

---

# CCUS : défis scientifiques et économiques pour la société d'aujourd'hui et de demain

Chemical Engineering, Université de Liège

---

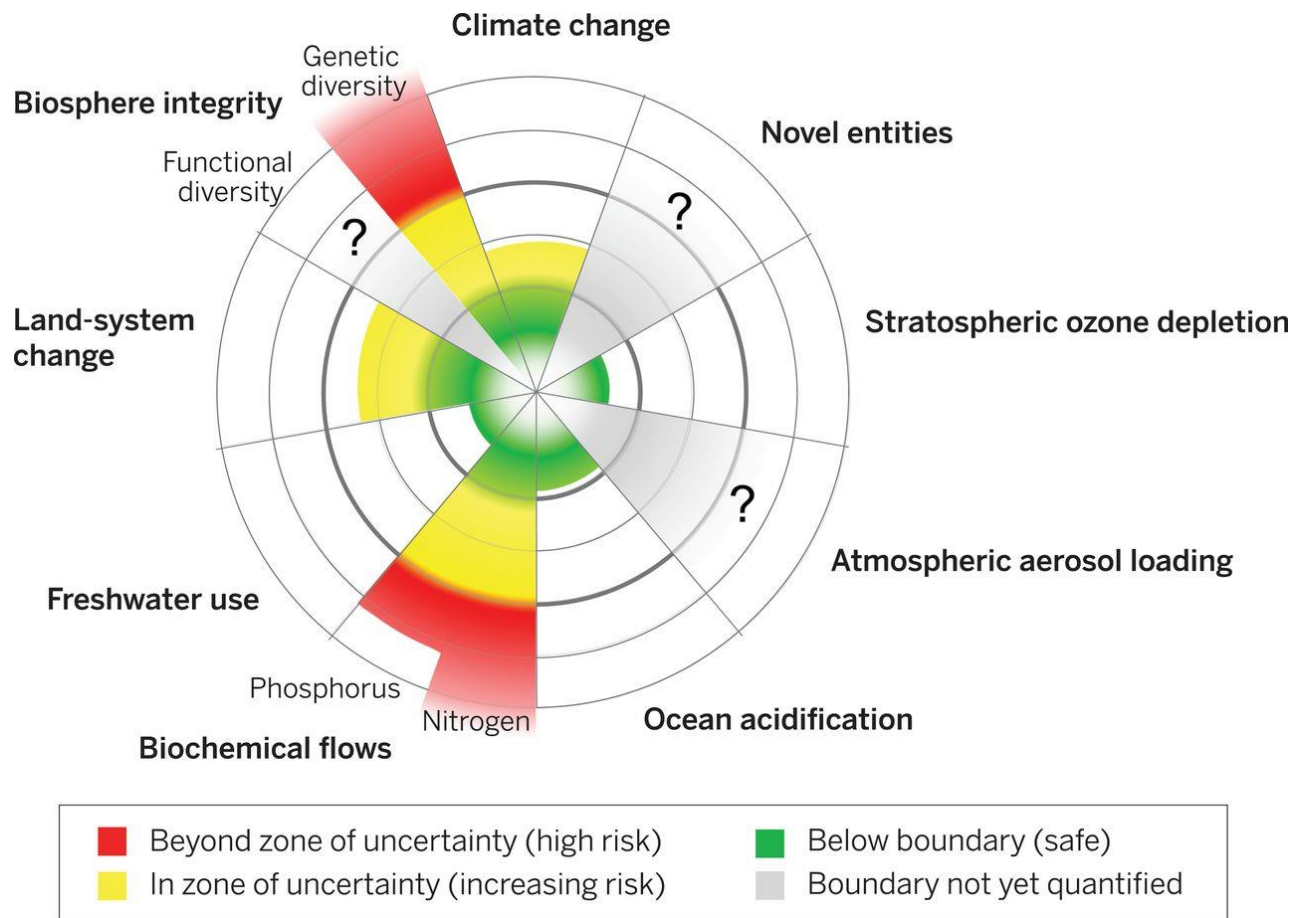
Grégoire LEONARD

# Sommaire

1. Des chiffres et du contexte
2. Capture du CO<sub>2</sub> : le filet à papillons ?
3. Stockage
4. Réutilisation du CO<sub>2</sub>
5. Conclusions et perspectives

# Pourquoi une transition énergétique?

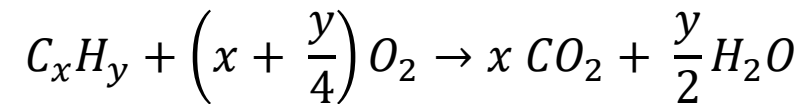
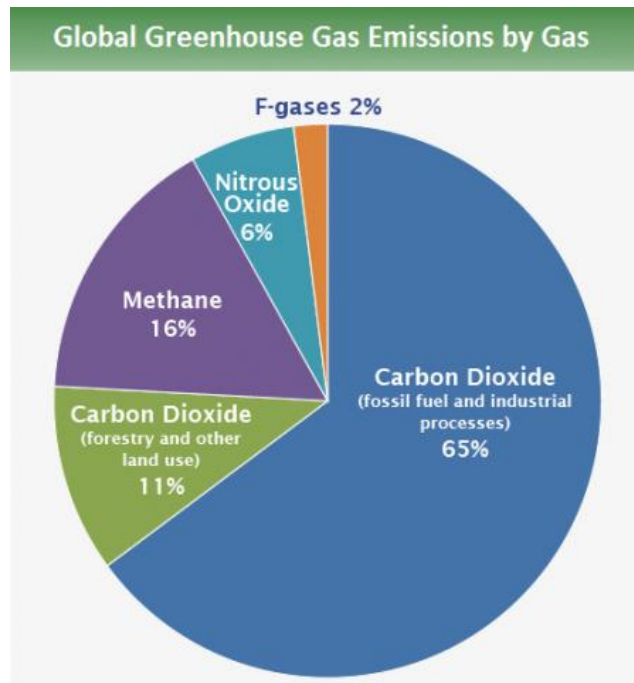
## ■ Comment conserver un écosystème sûr?



# Gaz à effet de serre (GES)



- Un phénomène d'origine naturelle
- Outre l'eau, le CO<sub>2</sub> est le principal GES anthropique



Emissions:

~ 40 GT CO<sub>2</sub> par an

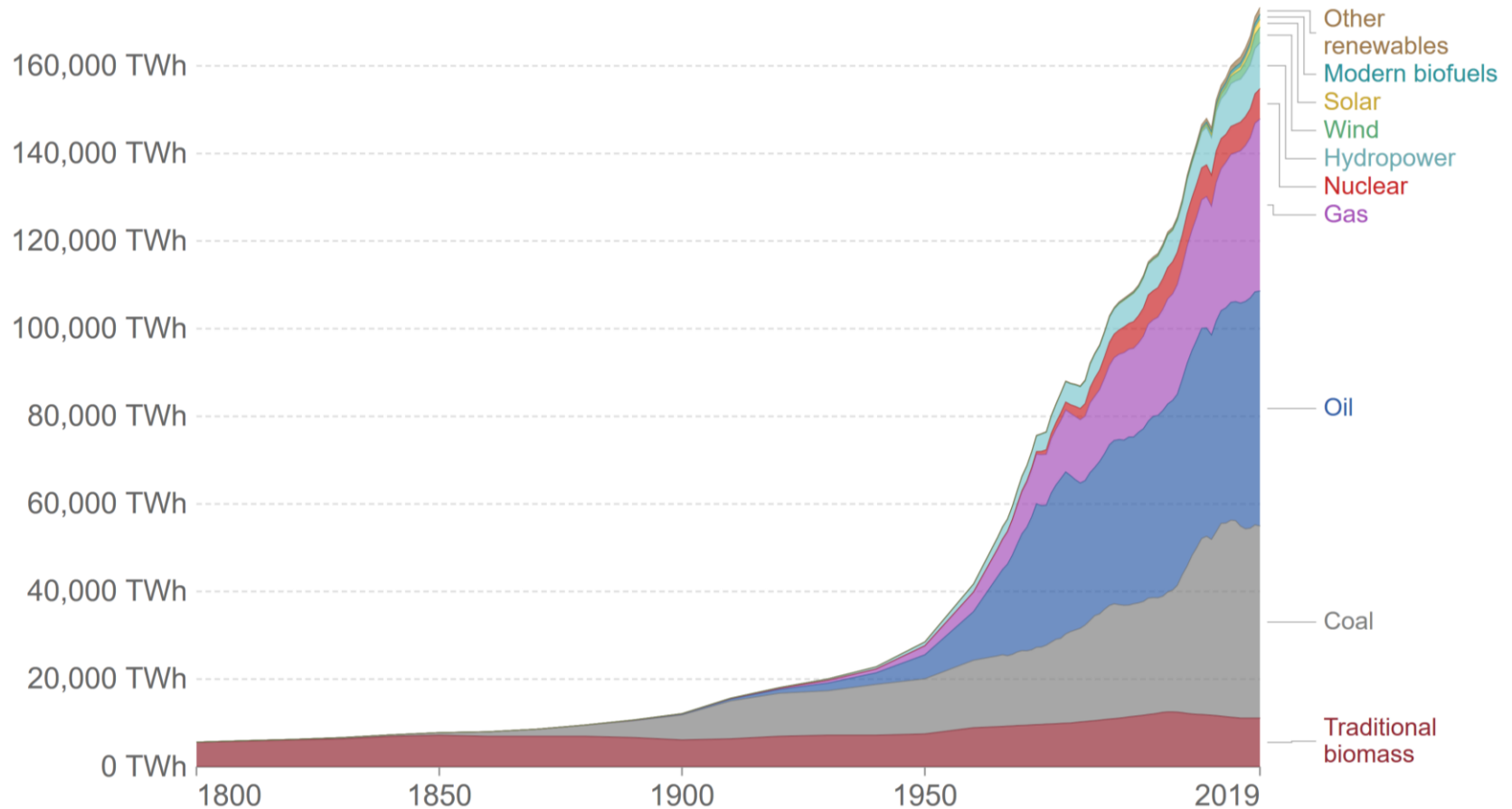
# La transition énergétique a déjà commencé



Mais elle doit faire face à des défis en contradiction:

- Réduire les émissions...
- ... tout en augmentant la production!

# Répondre à la demande énergétique croissante est déjà un grand défi en soi!



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

PEPs

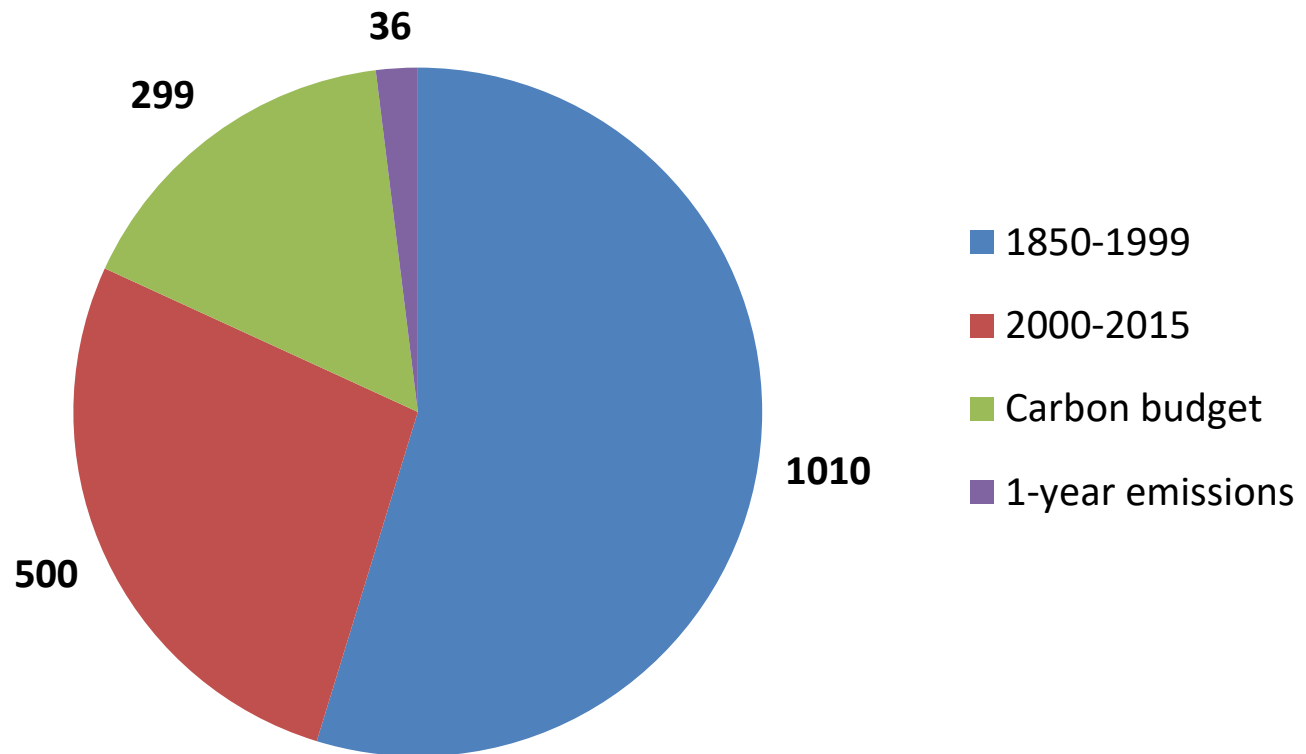
Source: Our world in data

CHEMICAL  
ENGINEERING

6

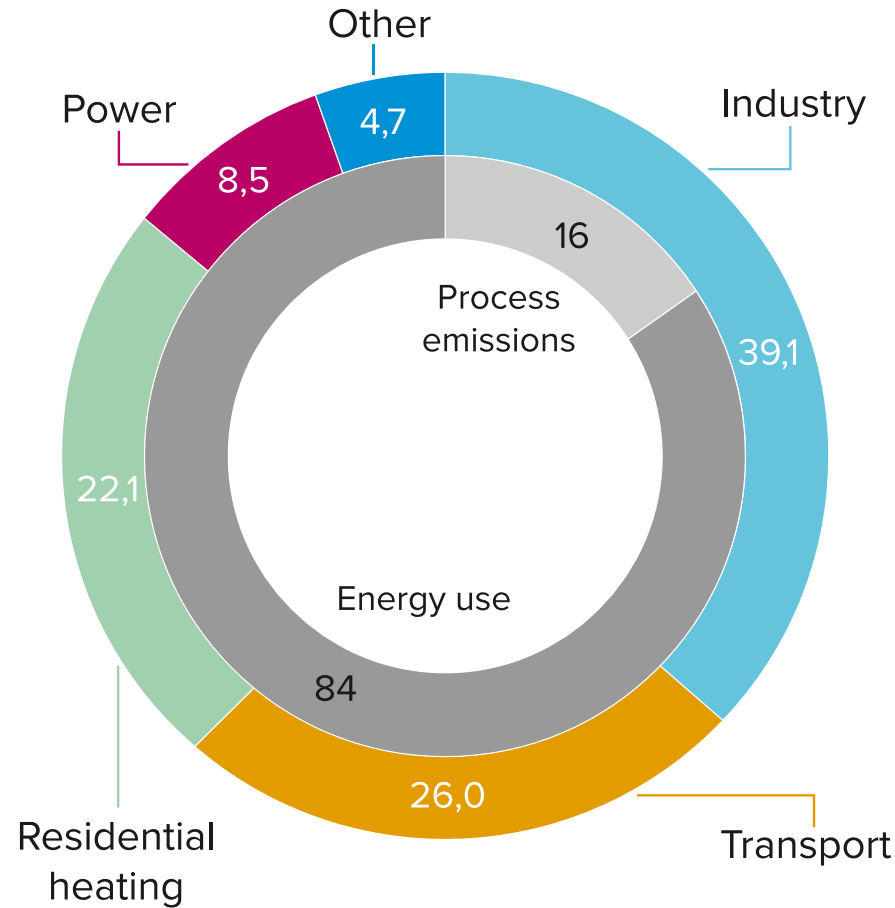
# Budget CO<sub>2</sub>

Budget CO<sub>2</sub> d'ici 2050 pour 80% de chances de rester sous 2°C



Note: Valeurs in Gt CO<sub>2</sub> eq

# Les émissions de CO<sub>2</sub> en Belgique viennent à 40% de l'industrie (énergie et procédés)





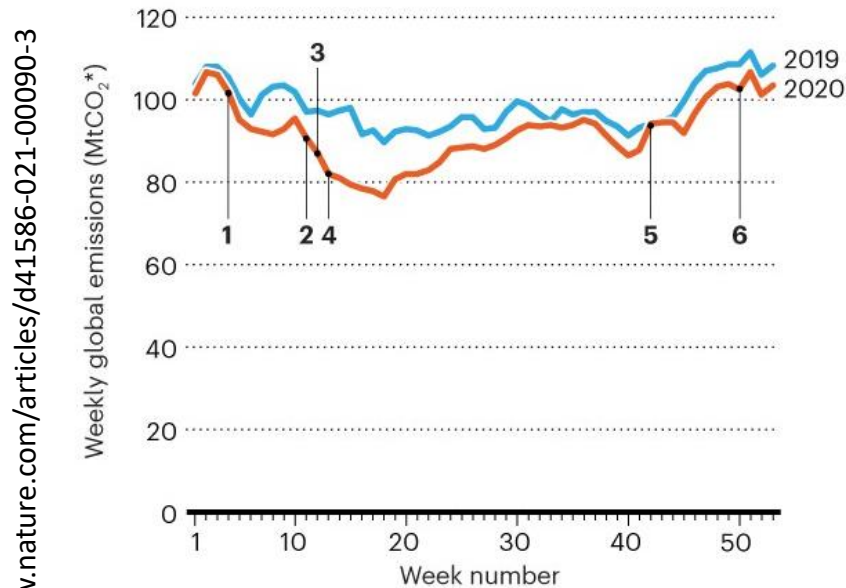
# Quelques données intéressantes...

- Emissions CO<sub>2</sub> en Be ~ 100 Mt/a
- Ce qui correspond à ~ 8.6 t/hab.a
  - => 24 kg/jour!!
- Source: Our world in data
  - Related reference: <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
  - <https://ourworldindata.org/co2/country/belgium>
  - <https://ourworldindata.org/co2-emissions>



# Impact de la pandémie

- -6.4% CO<sub>2</sub> en 1 an (2020), mais relancé depuis
- Objectifs de Paris : -7.6% chaque année d'ici 2030 pour rester en ligne avec -1.5°C!



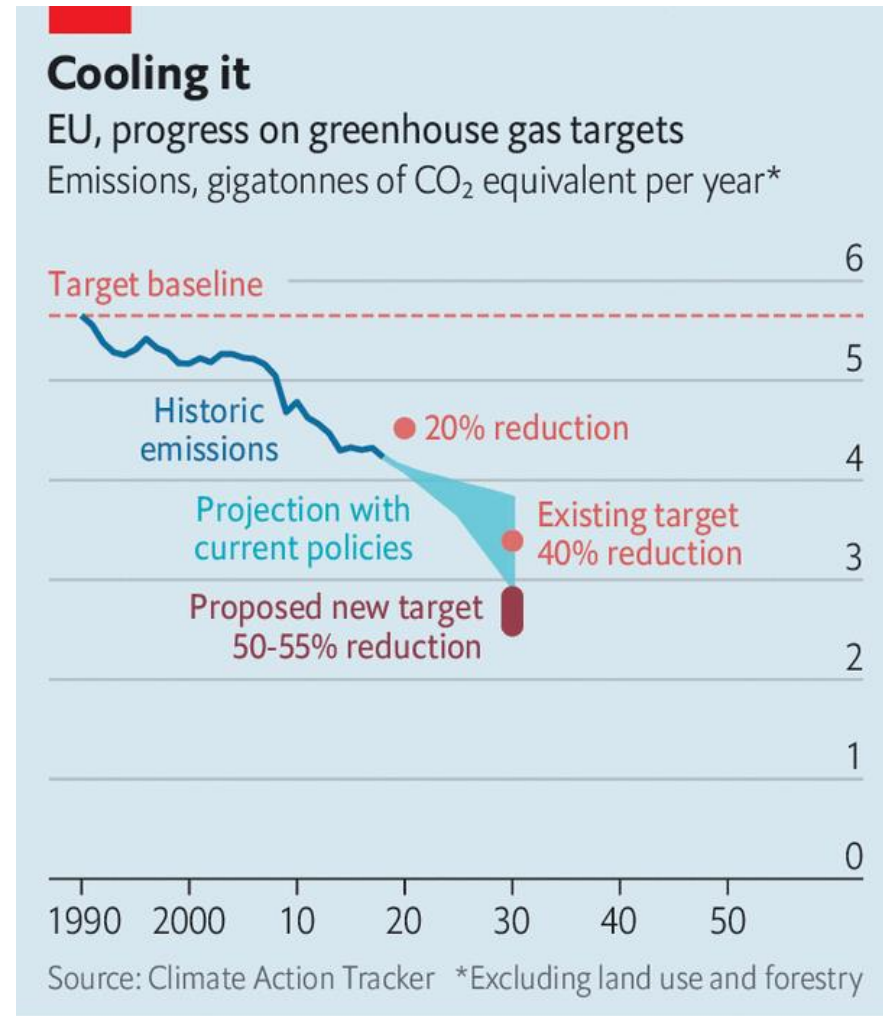
<https://www.nature.com/articles/d41586-021-00090-3>

1. China imposes lockdown on Wuhan, where coronavirus was first detected.
2. Slammed by COVID, Italy issues a national lockdown.

**=> Pas une tâche facile!**

# Réponses possibles: The green deal...

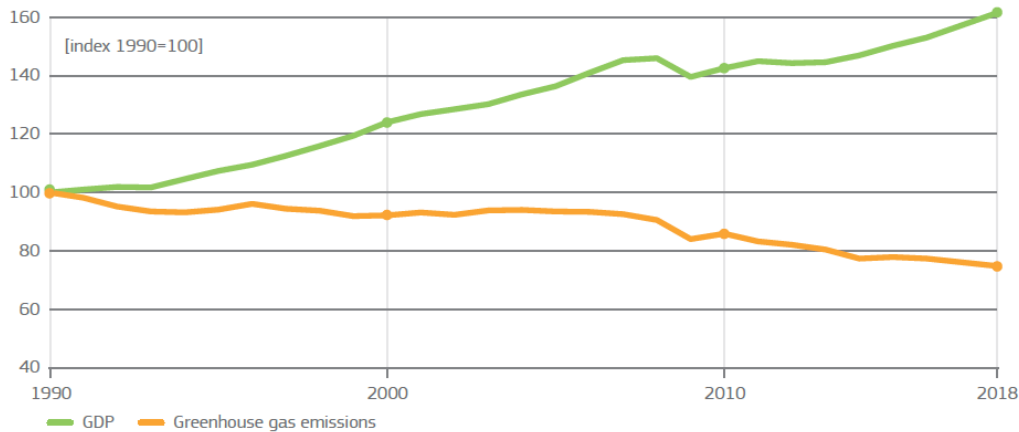
- Neutralité Carbone en 2050
- - 55% CO<sub>2</sub> pour 2030
- RED II: 32% Ren. En. 2030



The Economist

# Réussite européenne

Between 1990 and 2018, greenhouse gas emissions **decreased by 23%**, while the economy **grew by 61%**.



