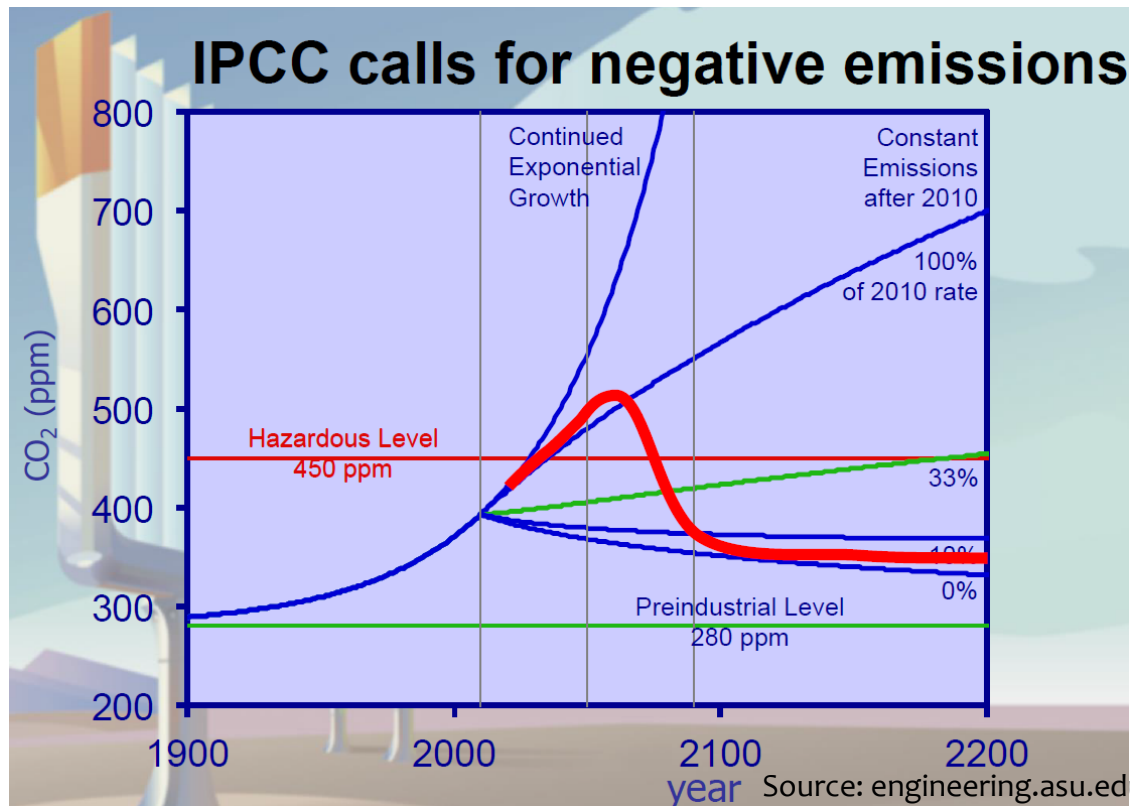
- **Reduction : endothermic**



M : metal, MO : metal oxide

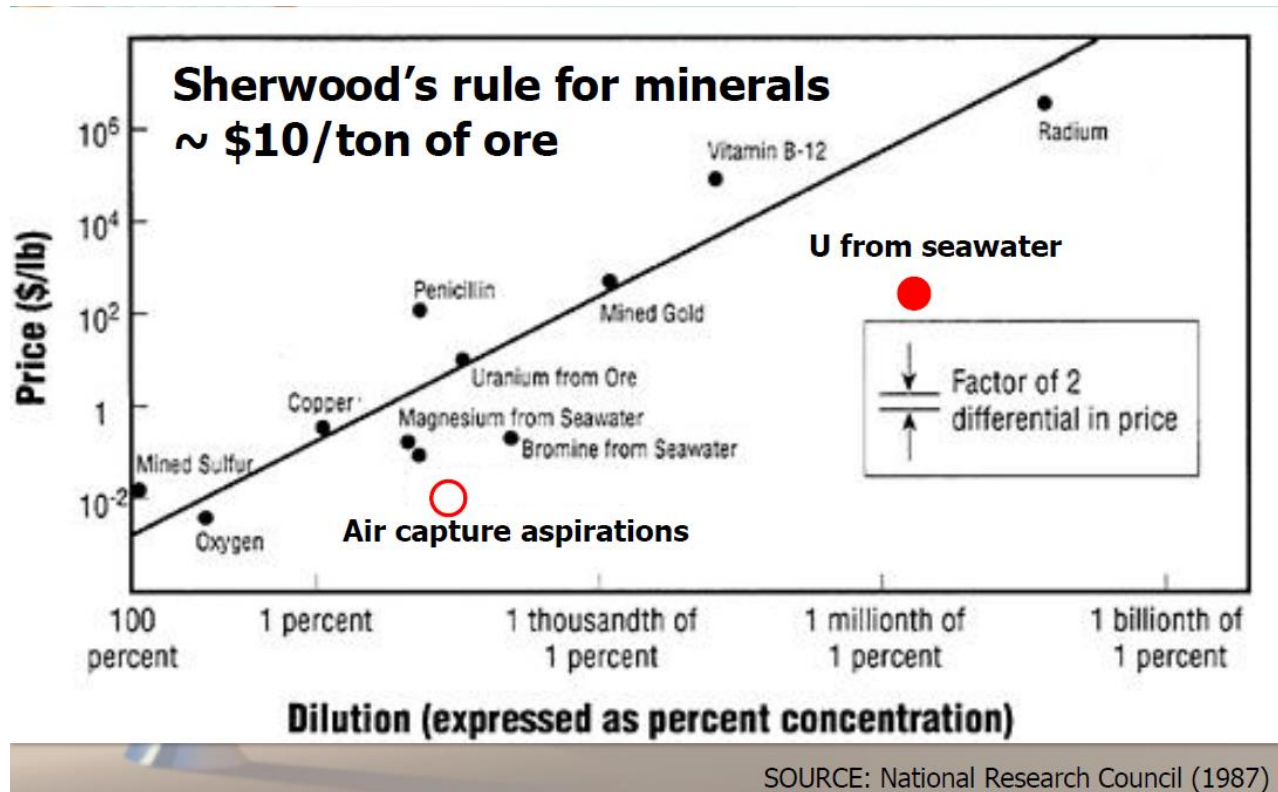
2. Capture du CO₂

- Direct air capture = Capture du CO₂ dans l'air
 - Le CO₂ s'accumule dans l'atmosphère
 - 400 ppm, augmente de 2-2.5 ppm/an



2. Capture du CO₂

- Direct air capture = Capture du CO₂ dans l'air (400 ppm!)



