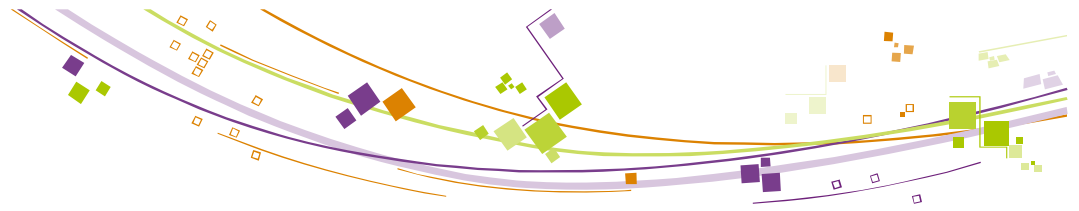


Captage et stockage du CO₂

Andreas Ehinger



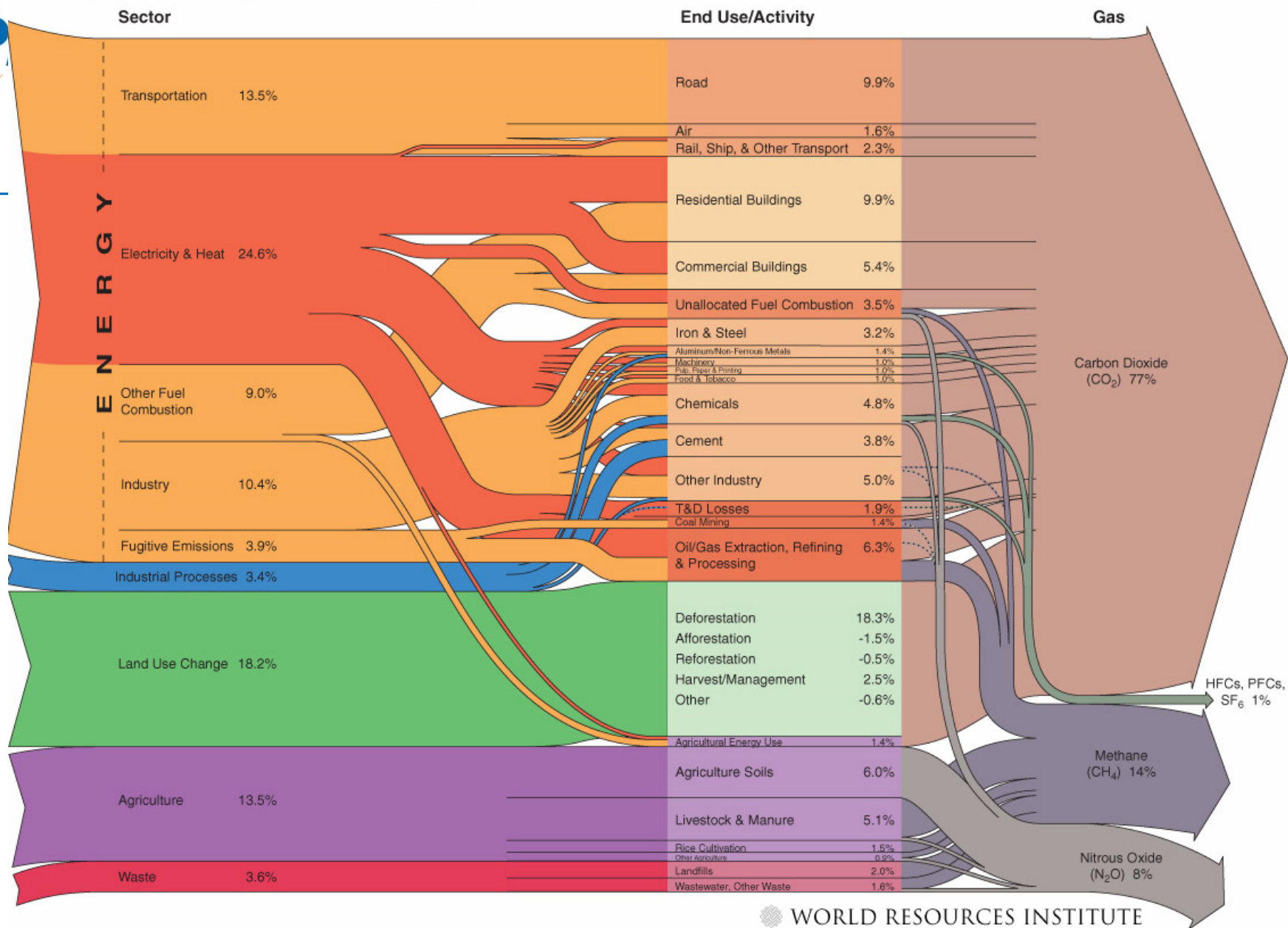


Le captage et stockage du CO₂

Une technologie pour
réduire massivement les émissions de CO₂
dues à l'utilisation des combustibles fossiles dans
les grandes installations industrielles

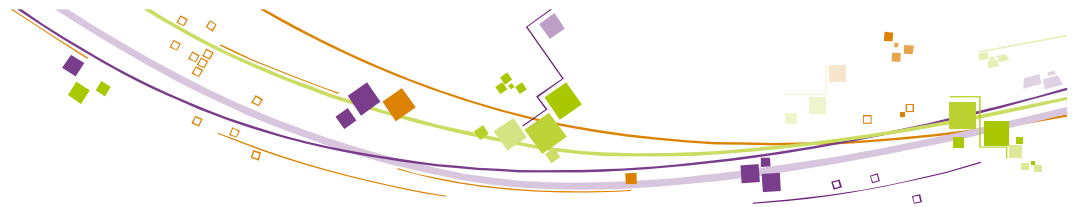


World GHG Emissions Flow Chart



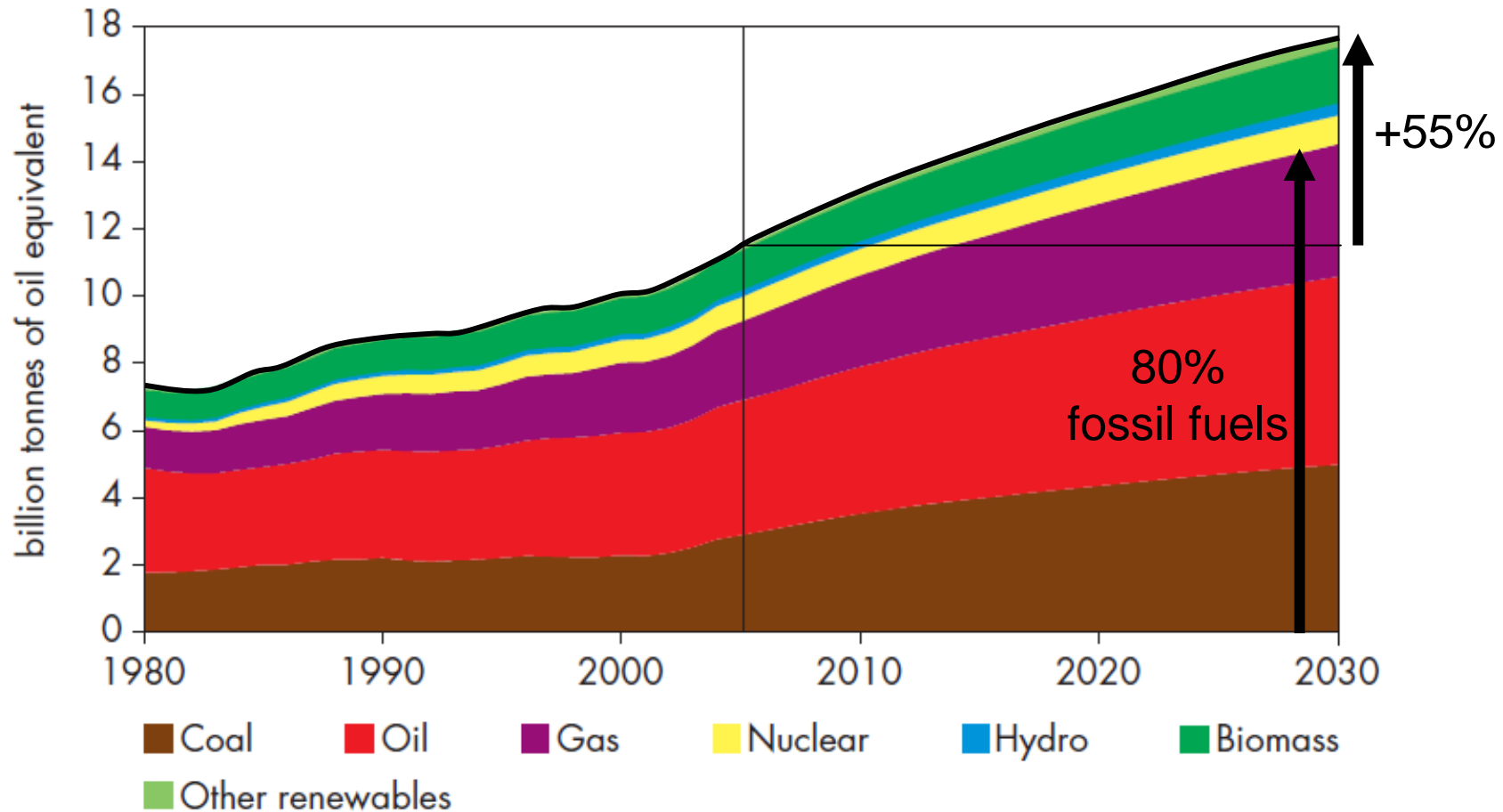
WORLD RESOURCES INSTITUTE

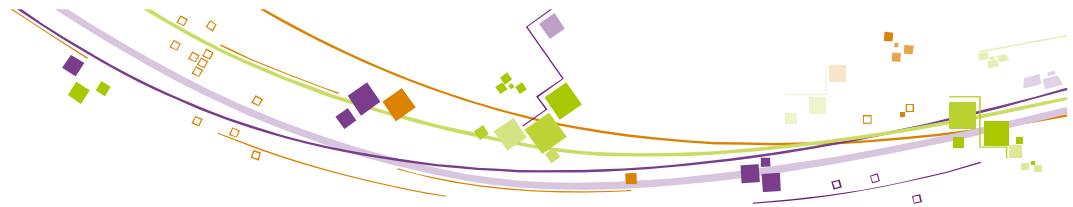
Sources & Notes: All data is for 2000. All calculations are based on CO₂ equivalents, using 100-year global warming potentials from the IPCC (1996), based on a total global estimate of 41,755 MtCO₂ equivalent. Land use change includes both emissions and absorptions; see Chapter 16. See Appendix 2 for detailed description of sector and end use/activity definitions, as well as data sources. Dotted lines represent flows of less than 0.1% percent of total GHG emissions



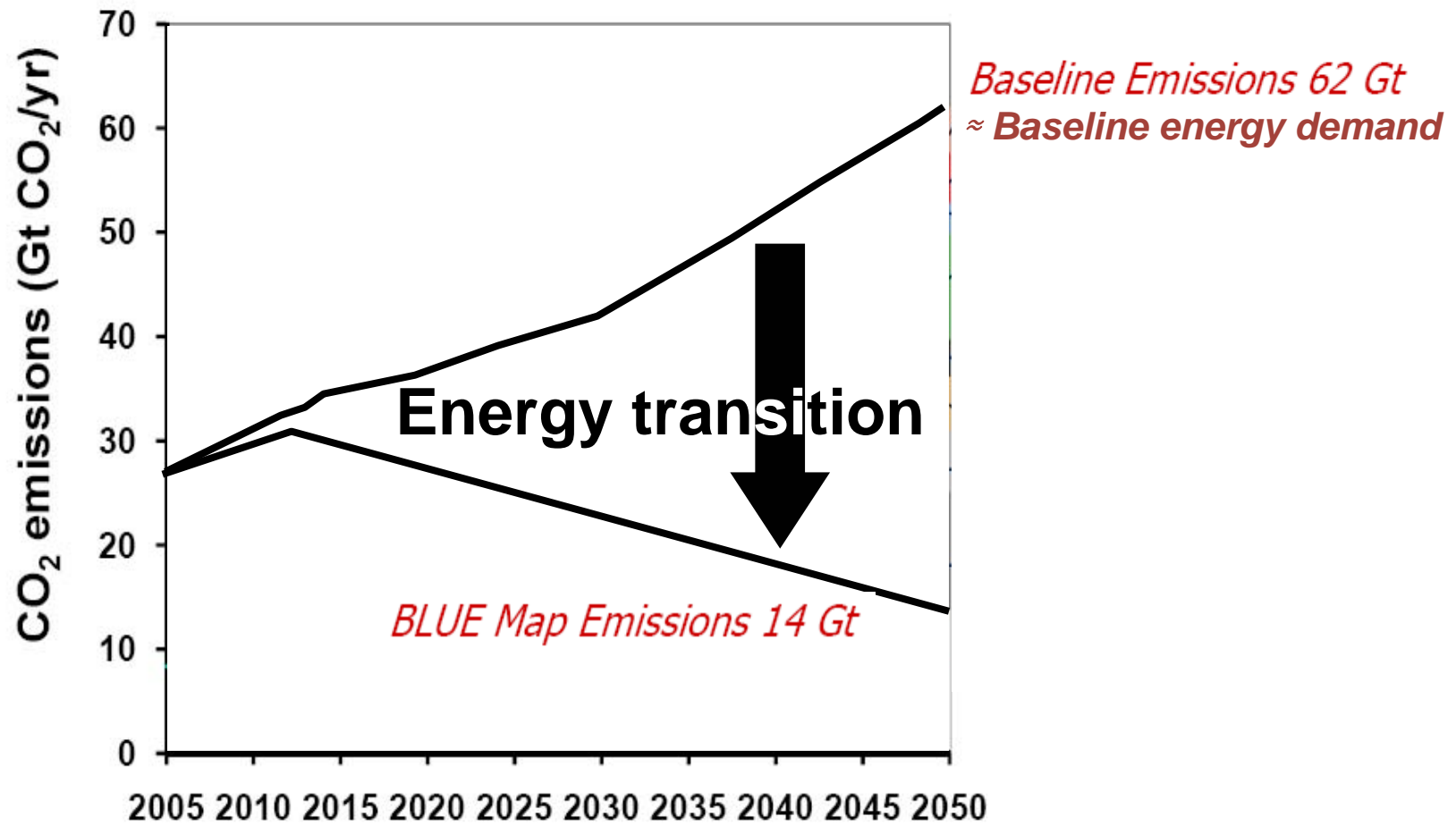
La demande énergétique mondiale

Figure 1.1: World Primary Energy Demand in the Reference Scenario (IEA, WEO 2007)