EU GDP  
up **61%**

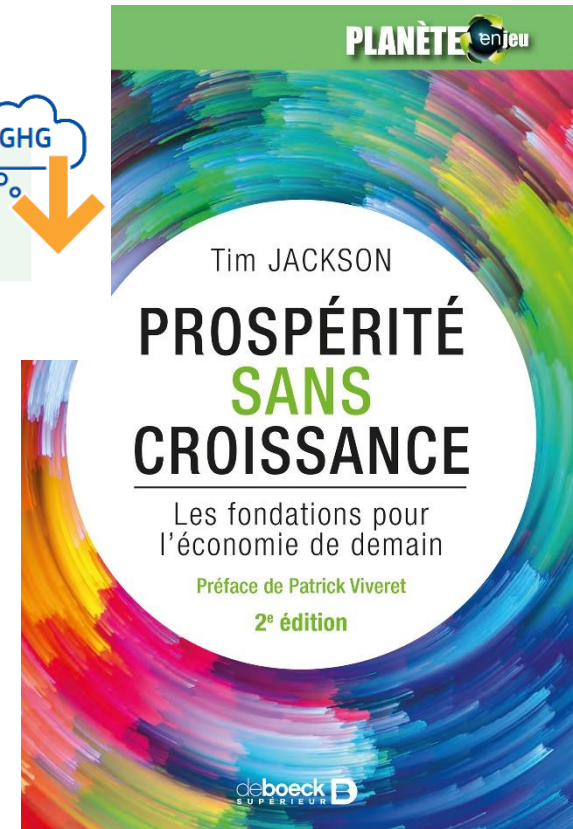
1990-2018

Greenhouse  
Gas Emissions  
down **23%**

1990-2018

Mais pour quelle raison?

Le découplage entre croissance et émissions est un sujet clé! Voir Tim Jackson, Prospérité sans croissance.



PEPs

CHEMICAL  
ENGINEERING

The EU's track record on climate action, EU Commission, 12/2019

12

## Le découplage est un sujet clé!

- Relation de Kaya, qui lie entre elles de nombreuses variables technico-économiques

$$CO_2 = \frac{CO_2}{MWh} \times \frac{MWh}{k\text{€}} \times \frac{k\text{€}}{\text{hab}} \times \text{hab}$$

Facteur d'émission

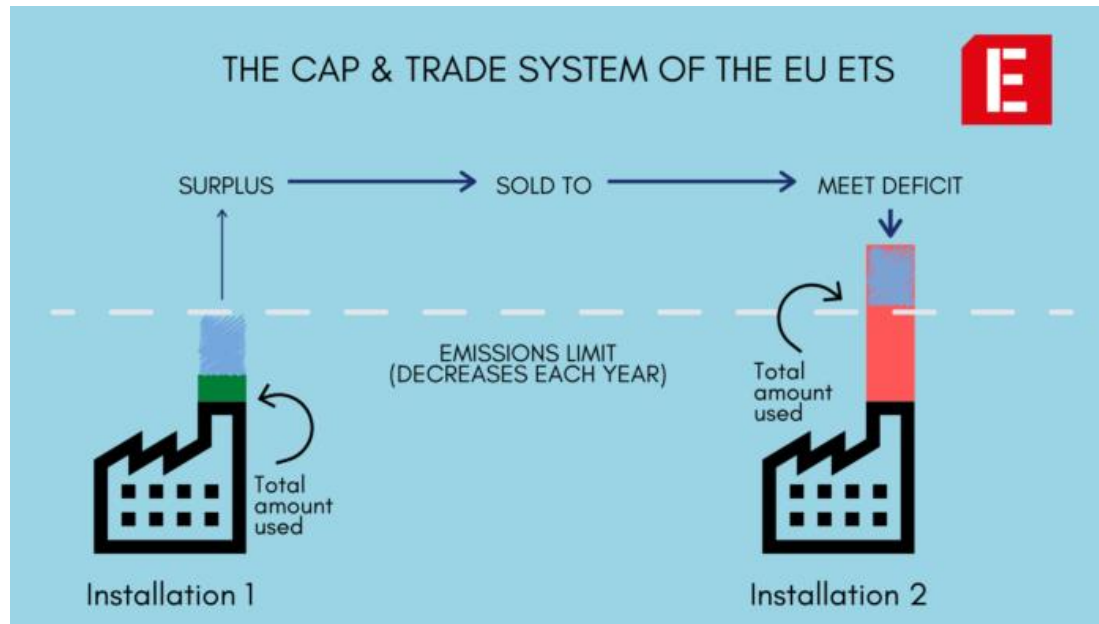
Intensité énergétique

PIB

Croissance démograph.

# Réponses possibles: Exemple UE

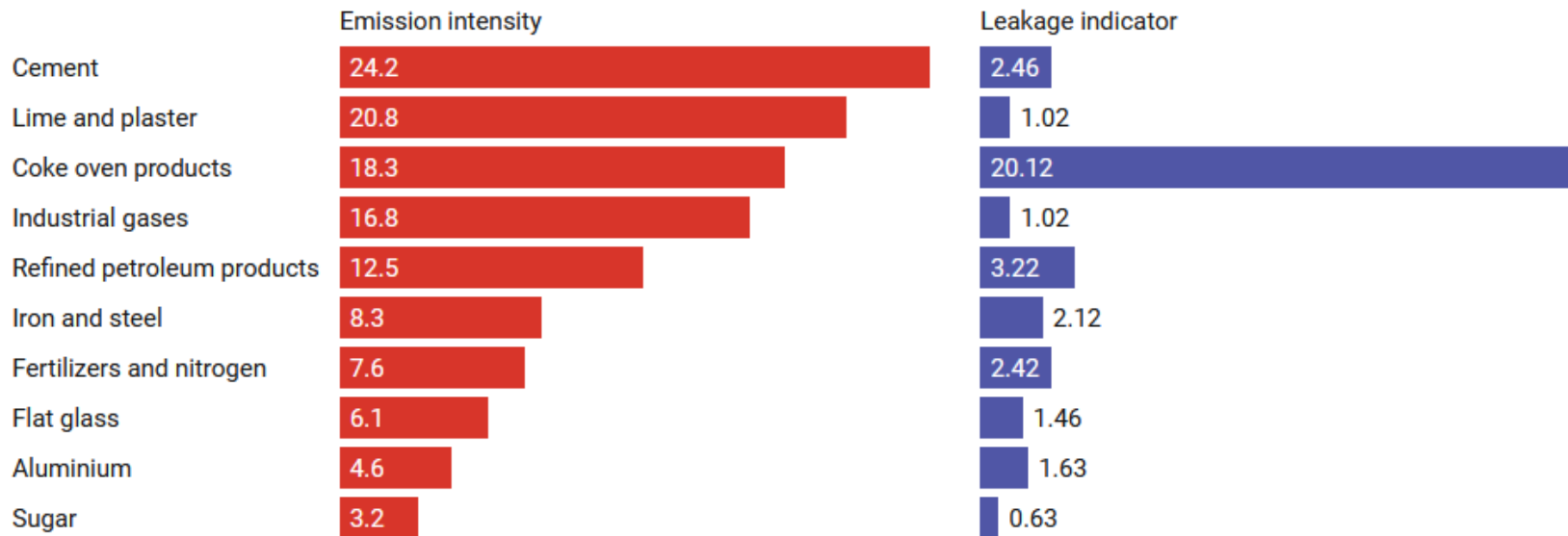
- Développement d'un marché du carbone: ETS



# Attention à la délocalisation!

## Top 10 EU economic sectors with the highest emissions

The industries with the highest emissions also tend to have a high risk of carbon leakage, meaning foreign imports might be substituted for domestic production to avoid a charge for emissions. An indicator over 0.2 is considered at risk for carbon leakage.



*Emission intensity is the volume of emissions per unit of GDP. Coke oven products include coke, which is made from coal and used for fuel in furnaces and to manufacture iron and steel.*

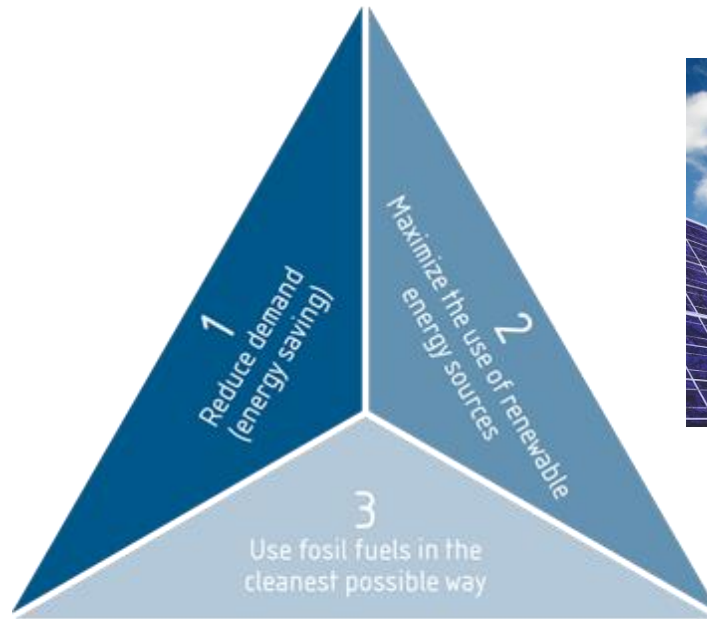
Chart: The Conversation/CC-BY-ND • Source: [European Commission](#) • [Get the data](#)

# Réponses possibles: Exemple UE

- Monitoring des émissions hors ETS
- Objectifs d'augmentation de l'efficacité énergétique
- Objectifs contraignants pour les émissions de CO<sub>2</sub> des autos et camions
- Législation pour atteindre 20% d'énergies renouvelables en 2020
- Support aux technologies de capture du CO<sub>2</sub>

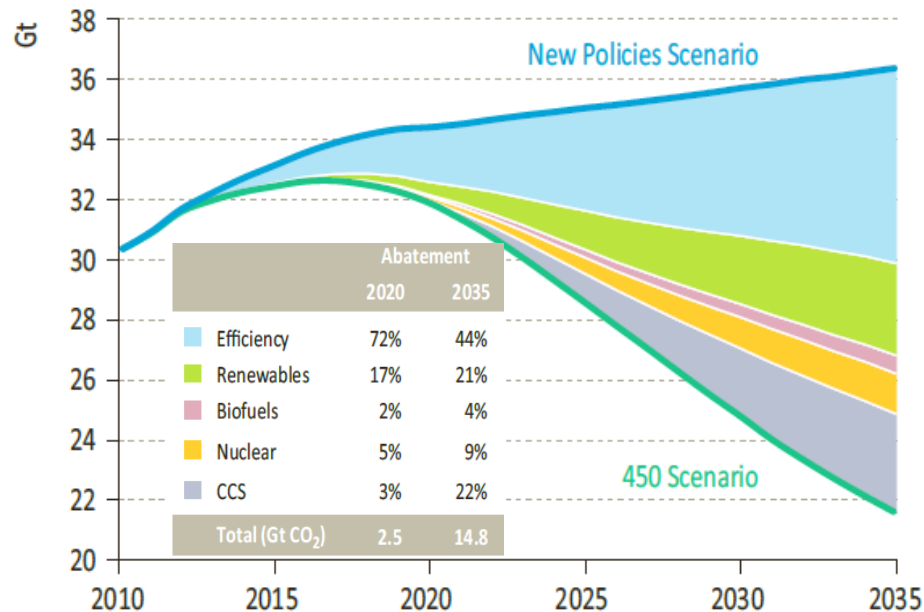


# Réponses possibles: TRIAS ENERGICA

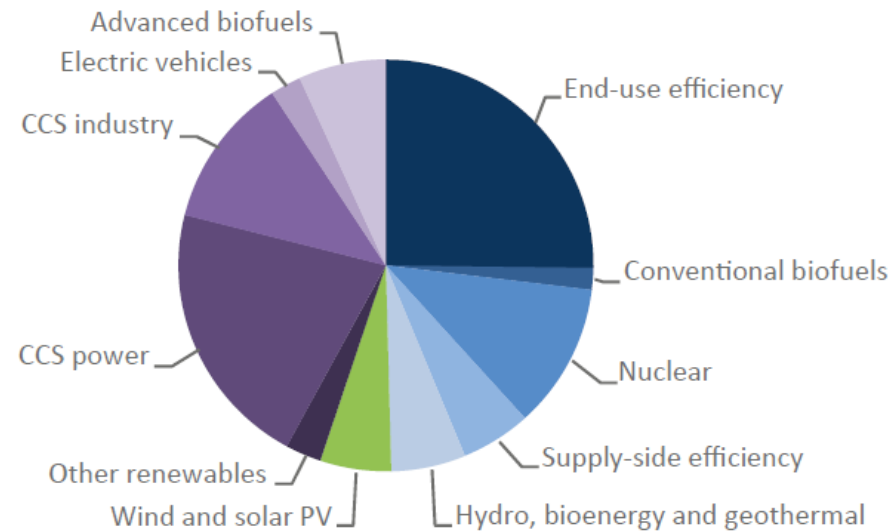


# Le CCUS fait partie de la solution

- CCUS = Carbon Capture, Utilization and Storage
  - Capture = mature, flexible, mais cher
  - Ré-utilisation: différentes maturités, en fonction de l'application



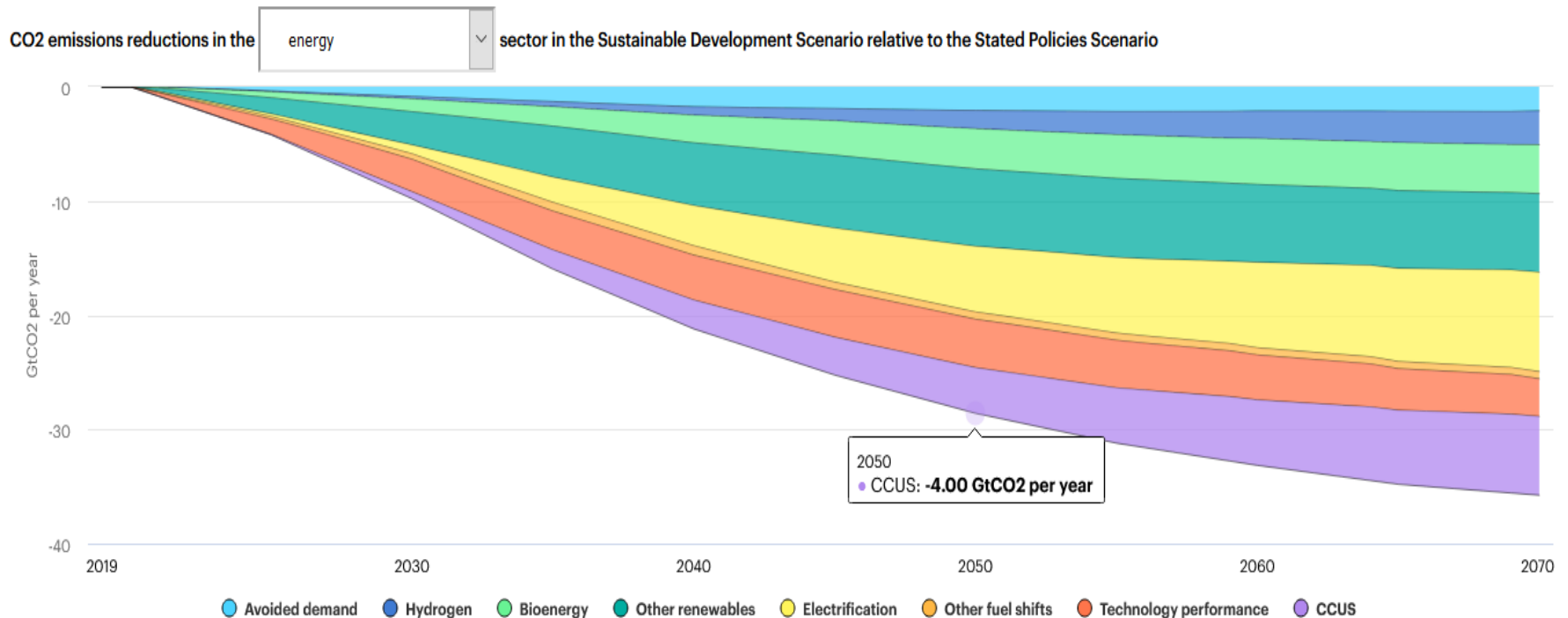
World CO<sub>2</sub> emissions abatement in the 450 Scenario (New Policies Scenario), IEA 2011, WEO2011.



World CO<sub>2</sub> emissions abatement in the 450 Scenario (Bridge Scenario 2015-2040), IEA 2015, WEO special report, Energy & Climate Change

# Le CCUS fait partie de la solution

- CCUS = Carbon Capture, Utilization and Storage



IEA. All rights reserved.

# Et en Belgique?

- « *Le gaz, qui englobe à la fois les gaz de synthèse (renouvelables), le biogaz et du gaz naturel résiduel brûlé dans des unités thermiques équipées d'un système de capture et de stockage du carbone, représente un tiers (32 % à 33 %) du futur mix électrique. »*
- « *De manière générale, dans les deux scénarios [étudiés], la demande totale d'électricité augmente significativement d'ici 2050, en comparaison avec les niveaux actuels : la demande est jusqu'à trois fois supérieure à celle de 2018. »*

Source: Federal Planning Bureau, Fuel for the future, Working paper 4-20, October 2020

---

## 2. Capture du CO<sub>2</sub> : Un filet à papillons?

---



# Une des réponses possibles...

- CCUS : Carbon Capture, Use and Storage
- Principe : récupérer le  $\text{CO}_2$  émis, le valoriser, et/ou le stocker de façon à ce qu'il ne contribue plus à l'effet de serre
- Pureté des sources varie entre 0.04% et 100%!
  - => Séparation de fluides
  - En général (cas énergie): mélange de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  (surtout),  $\text{O}_2$ , contaminants divers

# Ceci n'est pas une nouvelle technologie!

- Technologie exploitée depuis plus de 50 ans pour séparer le CO<sub>2</sub> de gaz industriels



Inde, 2006, production d'ammoniac  
Echelle: 2x450 tonnes par jour CO<sub>2</sub>



Algérie, 2017. Adoucissement du gaz naturel, qui contient parfois près de 80% de CO<sub>2</sub>!  
Echelle: 1400-2800 tonnes par jour CO<sub>2</sub>

- En 2016: ~ 250 Mtpa (dont 15% CCS, 50% engrais)

# Des avantages et désavantages!

Pour:

- Rapidement implémentable à grande échelle, pour différentes industries
- Dynamique rapide et contrôlable
- Rétrofit possible sur unités existantes

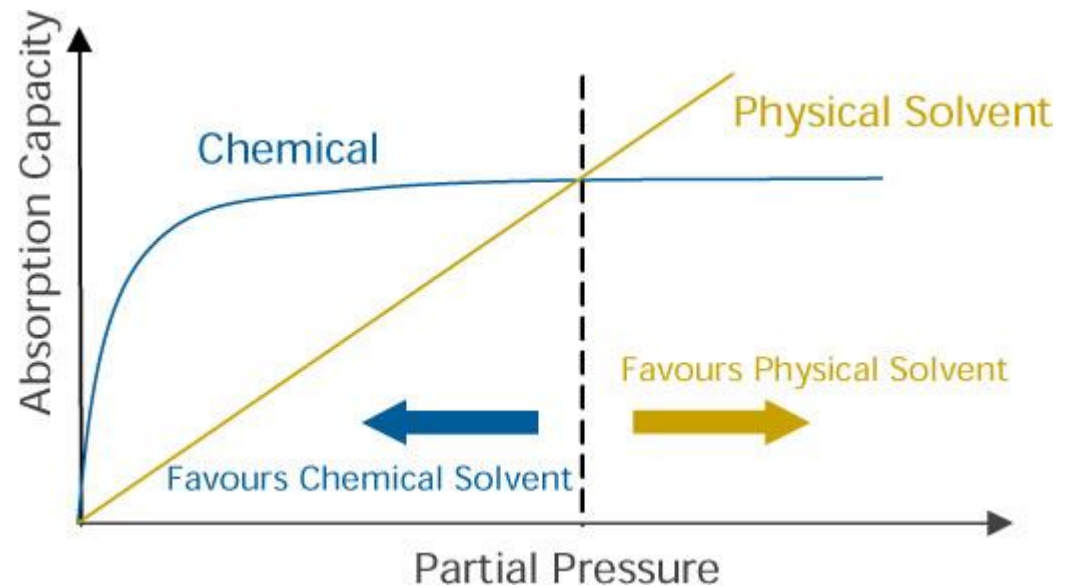
Contre:

- Investissement important
- Coûts opératoires importants (-10-40% rendement)
- Risque d'émissions secondaires



# Séparation du CO<sub>2</sub>: comment faire?

- Eviter les mélanges
- Absorption
  - Physique
  - Chimique
- Adsorption
- Membranes
- Separation cryogénique
- Autres...



# Différentes configurations existent

1. Procédés industriels (cimenteries, aciéries...)

=> CO<sub>2</sub> produit **hors combustion**

2. Brûler le combustible avec de l'oxygène pur

=> **Combustion Oxyfuel**

3. Capturer le CO<sub>2</sub> des fumées de combustion

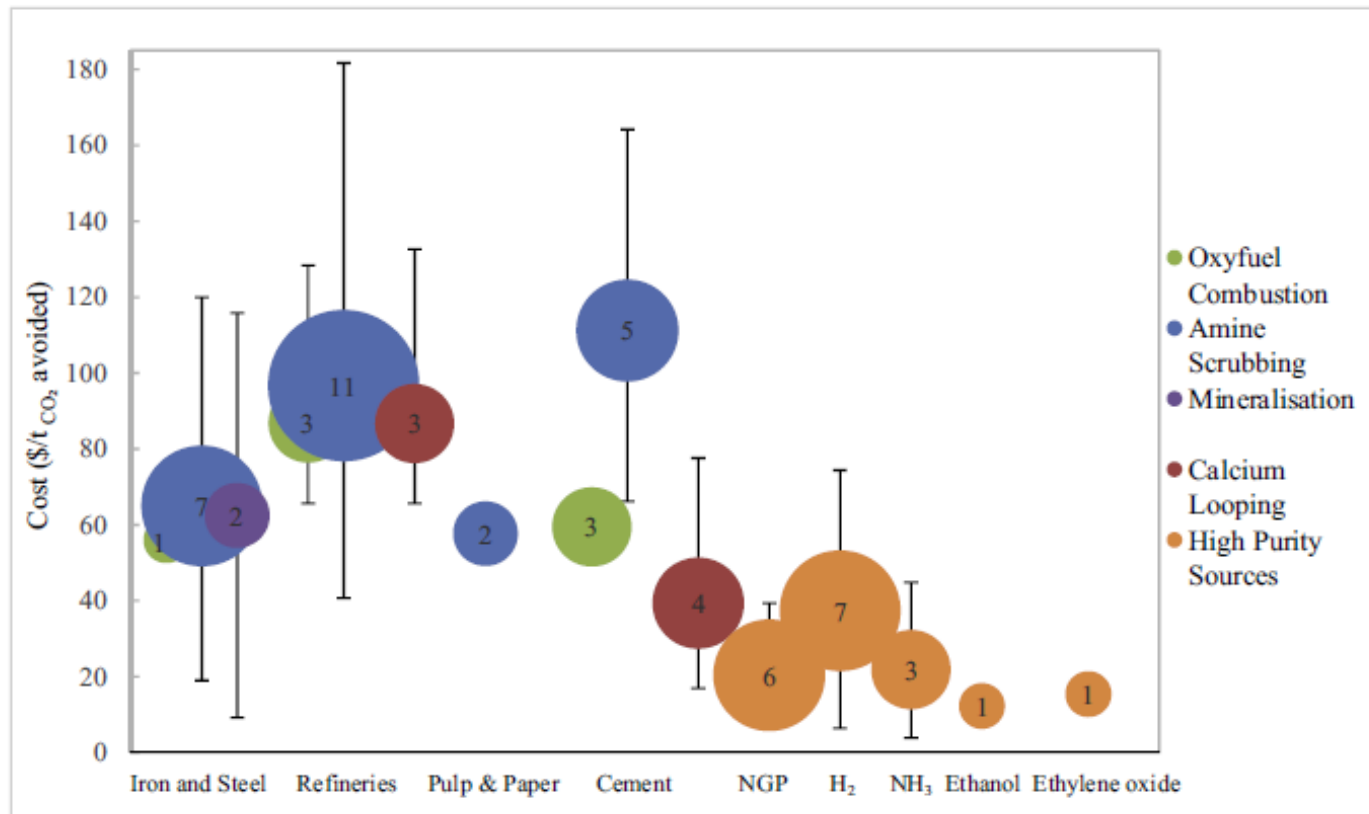
=> **Capture post-combustion**

4. Enlever le C du combustible par gazéification

=> **Capture pré-combustion**

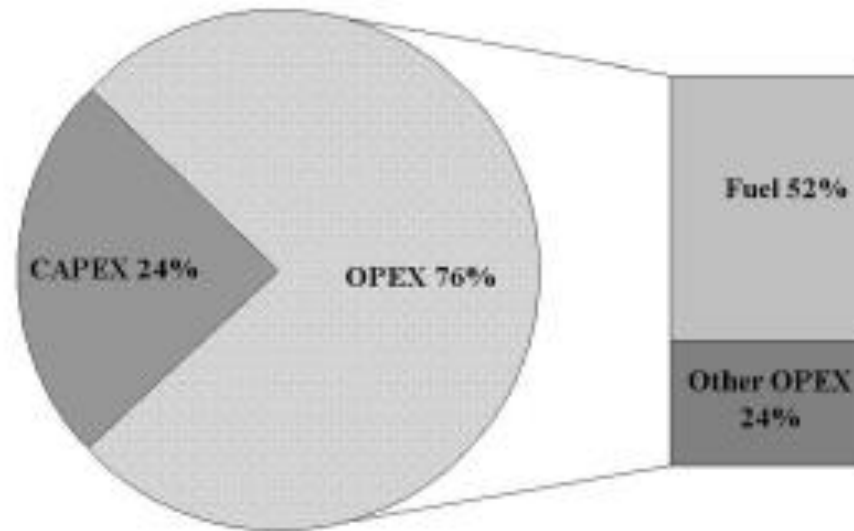
# Coût de la capture de CO<sub>2</sub>

- Dans l'industrie
  - => 30-40 €/t est la gamme visée



# Coût de la capture de CO<sub>2</sub>

- Coût principalement lié à la pénalité énergétique!