Source: engineering.asu.edu/cnce

2. Capture du CO₂

- Direct air capture = Capture du CO₂ dans l'air (400 ppm!)
 - Capte les émissions distribuées (transport, petits émetteurs...)
 - Plus petite échelle, mais disponible partout!
 - Coût important (plusieurs centaines d'€/tCO₂ vs. 30-40 €/t pour techniques à grande échelle)
 - Technologies en développement (~1 t/jour; 365 Tpa)

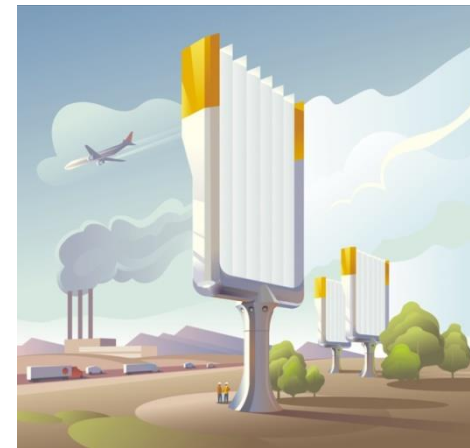
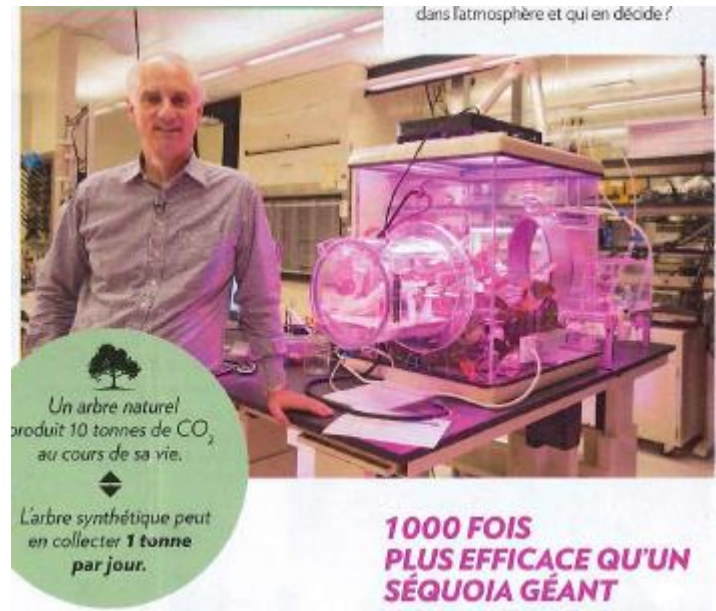


2. Capture du CO₂

Humidity-swing adsorption
Résines échangeuses d'ions



Source: Isabelle Léouffre, Paris Match, 2015

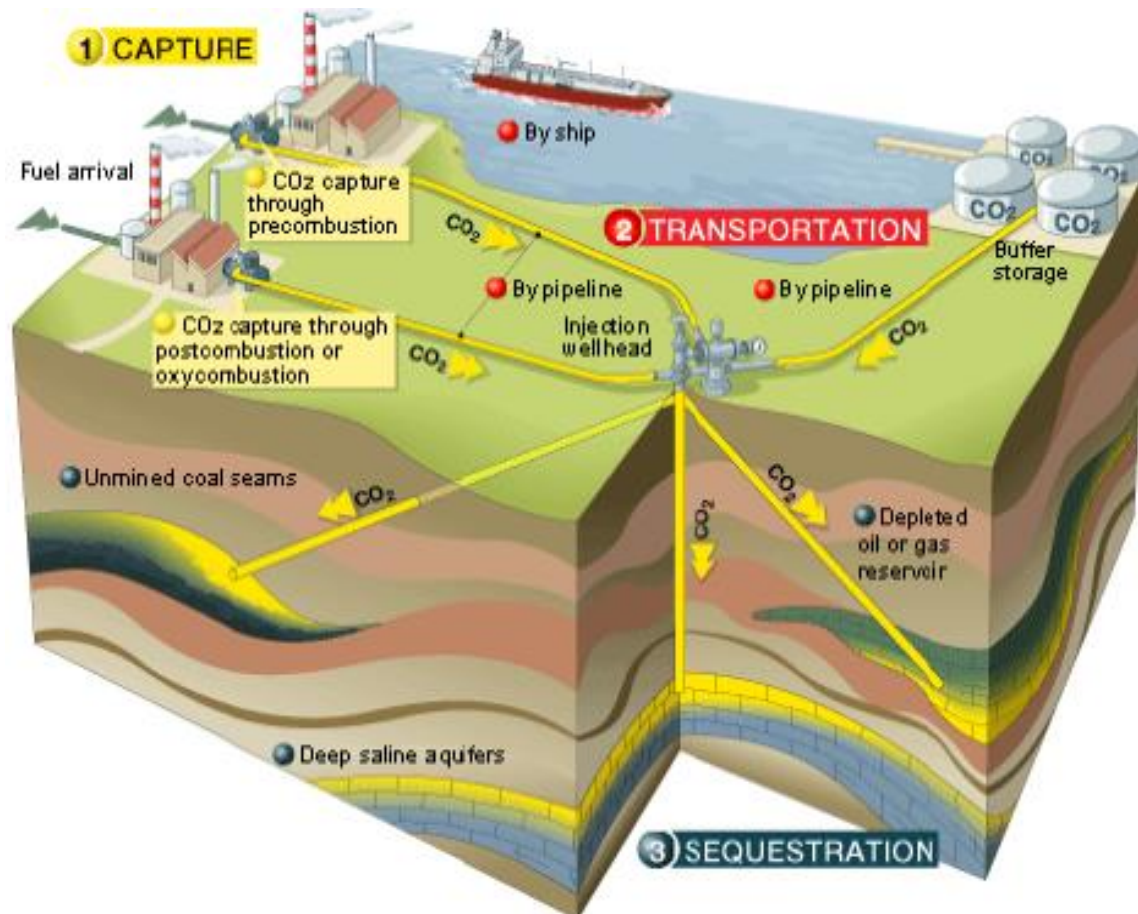


Source: engineering.asu.edu/cnce

3. Stockage du CO₂

3. Stockage du CO₂

Capture – Transport – Ré-utilisation – Stockage



3. Stockage du CO₂

Transport de CO₂

■ Par bateau:

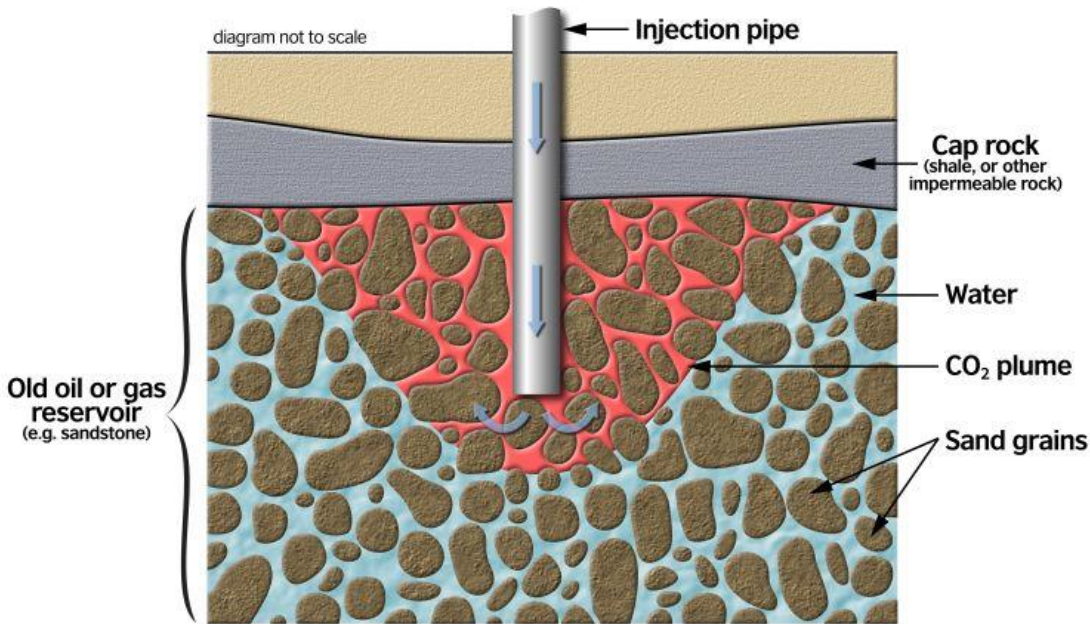
- ❑ 100 000 tonnes transportées/an (~1000 tCO₂/bateau)
- ❑ CO₂ liquéfié (-30°C, 15 bar)
- ❑ Technologie similaire au LPG

■ Par pipeline:

- ❑ CO₂ supercritique (100 bar)
- ❑ > 6500 km de pipelines depuis les années 70 (EOR)



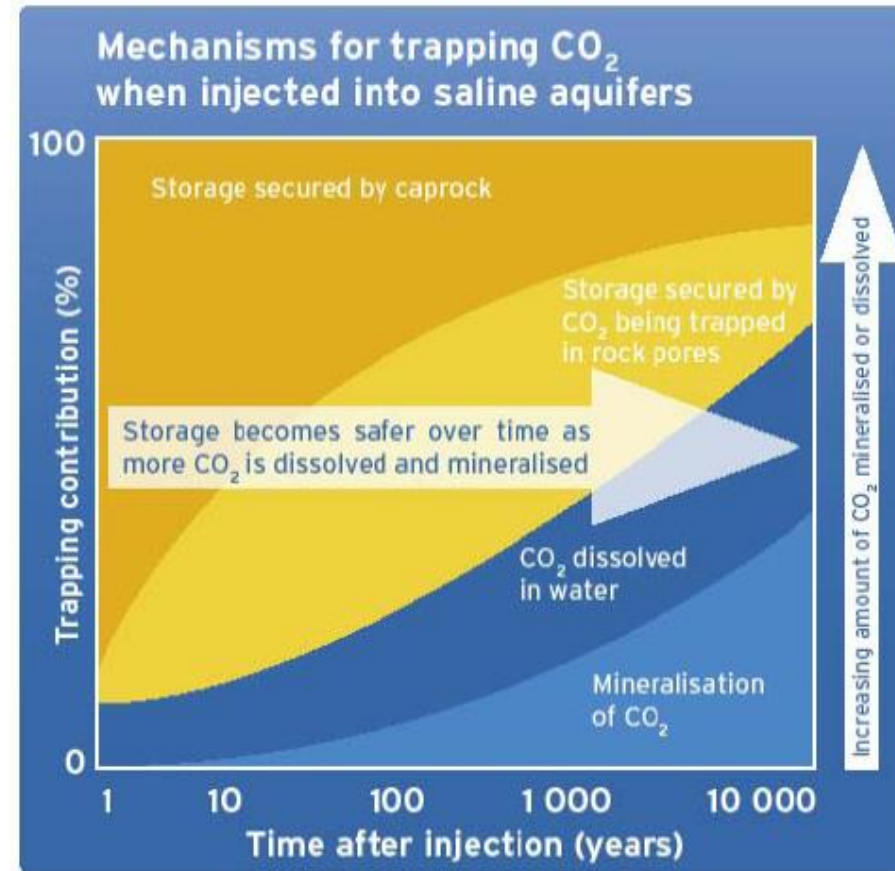
3. Stockage du CO₂



- **Aquifères salins:** grande capacité, géologie moins connue mais fortement étudiée récemment
- **Champs épuisés de gaz et pétrole:** Plus faible capacité, mais géologie mieux connue, stabilité du site démontrée
- **Puits de charbon:** Capacité limitée, faible perméabilité mais possibilité de récupérer du méthane