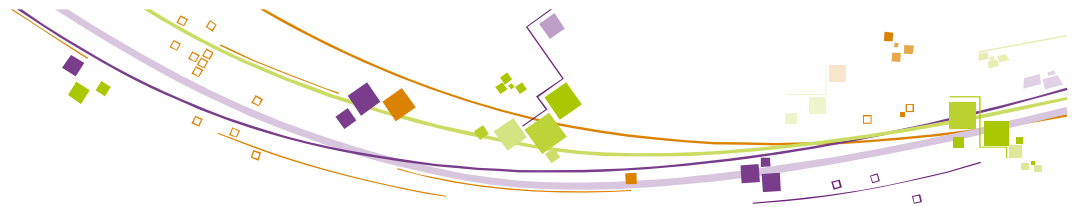




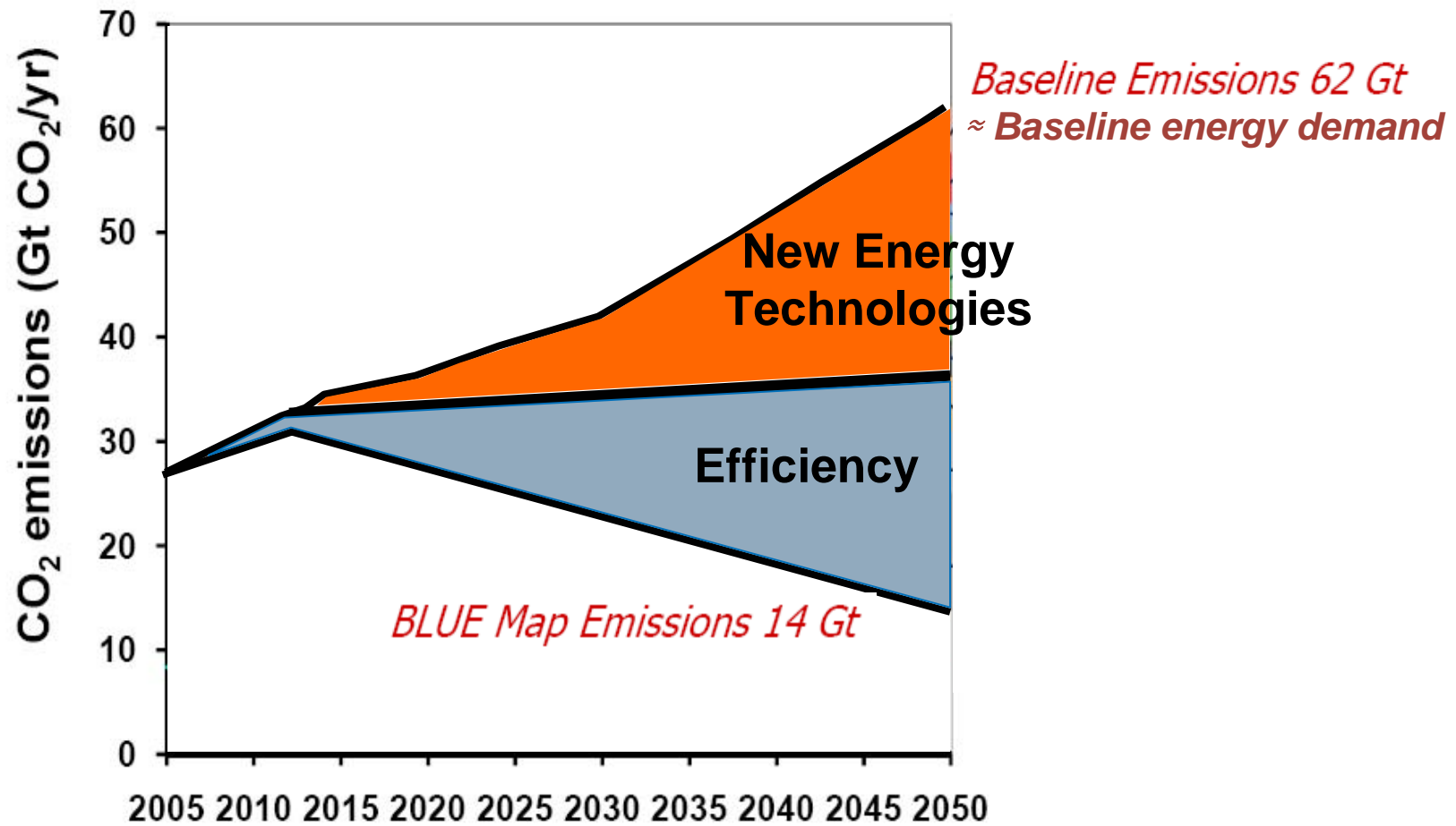
Le défis: la transition énergétique



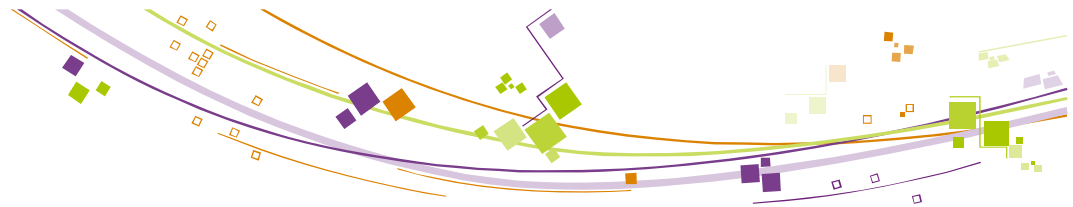
Source: IEA



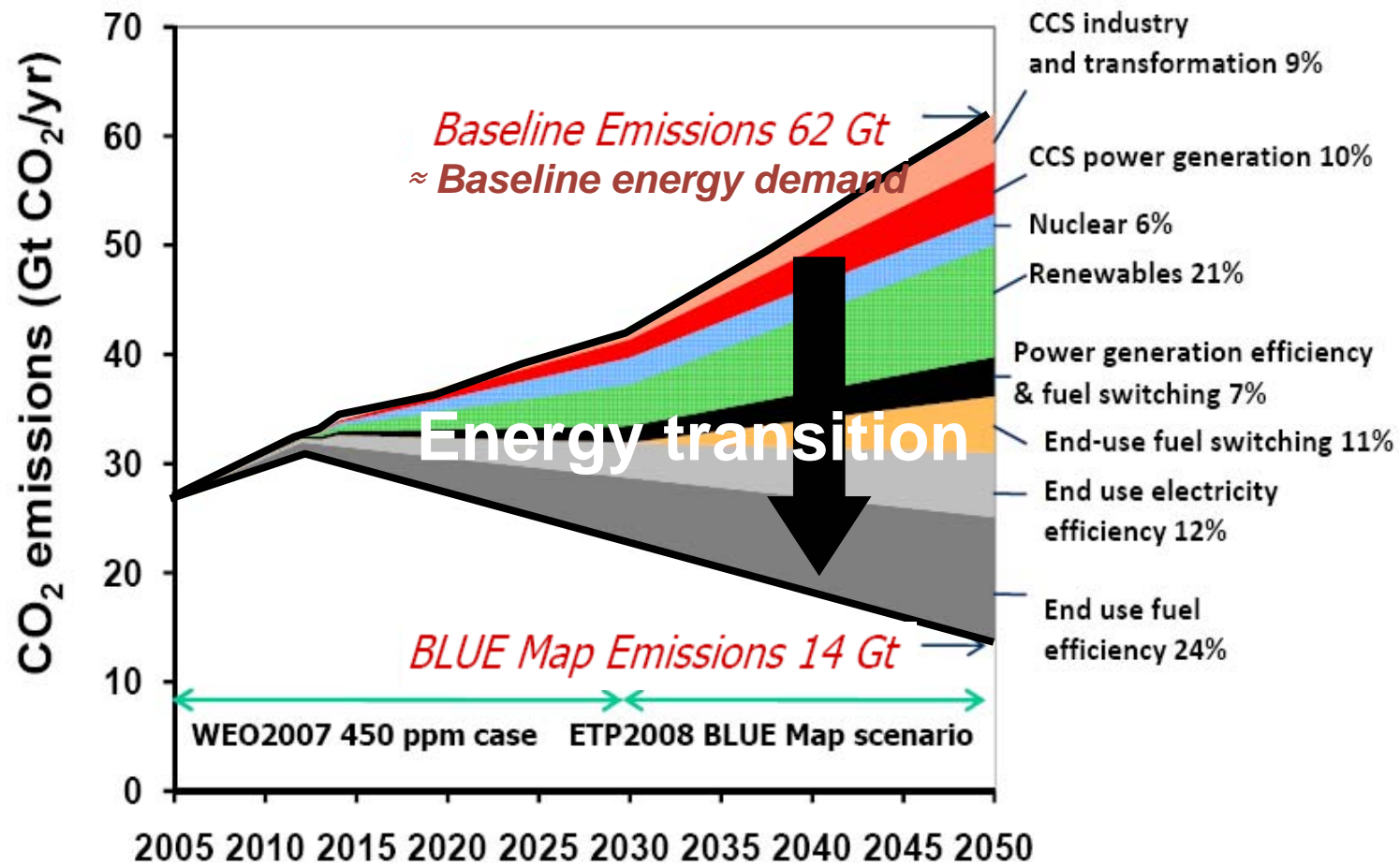
Le défis: la transition énergétique



Source: IEA



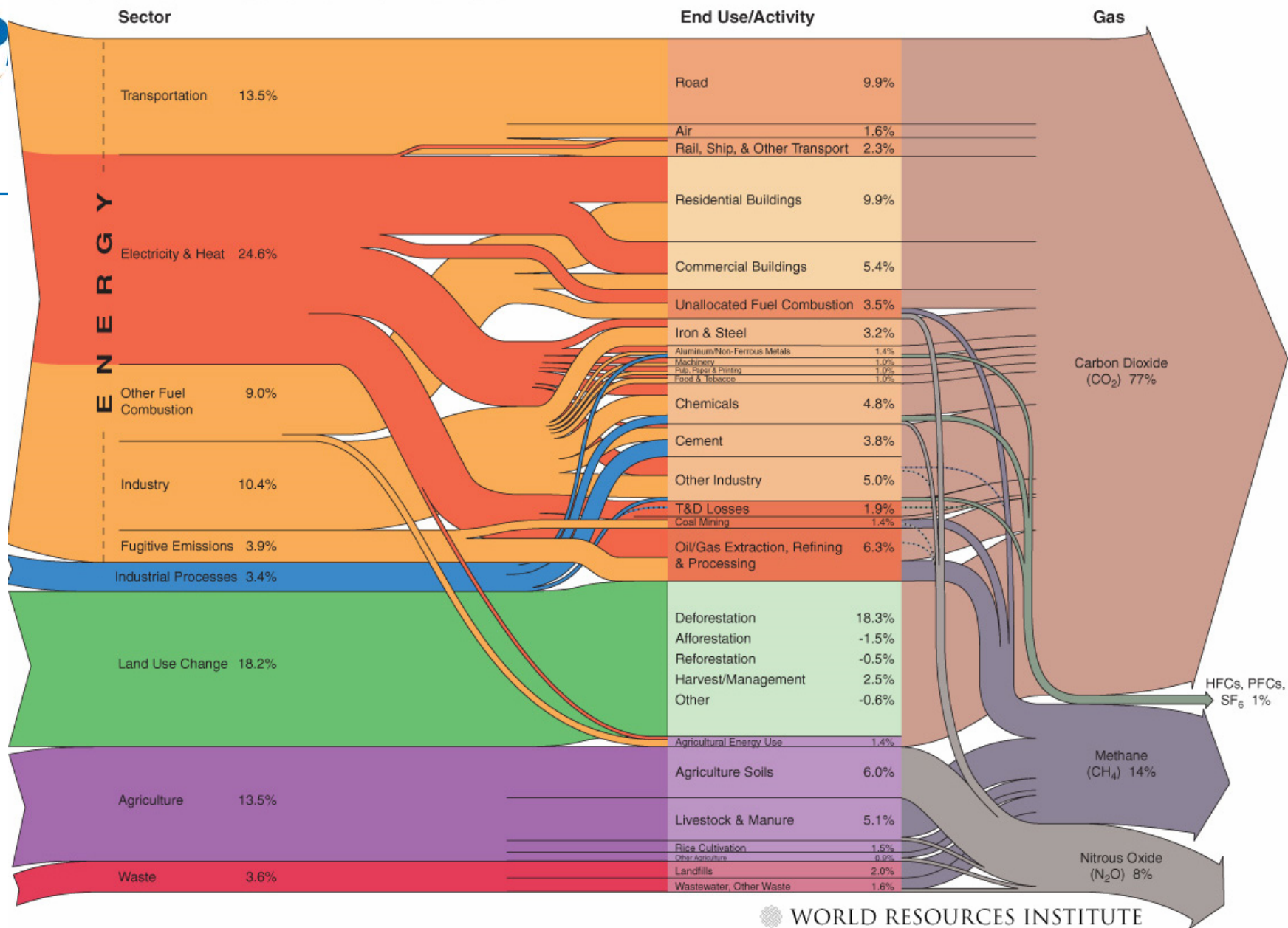
Le défis: la transition énergétique



Source: IEA



World GHG Emissions Flow Chart

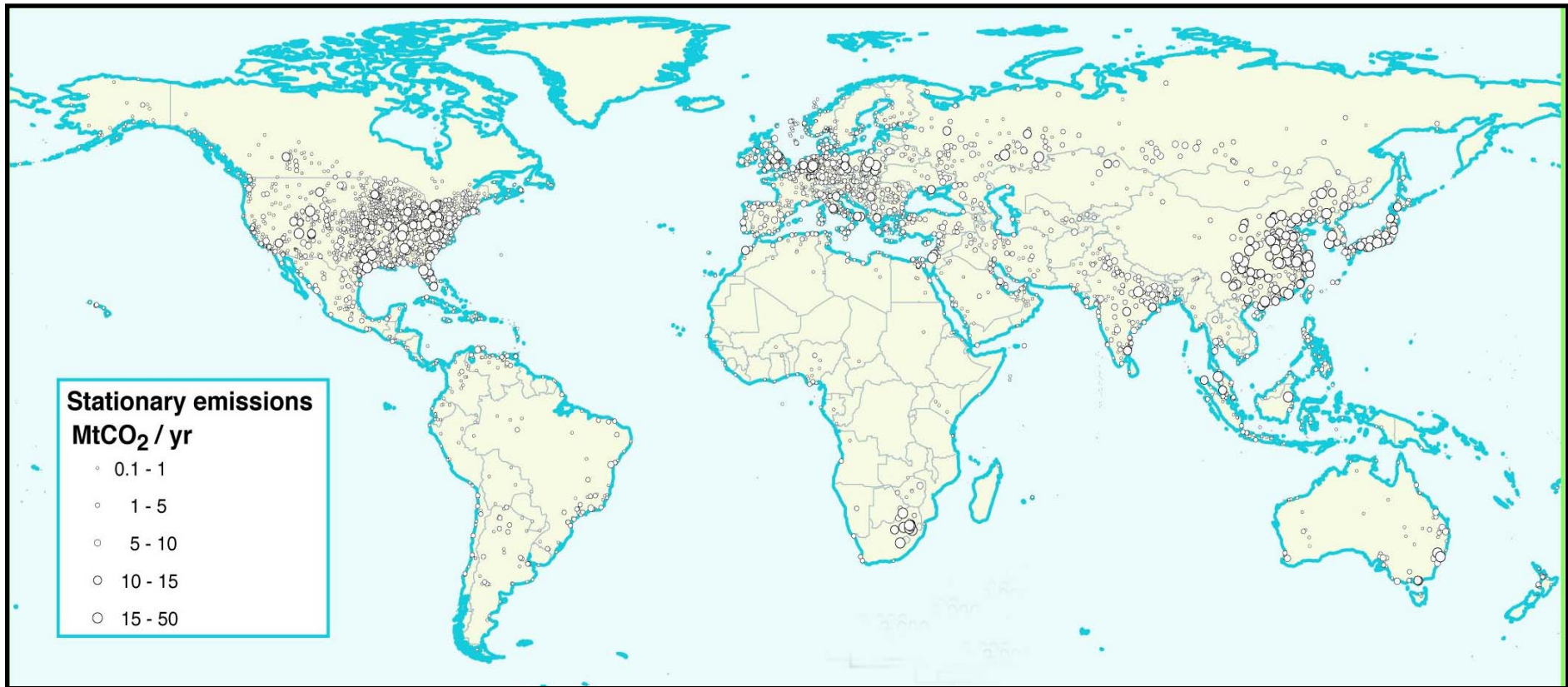


WORLD RESOURCES INSTITUTE

Sources & Notes: All data is for 2000. All calculations are based on CO₂ equivalents, using 100-year global warming potentials from the IPCC (1996), based on a total global estimate of 41,755 MtCO₂ equivalent. Land use change includes both emissions and absorptions; see Chapter 16. See Appendix 2 for detailed description of sector and end use/activity definitions, as well as data sources. Dotted lines represent flows of less than 0.1% percent of total GHG emissions



Les grandes émetteurs stationnaires



8000 sources, 13,5 Gt CO₂/y (2002 data)

source: IPCC/SRCCS

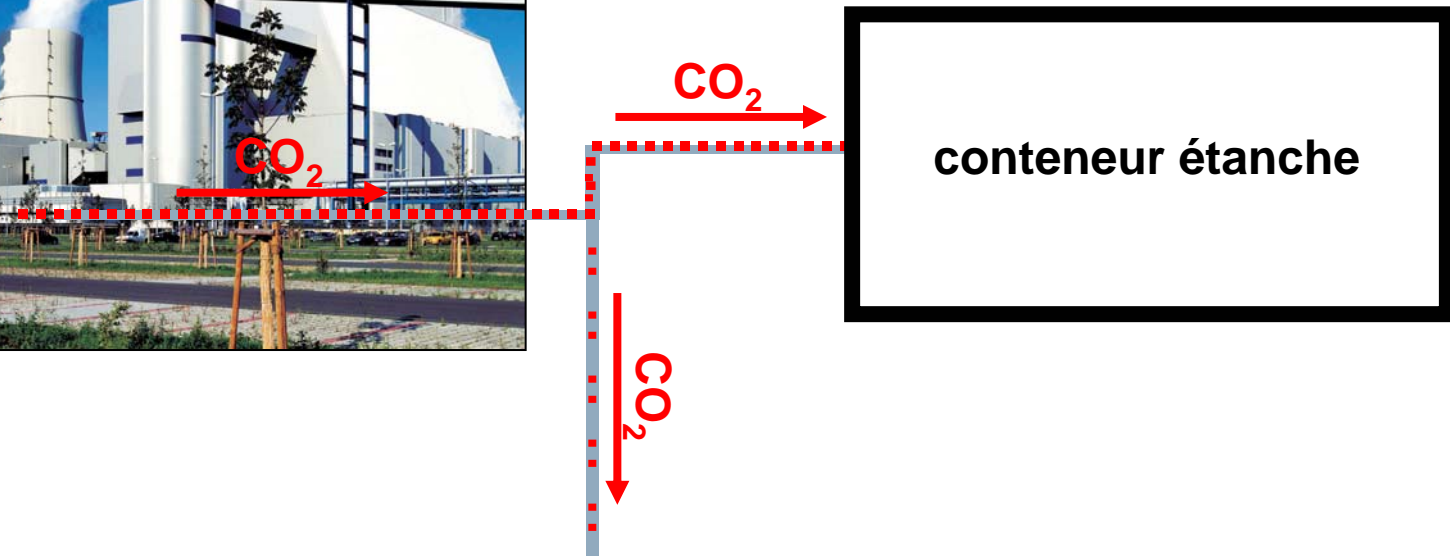


Le challenge

- **Pour les décennies à venir, les énergies fossiles fourniront une partie importante du mix énergétique mondiale**
- **Il faut impérativement et rapidement baisser les émissions de CO₂**
- ➔ **Une contribution essentielle : le captage et stockage du CO₂**
 - ... mais, ce n'est pas une solution miracle**
 - ET c'est une technologie de transition !**