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

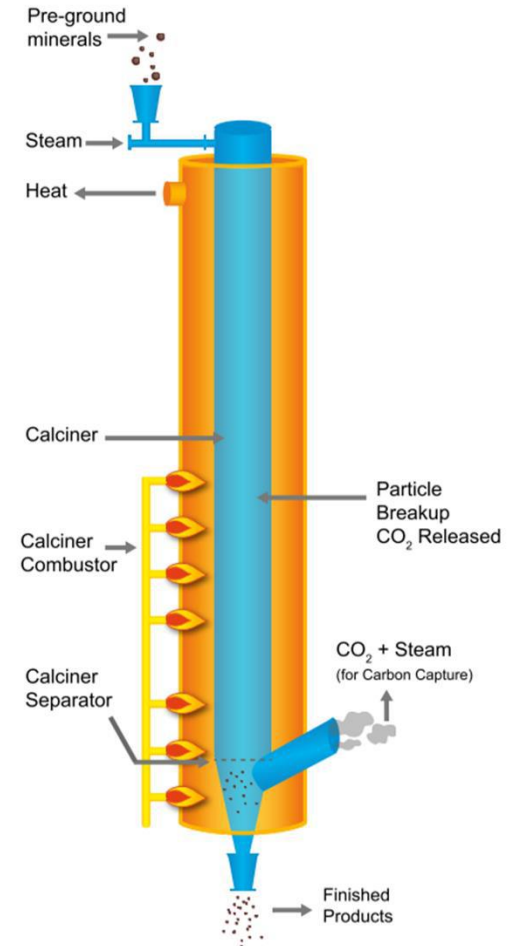
- Le développement technologique n'est pas un long fleuve tranquille!
  - Eg. Kemper County (Mississippi): 582 MWe, 9500 tCO<sub>2</sub>/j
  - Coût : de 2.9 à 7.5 milliards US\$ et maintenant à l'arrêt...



# Procédés industriels: exemple

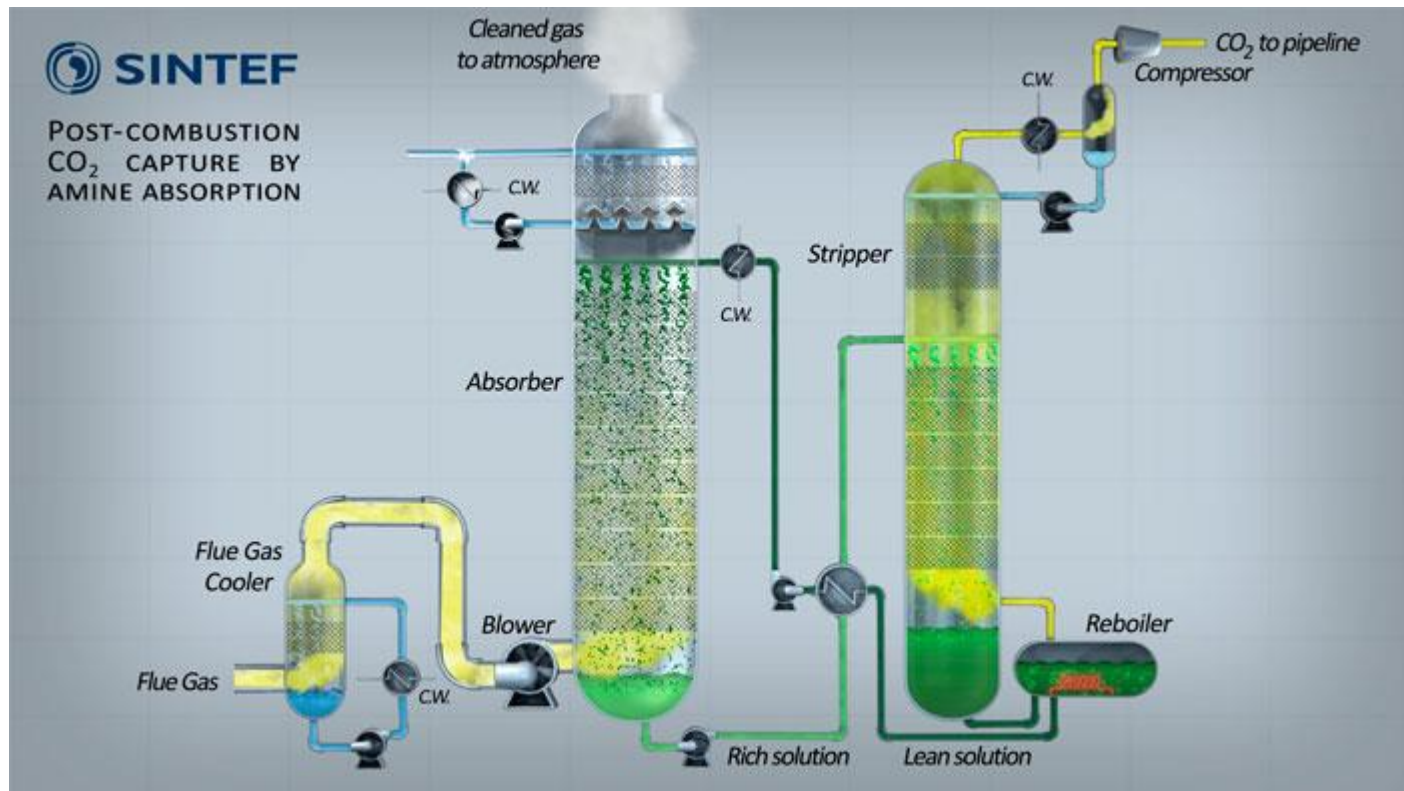
## 1. CO<sub>2</sub> ne résultant pas de la combustion

- Cimenterie
  - $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
  - Potentiel : -60% CO<sub>2</sub>
  - Haute température  $\rightarrow 1000^\circ\text{C}$
  
- Pilote à Lixhe (Visé)
- Fin de la construction: 2019
- Investissement: 21 M€



# Capture post-combustion

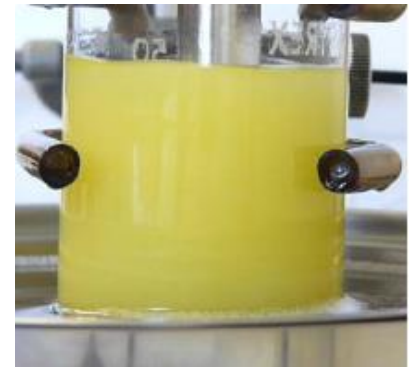
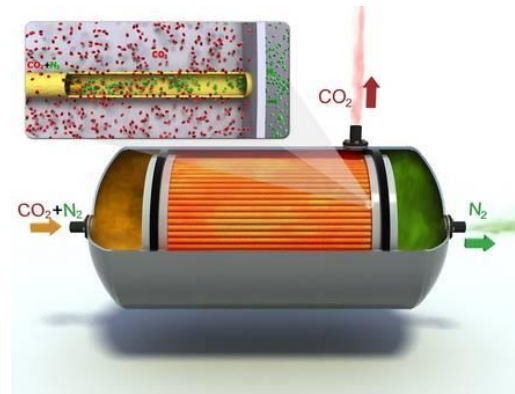
- Principale technologie: Boucle d'absorption-régénération avec des amines



# Capture post-combustion

## ■ Alternatives aux amines

- Solvants physiques
- Ammoniac, acides amines, liquides ioniques...
- Solvants démixants => separation de phase
- Membranes
- Adsorbants solides...





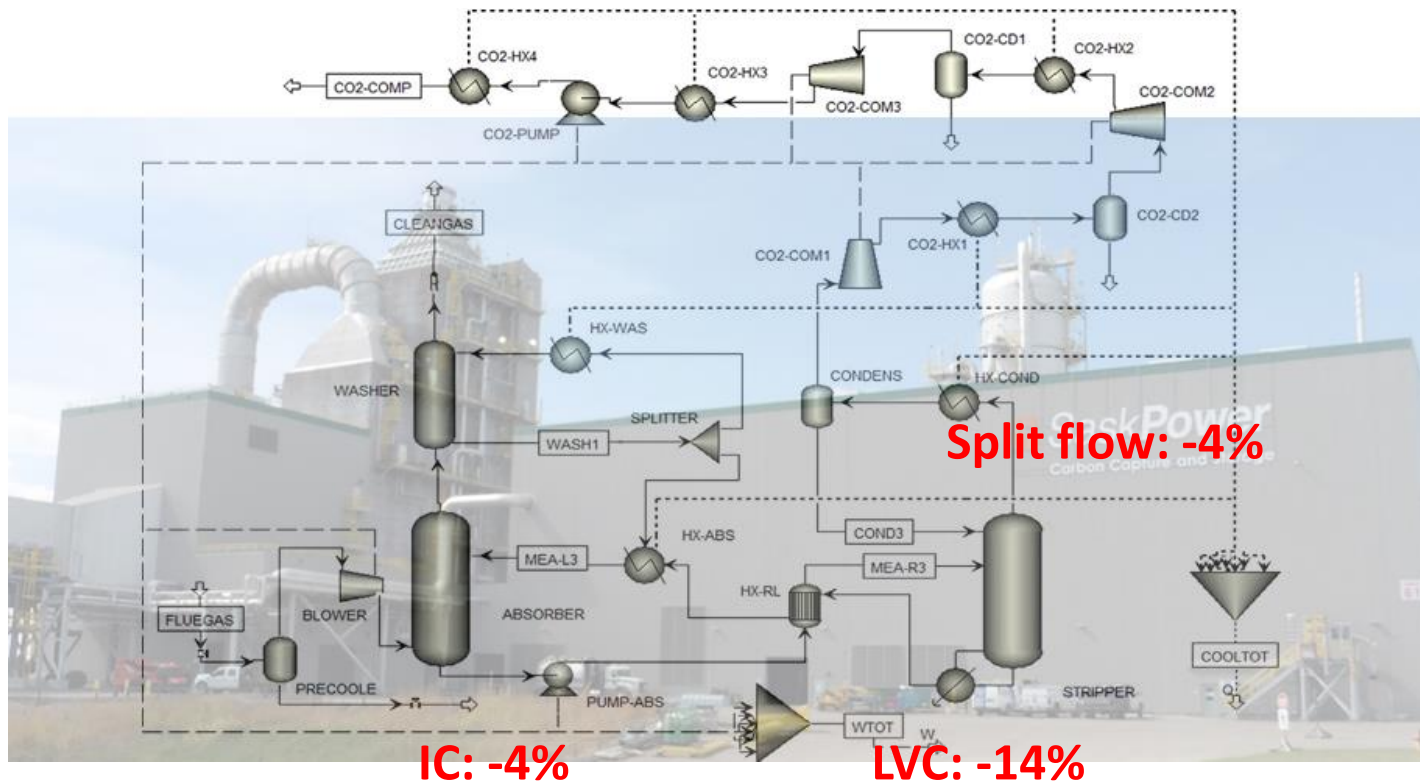
# Capture post-combustion

- Echelle commerciale atteinte récemment
  - Saskatchewan, Canada (2014)
    - Centrale charbon 160 MWe
    - 2700 tCO<sub>2</sub>/j => 180 Nm<sup>3</sup> gaz traité/s ; Solvant: 550 L/s
  - Petra Nova, Texas (2017)
    - Centrale charbon 240 MWe, 4400 tCO<sub>2</sub>/j, 1 milliard US\$



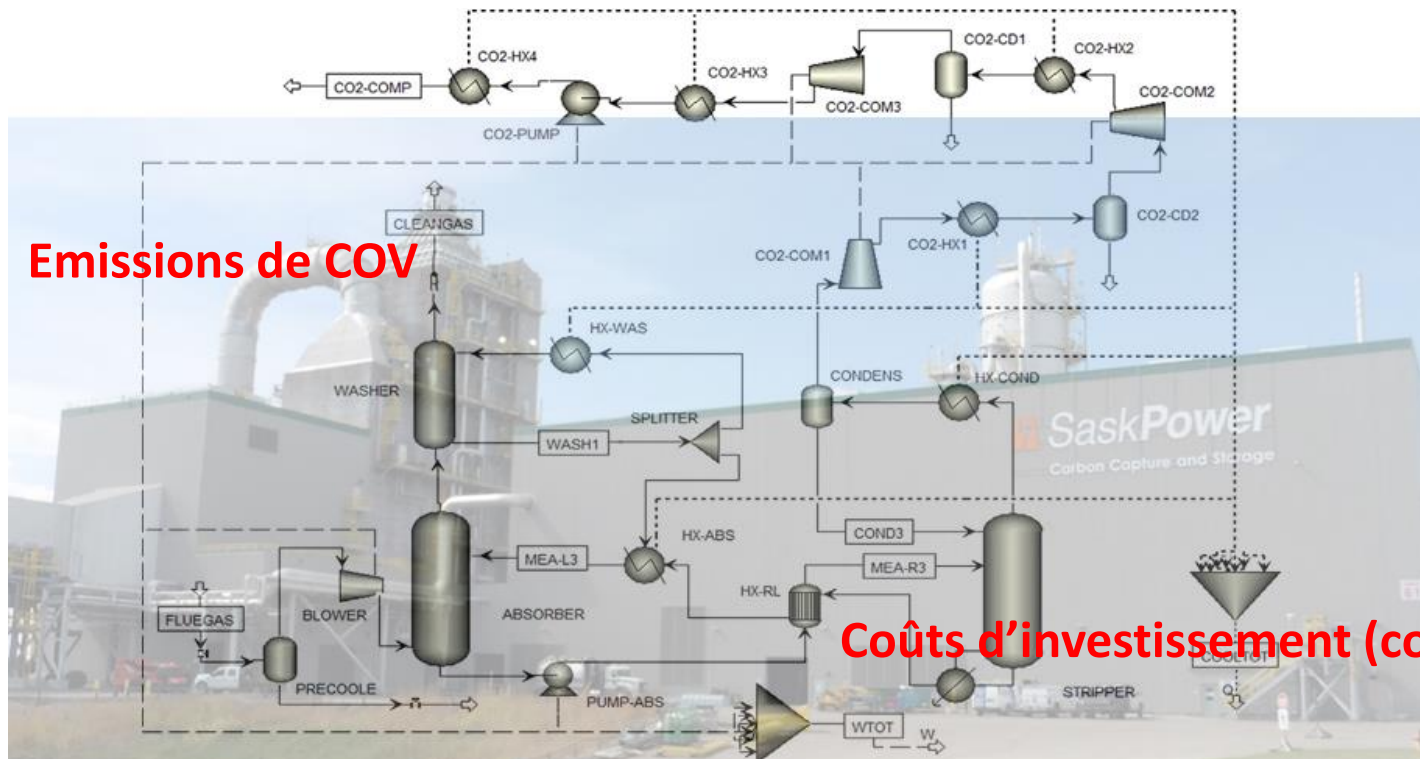
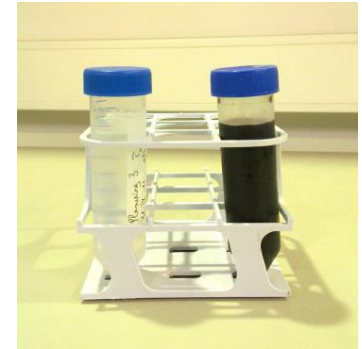
# Capture post-combustion

- Aparté: recherches à l'ULiège
  - Modélisation et optimisation énergétique des systèmes



# Capture post-combustion

- Aparté: recherches à l'ULiège
  - Stabilité des solvants chimiques



**Coûts opératoires: viscosité, propriétés modifiées...**

# PROCURA ETF: Outil d'aide à la décision

- Nous sommes convaincu que les technologies CCUS vont jouer un rôle important en Belgique dans les années à venir
- Mais il y a beaucoup de choix technologiques possibles, qui dépendent de nombreuses variables:
  - Coût, Maturité technique, empreinte environnementale...
  - Pureté du CO<sub>2</sub> ; présence de contaminants
  - ...
- Dans le projet PROCURA, nous développons un outil d'aide à la décision pour aider les émetteurs locaux de CO<sub>2</sub> dans leur choix :
  - Outil bientôt en libre accès (v2.0)
  - V1.0 sur base de la littérature, v2.0 inclura des résultats de nos modèles de procédés
  - L'outil sera démontré sur base de cas d'étude locaux

# PROCURA ETF: Decision support tool

Goal:

The appropriate CO<sub>2</sub> capturing method

Criteria:

Engineering

Economics

Environment

KPI:

TRL

Capture rate

CO<sub>2</sub> avoided cost

CAPEX/OPEX

LCA

Safely/Acceptance

Technology:

Absorption

Adsorption

Membrane

Cryogenic

Looping

# PROCURA Decision Support Tool

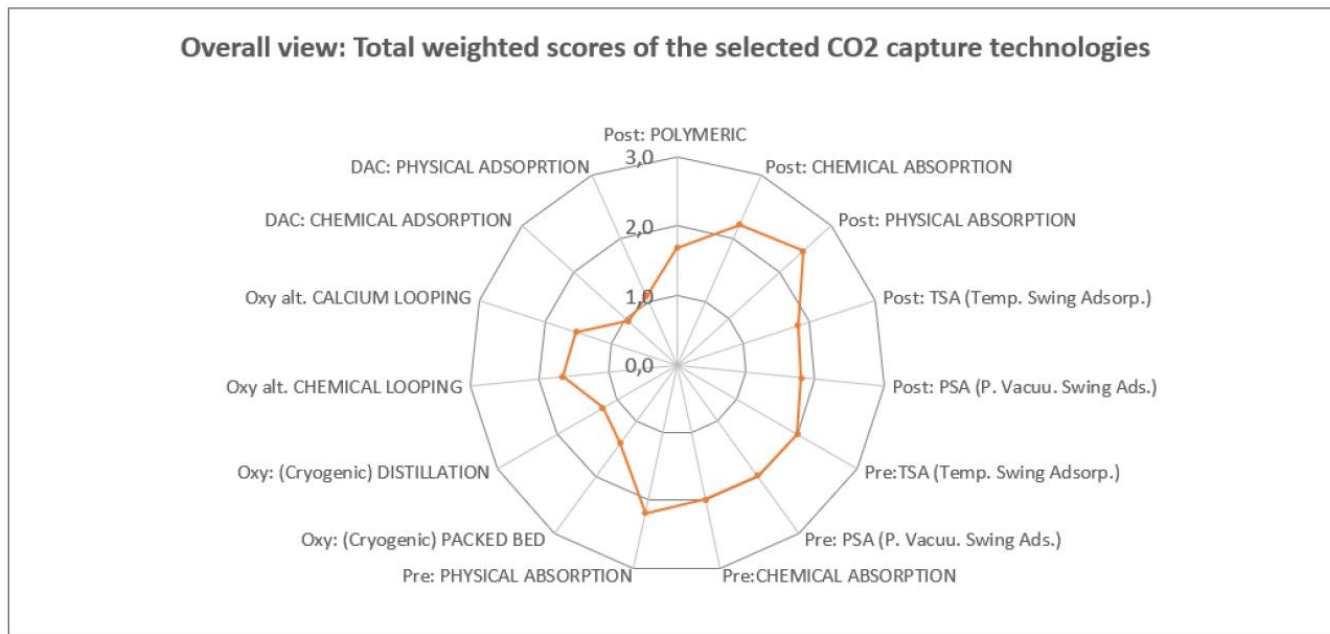
## ■ Exemple de résultats

\*Please select combustion methods/technology options you wish to display

Post-combustion    Pre-combustion    Oxy-combustion    DAC

\*Please select a chart type to display

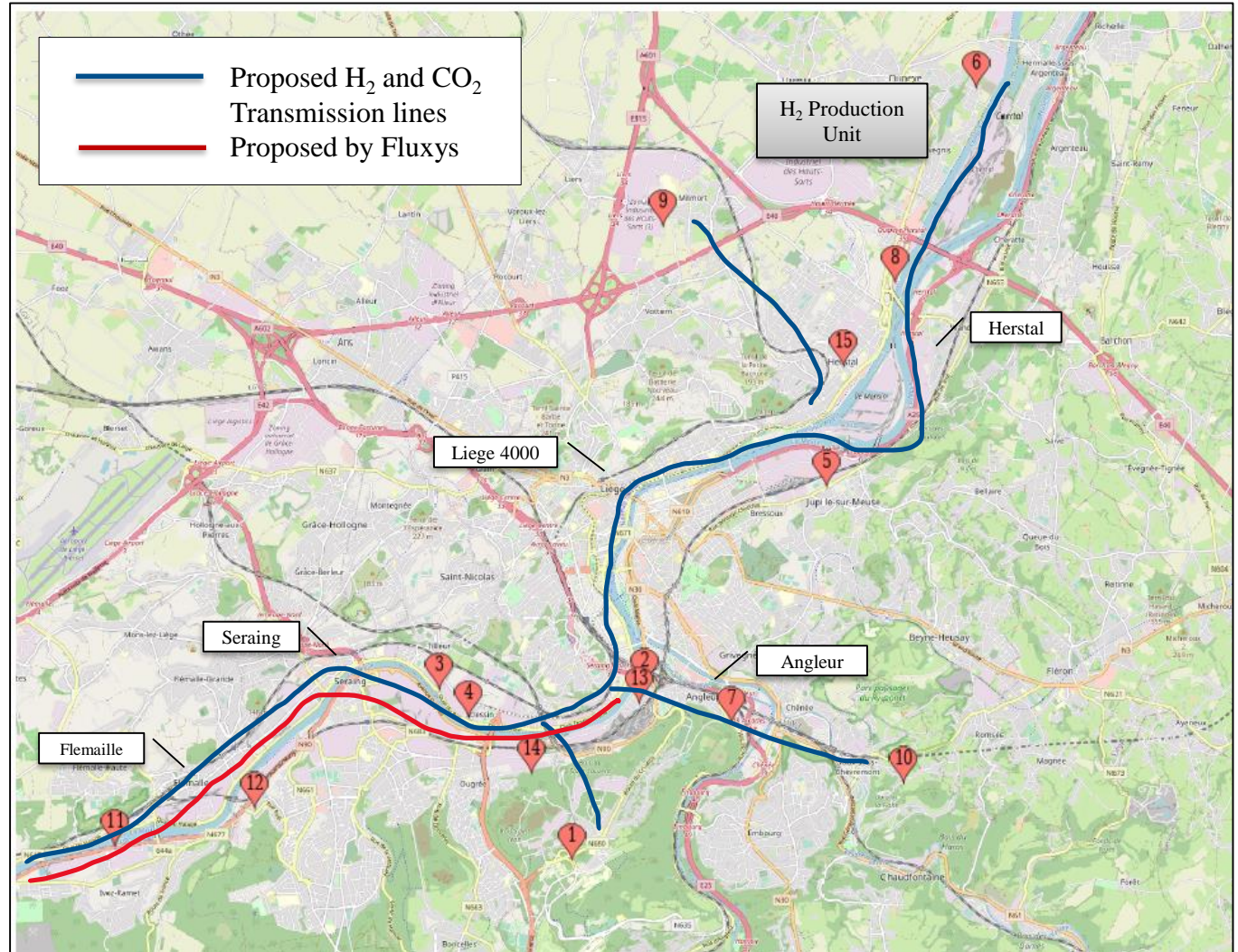
 



If you are **NOT** satisfied with the recommendations, kindly go back to the AHP step by clicking the '**Back to AHP**' button below.  
If you wish to look at the appendix of this analysis, please click '**Appendix**' button at the end of this page.