3. Stockage du CO₂

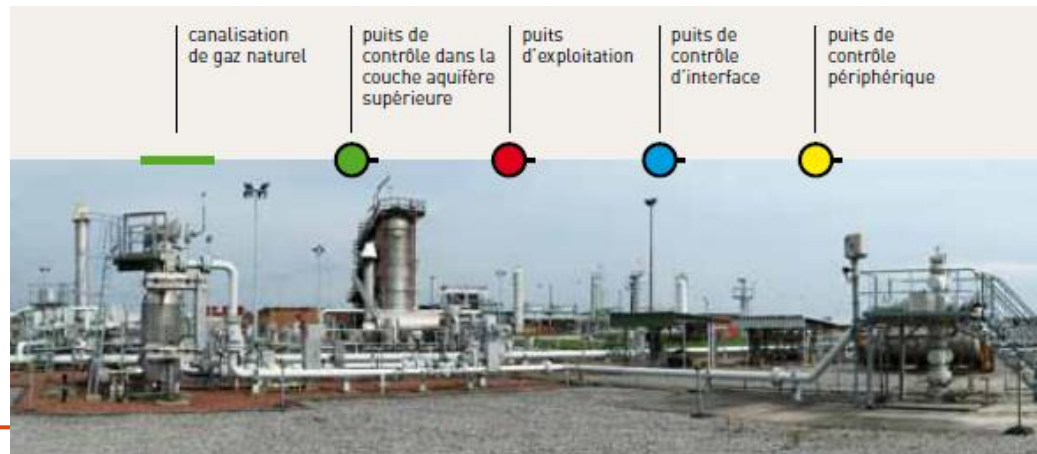
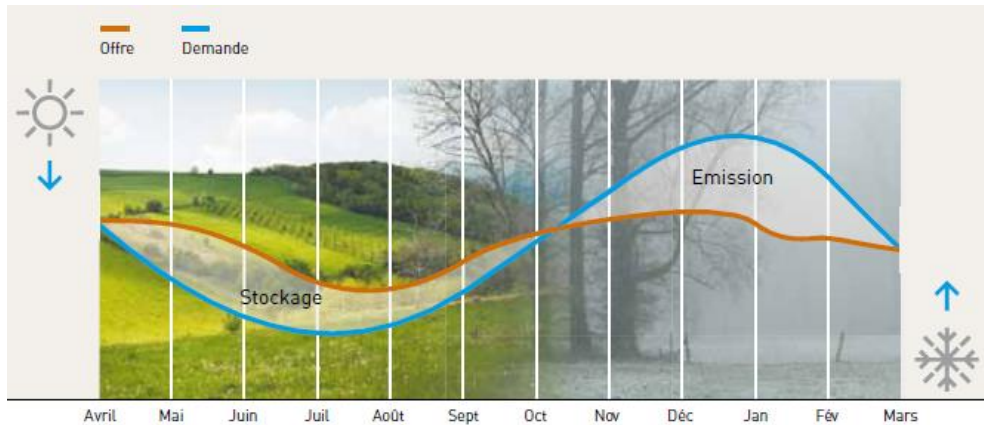
- CO₂ diffuse dans la formation géologique et est piégé sous terre
- Il pénètre dans les porosités de la roche, se dissout et minéralise
- Longue échelle de temps!



3. Stockage du CO₂

C'est une technologie éprouvée: stockage saisonnier de gaz naturel

Exemple: Loenhout (Anvers)



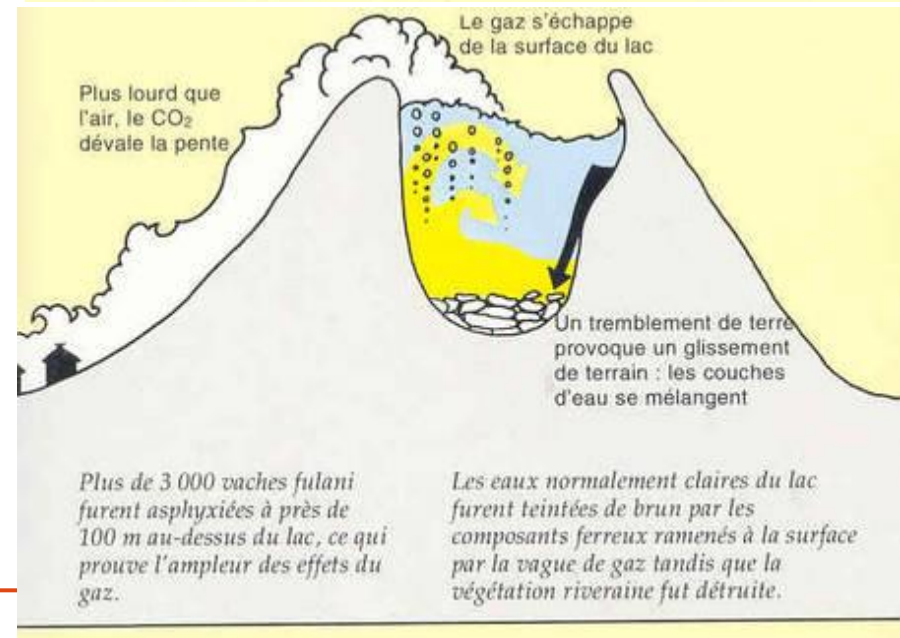
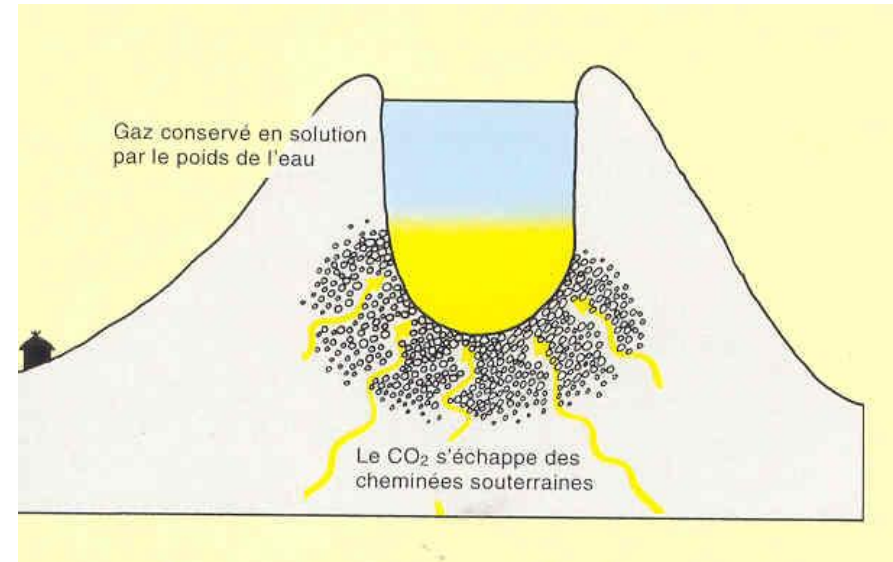
Source : www.fluxys.com