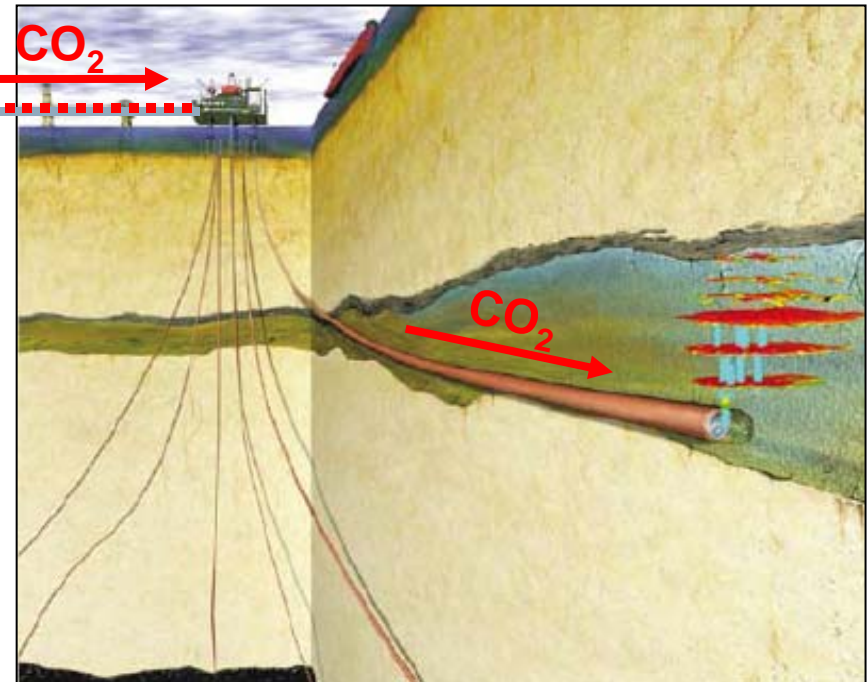
Le captage et stockage du CO₂



utilisation / recyclage
< 1%

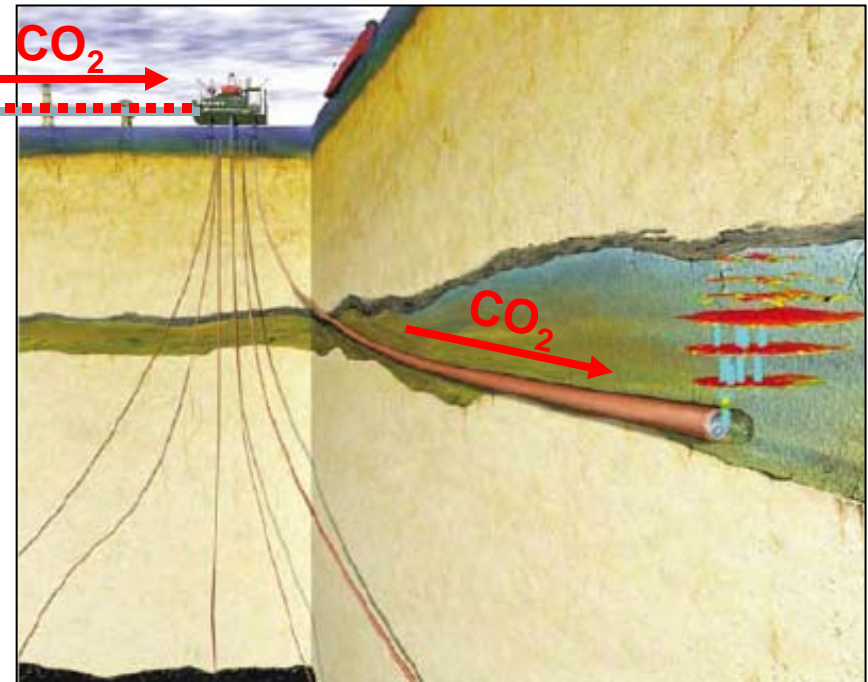


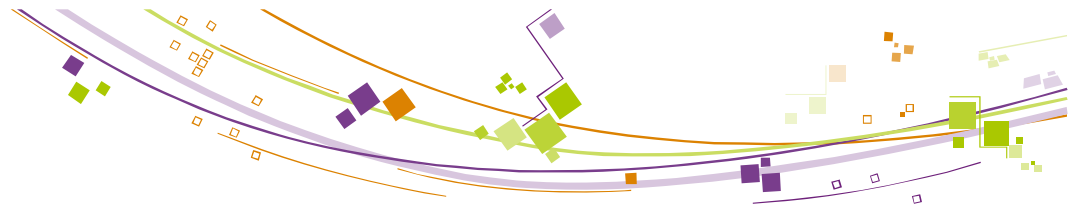
Le captage et stockage du CO₂



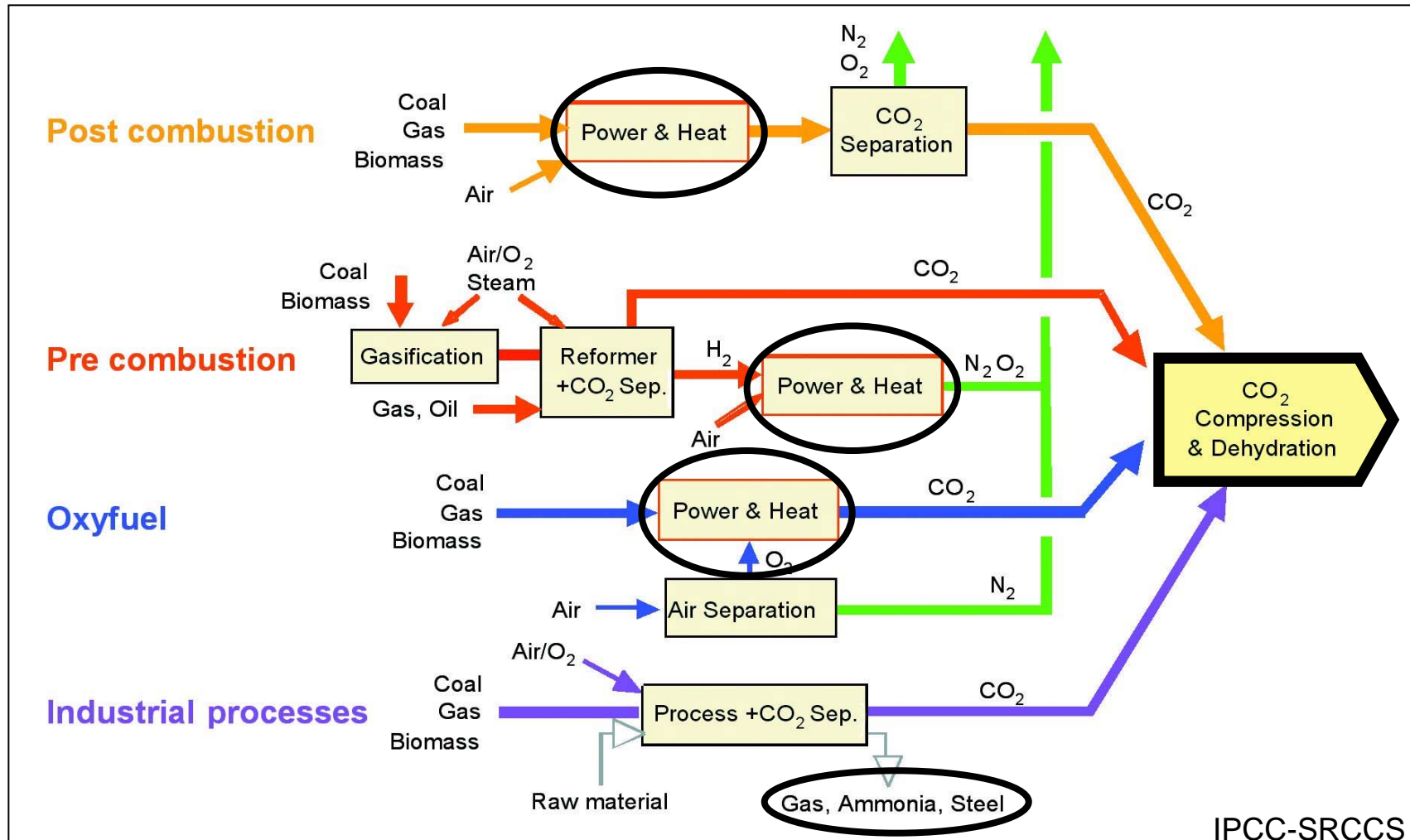


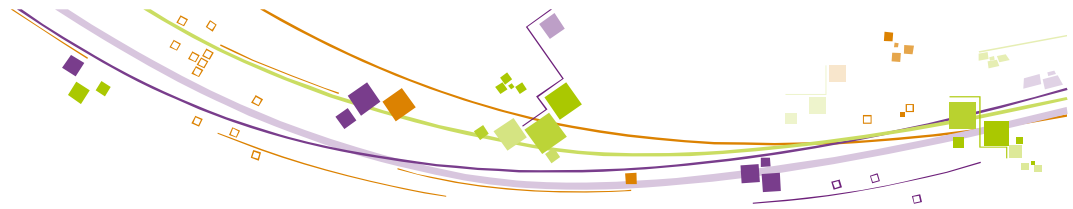
Le captage et stockage du CO₂



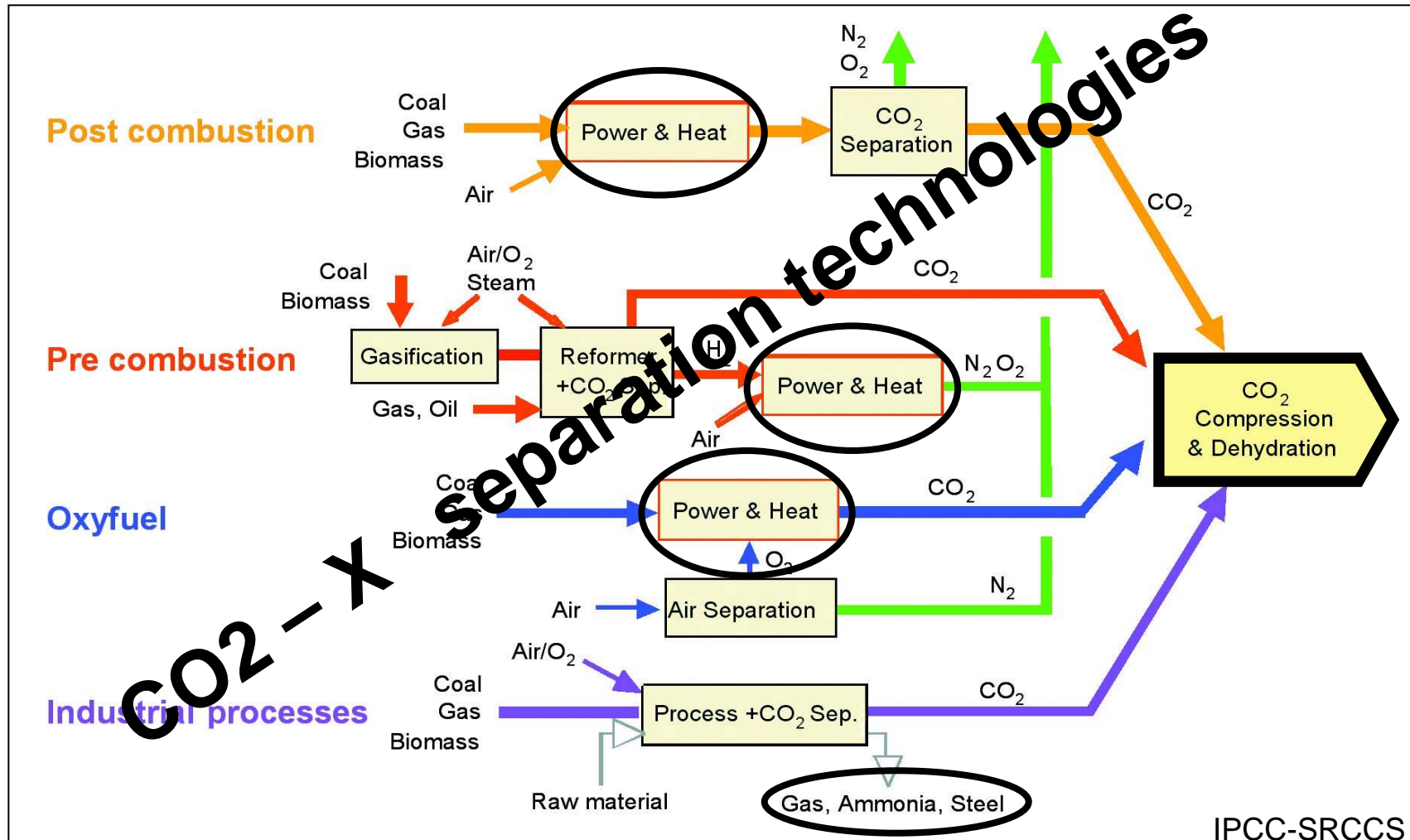


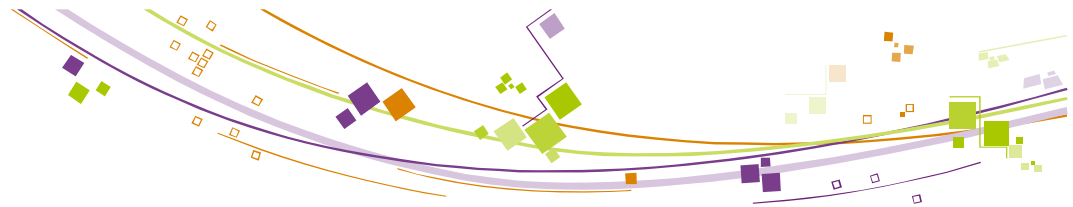
Captage: les options technologiques





Captage: les options technologiques





Captage: les options technologiques

Table 3.2 CO₂ Capture Toolbox: Current and Future Technologies

Capture method	Post-combustion decarbonisation CO ₂ /N ₂		Pre-combustion decarbonisation CO ₂ /H ₂		Oxyfuel conversion O ₂ /N ₂	
	Current	Future	Current	Future	Current	Future
Principles of separation	Current	Future	Current	Future	Current	Future
Membranes	Polymeric	Ceramic facilitated transport Carbon molecular sieve	Polymeric	Ceramic Palladium Reactors Contactors	Polymeric	Ion-transport facilitated transport
Solvents / Absorption	Chemical solvents	Improved process design Improved solvents Novel contacting equipment	Chemical solvents Physical solvents	Improved process design Improved solvents Novel contacting equipment	NA	Bio-mimetic solvents
Cryogenic	Liquefaction	Hybrid process Anti-sublimation	Liquefaction	Hybrid process	Distillation	Improved distillation
Solid Sorbents	Zeolites Activated carbon	Carbonates Carbon based solvents	Zeolites Activated carbon Alumina	Dolomites Hydrotalcites Zirconates	Zeolites Activated carbon	Carbonates Hydrotalcites Silicates
Biotechnology		Algae production		High pressure		Bio-mimetic



CC-SRCCS

Source: IEA

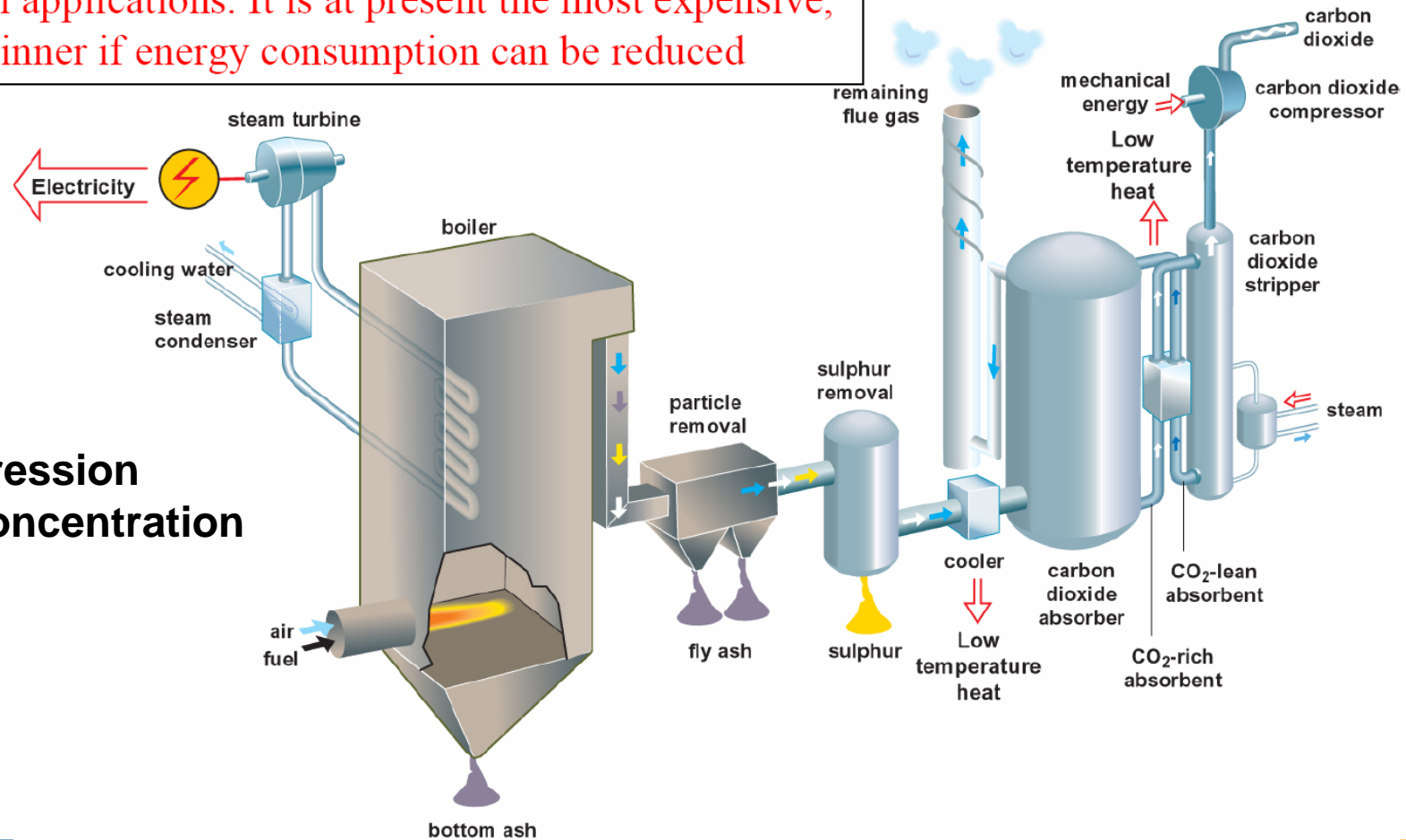
Sources: ZEP, 2006; Feron, 2006.