# Cas d'étude – Liens avec projet TRILATE

1. ULiège
2. EDF Luminus power plant
3. Cockerill – Ferblatil  
Tilleur
4. Fonderies Marichal ketin
5. InBev Brewing
6. TI automotive
7. Everzinc SA
8. Intradel – Waste treatment
9. Safran Aero Boosters
10. Maggoteaux Siderurgy
11. Electrabel Engie
12. Luminus Seraing
13. KLK Tensachem  
Chemicals
14. Agriphar Agrochems
15. FN Herstal Firearms

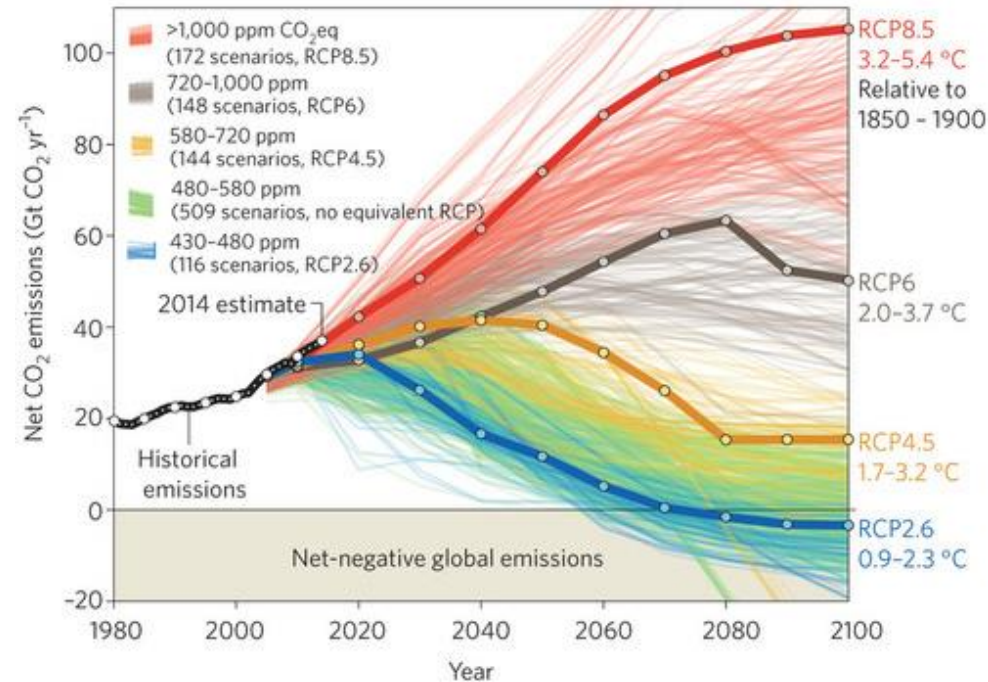


# Negative Emissions Technologies

- Emissions négatives de CO<sub>2</sub>
  - Biomasse + CCS
  - Séquestration du carbone dans les sols
  - Direct air capture: capture directe du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

Technologies avec un intérêt croissant...

Mais qui ne doivent pas nous empêcher de diminuer les émissions par ailleurs!!



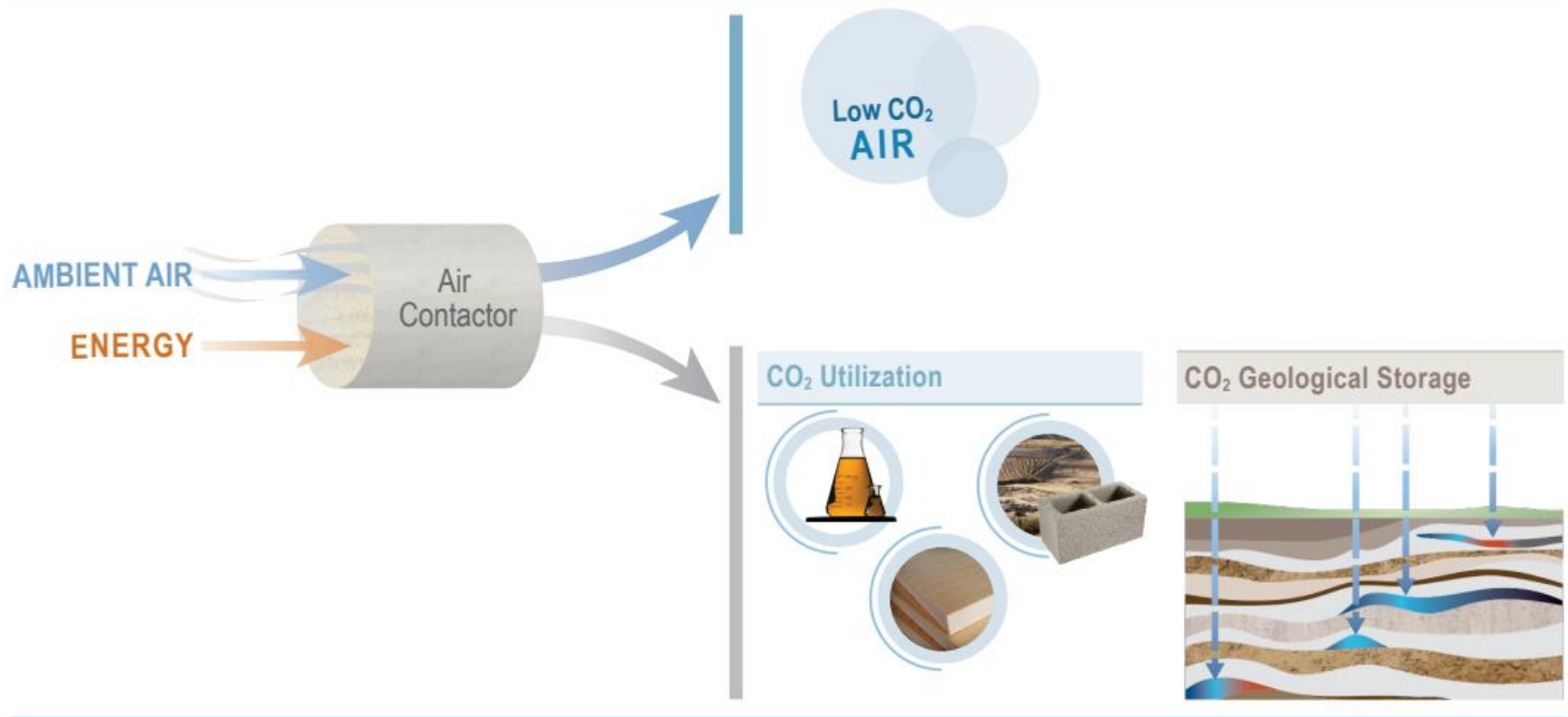


# Direct air capture: motivations

- Compenser les émissions « hard-to-abate » (pas que CO<sub>2</sub>)
  - 20 à 40% des émissions actuelles
  - Aviation, marine, matières premières, agriculture, fuite potentielle des sites de stockage
- Clôre la boucle des carburants synthétiques
  - Pas de neutralité carbone sans capture de CO<sub>2</sub>!
- Réduire le besoin de transporter le CO<sub>2</sub>
  - Possible de capturer le CO<sub>2</sub> partout, y compris près des sites de stockage
  - Pas d'effet Nimby
- Considérations à long terme : enlever le C de l'atmosphère
- Technologie de dernier recours (backstop) pour lutter contre les changements climatiques

# Direct Air Capture (DAC)

- DAC: separation (physique ou chimique) et concentration du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (415 ppm)

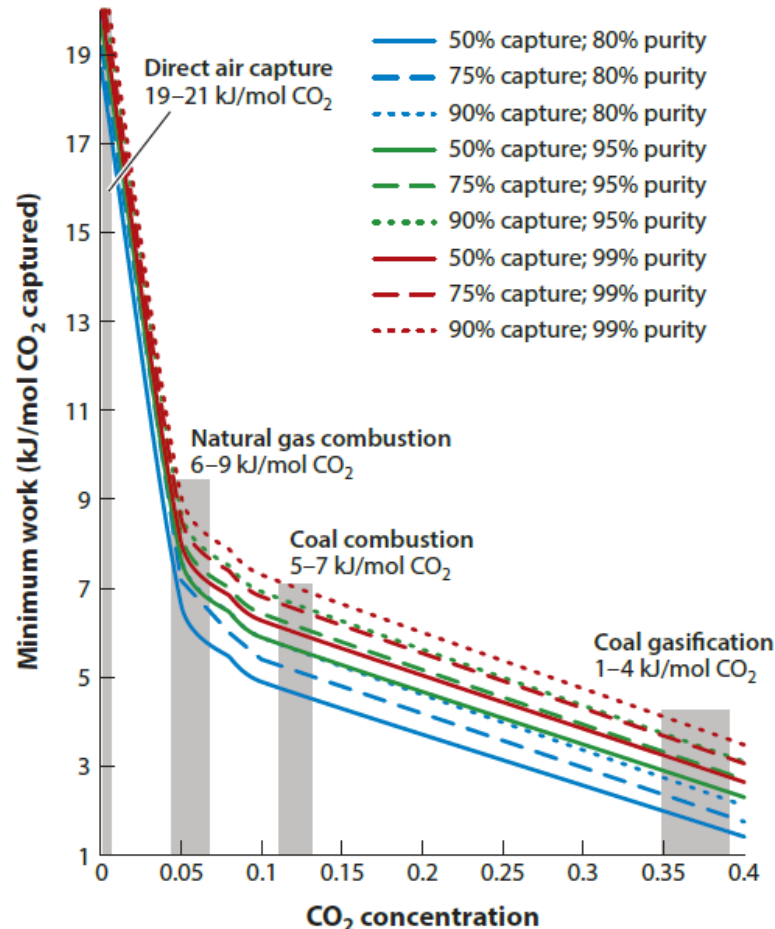


# Désavantages du DAC

- Thermodynamique!
- DAC nécessite plus d'énergie
  - En particulier pour mettre l'air en mouvement
  - L'énergie pour régénérer l'agent de capture est similaire à la capture sur des fumées concentrées
- DAC est donc plus cher!
  - Climeworks: ~ 600 \$/tCO<sub>2</sub>, mais la route pour atteindre 200 \$/t est en vue
  - Carbon Engineering: objectif à 94 \$/t

# Néanmoins...

- Le travail thermodynamique n'est pas proportionnel à la dilution!



Minimum work required for CO<sub>2</sub> capture based upon initial gas concentration, percent capture, and final purity of CO<sub>2</sub>.  
DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-060713-040100

# Direct air capture

- Un business en croissance...



## Exclusive: Carbon Engineering CEO discusses recent funding for DAC technology

By Molly Burgess | 24 April 2019



Last month, Carbon Engineering, a Canadian clean energy company announced the completion of an equity financing round of \$68m, marking the largest private investment made into a Direct Air Capture (DAC) company to date.



PEPs

CHEMICAL  
ENGINEERING

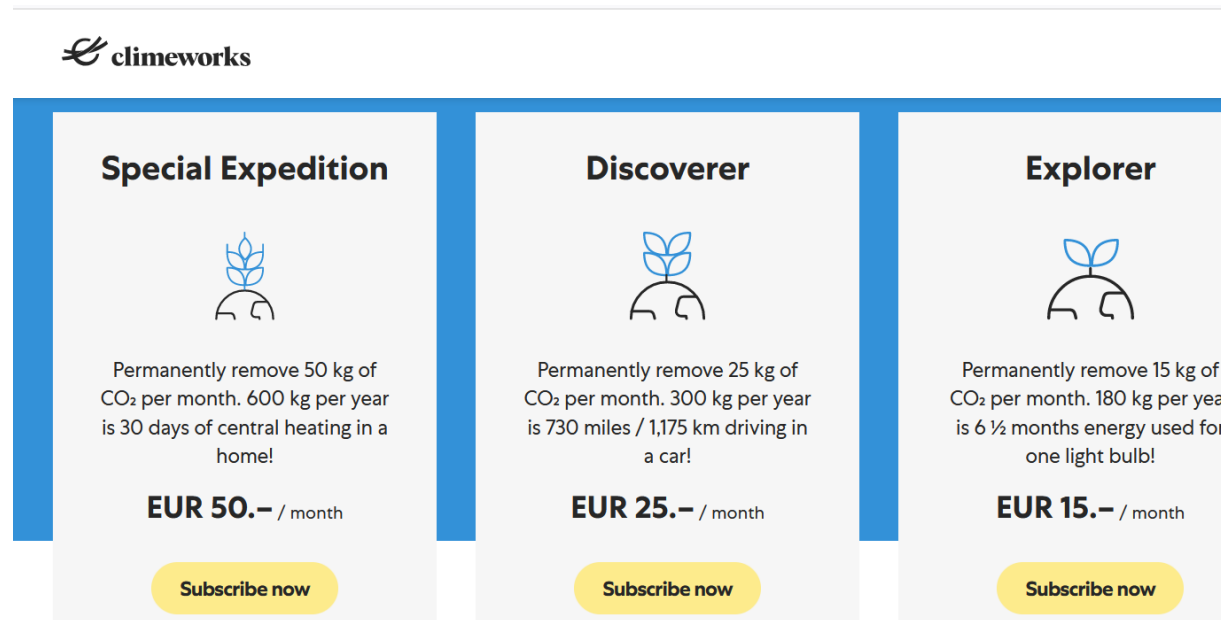
# DAC technologies today

- Orca project, Islande – world's largest, 08/2021
  - Climeworks (Swiss start-up)
  - 4000 tpa CO<sub>2</sub> ~ Emissions of 250 US citizens
  - CAPEX: ~15 M€
  - Geothermal energy
  - CO<sub>2</sub> liquefaction
  - Underground mineralization



# Qui doit payer pour le DAC?

- ORCA et Climeworks vendent des « CO<sub>2</sub> allowances » à ~1200 \$/ton
- Le coût d'un vol UE-US (côte ouest) augmenterait de ~3000 \$ (2.5 t/passager)




The screenshot displays the Climeworks website with three subscription options:

- Special Expedition:** Permanently remove 50 kg of CO<sub>2</sub> per month. 600 kg per year is 30 days of central heating in a home! **EUR 50.- / month**
- Discoverer:** Permanently remove 25 kg of CO<sub>2</sub> per month. 300 kg per year is 730 miles / 1,175 km driving in a car! **EUR 25.- / month**
- Explorer:** Permanently remove 15 kg of CO<sub>2</sub> per month. 180 kg per year is 6 ½ months energy used for one light bulb! **EUR 15.- / month**

Each plan includes a "Subscribe now" button.

# « Tragedy of the commons »

- Qui doit payer pour la qualité de l'air (et la diminution de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère)? C'est un bien public!
- Une solution serait d'établir des droits de propriété pour cette ressource naturelle
  - Principe du marché ETS?



### What science says

- Climate change is **proportional** to historically accumulated emissions. IPCC: "likely 0.27-0.63 °C/TtCO<sub>2</sub>".
- It therefore gets worse the longer we wait, but it is **not becoming too late** for policy. IPCC states clearly that we are not close to global tipping points that could cause uncontrollable climate change.
- Policy required for transition to climate neutrality **not complicated** in principle.
- Policy must fix the **fundamental problem**. The atmosphere's capacity to absorb CO<sub>2</sub> is a natural resource in limited supply that has been and still largely is free to use in unlimited quantities. *Tragedy of the commons*.
- Solution is to establish **property rights** to this natural resource – tradable emission allowances.

International Economic Studies  
Stockholm University



# Marché du CO<sub>2</sub>

- European Emissions Trading System (ETS)
- Novembre 2019: Le prix du CO<sub>2</sub> atteint ~ 25 €/t!



# Marché du CO<sub>2</sub>

## ■ La Libre Belgique, 04/05/21

- A noter qu'on voit des fumées de tours de refroidissement = de l'eau!

**Les droits d'émission pour une tonne de CO<sub>2</sub> dépassent les 50 euros en Europe, une première**

Conjoncture

La Libre Eco avec Belga

Publié le 04-05-21 à 13h17 - Mis à jour le 04-05-21 à 14h03

**Les droits d'émission de CO<sub>2</sub> dépassent les 50 euros pour la première fois en Europe.**



# Marché du CO<sub>2</sub>

- Décembre 2021: 65 €/t!



<https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/>

# Marché du CO<sub>2</sub>

- Février 2022: jusqu'à 97 €/t!



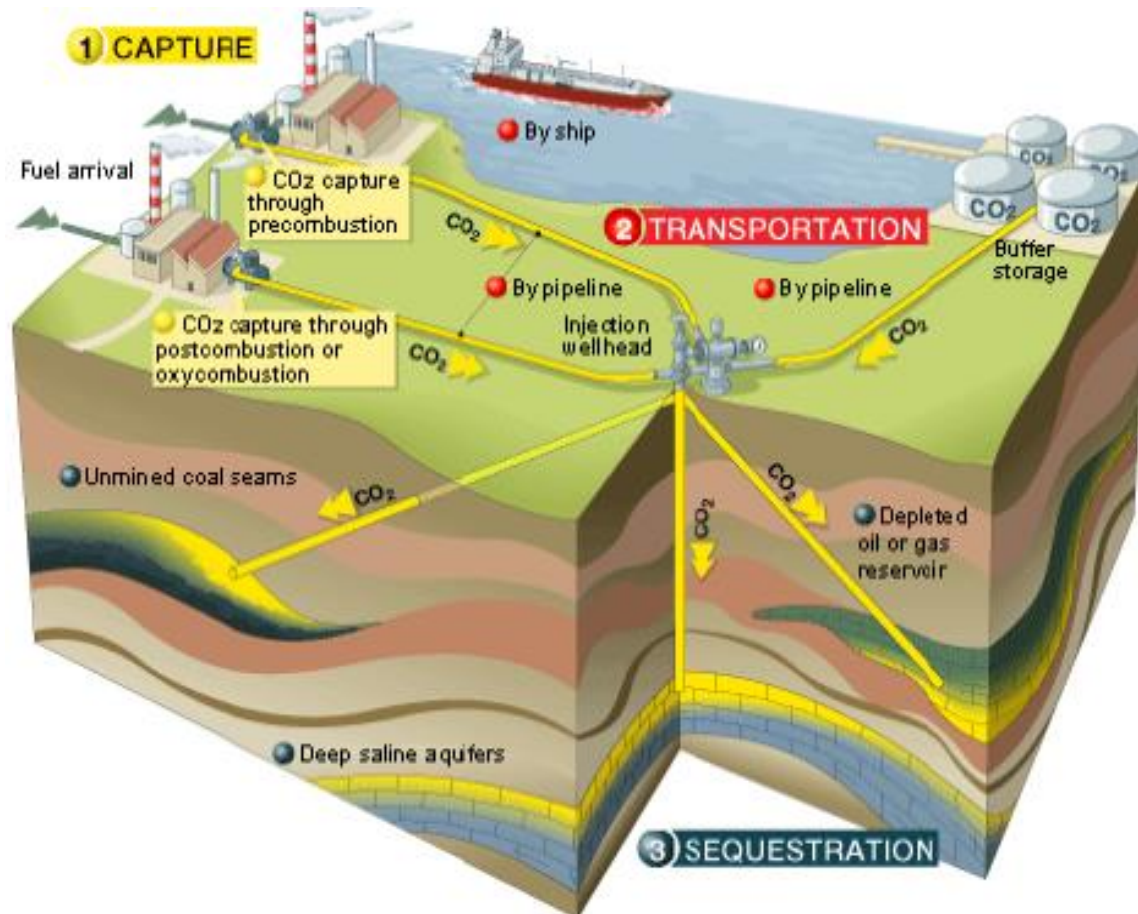
---

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

---

# Une chaîne logistique complète...

Capture – Transport – Ré-utilisation – Stockage



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

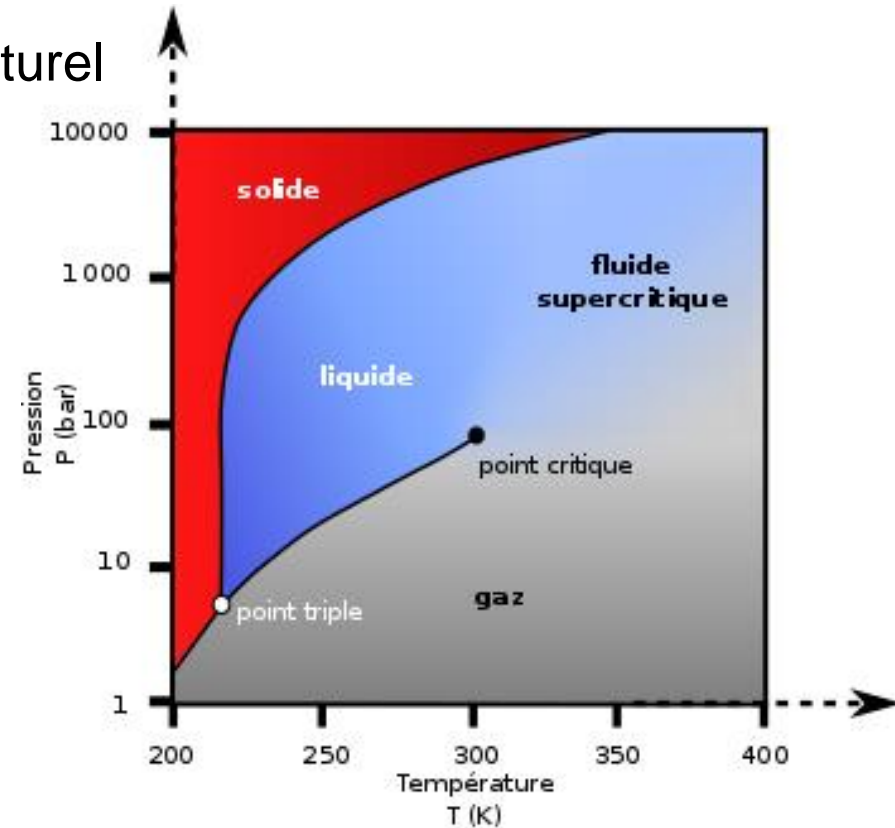


## ■ Par bateau:

- ❑ 1000 tCO<sub>2</sub>/bateau, ~ 100 000 tonnes transportées par an
- ❑ CO<sub>2</sub> liquide (-30°C, 15 bar)
- ❑ Technologie similaire au gaz naturel