3. Stockage du CO₂

Cas du lac Nyos (Cameroun, 1986):

- CO₂ d'origine volcanique
- Près de 1700 victimes

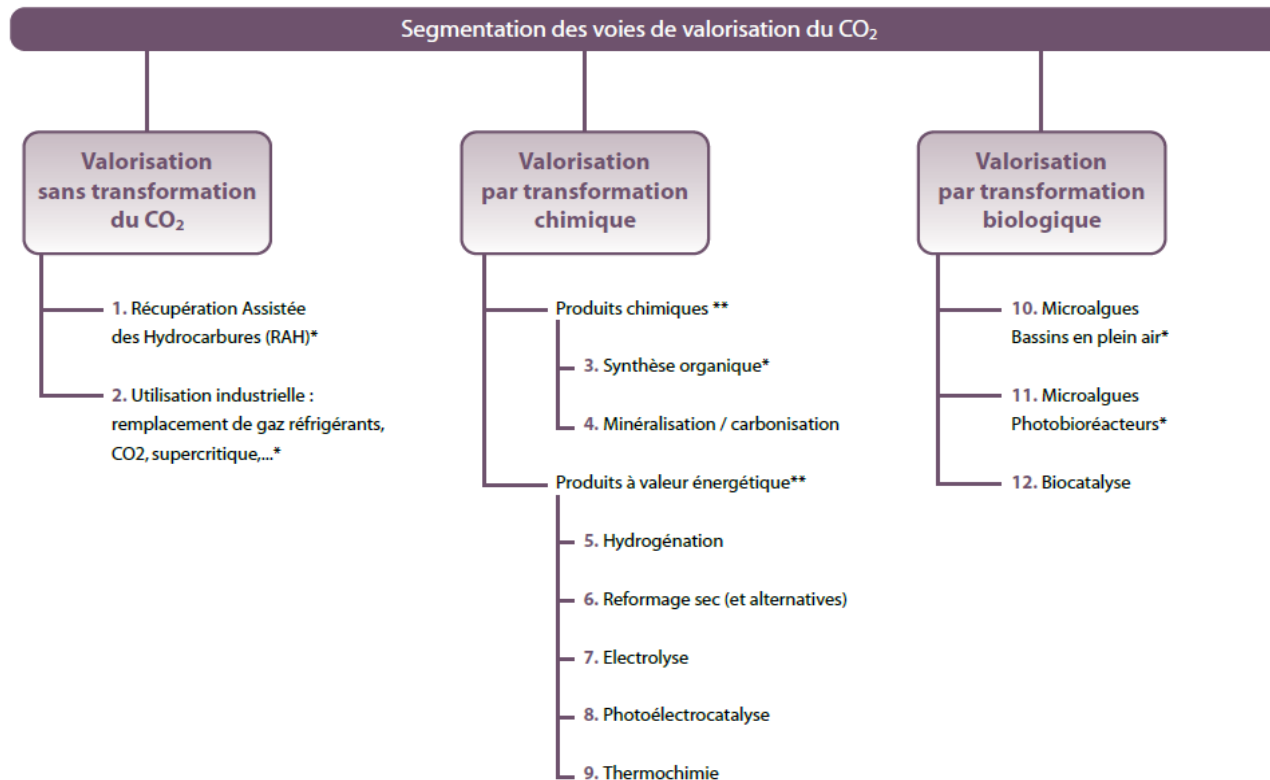
=> Gestion du risque !



4. Valorisation du CO₂

4. Valorisation du CO₂

Le CO₂, un déchet ou une matière première?



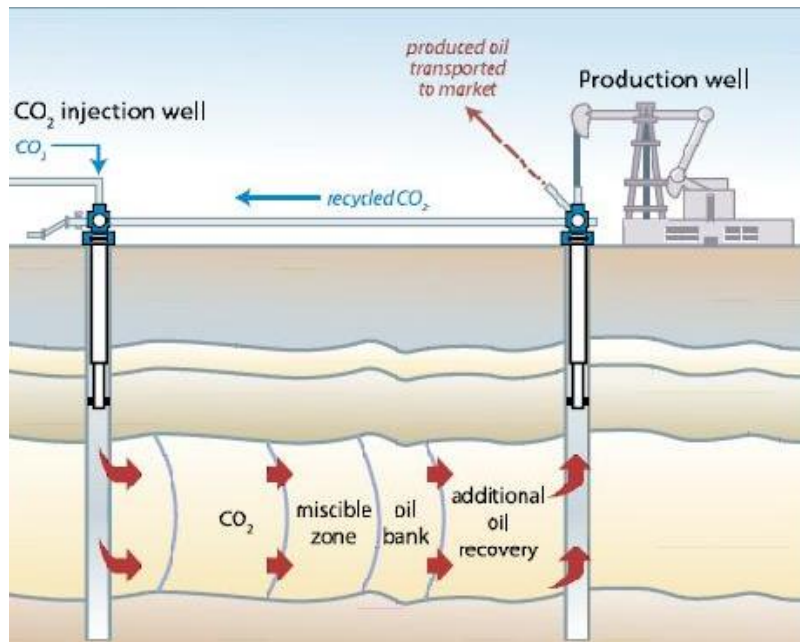
* Voies pour lesquelles il existe déjà certaines applications à un stade industriel

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

4. Valorisation du CO₂

Récupération assistée d'hydrocarbures (EOR):

- 40 MtCO₂/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

4. Valorisation du CO₂

Utilisations industrielles directes du CO₂



4. Valorisation du CO₂

Utilisations industrielles directes du CO₂:

- Haut niveau de pureté exigé (99,99%)
- Potentiel de croissance de cette filière moins important (20 MtCO₂/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

4. Valorisation du CO₂

Valorisation par transformation biologique:

=> 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 (12 t CO₂/an à Niederaussem)
- Energie nécessaire pour traitements en aval

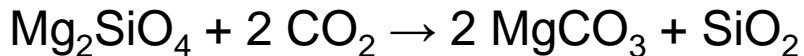
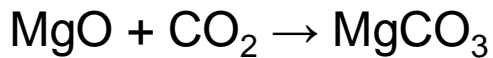
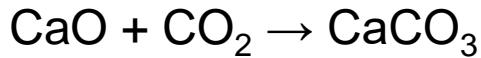
4. Valorisation du CO₂

Valorisation biologique
=> Applications diverses

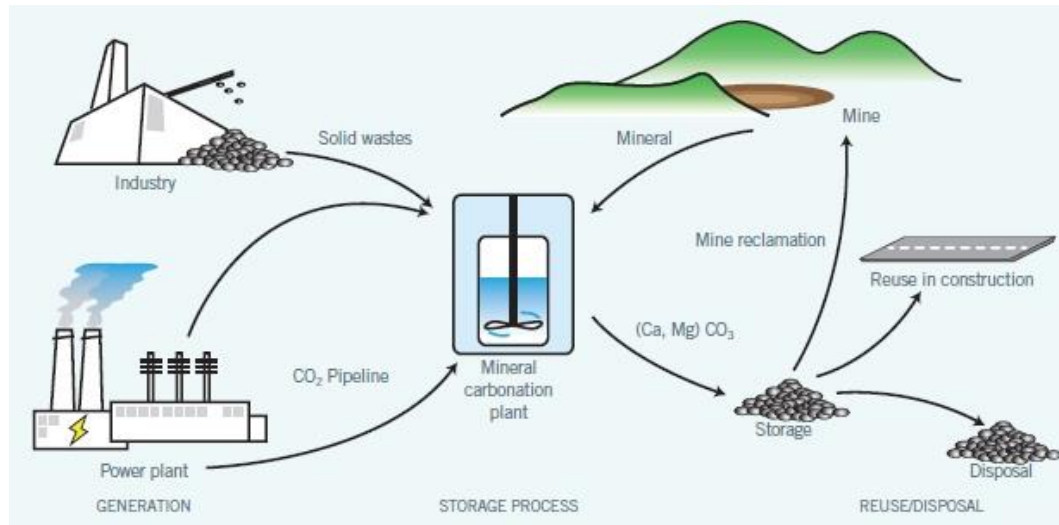


4. Valorisation du CO₂

■ Valorisation chimique: Minéralisation



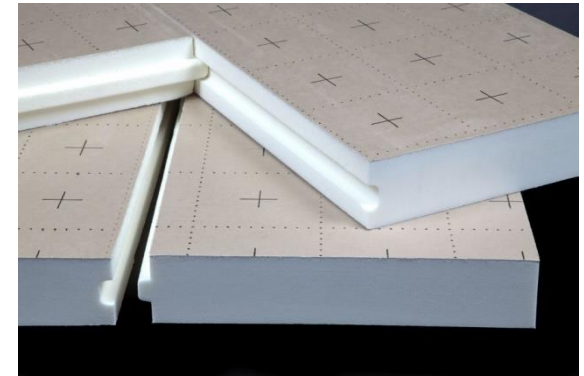
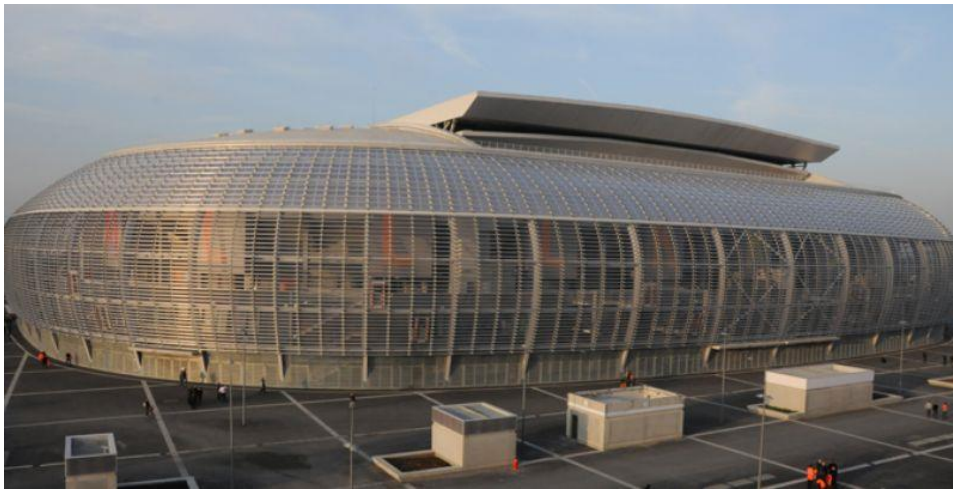
Source: Hemcrete, 2015



- Utilisation d'oxides de Mg ou de Ca comme matières premières, présents dans minerai ou déchets industriels
- Réaction spontanée, mais lente

4. Valorisation du CO₂

Valorisation chimique: Synthèse organique



4. Valorisation du CO₂

Synthèse organique:

- Polycarbonates, polyols, polyuréthanes...
- Déjà largement utilisée pour la production d'urée (100 MtCO₂/an)
- Potentiel limité en volume: ~6% du pétrole va en pétrochimie
- Mais haute valeur ajoutée possible
- Énergie nécessaire aux synthèses constitue un frein