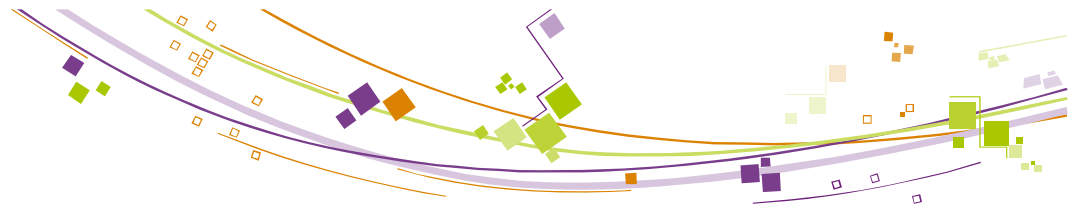


Captage en post-combustion

Technology is commercially available in medium scale for industrial applications. It is at present the most expensive, a winner if energy consumption can be reduced

- Faible pression
- Faible concentration en CO₂





Des installations de (très grande) taille



Figure 1: A visualisation of part of the CO₂ Capture Plant - the man standing in front of the two large absorbers gives an impression of scale

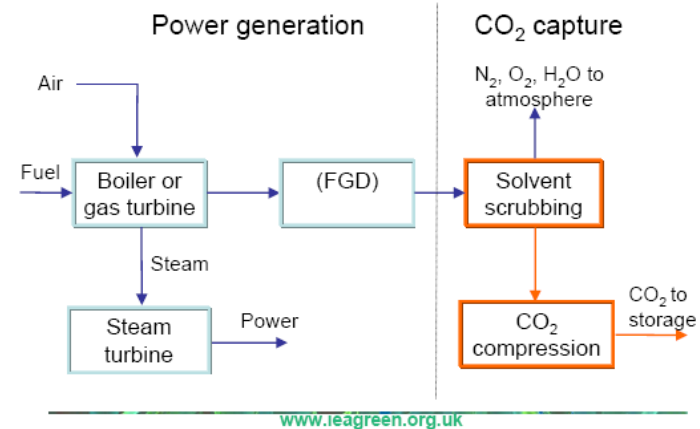
Captage en post-combustion avantages / défis

■ Avantages

- technologie mature héritée du traitement de gaz
- pureté du CO₂
- re-engineering de centrales existantes possible (si rendement élevé)
- technologie expérimentée sur pilote

■ Défis

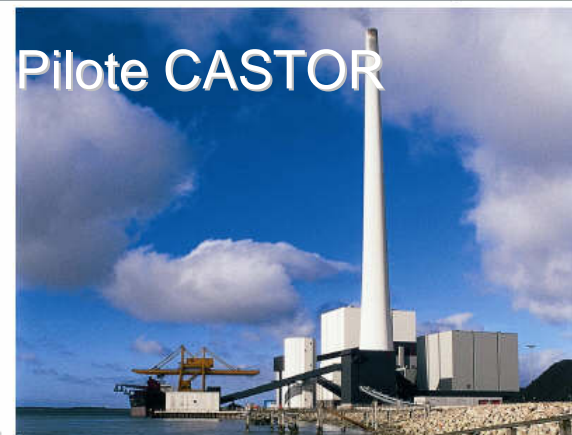
- réduire la pénalité énergétique
 - optimisation des solvants, intégration énergétique
- accroître la compacité des installations
- minimiser le renouvellement des solvants

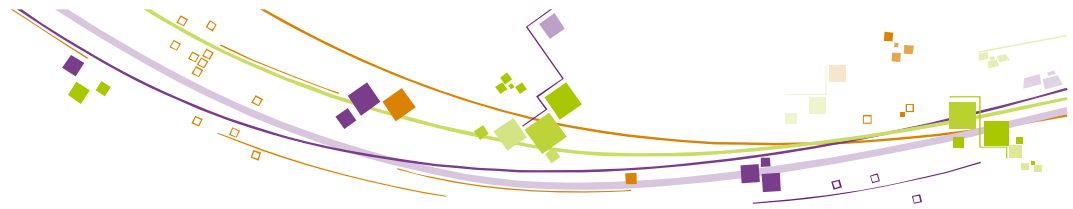


Esbjergværket

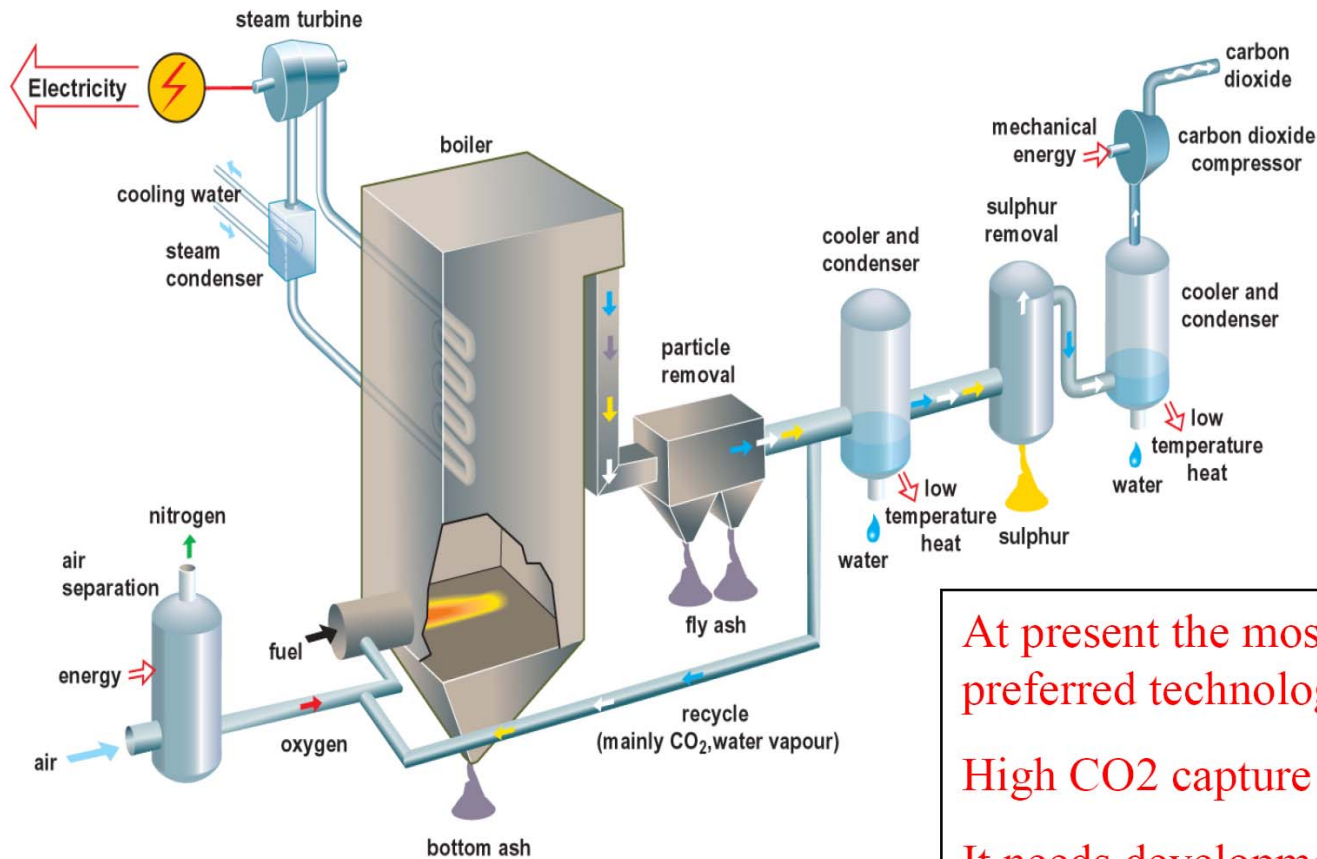


Pilote CASTOR





Captage en oxycombustion



At present the most competitive and preferred technology for coal.

High CO₂ capture rate

It needs development, pilot and demo plants to validate design data

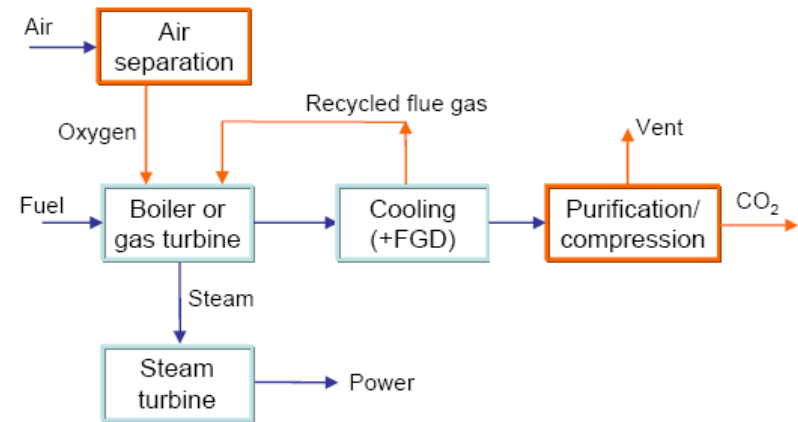
Captage en oxycombustion avantages / défis

■ Avantages

- concentration élevée en CO₂ (80%)
- compacité des installations, séparation par variation de pression

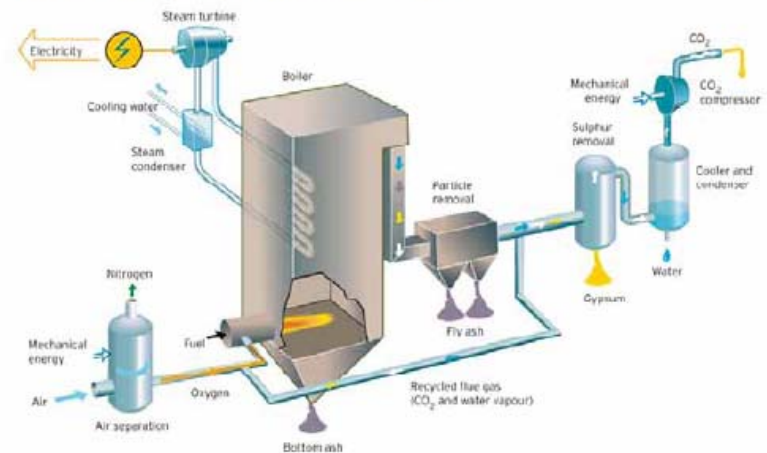
■ Défis

- implantation à grande échelle
- coût de la production d'O₂
- technologie des brûleurs, des turbines
- combustion haute température (présence d'incondensables)



www.ieagreen.org.uk

Oxyfuel (O₂/CO₂ recycle) combustion capture



Combustion par boucle chimique

Chemical Looping Combustion (CLC)

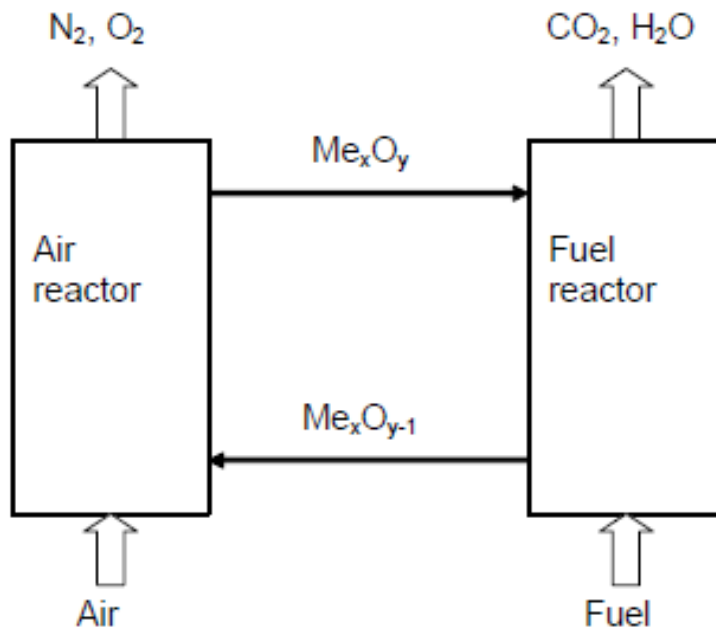


Fig. 1. Chemical-looping combustion. Me_xO_y/Me_xO_{y-1} denotes recirculating oxygen carrier material.

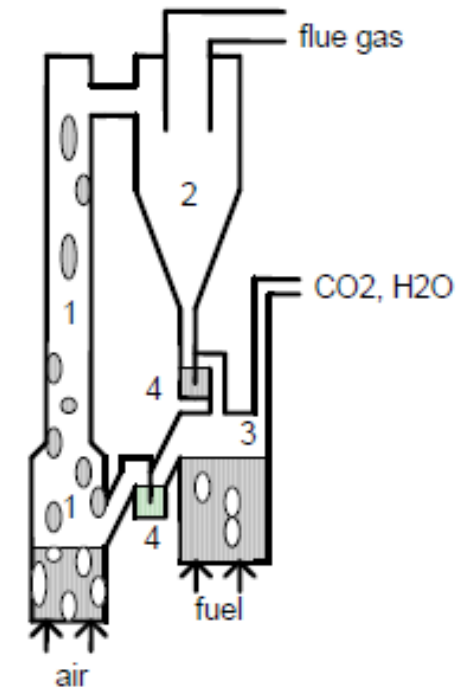
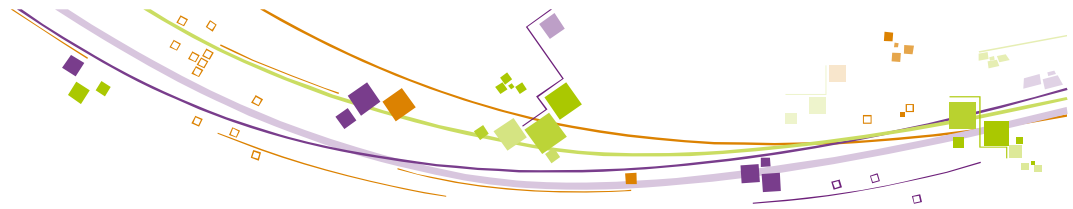


Fig. 2. CLC process, with two fluidized reactors. 1) air reactor, 2) cyclone, 3) fuel reactor, 4) particle locks

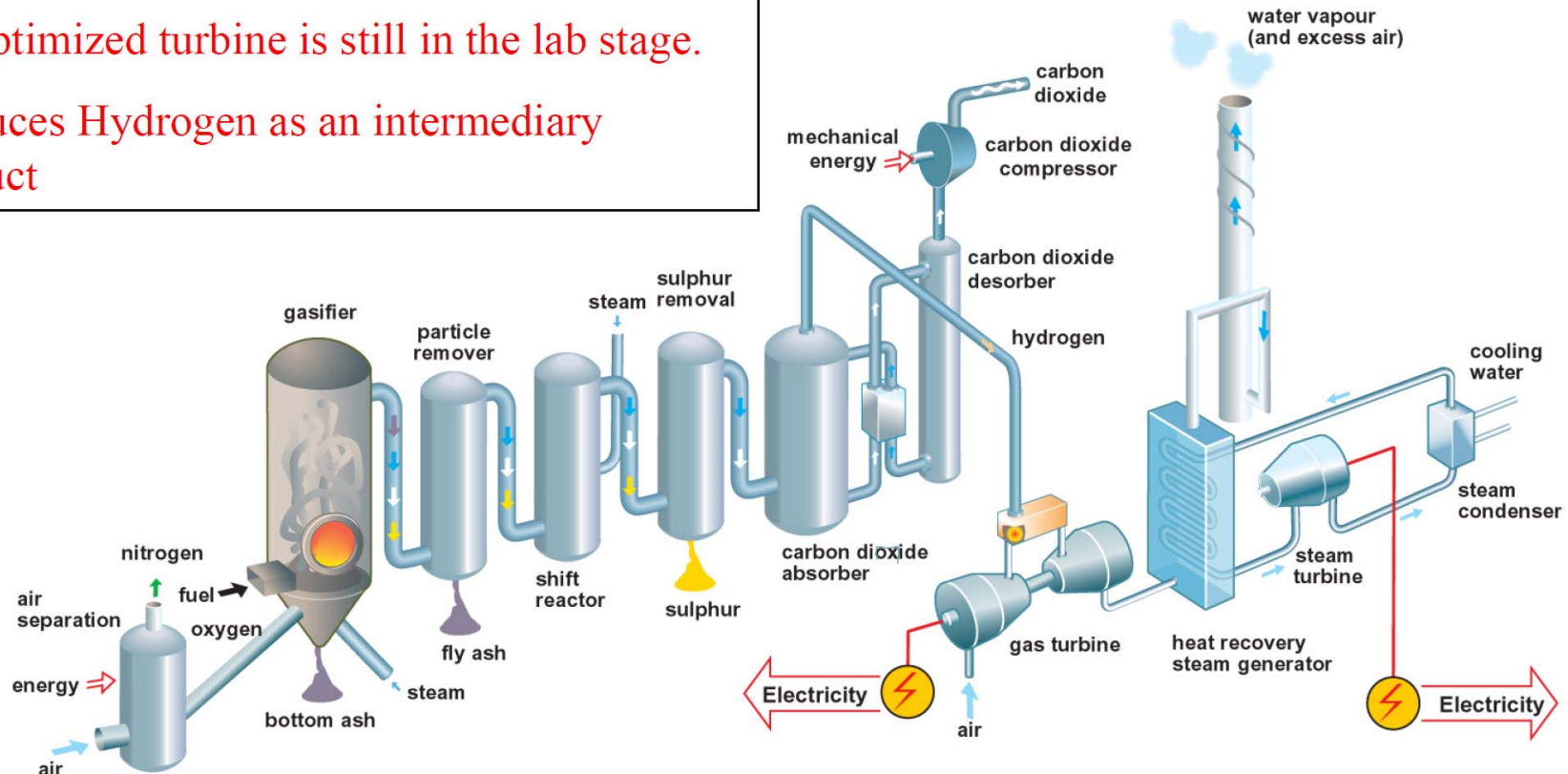


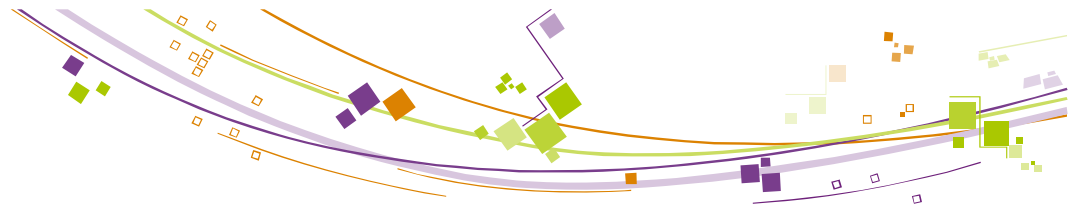
Captage en pré-combustion

This technology might be competitive. IGCC without capture exists in five demo plants.