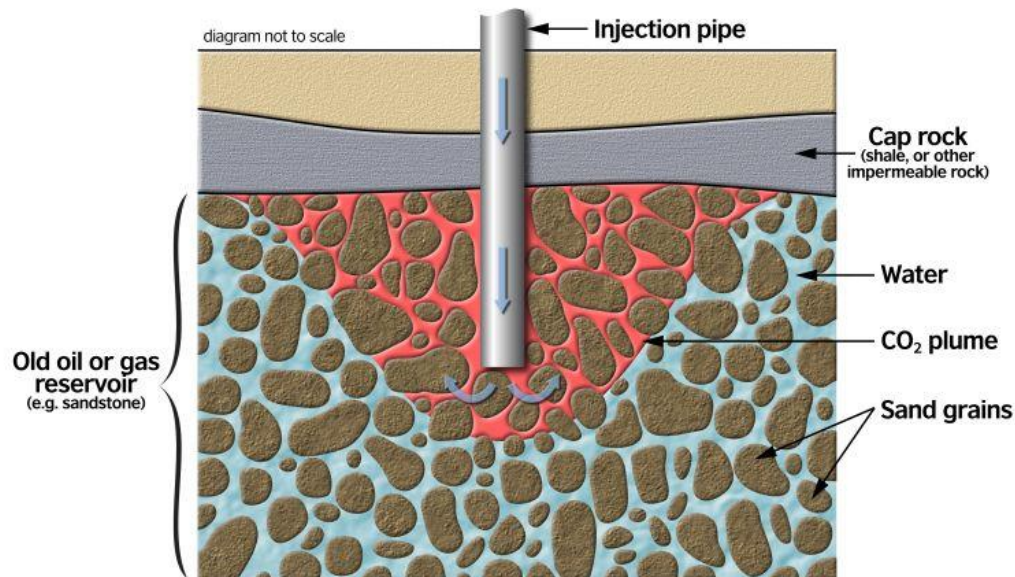
## ■ Par pipeline:

- ❑ CO<sub>2</sub> Supercritique (100 bar)
- ❑ > 6500 km de pipelines depuis les années 70 (EOR)



# Sites de stockage

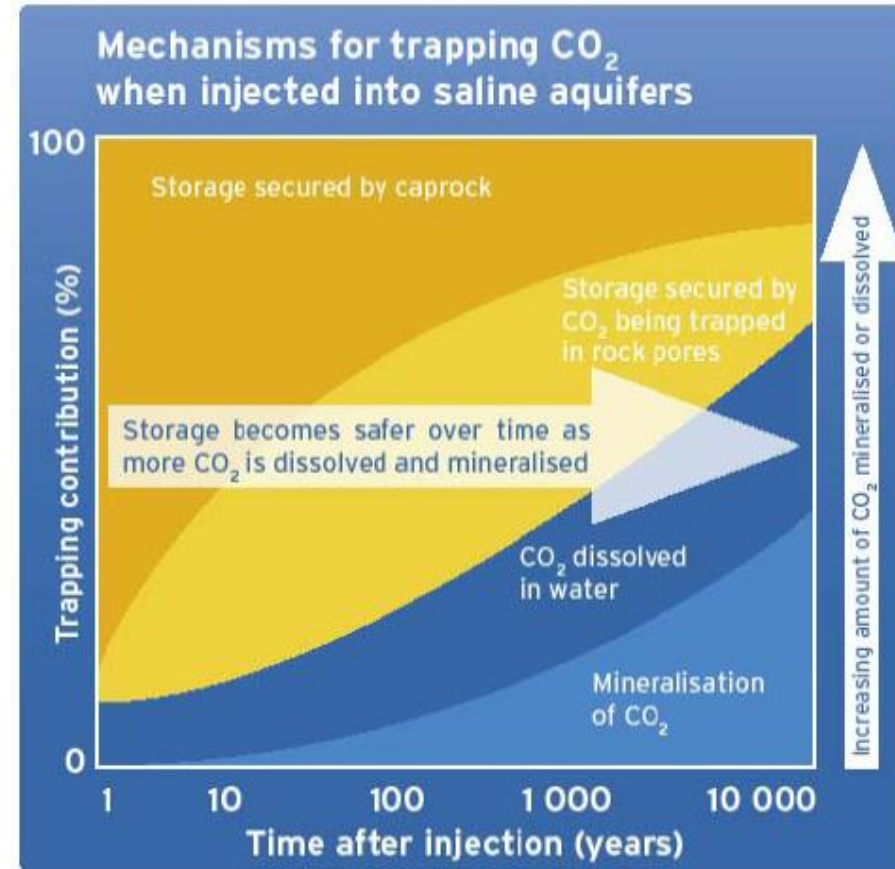
- Aquifères salins: grande capacité, géologie moins bien connue mais en cours d'étude
- Anciens champs de pétrole ou gaz nat.: capacité limitée mais géologie connue et éprouvée
- Mines de charbons: capacité et perméabilité limitées, mais possibilité de récupération de méthane





# Que se passe-t-il une fois le CO<sub>2</sub> stocké?

- Le CO<sub>2</sub> 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!



# Quelques exemples

## ■ In-Salah, Algérie

- ❑ 3.8 Mt CO<sub>2</sub> injecté de 2004 à 2011
- ❑ Ancien réservoir de gaz (1900 m de profondeur)
- ❑ Injection suspendue, l'intégrité du site est étudiée en profondeur
- ❑ Monitoring permanent

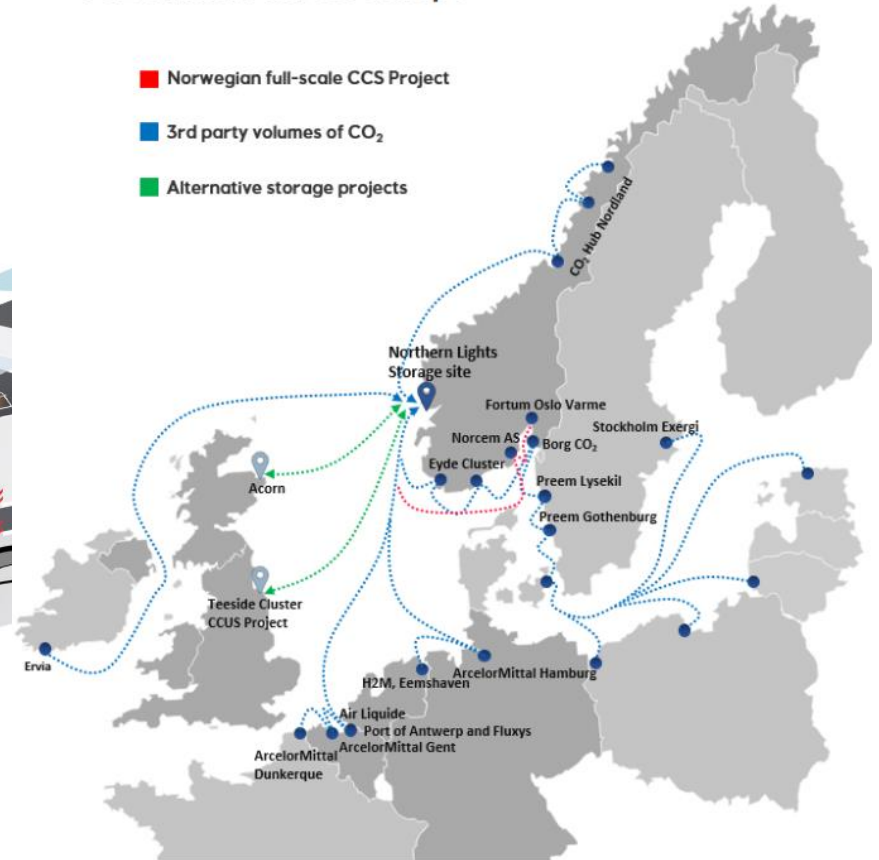
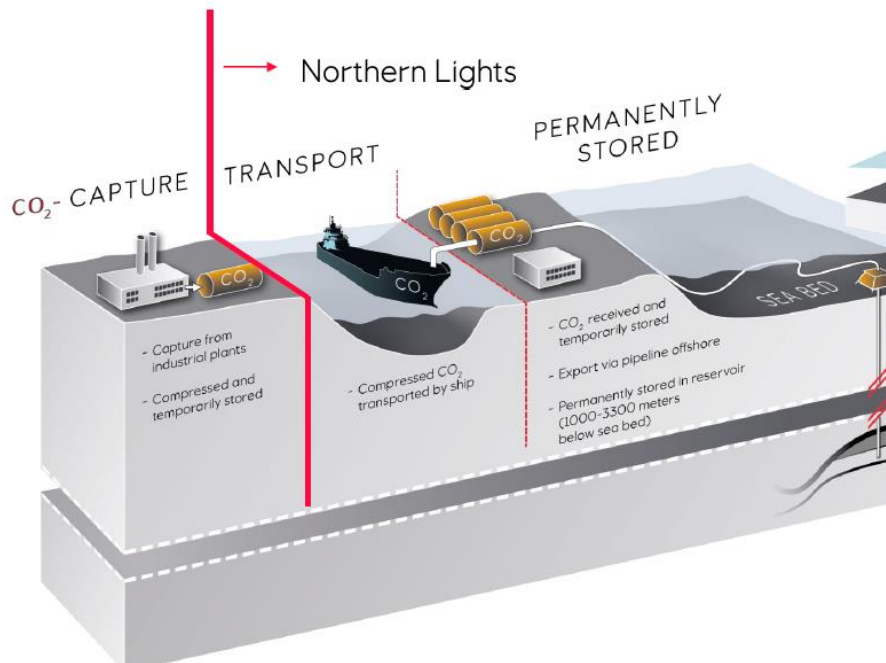
## ■ Sleipner, Norvège

- ❑ 1 Mtpa depuis 1996
- ❑ Aquifère salin (800-1000 m de profondeur)
- ❑ Au large de la Norvège
- ❑ > 17 Mt injectées

# Northern lights

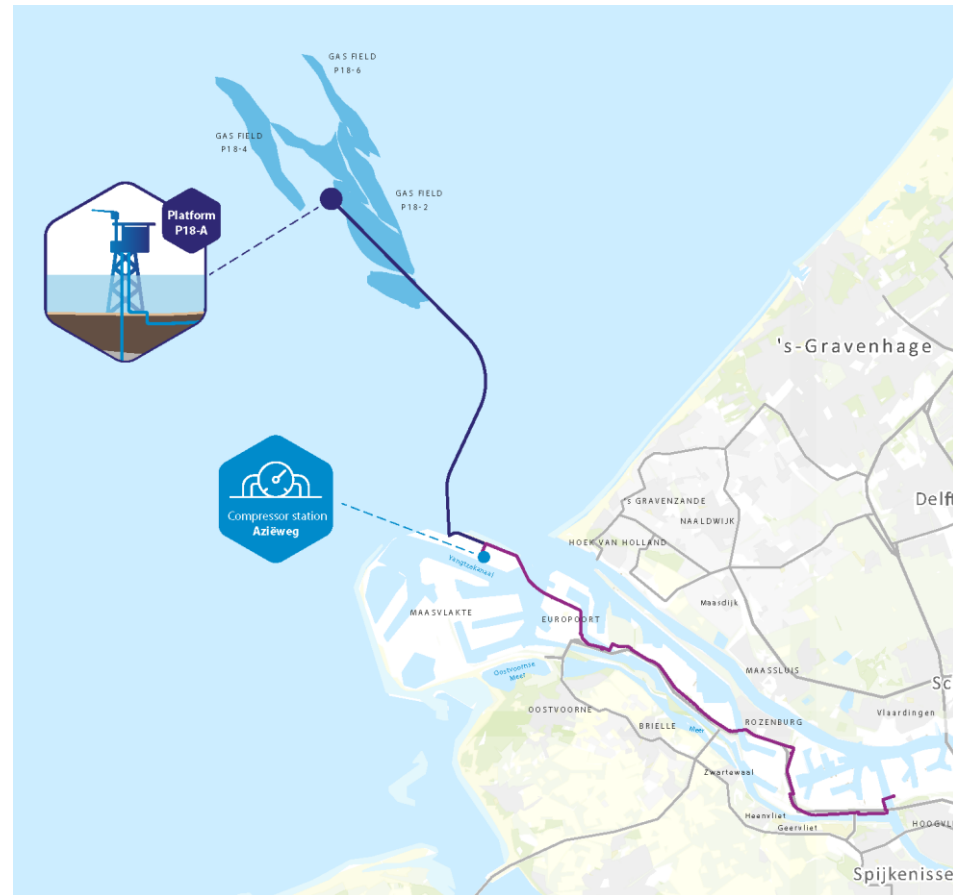
- Norvège, off-shore, aquifère salin
- Jusqu'à 5 Mt CO<sub>2</sub>/a

- A ship based solution means access for CO<sub>2</sub> emitters across Europe



# Porthos

- Rotterdam, off-shore, champ de gaz épuisé
- 2.5 Mt CO<sub>2</sub>/a

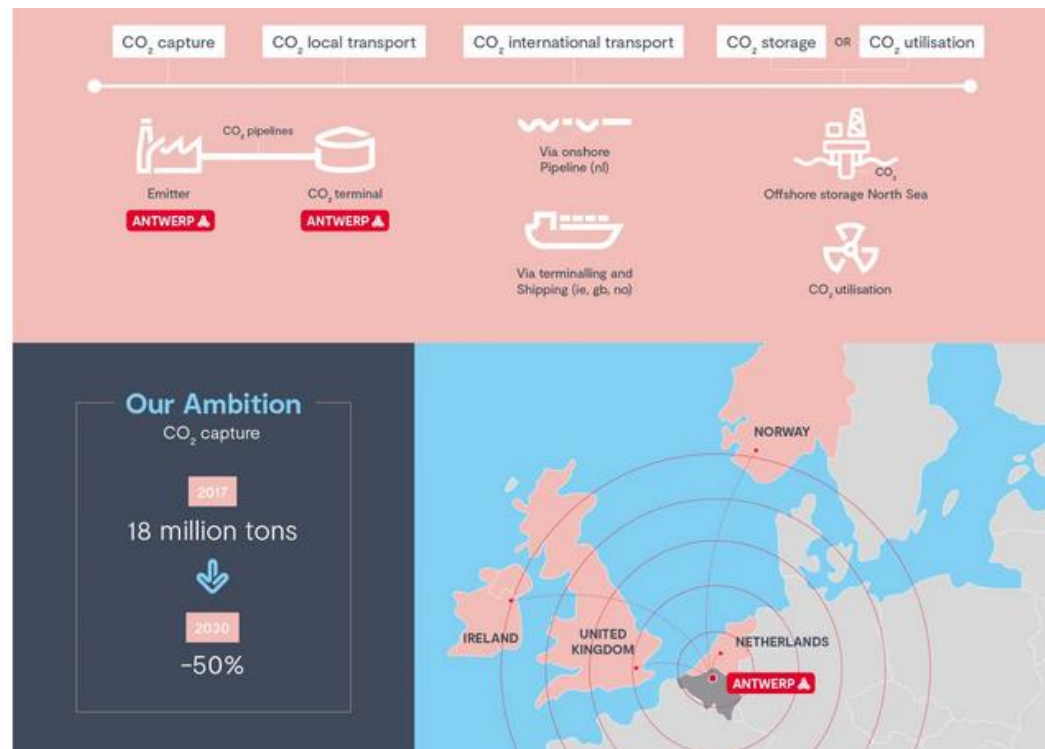


# Antwerp@C

- Pas de capacité de stockage au large de la Belgique
  - Antwerp@C étudie l'infrastructure nécessaire pour une connection avec la Norvège et les Pays-Bas
  - => Pipelines, stockage intermédiaire, liquéfaction...

## Antwerp@C

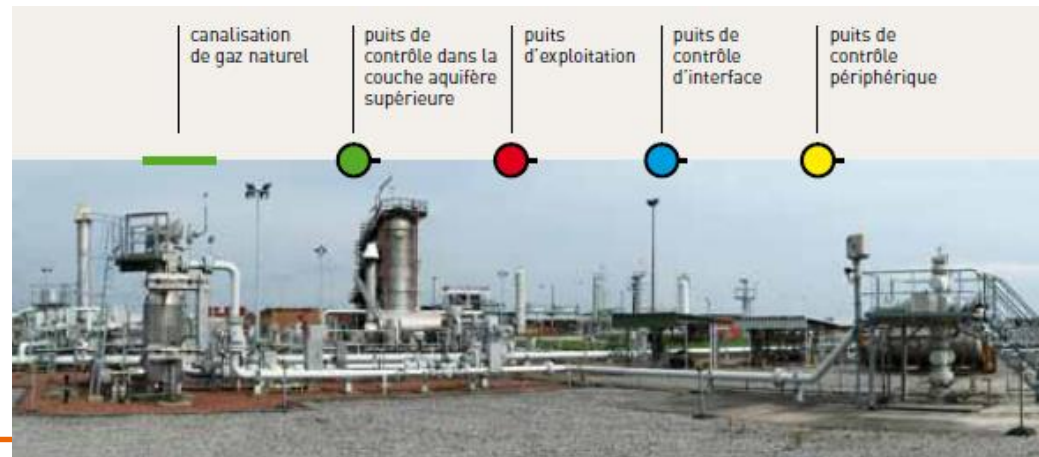
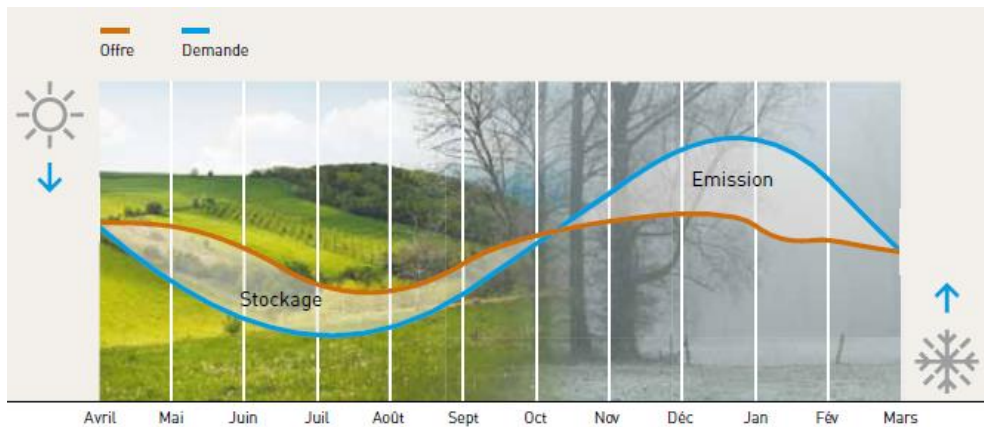
8 players in chemical & energy sector investigate feasibility of carbon capture, utilisation and storage in Port of Antwerp



# Le stockage sous-terrain de gaz n'est pas neuf!

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

Exemple: Loenhout (Anvers)

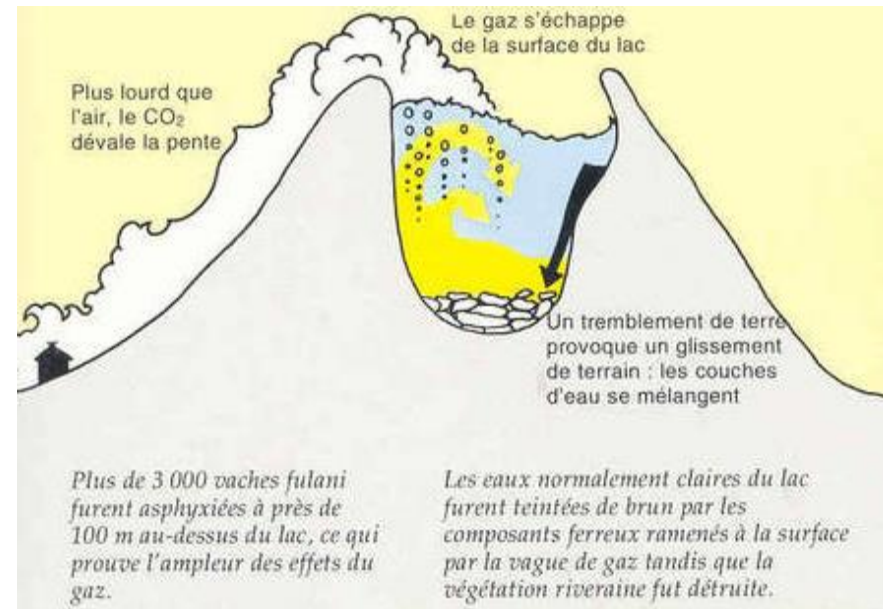
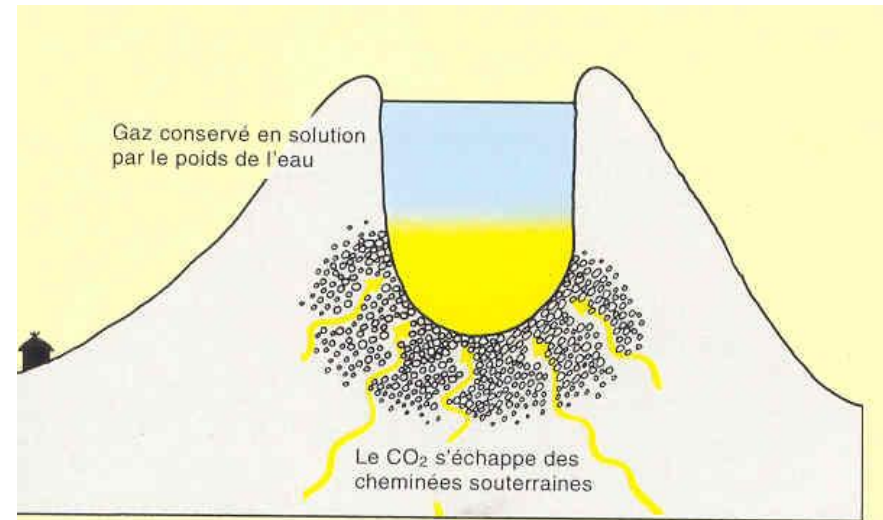


# Gestion du risque

Cas du lac Nyos (Cameroun, 1986):

- CO<sub>2</sub> d'origine volcanique
- Près de 1700 victimes

=> Solution identifiée et implémentée!



---

# 4. Réutilisation du CO<sub>2</sub>

---

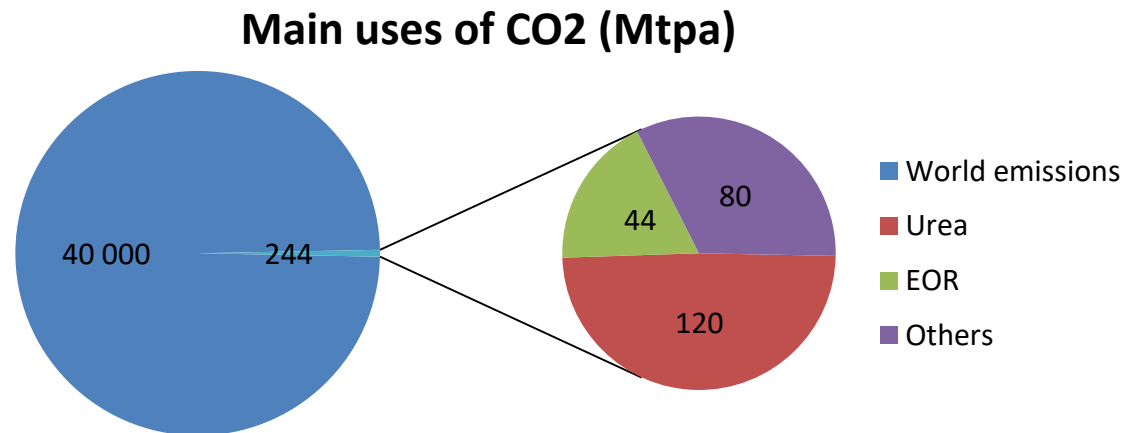


# CO<sub>2</sub>: déchet ou matière première?

- CCS a un coût, mais n'amène pas de recettes!
  - Besoin d'infrastructure (pipelines, bateaux, sites de stockage géologique...)
  - C'est en fait une mise en décharge permanente...
  
- Estimations de coût
  - Capture de CO<sub>2</sub> ~ 40 US\$/t
  - Marché européen du CO<sub>2</sub> ETS ~ 7-8 €/tCO<sub>2</sub> entre 2011 et 2018
  - Depuis: en nette augmentation!