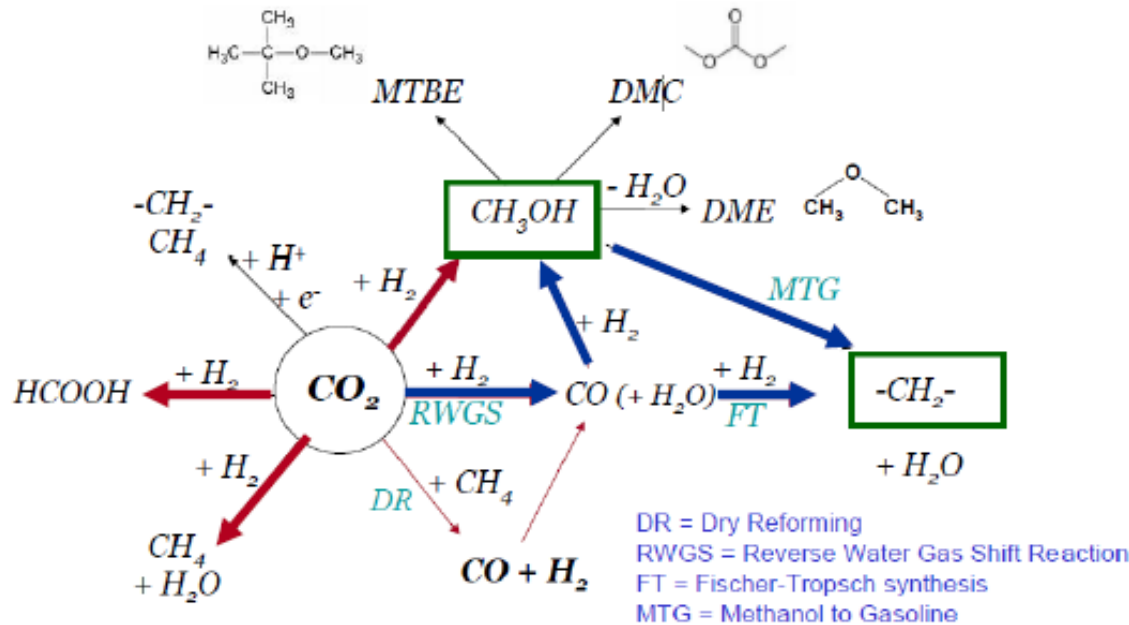


Source: ChemEurope.com, June 2015

	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

4. Valorisation du CO₂

Valorisation chimique pour énergie:



Volume potentiel bien plus grand que pétrochimie!

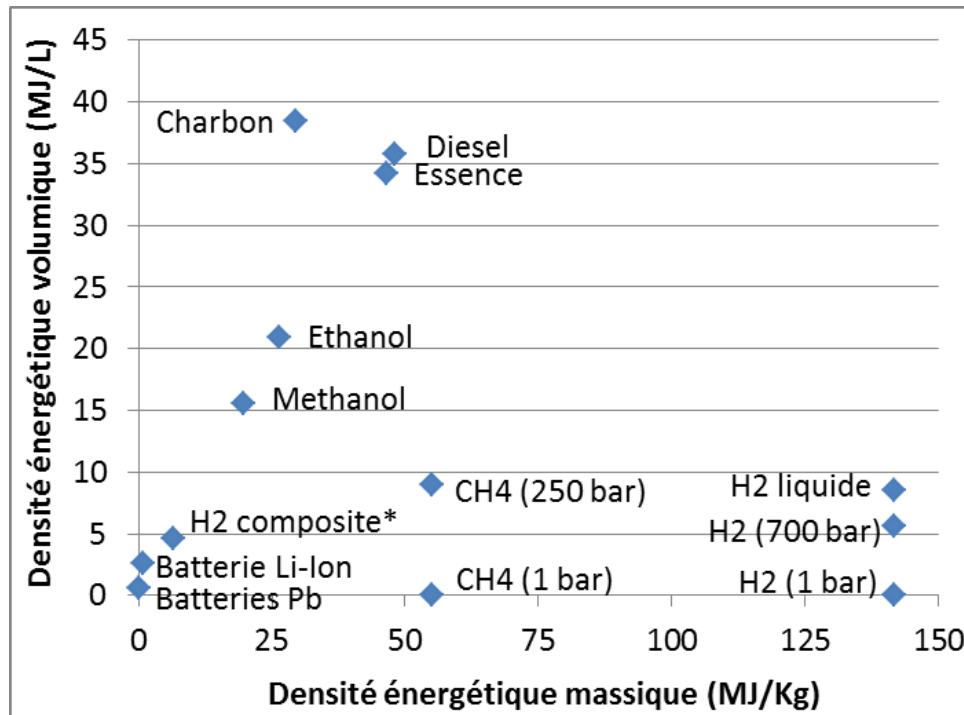
Mais coût énergétique élevé et produits à moins haute valeur ajoutée

=> CO₂ au bas de l'échelle d'énergie => Energie renouvelable nécessaire

4. Valorisation du CO₂

Valorisation chimique pour énergie: Power-to-gas / to-fuel

- ❑ Stockage intersaisonnier d'énergie
- ❑ Haute densité énergétique dans la liaison carbone
- ❑ Support pour de l'hydrogène produit par énergie renouvelable