An optimized turbine is still in the lab stage.

Produces Hydrogen as an intermediary product





Captage en pré-combustion

Gaz naturel

Résidus

Charbon

Biomasse



CO₂

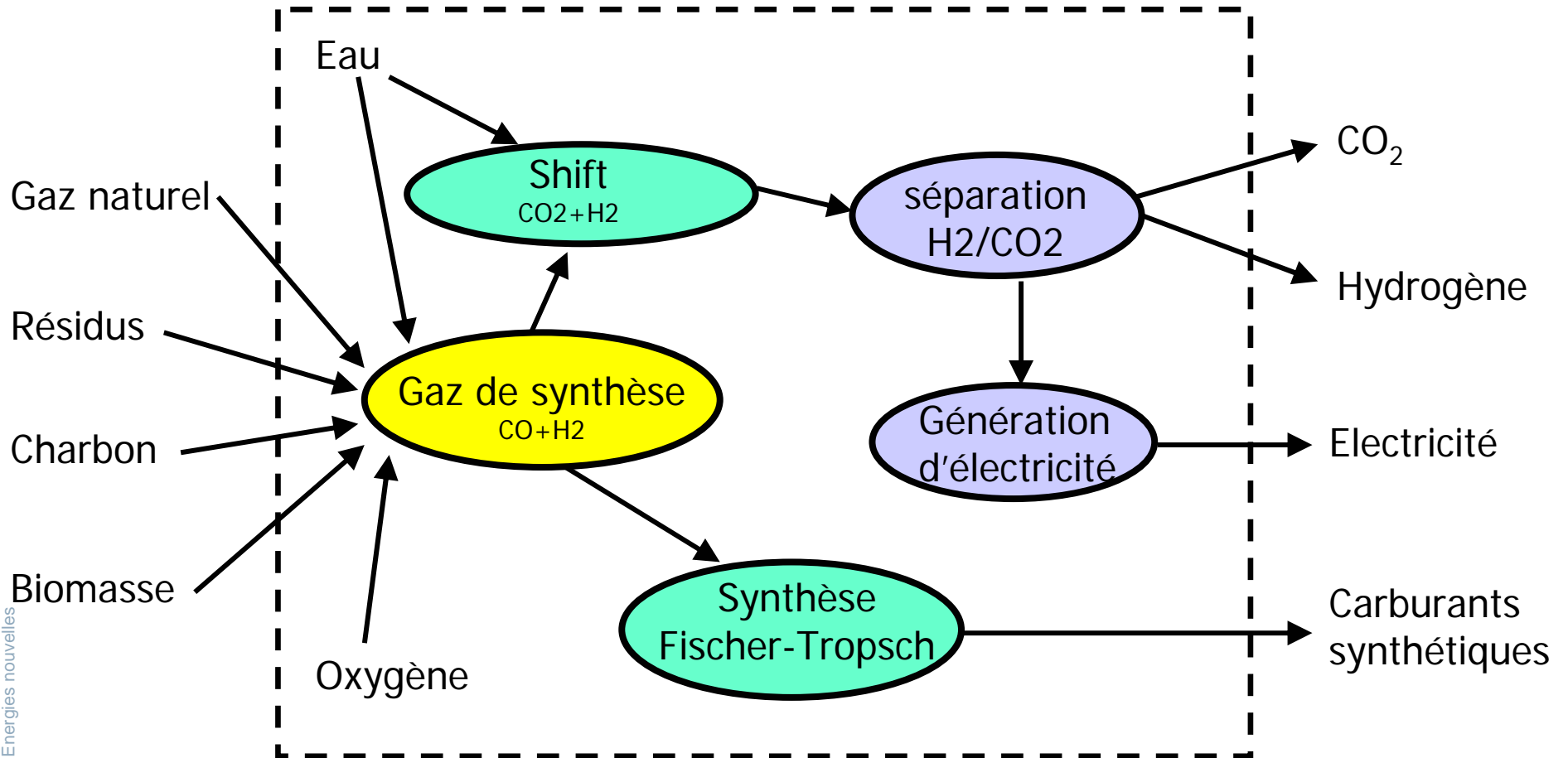
Hydrogène

Electricité

Carburants synthétiques



Captage en pré-combustion



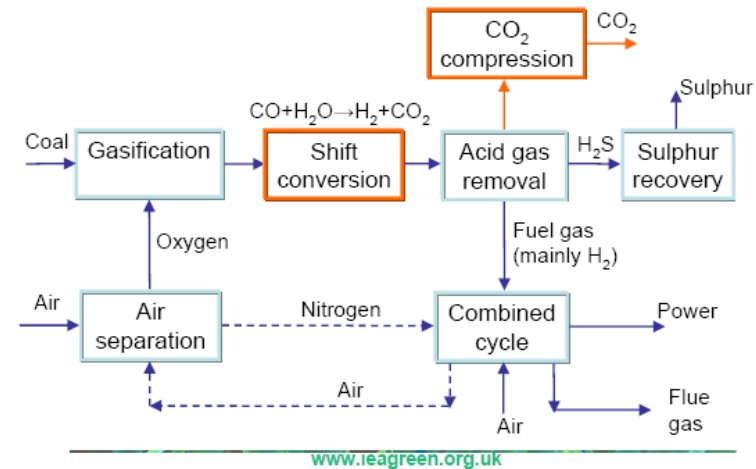
Captage en pré-combustion avantages / défis

■ Avantages

- **concentration élevée en CO₂ et forte pression (20-70 bar)**
 - pénalité énergétique faible
 - compacité du captage
- **polygénération**
 - électricité, H₂, fluides synthétiques
- **pénalité énergétique faible**

■ Défis

- **fiabilité (tend à s'améliorer)**
- **investissements initiaux élevés**
- **combustion de l'hydrogène (turbine)**



Shell gasifier IGCC plant, Buggenum, Netherlands

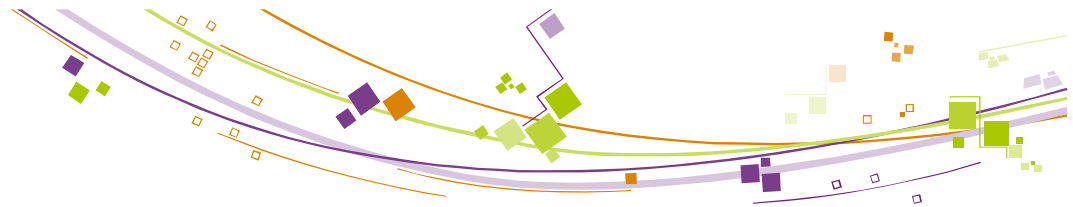


Les travaux futurs

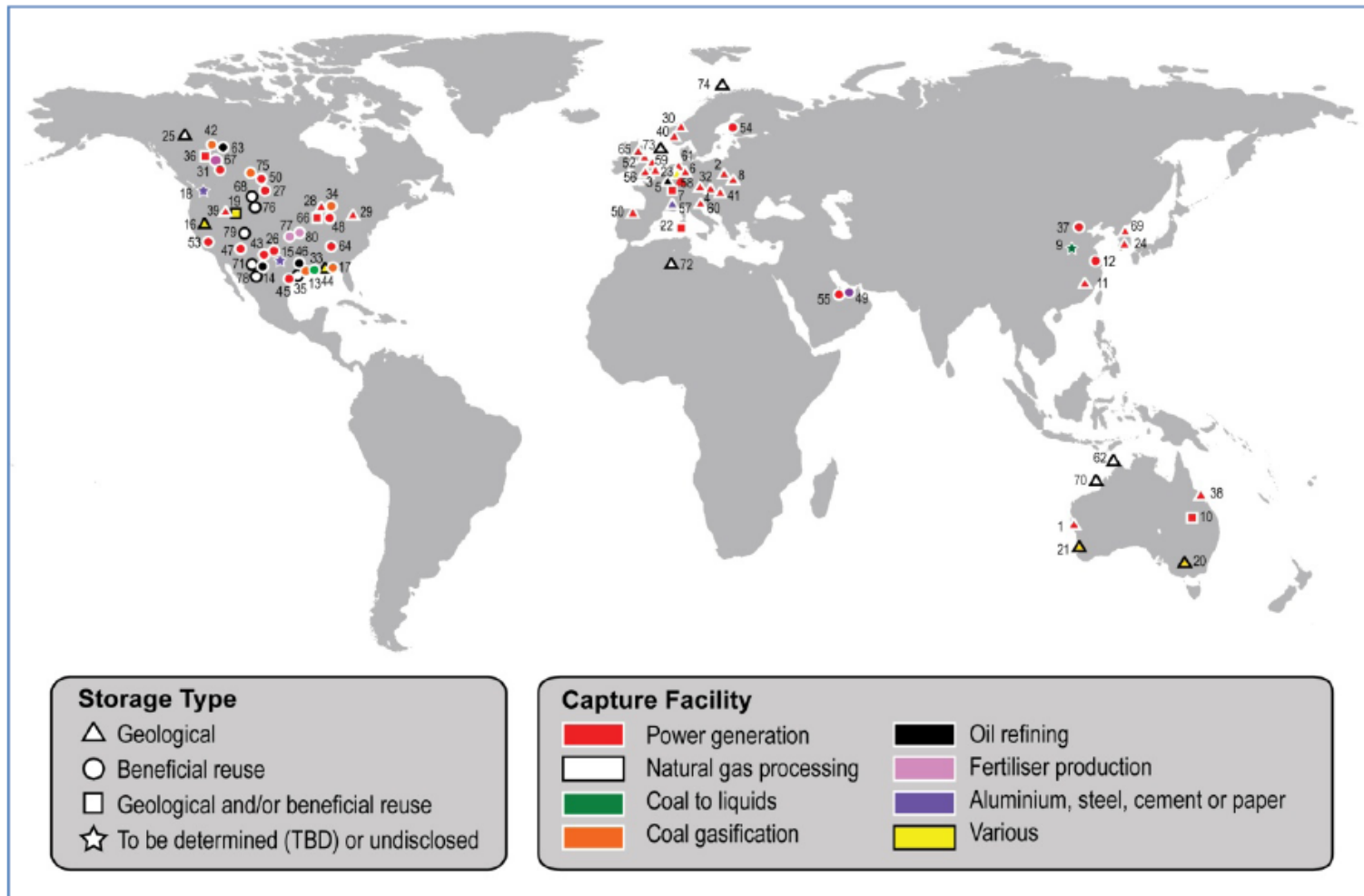
- **Besoin d'unités pilotes et démonstrateurs industriels**
 - mieux connaître les coûts réels du captage
 - valider la mise à l'échelle

- **R&D**
 - Objectif: réduire le coût du captage

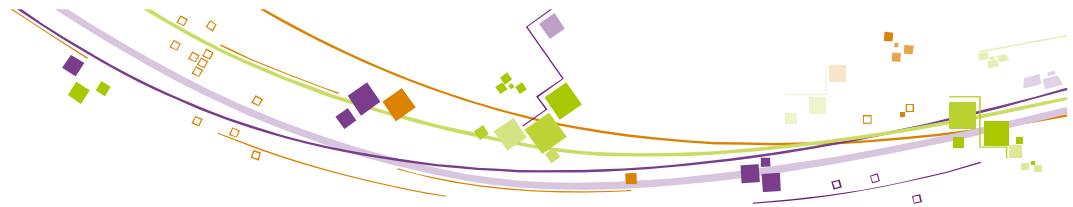
 - Nouveaux procédés
 - Nouveaux matériaux pour la séparation



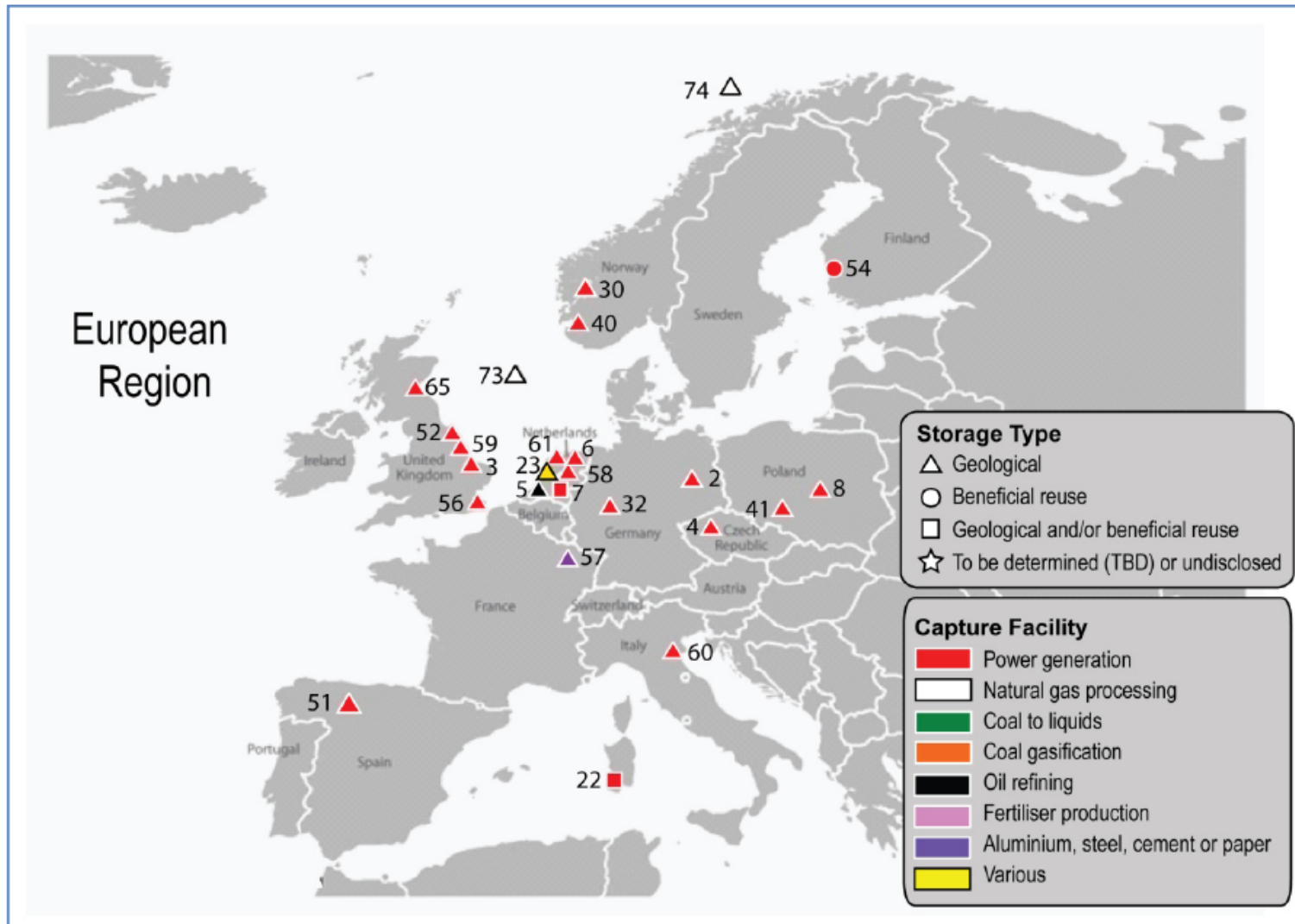
Projets (semi-) industriels

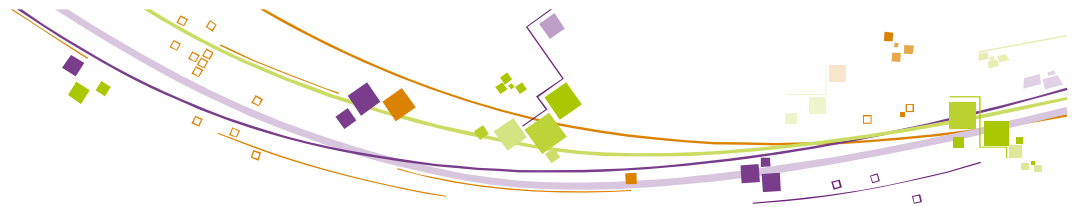


source: CSLF / GCCSI



Projets (semi-) industriels





Les travaux de R&D

Table 3.2 CO₂ Capture Toolbox: Current and Future Technologies

Capture method	Post-combustion decarbonisation CO ₂ /N ₂		Pre-combustion decarbonisation CO ₂ /H ₂		Oxyfuel conversion O ₂ /N ₂	
	Current	Future	Current	Future	Current	Future
Principles of separation						
Membranes	Polymeric	Ceramic facilitated transport Carbon molecular sieve	Polymeric	Ceramic Palladium Reactors Contactors	Polymeric	Ion-transport facilitated transport
Solvents / Absorption	Chemical solvents	Improved process design Improved solvents Novel contacting equipment	Chemical solvents Physical solvents	Improved process design Improved solvents Novel contacting equipment	NA	Bio-mimetic solvents
Cryogenic	Liquefaction	Hybrid process Anti-sublimation	Liquefaction	Hybrid process	Distillation	Improved distillation
Solid Sorbents	Zeolites Activated carbon	Carbonates Carbon based solvents	Zeolites Activated carbon Alumina	Dolomites Hydrotalcites Zirconates	Zeolites Activated carbon	Carbonates Hydrotalcites Silicates
Biotechnology		Algae production		High pressure		Bio-mimetic

Source: IEA

Sources: ZEP, 2006; Feron, 2006.