# CO<sub>2</sub>: déchet ou matière première?

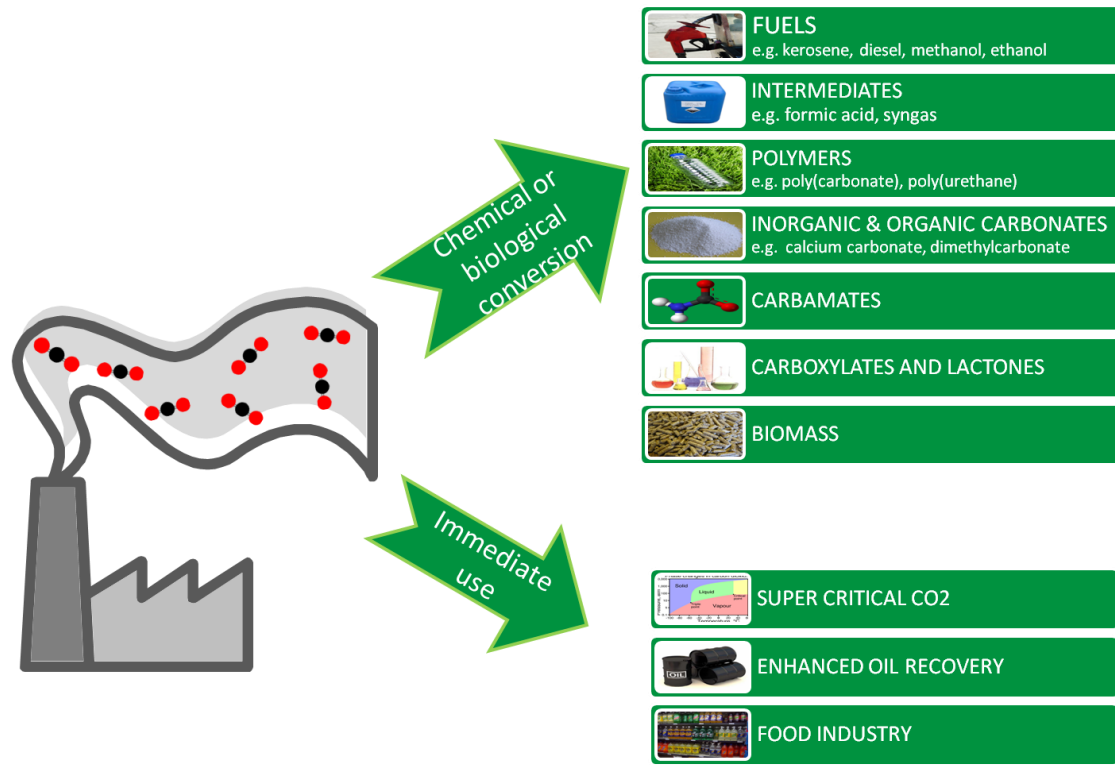
- Comment rendre la technologie moins coûteuse?
  - Optimisation et nouveaux développements
  - Taxe CO<sub>2</sub> (rendre les concurrents plus chers)
  - Réutiliser le CO<sub>2</sub> et le valoriser comme ressource:
    - 2016: ~ 250 Mt CO<sub>2</sub> réutilisé par an (dont 120 Mt CO<sub>2</sub> sur site)



- Les sources de CO<sub>2</sub> utilisées sont celles de haute pureté:
  - Industrielles (Ethanol, Ammoniac, Ethylene, Gaz naturel...)
  - Naturelles (Dome)
  - CO<sub>2</sub> des centrales thermiques (~2.4 Mtpa)

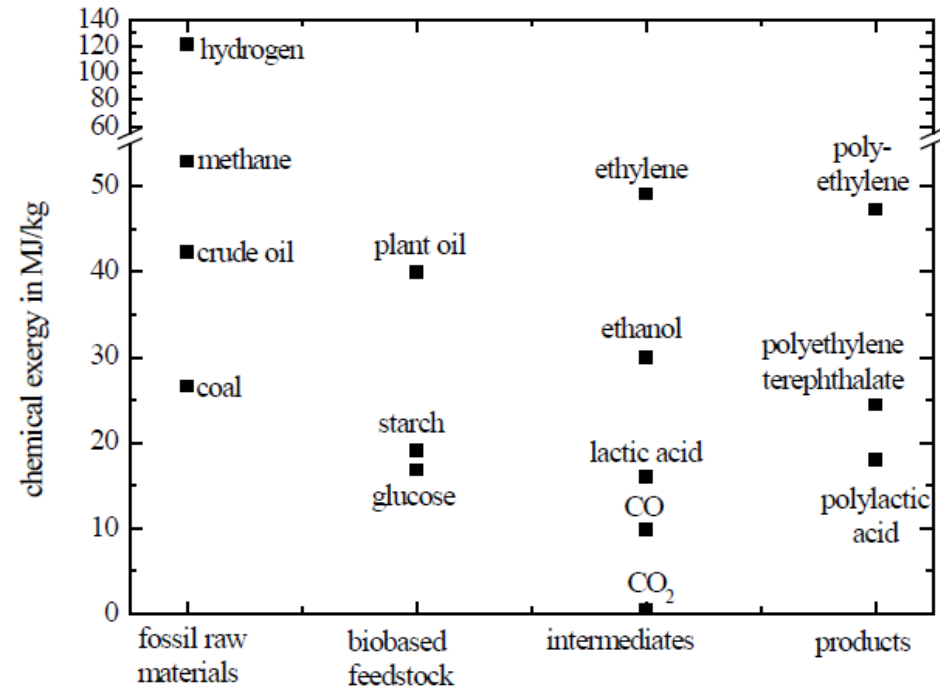
# CO<sub>2</sub>: déchet ou matière première?

- Le carbone est à la base de la chimie organique
  - => Immense potentiel d'applications : 4 - 20 Gtpa CO<sub>2</sub>



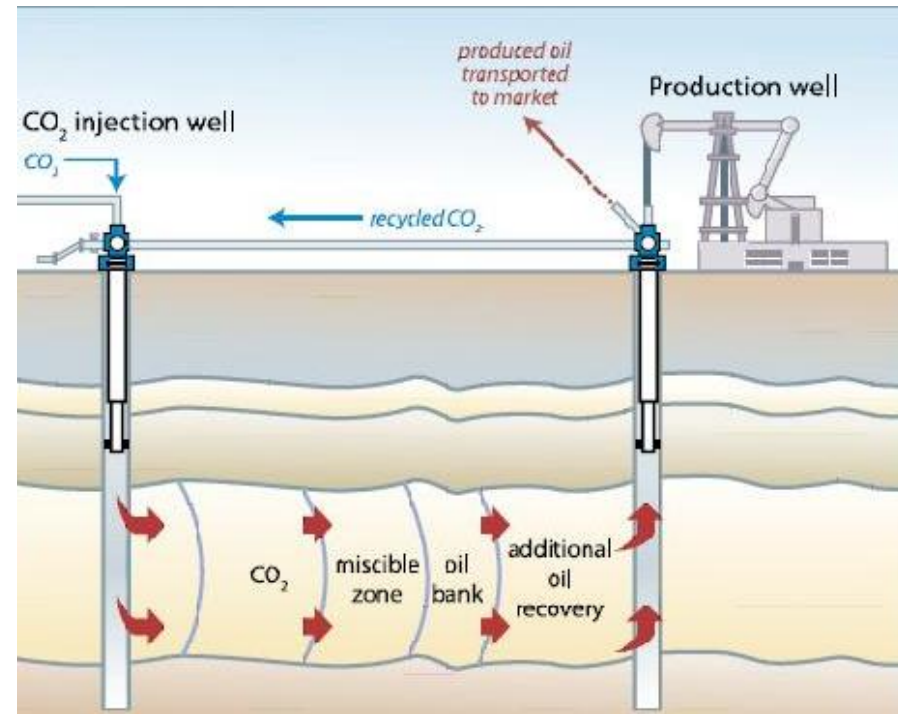
# Principales voies de valorisation

- Utilisation directe, sans transformation
- Transformation biologique
- Transformation chimique
  - Sans énergie
    - Carbonatation
  - Avec énergie



=> A part les carbonates, toute utilisation nécessite de l'énergie! Celle-ci doit être renouvelable ou bas carbone!

# Utilisation industrielle directe du CO<sub>2</sub>



# Valorisation biologique

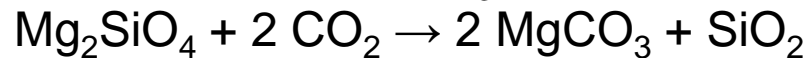
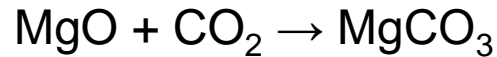
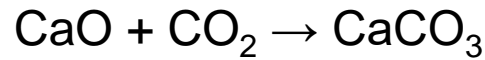
- Photosynthèse
  - Microalgues
  - Culture sous serre



- Limitations :
  - Surface pour les cultures (+- 120 t CO<sub>2</sub>/ha.an)
  - Energie nécessaire pour traitements en aval

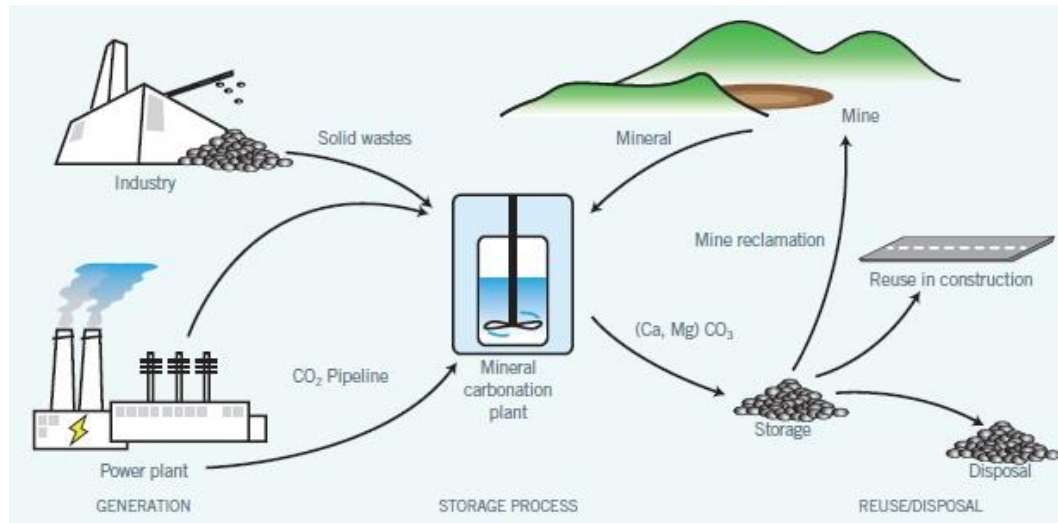
# Valorisation chimique: minéralisation

- Réaction avec des oxydes présents dans minerai ou déchets industriels



- Réaction spontanée mais lente

Source: Hemcrete, 2015



# Valorisation chimique: minéralisation

- Eg.: Procédé Recoval

- Formation de carbonates de Ca & Mg
- Sur base de laitier d'aciérie



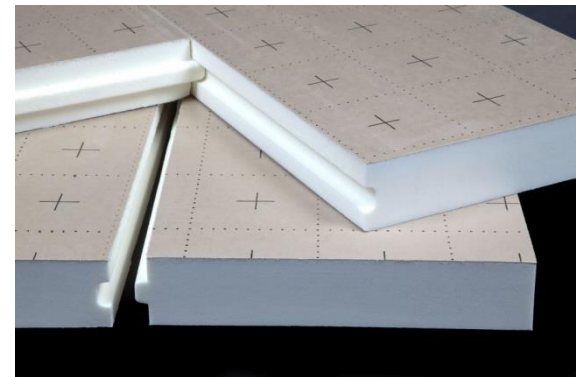
Carbstone, ORBIX, 2019





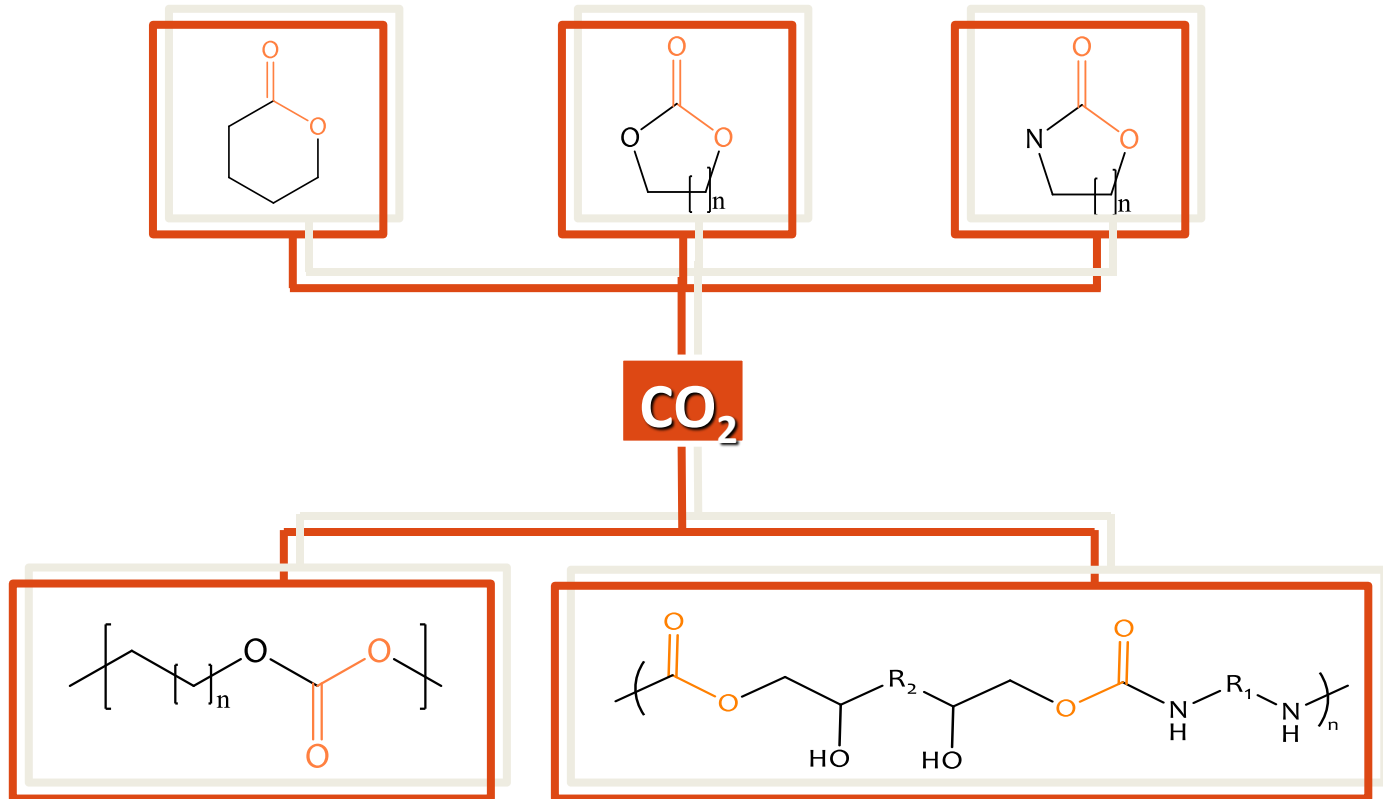
# Valorisation chimique: Synthèse organique

- Pétrochimie utilise environ 6% des ressources fossiles
- Haute valeur ajoutée possible
- Énergie nécessaire aux synthèses constitue un frein



# CO<sub>2</sub> to chemicals

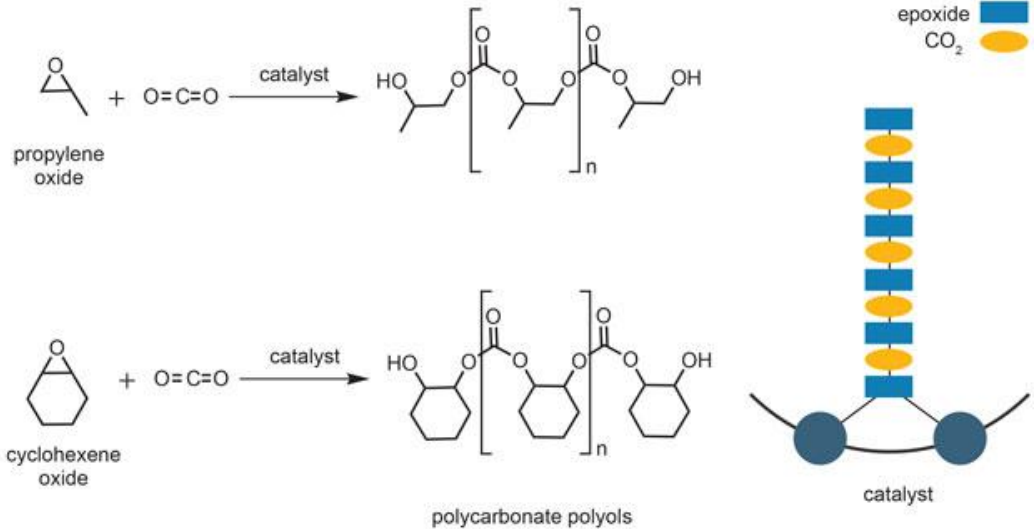
## ■ Monomères



Gennen & al., *Chemsuschem*, 2015, 11, 1845-1849; Alves & al., *RSC Adv.*, 2015, 5, 53629-53636; Alves & al., *Catal. Sci. Technol.*, 2015, 5, 4636-4643, Poussard & al., *Macromolecules*, 2016, accepted

# CO<sub>2</sub> to chemicals

- Polycarbonates
  - CO<sub>2</sub> + époxydes



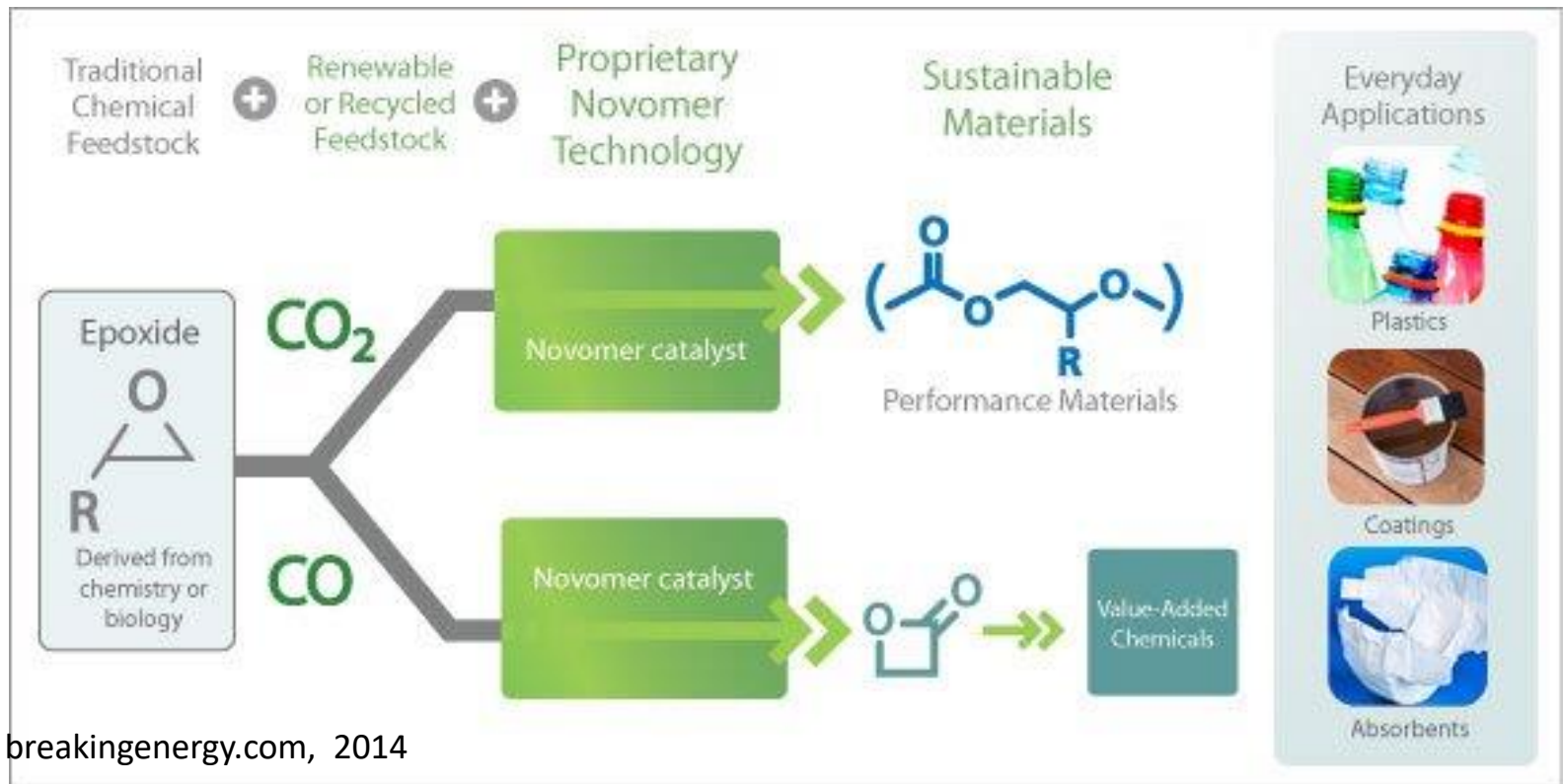
PEPs

CHEMICAL  
ENGINEERING

# CO<sub>2</sub> to chemicals

## ■ Autres polyols...

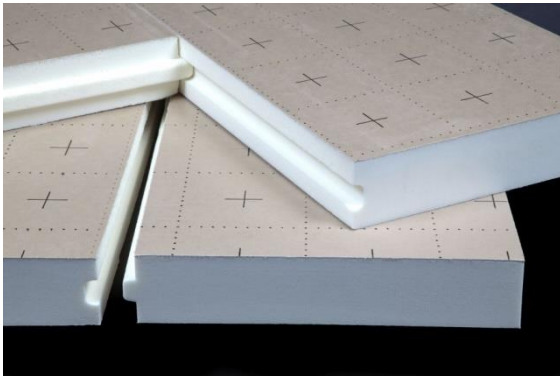
- Jusqu'à 40 % en poids de CO<sub>2</sub> dans le plastique final



# CO<sub>2</sub> to chemicals

## ■ Polyuréthanes

- ❑ Marché de 18 Mtpa
- ❑ 20% CO<sub>2</sub> dans le plastique
- ❑ Réacteur pilote 5000 t/a

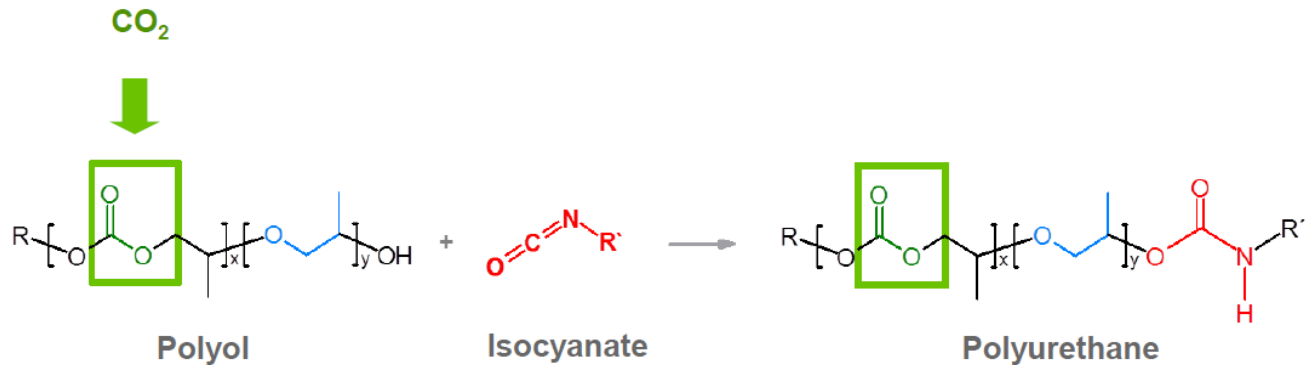


CO<sub>2</sub>-production-line at Bayer Material Sciences' site in Dormagen, Germany.  
ChemEurope.com, June 2015