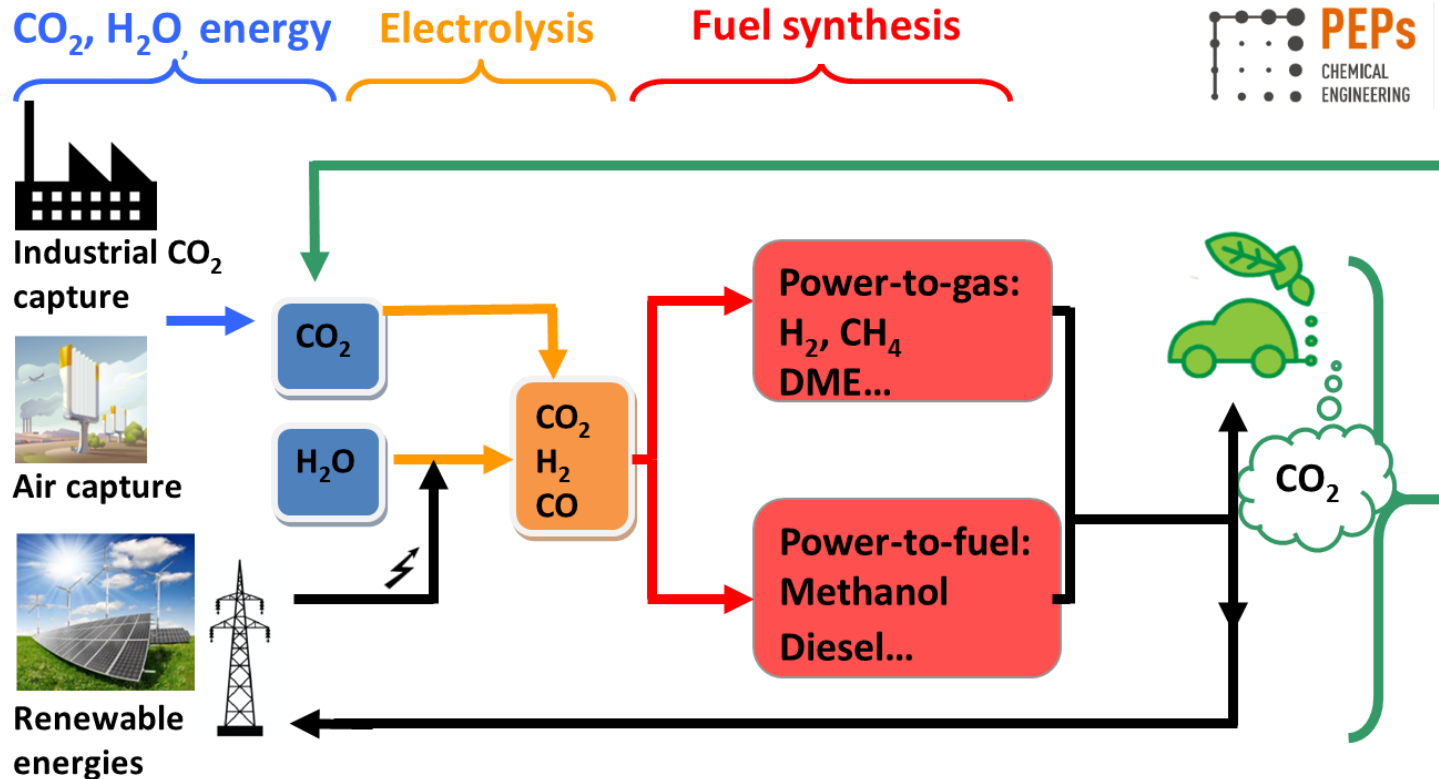


NB: Consommation moyenne d'un ménage belge: 36 MJ/j



4. Valorisation du CO₂

Valorisation chimique pour énergie: Power-to-X



4. Valorisation du CO₂

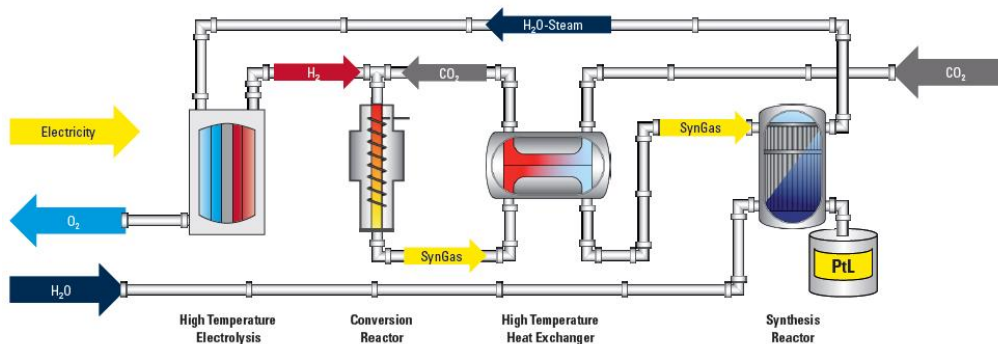
- Applications pour le transport
 - Ferries (Méthanol, Stena, 24 MW)
 - Camions (DME, Volvo)
 - Voitures (GEM fuels)



4. Valorisation du CO₂

Quelques projets en cours

- Carbon Recycling International
 - Power-to-methanol
 - 4000 T/a, Efficacité ~50%
- Sunfire
 - Power-to-diesel
 - 58 000 L/a, Efficacité ~70%
- Steelanol
 - CO to ethanol



Le coût de capital est critique pour une installation en fonctionnement dynamique!

5. Conclusions et perspectives

5. Conclusions et perspectives

Grand potentiel, mais beaucoup de défis pour le CO₂!

■ Défis sociétaux

- ❑ Croissance mondiale de la demande en énergie
- ❑ Environnement
- ❑ Transition énergétique
- ❑ Acceptation de nouvelles technologies

■ Défis scientifiques et techniques

- ❑ Développer ces technologies de façon durable et bon marché
- ❑ Débits gigantesques (~ 3 MtCO₂ le temps de cette présentation!)



5. Conclusions et perspectives

Grand potentiel, mais beaucoup de défis pour le CO₂!

■ Défis économiques

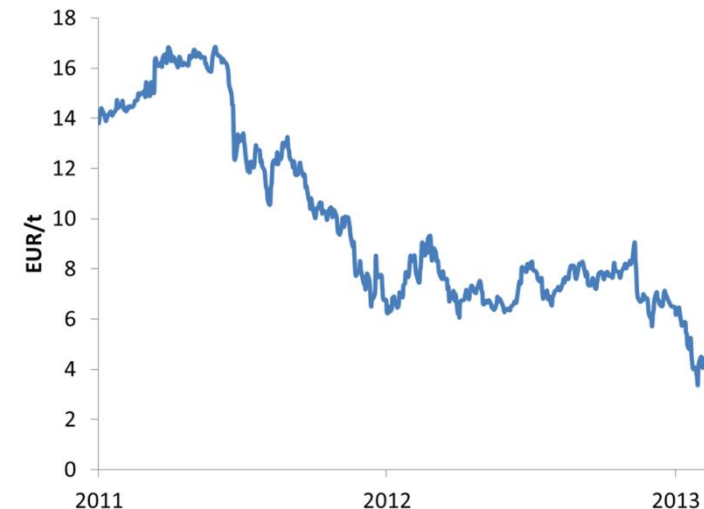
- ❑ Coût de la capture du CO₂ ~30-40 €/t
- ❑ ETS (European CO₂ market) ~ 6-7 €/t
- ❑ Taxe carbone?
- ❑ Label sur les produits neutres en CO₂?



NEUTRALIZED BY
GREEN ENERGY
0% CO₂
CERTIFIED

EU ETS CO₂ prices

(spot price as quoted on EEX)



■ Défis politiques

- ❑ Cadre législatif pour nouvelles technologies
- ❑ Décision sur les voies à choisir => besoin d'une politique européenne forte et cohérente



Merci pour votre attention!

g.leonard@ulg.ac.be