Les travaux de R&D

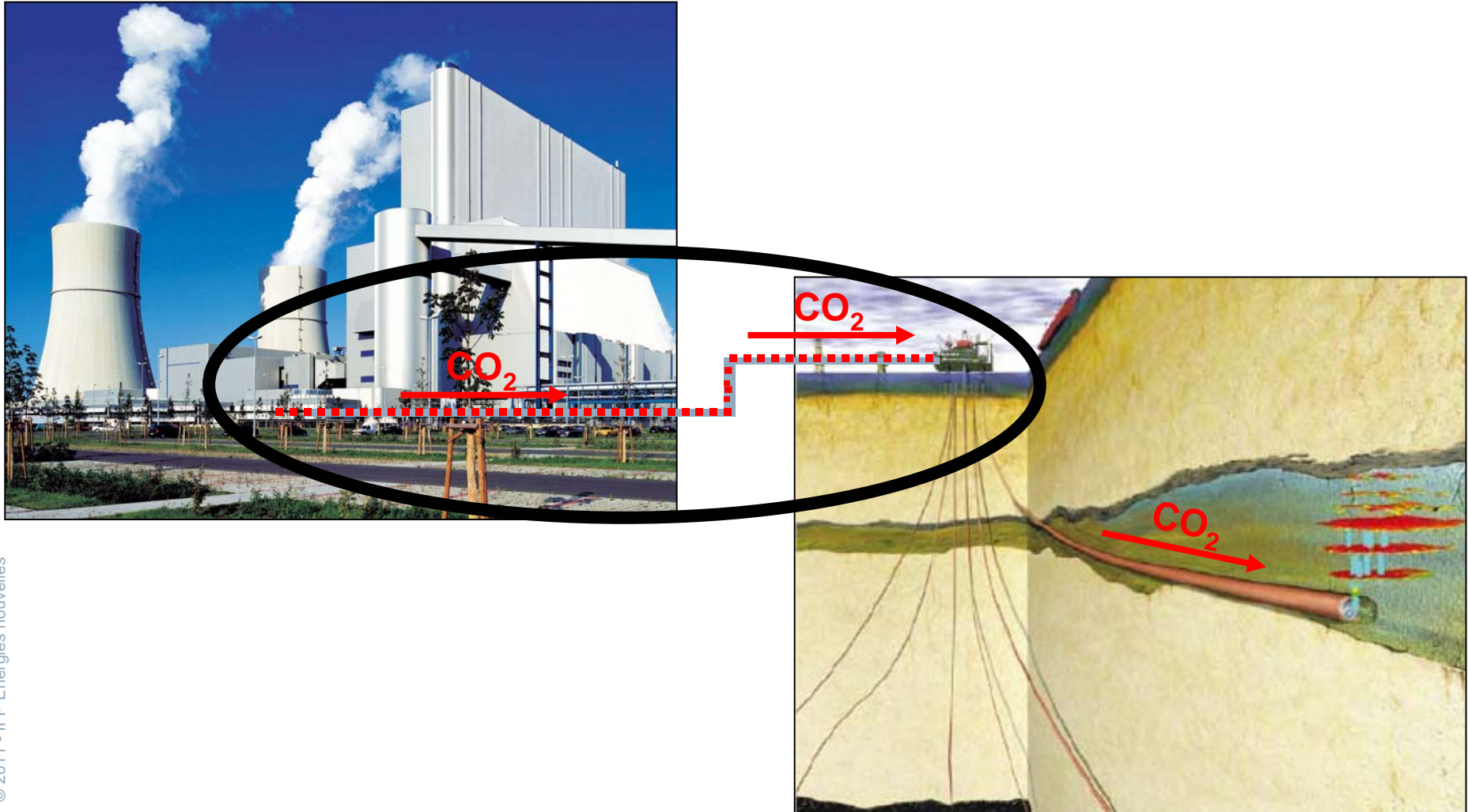
- **Nouveaux procédés**

- **Nouveaux matériaux pour la séparation**
 - faible coût (CAPEX, OPEX)
 - faible pénalité énergétique
 - technologie "verte" / durable

 - conditions de pression et température spécifiques
 - présence d'impuretés
 - grands volumes à traiter
 - grande disponibilité / charge variable

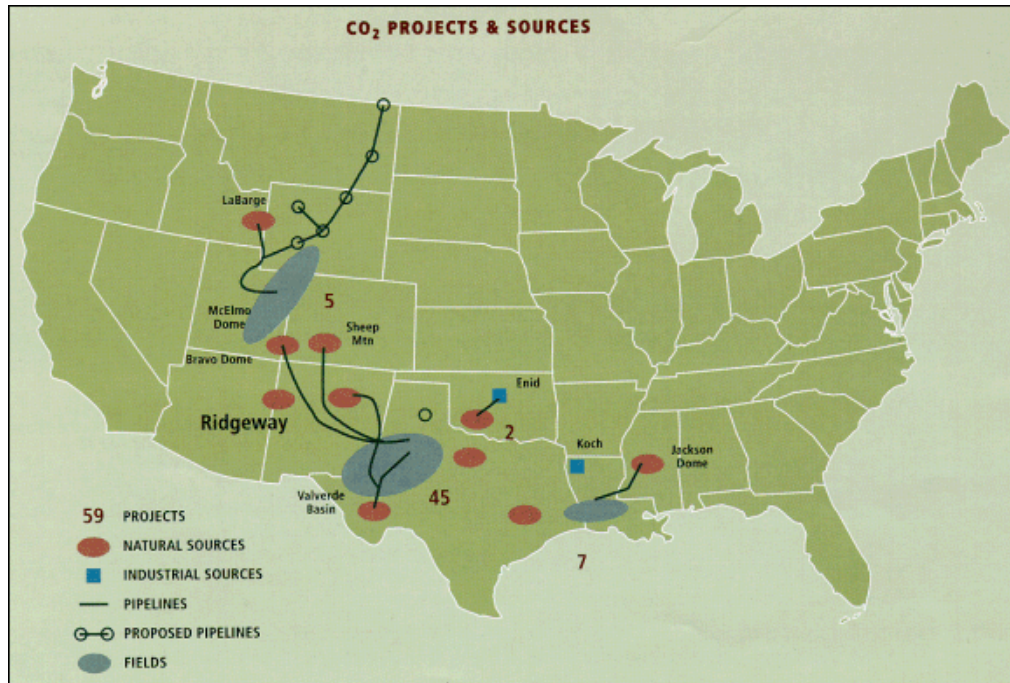


Le captage et stockage du CO₂



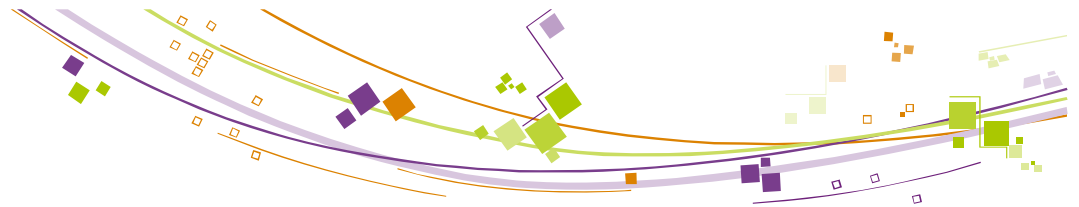


Transport du CO₂ par pipe



- Des technologies de transport maîtrisées
 - *Le CO₂ déshydraté n'est pas corrosif*
- Une surveillance à mettre en place