# CO<sub>2</sub> to chemicals

## ■ Polyurethanes

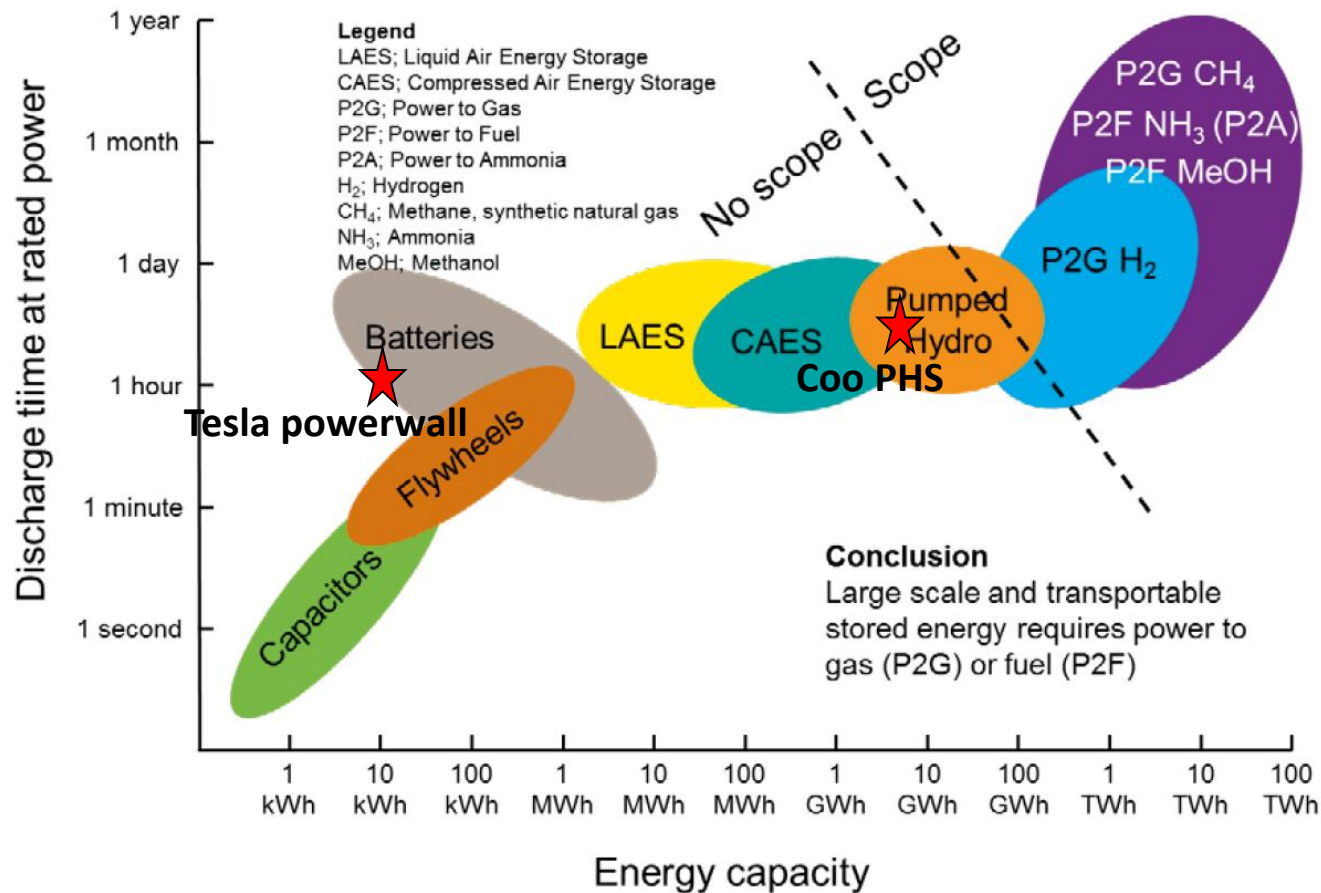
- Polyols + Isocyanate  
=> Dream material



- Prochaine étape: supprimer les isocyanates → NIPU
  - Grignard B et al., Green Chem., 2016, 18, 2206

# Stockage d'énergie

## ■ Quelques technologies de stockage d'énergie



# Stockage d'énergie

## ■ Some technologies for electricity storage

### ■ Tesla Powerwall

- ❑ 114 kg of batteries Li-ion
- ❑ 13.5 kWh; 7 kW
- ❑ RTE (Round-trip efficiency) ~90%



### ■ Coo PHS

- ❑ 1080 MW
- ❑ 6 hours capacity
- ❑ Black start
- ❑ RTE ~ 75%

- 1 Bassin supérieur
- 2 Bassin supérieur
- 3 Conduites forcées
- 4 Salle des machines
- 5 Liaison bassin inférieur
- 6 Prise d'eau inférieure
- 7 Bassin inférieur
- 8 Digues inférieures
- 9 Lignes haute tension



## ■ What about long-term storage??

PEPs

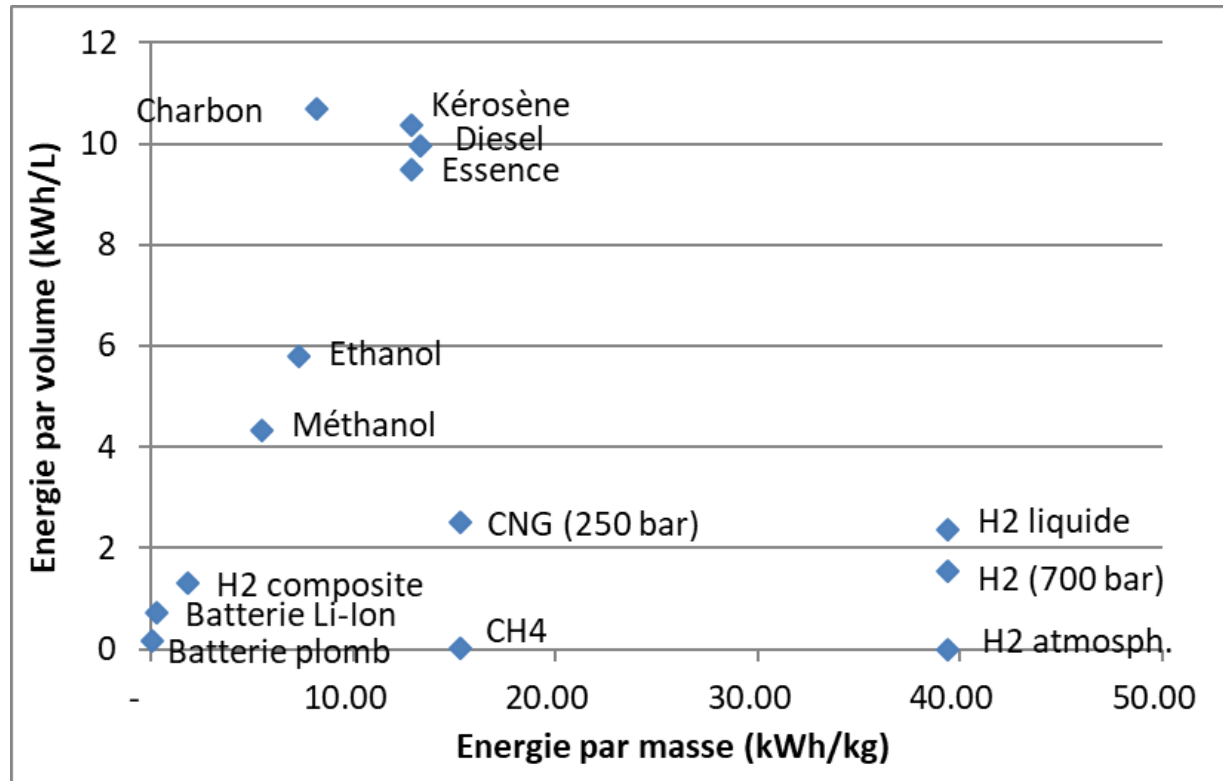
CHEMICAL  
ENGINEERING

Source: Tesla, Engie



# Stockage d'énergie

- L'avantage: une densité énergétique fantastique!
  - => Stockage intersaisonnier possible



# Stockage d'énergie

## ■ Calculs rapides

- ❑ Combien de voitures faisant le plein faut-il pour développer la puissance d'une centrale nucléaire (1 GW)?
- ❑ Quel serait le salaire horaire d'un travailleur s'il était payé à l'énergie qu'il développe?

# Stockage d'énergie

## ■ Calculs rapides

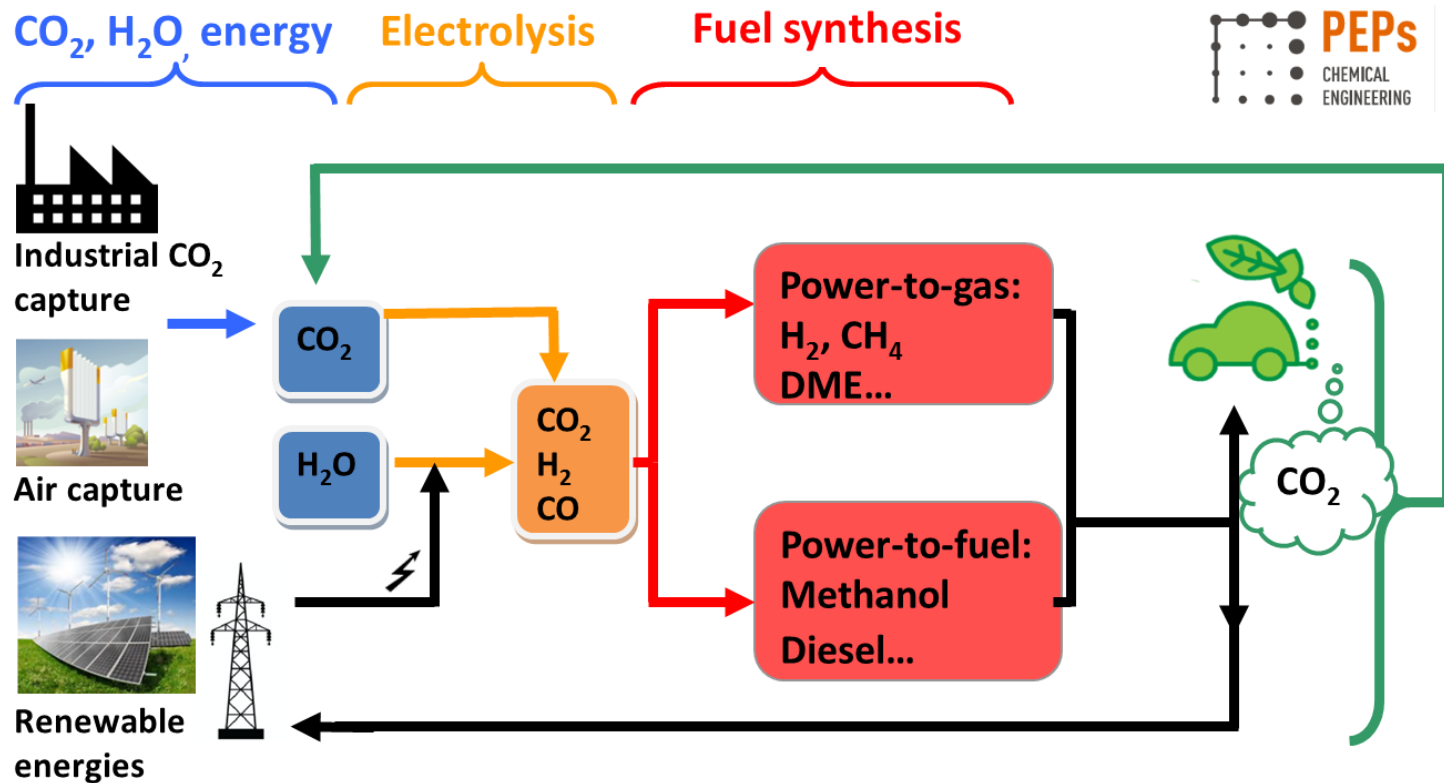
- Combien de voitures faisant le plein faut-il pour développer la puissance d'une centrale nucléaire (1 GW)?
  - 1 L/s débit de carburant
  - Carburant  $\sim 35$  MJ/L
  - $\Rightarrow$  1 voiture =  $35 \text{ MW}_{\text{th}} \sim 10 \text{ MW}_{\text{el}}$
  - 1 GW  $\sim 100$  cars
  
- Recharge rapide d'une voiture électrique: jusqu'à 50-250 kW!

# Stockage d'énergie

- Calculs rapides
  - Quel serait le salaire horaire d'un travailleur s'il était payé à l'énergie qu'il développe?
    - Activité physique ~300 W
    - 1 h = 300 Wh = 0.3 kWh = 1.08 MJ
    - Coût du barril (159 L) ~85 €
    - 159 L pétrole @ 40 MJ/L = 6360 MJ
    - => 1 heure de travail humain au coût de l'énergie fossile  
=  $1.08 \text{ MJ} * 85 \text{ €} / 6360 \text{ MJ} = 0.01 \text{ €} / \text{h}$

# Valorisation chimique pour énergie

## ■ Power-to-X

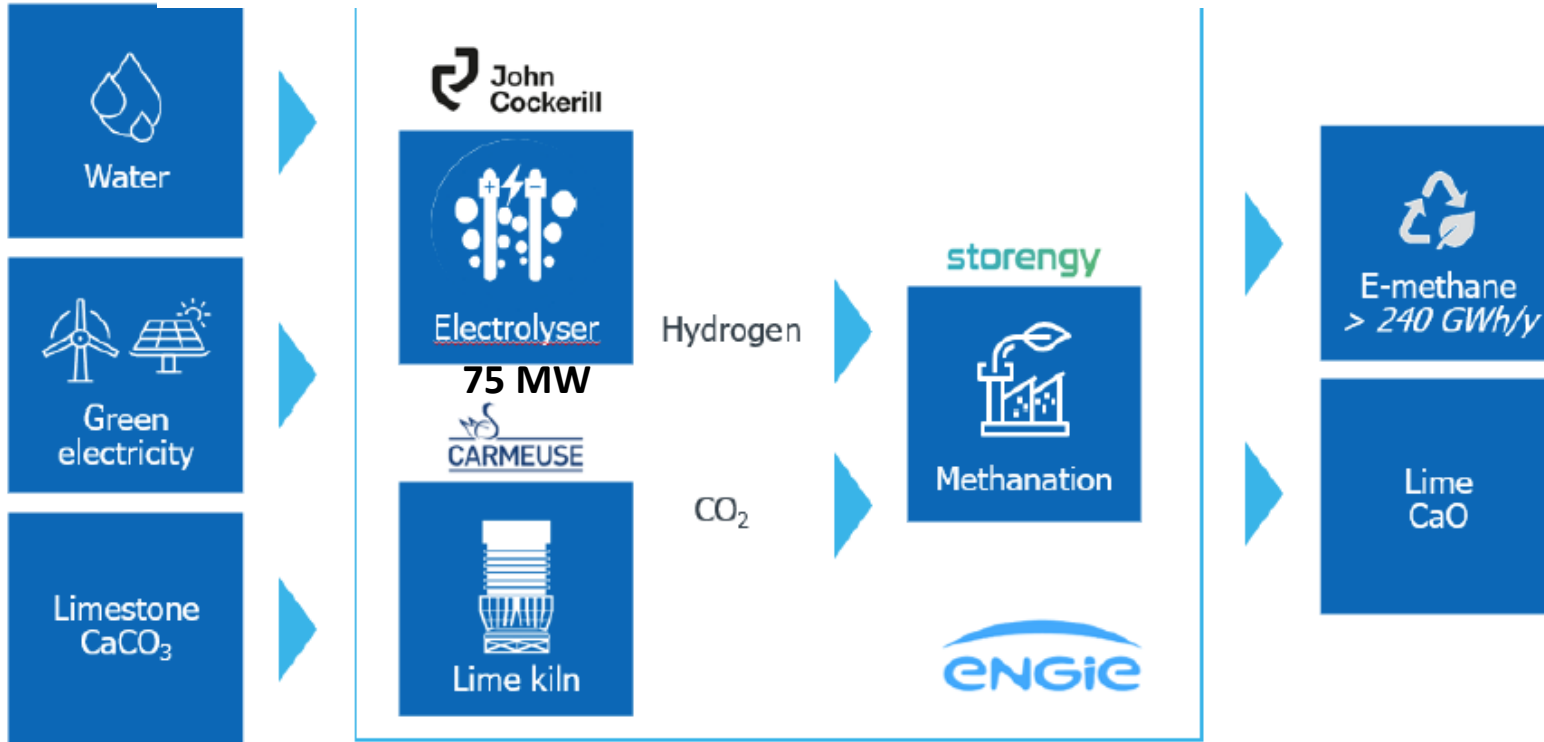


***⇒ Un système énergétique durable ET carboné est possible !***

# CO<sub>2</sub> to fuels

- Methane
  - $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
  - Sabatier reaction
  - $\Delta H^\circ = -165 \text{ kJ/mol}$
- Applications commerciales:
  - Great Plain synfuel plant
  - Methanation pour synthèse d'ammoniac
  - Production de carburant sur Mars
    - $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
    - CH<sub>4</sub> comme carburant
    - H<sub>2</sub>O => électrolyse pour H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>
  - Jupiter1000 in Marseille (Fos-sur-mer)
  - Power-to-gas in Germany
    - E.g. Audi e-gas plant, 54% efficiency (without heat reuse)

# Annonce récente - Methane



# Les challenges du méthane...

- Fuite et effet de serre!
  - USA - Russie: ~1-2% de taux de fuite, idem dans certains pays EU
  - Mais l'industrie s'attelle à améliorer ceci
  - Le CH<sub>4</sub> nécessite plus d'hydrogène que le méthanol
  - Reformage (pour refaire H<sub>2</sub>) à plus haute T° que le méthanol
    - $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
    - $\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
  - Le méthane est peu utilisé pour ses caractéristiques propres, mais plutôt comme vecteur énergétique
  - Mais fort effet d'inertie des infrastructures existantes!



# CO<sub>2</sub> to fuels

## ■ Methanol

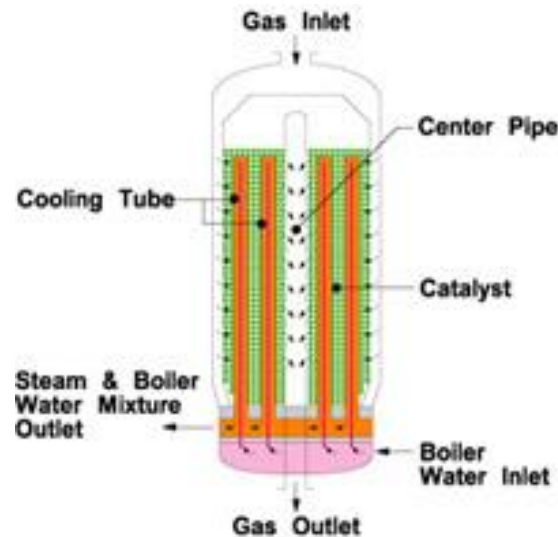
- $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
- $\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$



Haldor Topsoe, > 10 000 t/d



3,000 t/d methanol plant at Oman Methanol Company L.L.C., TOYO Engineering



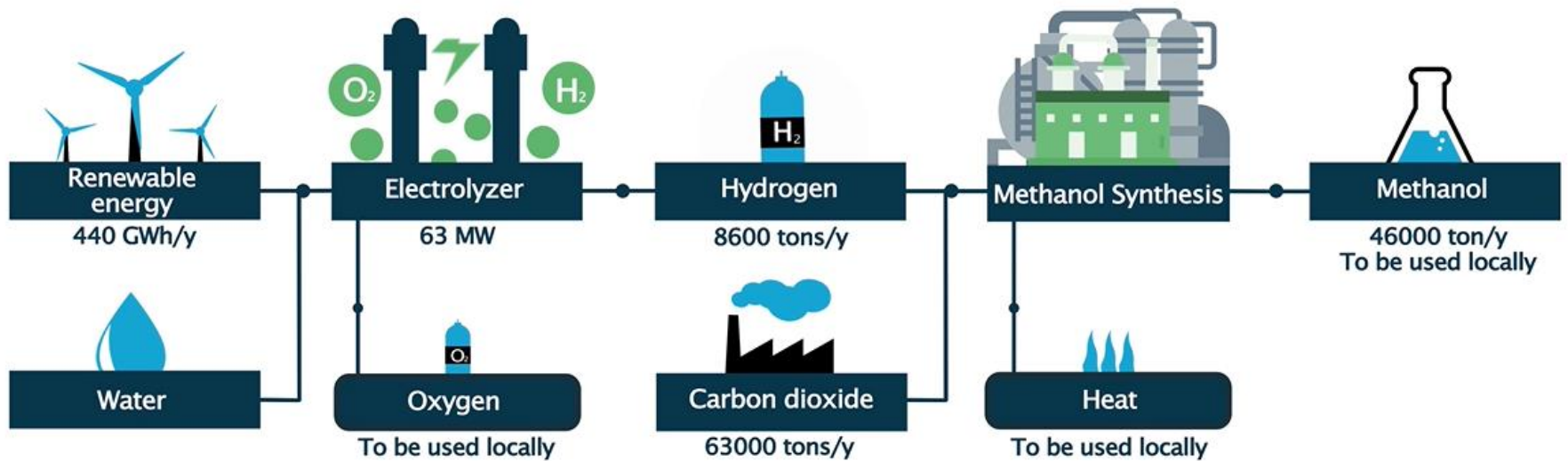
12 t/d renewable methanol - CRI

# Annonce récente



## The North-C-Methanol project

<https://northccuhub.eu/>



Antwerp: power-to-methanol: 8000 ton/y

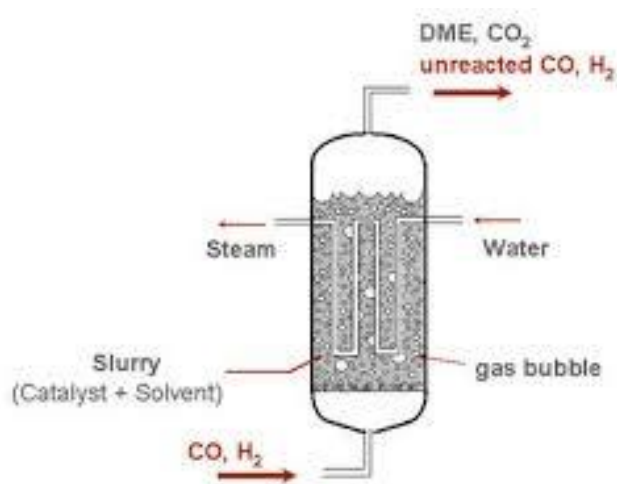
PEPs

CHEMICAL  
ENGINEERING

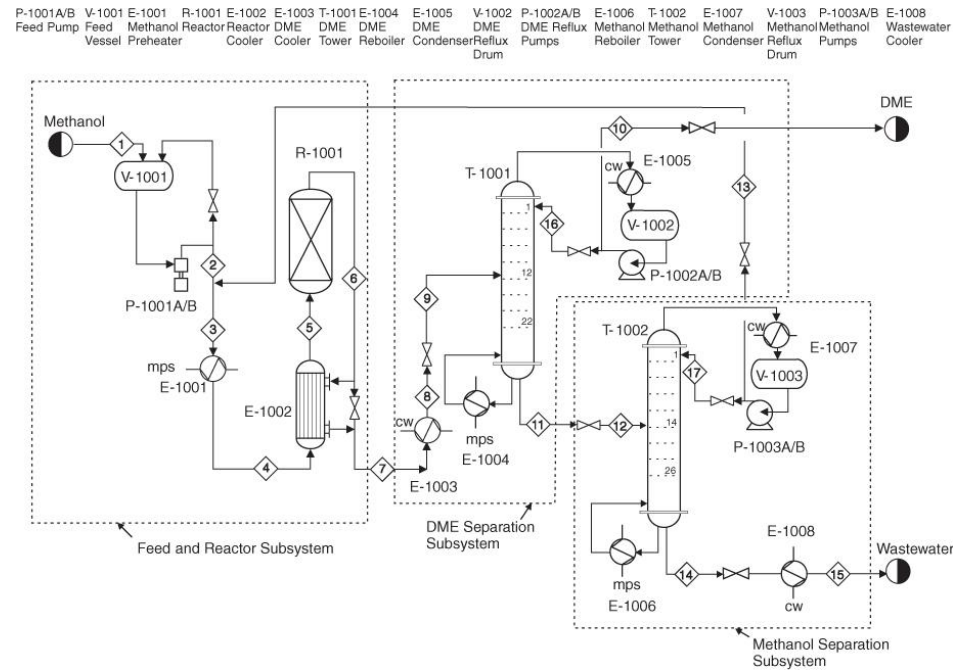
# CO<sub>2</sub> to fuels

## ■ DME (CH<sub>3</sub>-O-CH<sub>3</sub>)

- Similaire au diesel, mais réservoir sous pression
- A partir de méthanol, ou directement de CO<sub>2</sub>