Réseau de transport de CO₂ aux USA



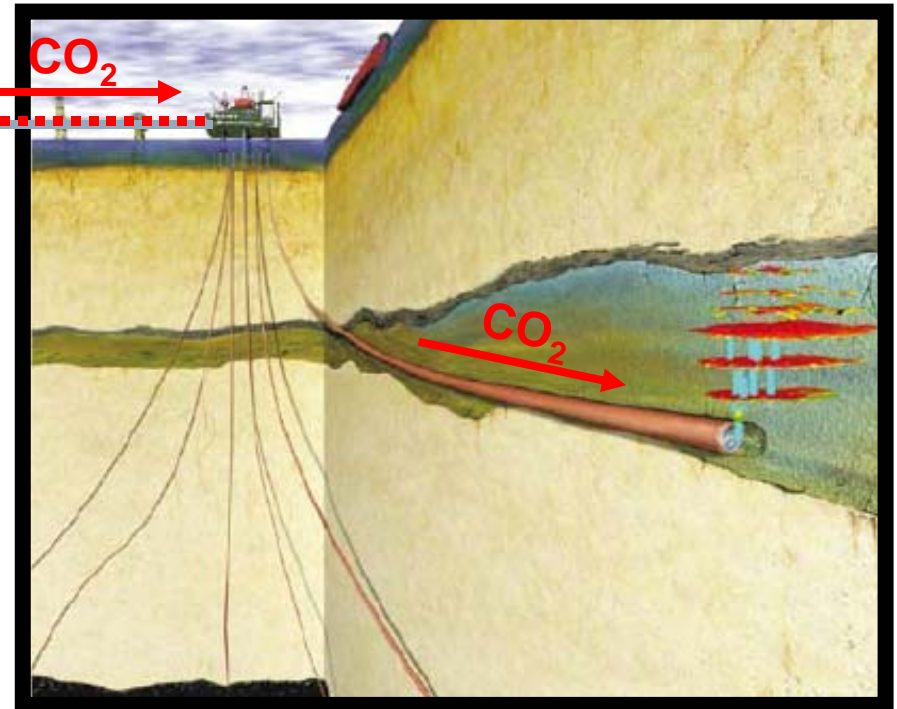
Transport du CO₂ par bateau

Yara CO₂-tankers, 1500 m³ capacity



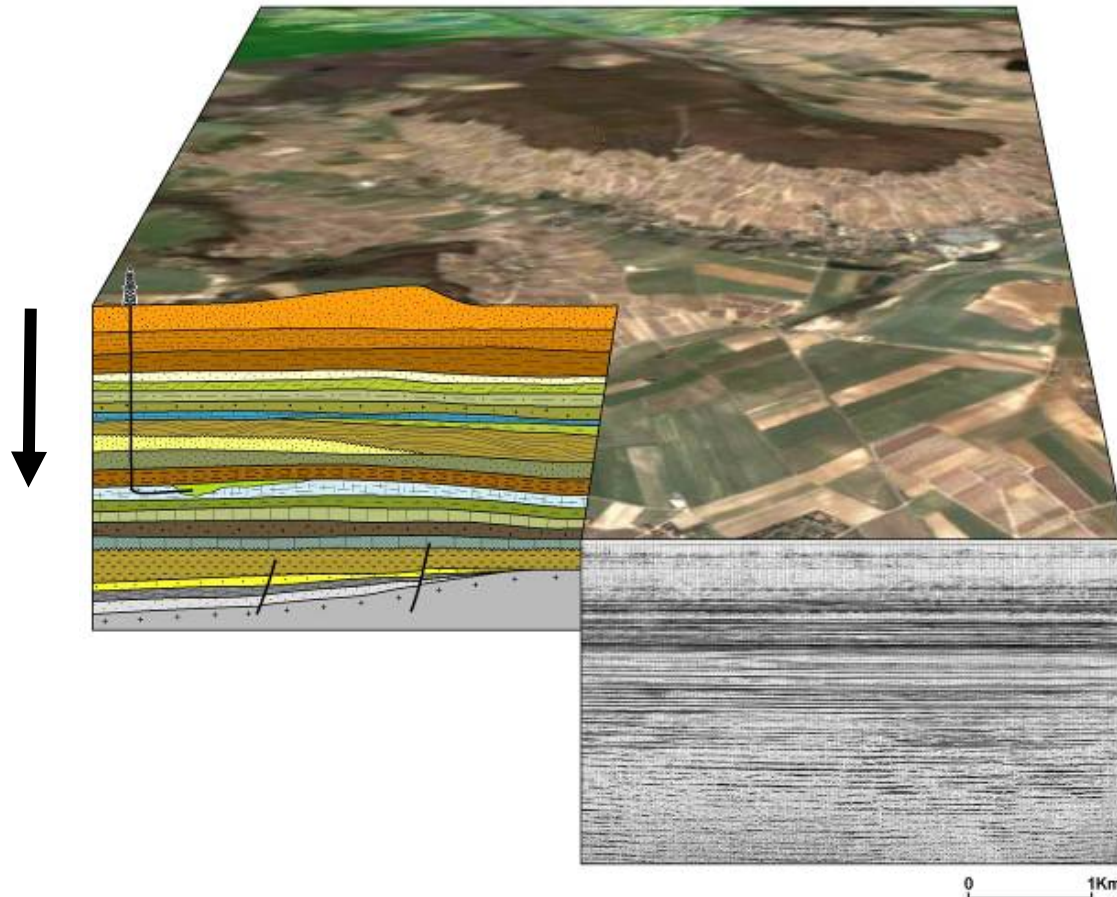


Le captage et stockage du CO₂

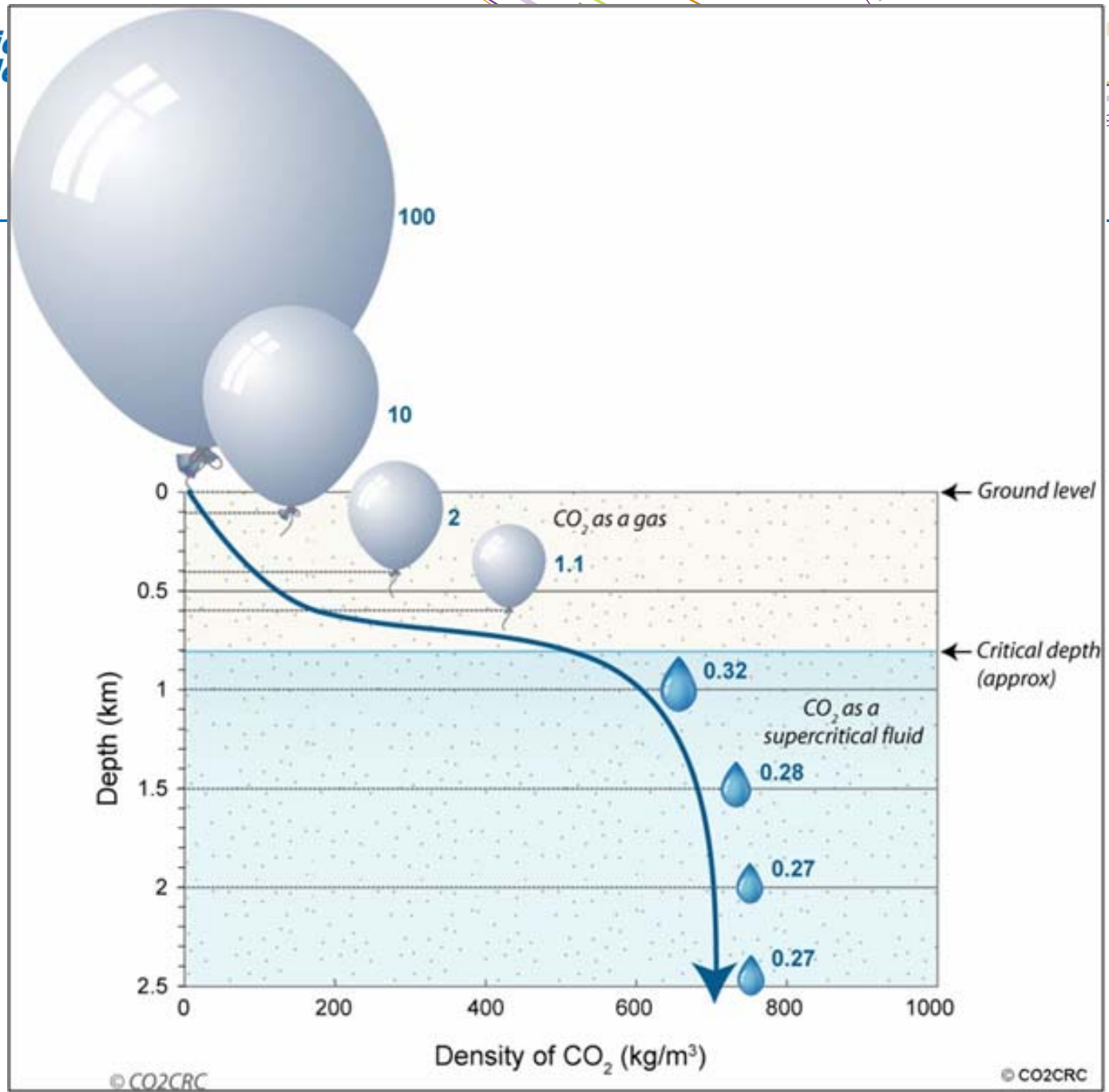


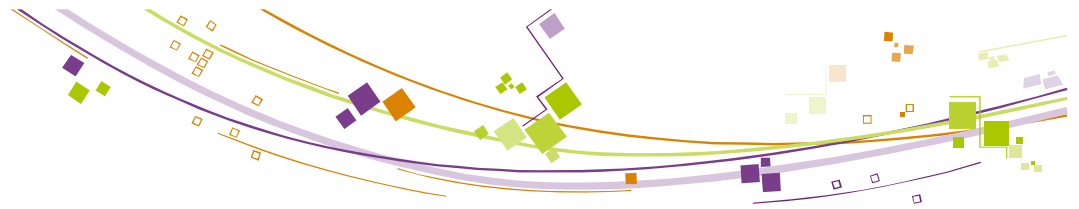


Le stockage géologique du CO₂

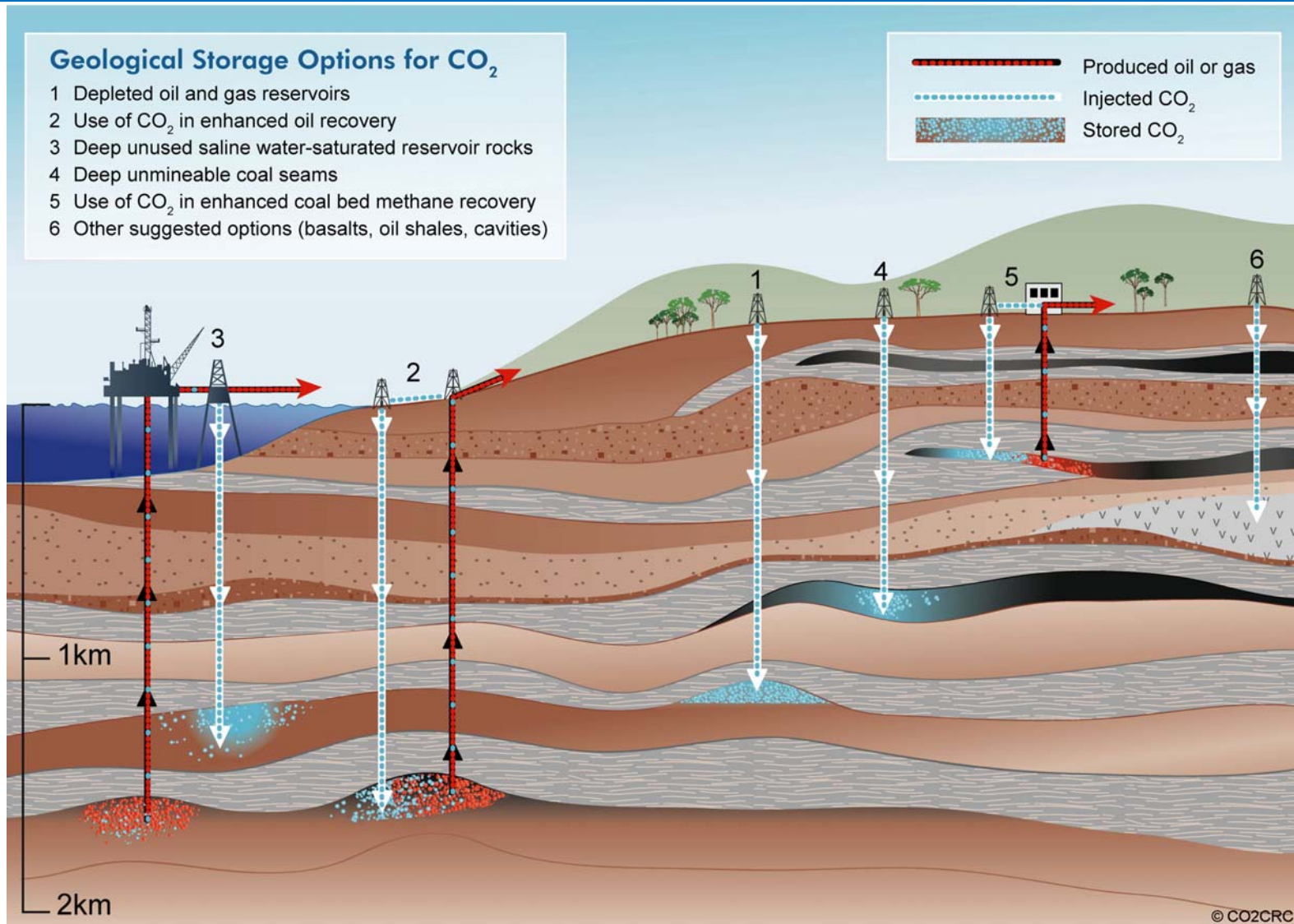


Le CO₂ est stocké à une profondeur supérieure à 1km sous forme dense (quasi liquide) !





Stockage géologique: les options





Avantages et inconvénients

■ Réservoirs épuisés

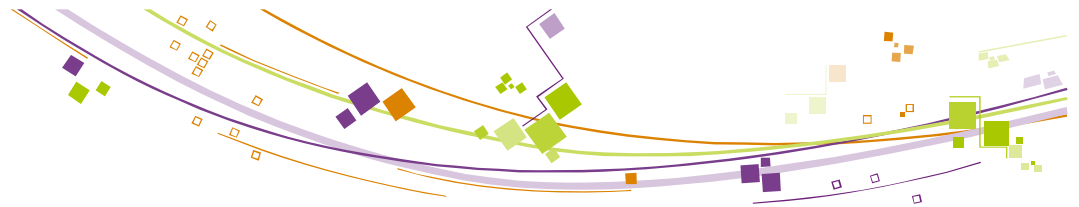
- étanchéité
- structure fermée
- bien connus
- possibilité CO₂ EOR/EGR
- distribution mondiale

■ Veines de charbon

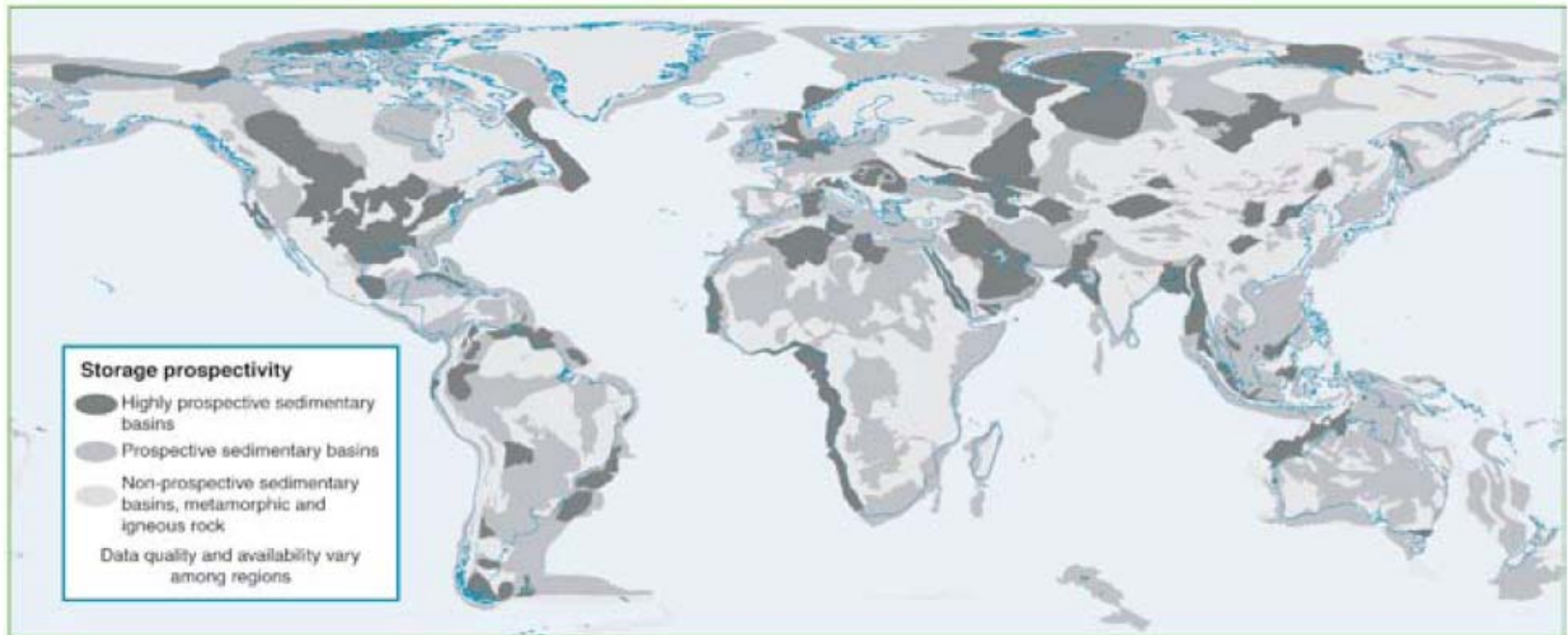
- production de méthane
- faible volume de pore, injectivité
- faible volume global

■ Aquifères salins

- très grande capacité globale
- bonne distribution globale
 - ✓ meilleure adéquation source - stockage
- généralement mal connus
- étanchéité à valider
- réglementation à établir
- coût
- acceptation par le public



Les bassins sédimentaires



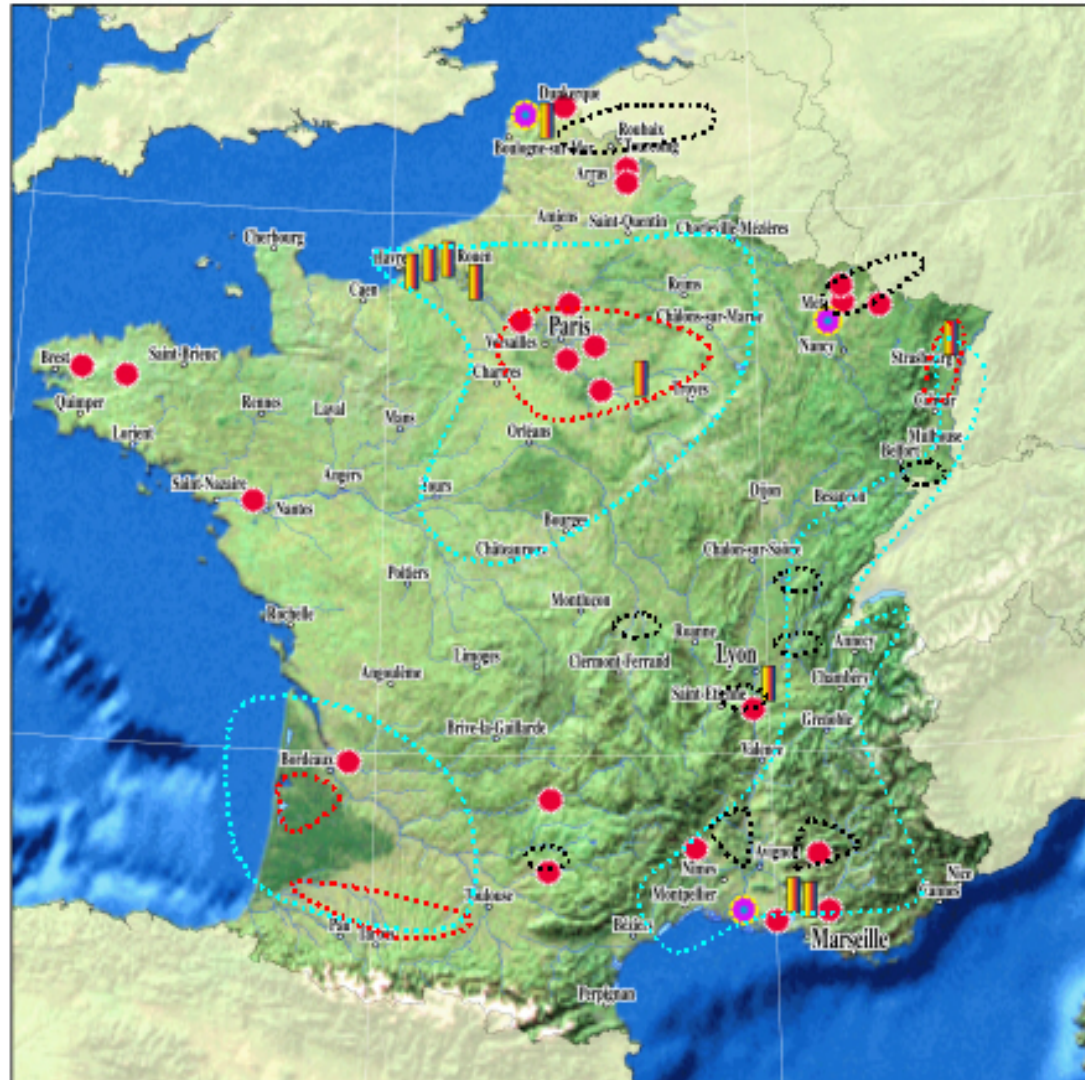
source: IPCC SRCC

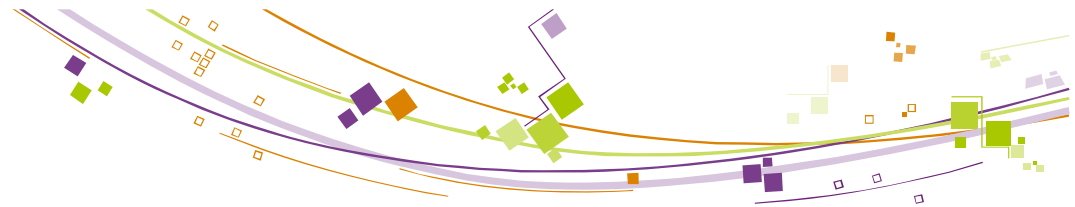
Principales possibilités de stockage géologique de CO₂ en France


GISEMENTS D'HYDROCARBURES

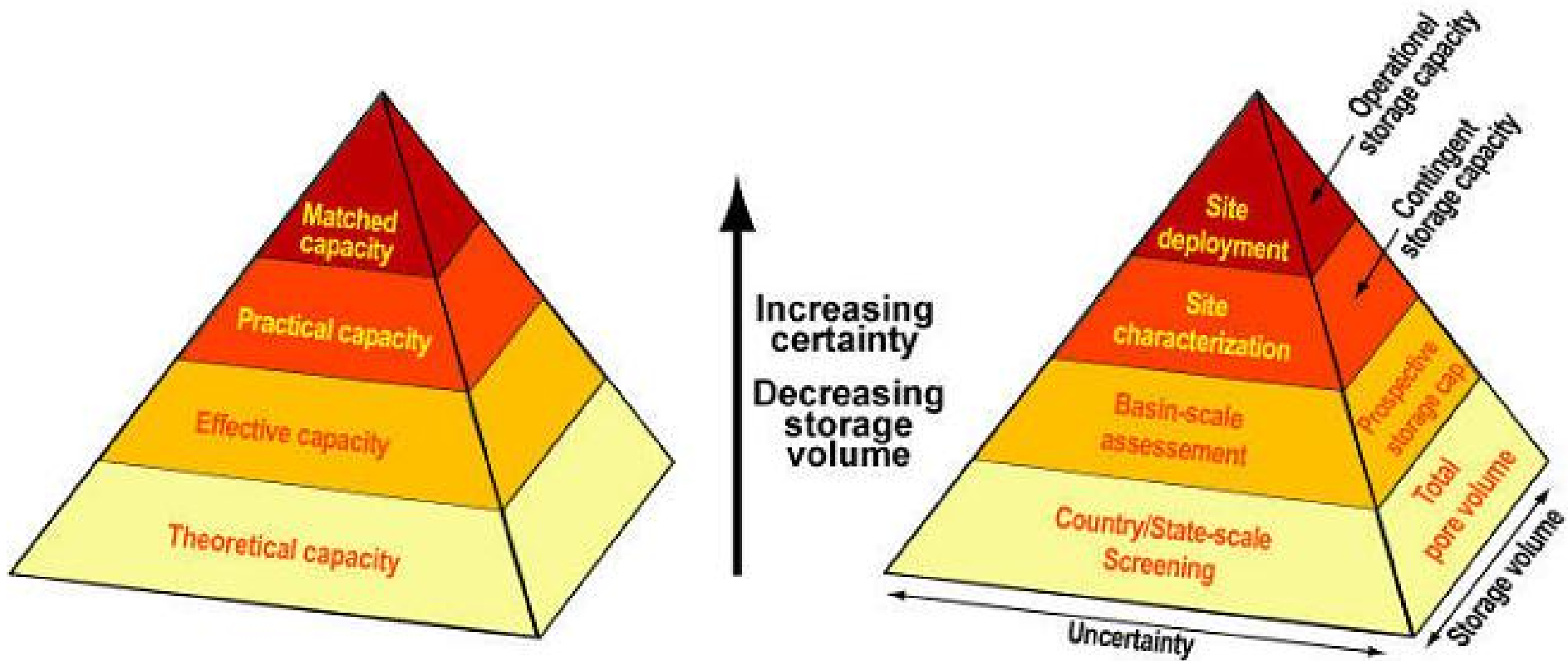

GISEMENTS DE CHARBON


PRINCIPAUX AQUIFERES





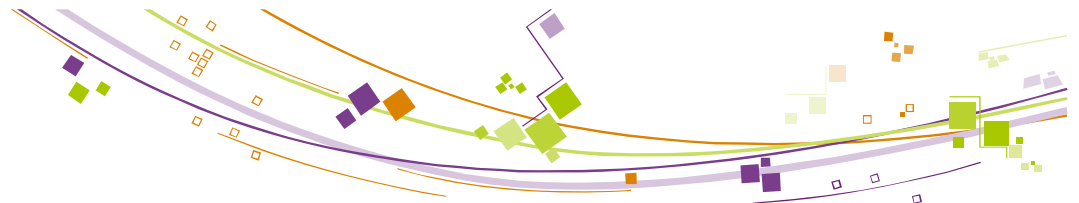
Capacité de stockage



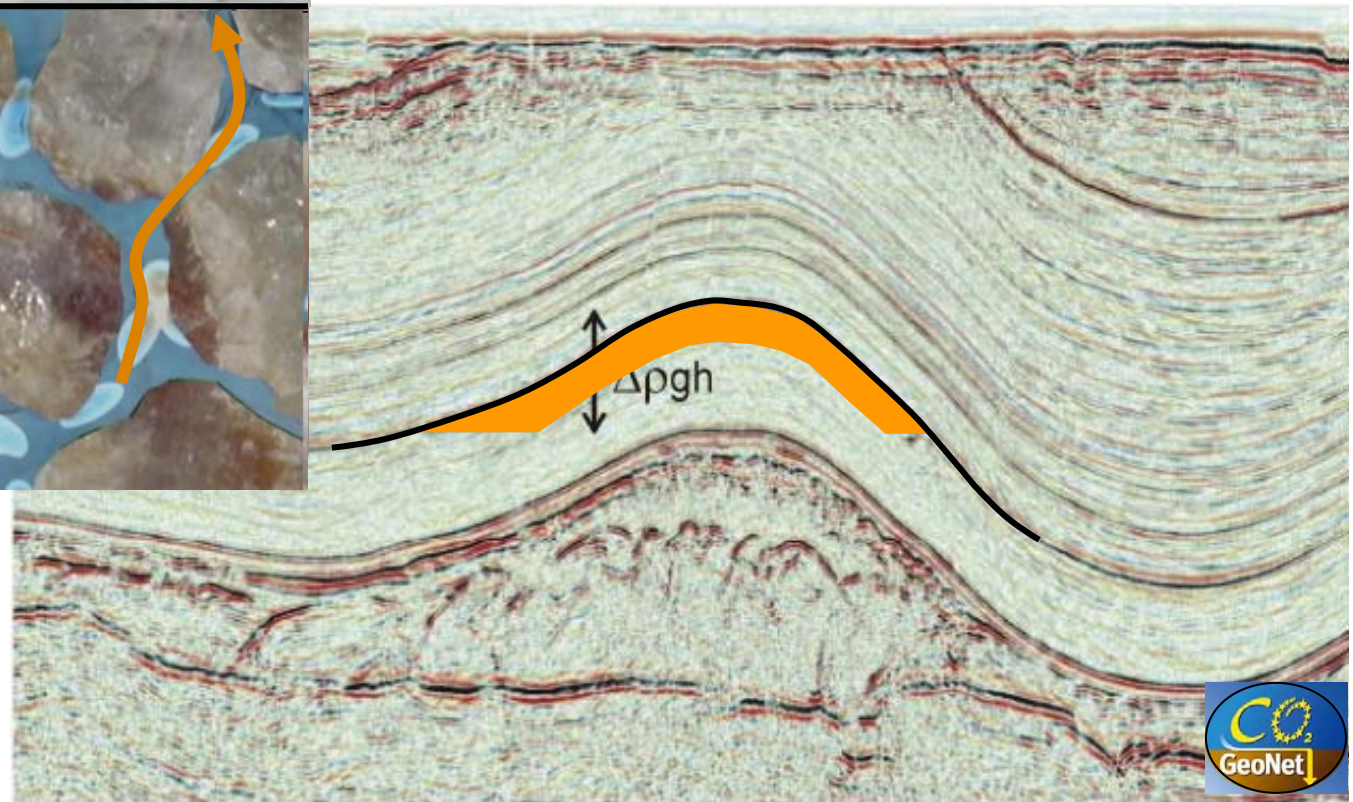


Le stockage en aquifère salin

- **Dynamique de fluide**
 - gradient de pression suite à injection
 - gradient hydraulique naturel
- **Ségrégation gravitaire et piégeage structural**
 - densités différentes entre fluide de formation et CO₂
- **Dissolution du CO₂ dans l'eau**
 - dépend de la température, de la salinité et de l'hydraulique
 - ségrégation gravitaire: eau avec CO₂ dissout plus dense
- **Minéralisation**
 - fixation du CO₂, dépend de la minéralogie (carbonates)
- **Piégeage capillaire**
 - dépend de la taille des pores et des perméabilités relatives