Yagi et al., 2010. DOI: 10.2202/1542-6580.2267



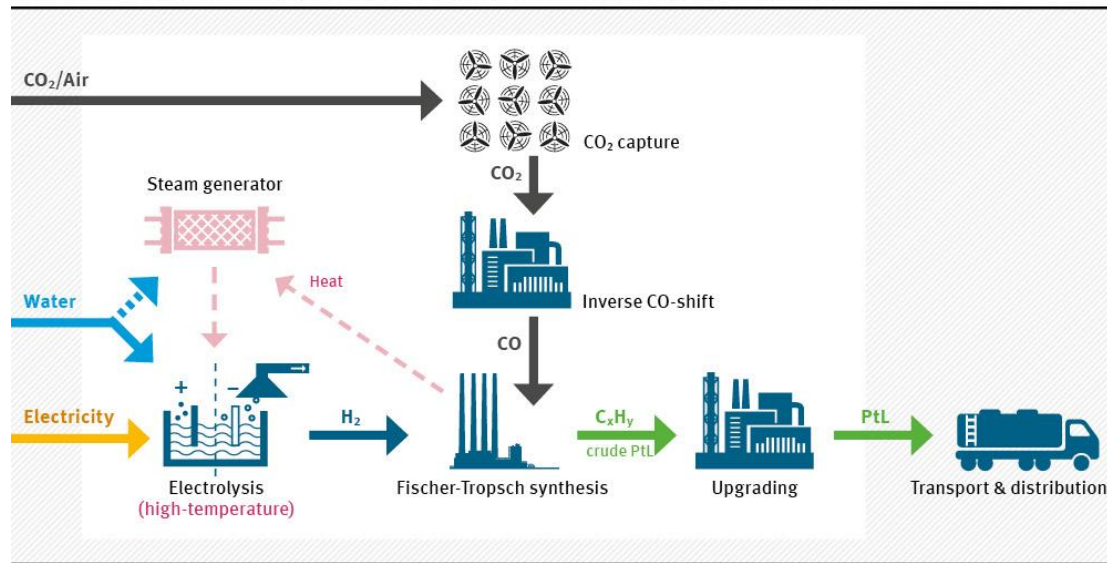
Turton et al., Prentice Hall, 2012

# CO<sub>2</sub> to fuels

- Carburants Fischer-Tropsch
  - Diesel ou essence synthétique
  - Sunfire: 58 m<sup>3</sup>/a, Rendement ~70%

Figure 3

PTL production via Fischer-Tropsch pathway (high-temperature electrolysis optional)



Source: LBST

Figure 5

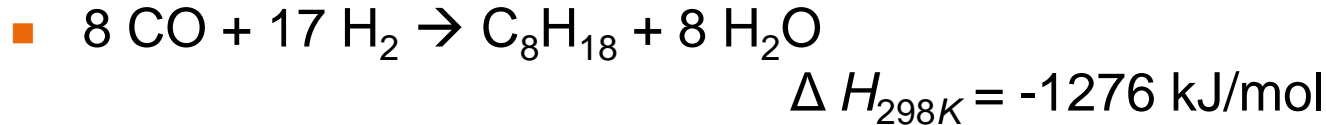
Sunfire PTL demonstration plant (top)  
using high-temperature electrolysis (middle)  
for the production of Fischer-Tropsch crude (bottom)



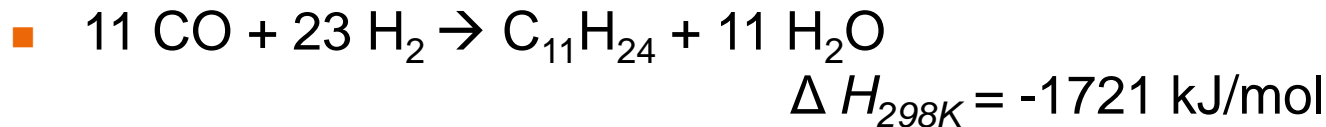
Sources: top: sunfire GmbH Dresden/CleantechMedia; sunfire GmbH Dresden/renedeutscher.de

# CO<sub>2</sub> to fuels

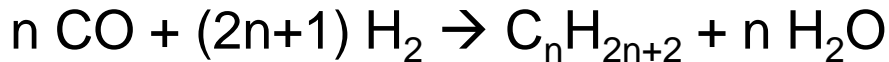
Gasoline:



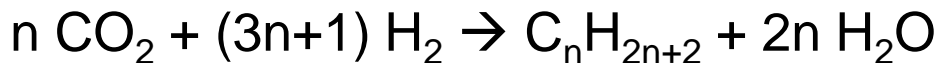
Jet fuel



Global reaction from CO



Global reaction from CO<sub>2</sub>



Difference is the RWGS:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$

# Annonce récente

- Kérosène neutre en carbone



**BELGIUM'S NEXT  
CENTURY SAF / E-FUEL  
ECOSYSTEM**

Neutral Kero Lime Presentation to Energia

Autoworld, Octobre 28<sup>th</sup>, 2021

Supported by

LIEGE AIRPORT

LIÈGE université

UMONS Université de Mons

Lhoist

RESA

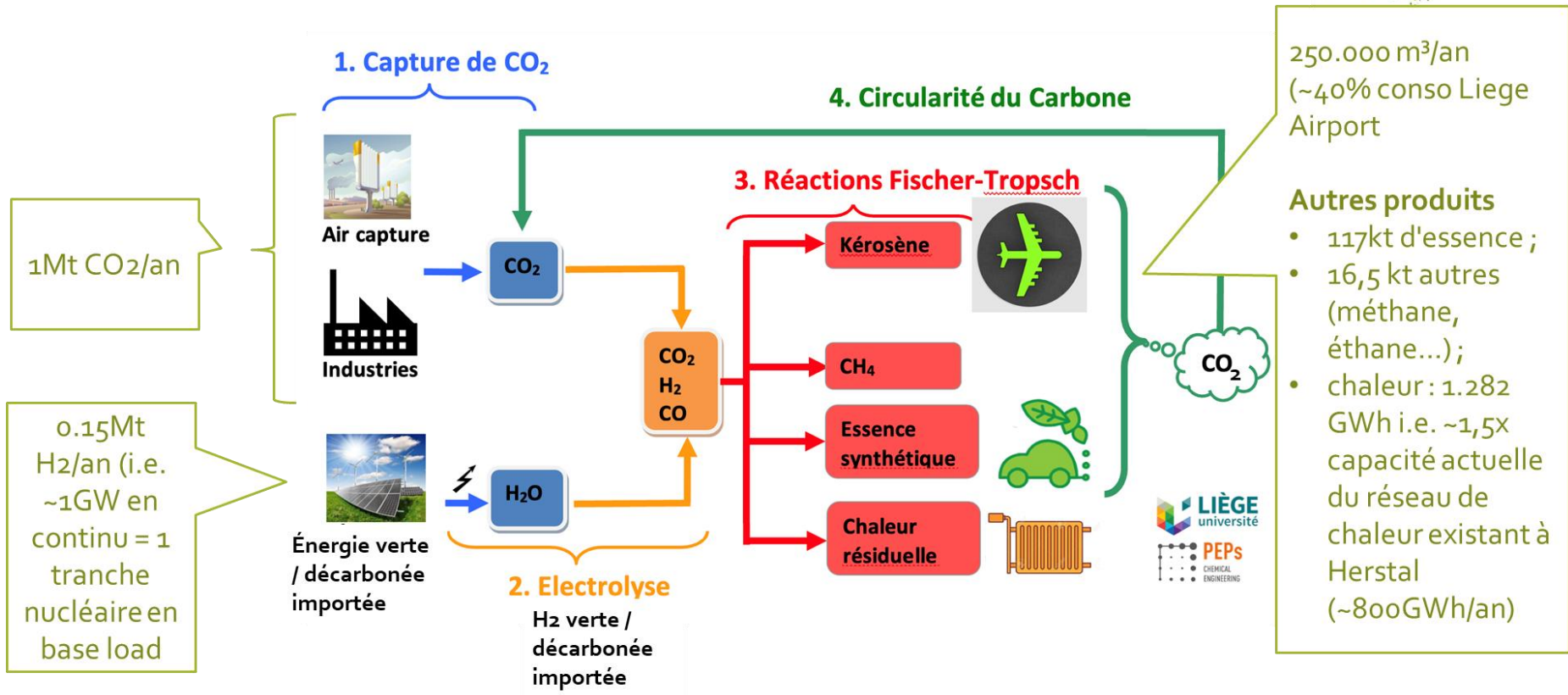
FLUXYS

ENGIE Laboratoire

HAMON

# Annonce récente

## Capture de CO<sub>2</sub> + électrolyse + synthèse Fischer-Tropsch



# CO<sub>2</sub> to fuels

- Applications dans les transports
  - Ferries (Methanol, Stena, 24 MW)
  - Camions (DME, Volvo)
  - Voitures (GEM fuels, Gely...)





# CO<sub>2</sub> to fuels

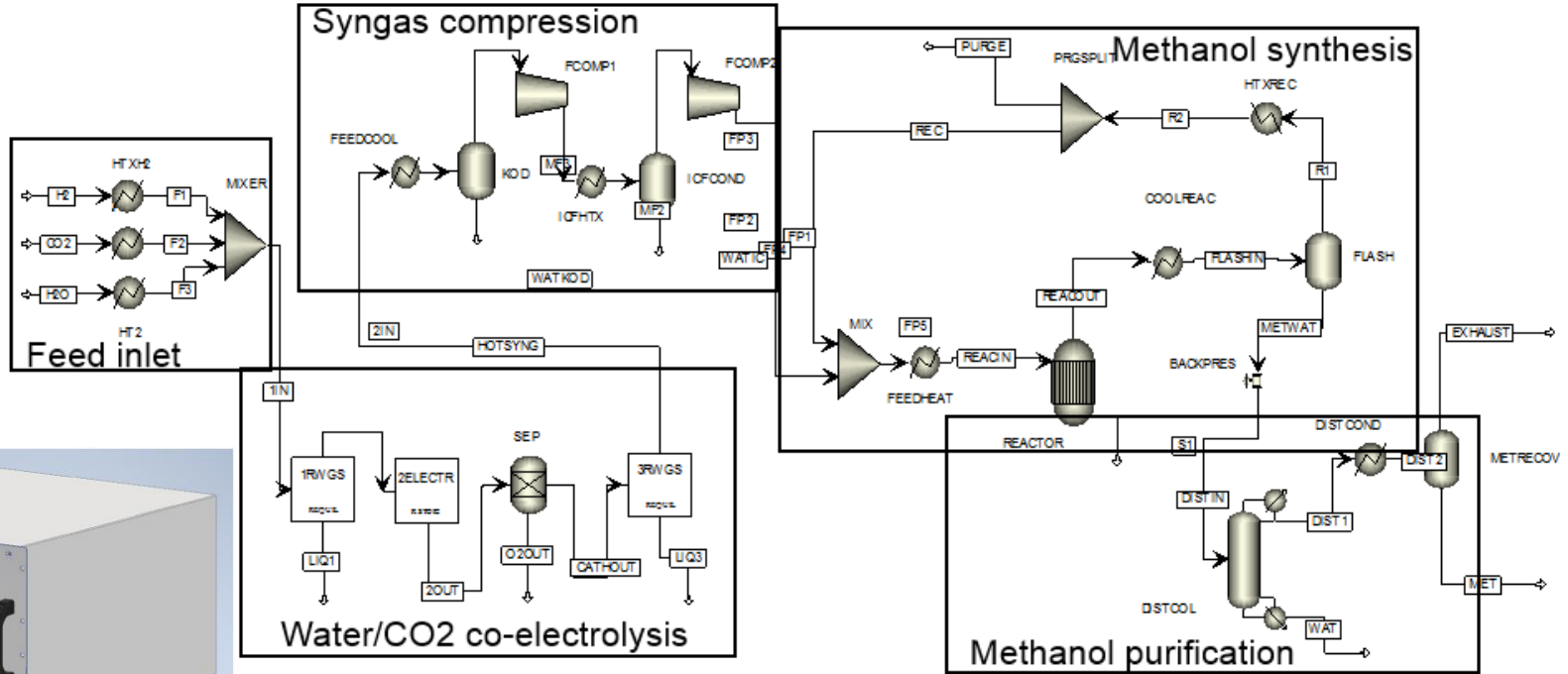
- Le marché potentiel est plus grand que celui de la pétrochimie!
  - Mais coûts énergétiques et faible valeur ajoutée
  - Il faut de l'énergie renouvelable!! => Stockage
- Défis technologies
  - Variabilité de la source d'énergie
  - Coûts de capital
  - Rendement de conversion
    - Power-to-methanol @ CRI => 4000 T/a, Rendement ~50%
    - Power-to-diesel @ Sunfire => 58 m<sup>3</sup>/a, Rendement ~70%
- Intégration dans des industries existantes!

# Recherche ULiège à l'échelle système

- Planning énergétique
- Modèle réseau électrique avec 100% énergie renouvelable + stockage :
  - Sur base de données historiques belges (demande, facteurs de charge)
  - Eolien on- et off-shore, PV, biomasse, stockage hydro, batteries...
  - On varie les capacités installées de façon à
    - Éviter les black-outs
    - Minimiser les coûts de système
- On arrive à un coût d'électricité ~ 150 €/MWh

# Recherche ULiège à l'échelle procédé

- Intégration de procédé
  - Modèles d'électrolyse, de capture de CO<sub>2</sub> et de synthèse de carburants



# CCU

- Produits CO<sub>2</sub>-sourcés sont plus chers que les produits d'origine fossile
  - Mais les coûts évoluent!
  - Coût de la capture du CO<sub>2</sub> diminue, ainsi que le coût de l'énergie verte!
- Compétitivité économique ne peut être assurée que par un coût sur les émissions.
  - Pour atteindre la parité à long-terme, il faudrait un coût d'émission de ~ 120-225 \$/tCO<sub>2</sub>.

# CCU

- Pour diminuer les émissions de  $> 1 \text{ GtCO}_2$ , il faut un déploiement massif
  - Méthanol: ok en couvrant tout le marché actuel ainsi que le transport par camion (heavy-duty trucks) et les plastiques
  - Produits pétroliers (essence, diesel, kerosene): ok en couvrant tout le marché actuel de l'aviation et du transport routier (heavy-duty).
  - Acide formique: même si tout le marché était  $\text{CO}_2$ -source, on n'arriverait qu'à  $\sim 2 \text{ MtCO}_2$ .
- Les technologies CCU doivent de plus être développées avec soin de façon à garantir des émissions de cycle de vie plus faibles que les voies alternatives!

---

# 5. Conclusions et perspectives

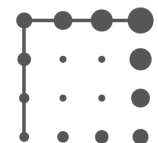
---

# Conclusions et perspectives

- Le développement durable est un défi vital pour notre société, le CO<sub>2</sub> en est un élément crucial
- Il existe des technologies de capture, stockage et utilisation de CO<sub>2</sub>
  - Elles sont à des niveaux de maturité différents
  - R&D est encore nécessaire => efficacité et coût
  - Besoin d'installations de démonstration!
  - Intégration dans des industries existantes
  - Quantités faramineuses!!
- L'acceptation de ces nouvelles technologies par la société est un défi en soi!
- Le rôle du politique et des industries est crucial, mais c'est toute la société qui doit agir!

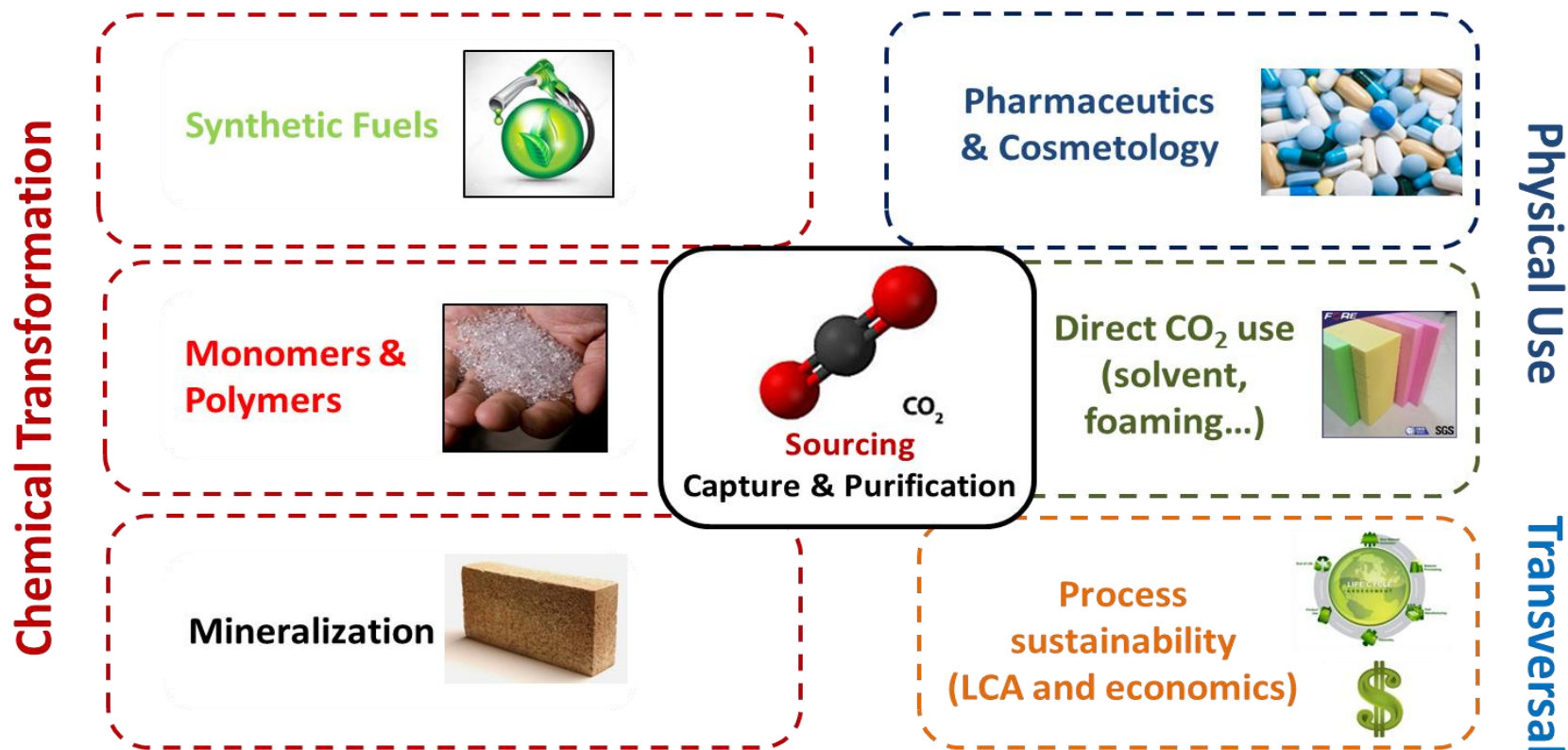


NEUTRALIZED BY  
GREEN ENERGY  
0% CO<sub>2</sub>  
CERTIFIED



# Perspective ULiège: plateforme FRITCO<sub>2</sub>T

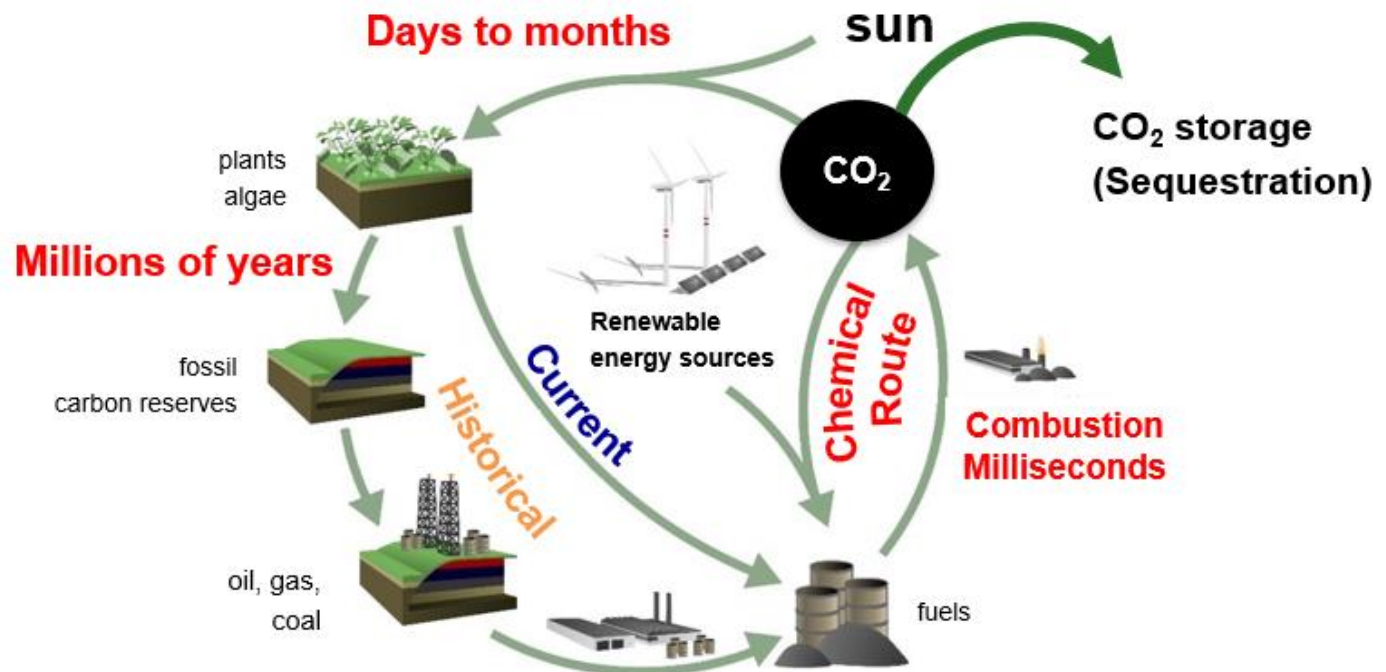
*Federation of Researchers in Innovative Technologies for CO<sub>2</sub> Transformation*





# Perspective

- Nous vivons dans une société basée sur le carbone, et il y a de bonnes raisons à cela!
- Un futur neutre en CO<sub>2</sub> est possible et en vue, mais pas sans CO<sub>2</sub>
- Il y a là de passionnants et gigantesques défis pour de jeunes ingénieurs!



# Pour aller un peu plus loin...

- Effet de serre et vulgarisation des défis environnementaux: <https://jancovici.com>
- IPCC, 2015. Rapport du GIEC sur l'énergie et le changement climatique: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf>
- Politique européenne et vision 2050: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_fr)
- Global CCS Institute, 2017. The Global Status of CCS: 2017. Rapport disponible sur : [www.globalccsinstitute.com](http://www.globalccsinstitute.com)
- Publications ULiège: <https://orbi.uliege.be>

---

# Merci pour votre attention!

---

[g.leonard@uliege.be](mailto:g.leonard@uliege.be)

[www.chemeng.uliege.be/FRITCO2T](http://www.chemeng.uliege.be/FRITCO2T)