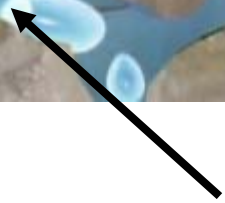


Ségrégation gravitaire et piégeage structural





Dissolution



CO₂



Dissolution (fin)





Minéralisation



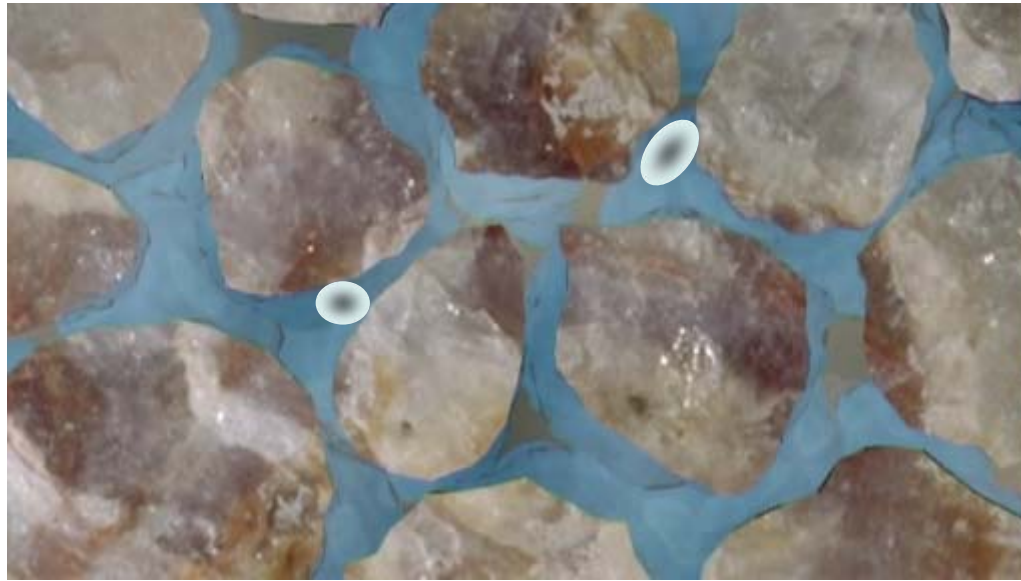


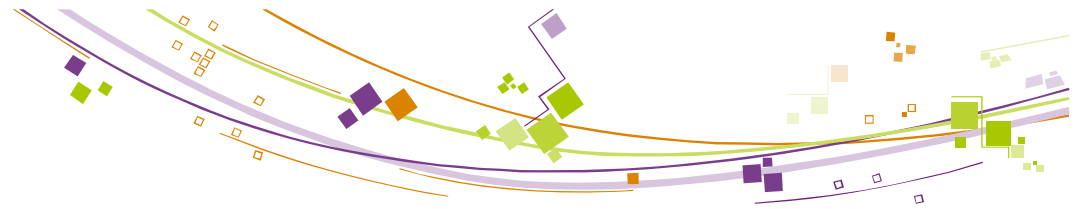
Minéralisation (fin)



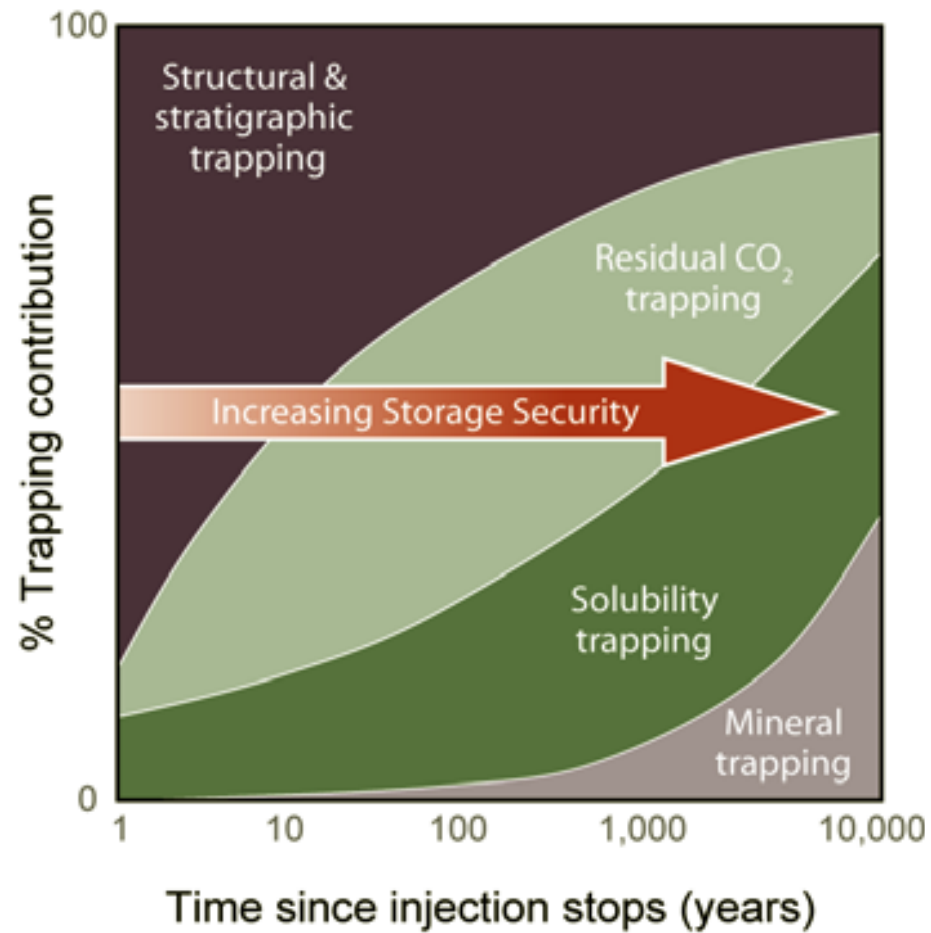


Piégeage capillaire





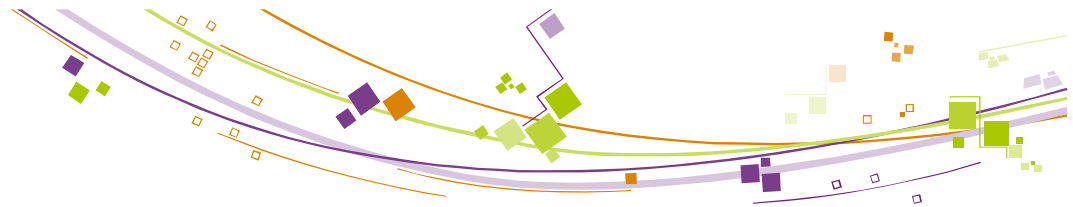
Mécanisme et sécurité de stockage





Objectif: assurer la sécurité du stockage

- Pour la population
 - Pour la biosphère
 - Pour le climat
- **Méthodologies de sélection, de gestion et de surveillance de sites**



Méthodologie de sélection de site

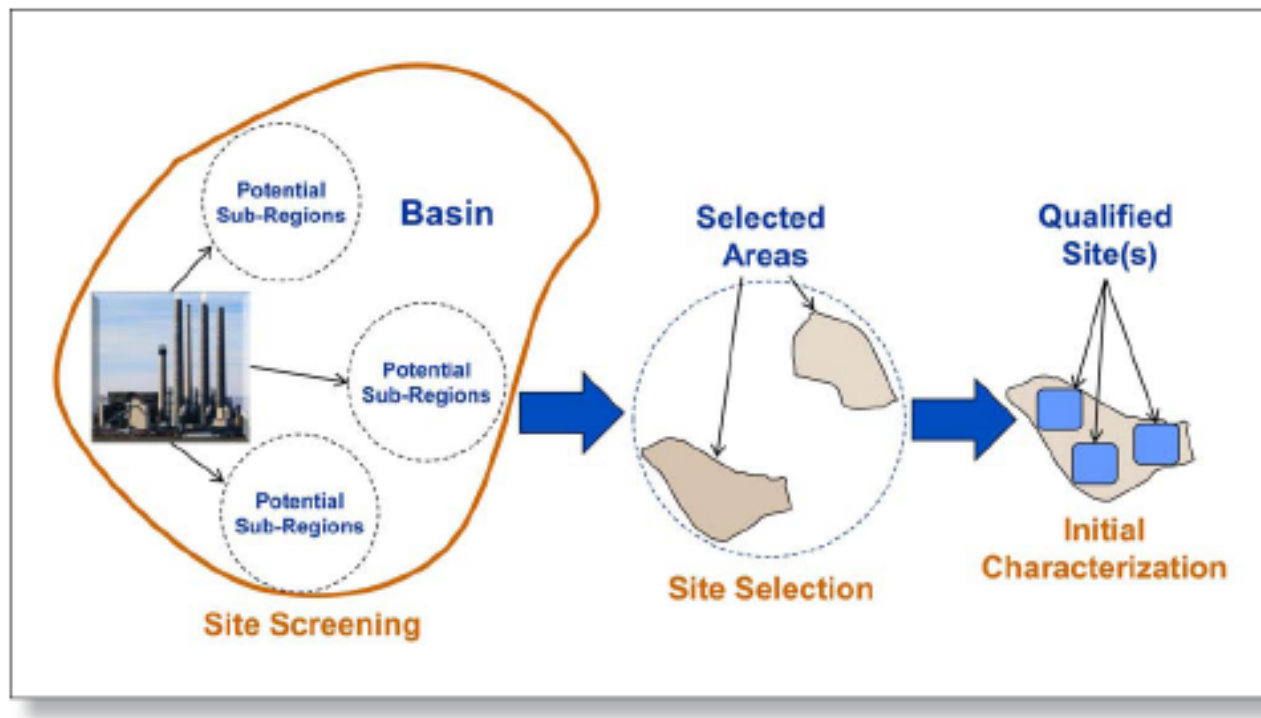
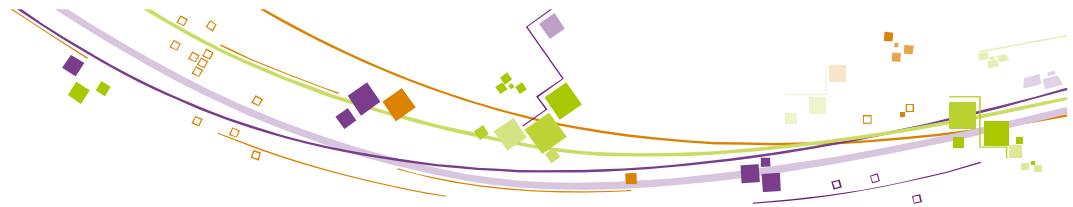
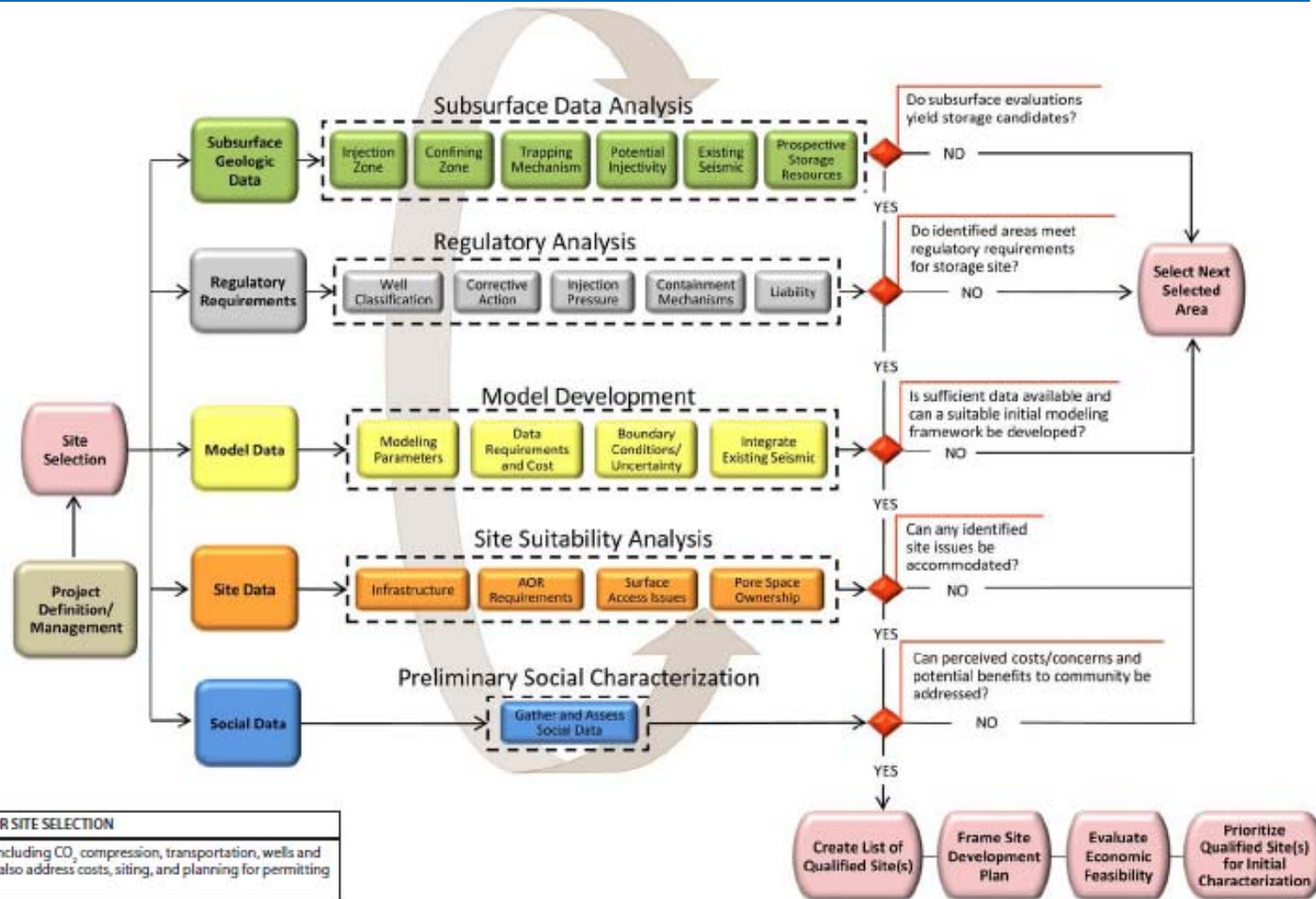


Figure ES-2. Graphical representation of "Project Site Maturation" through the Exploration Phase.



Méthodologie de sélection de site



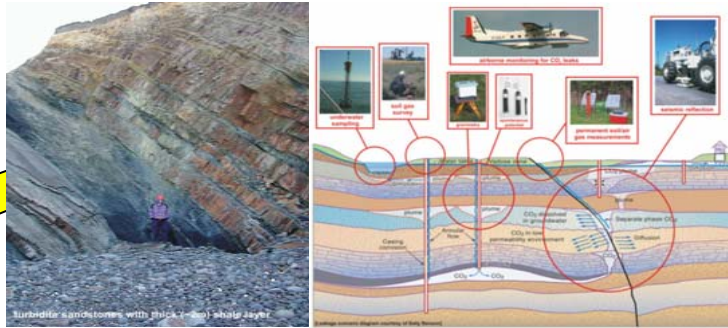
GUIDELINES FOR SITE SELECTION	
necessary infrastructure including CO ₂ compression, transportation, wells and	idly for pipelines should also address costs, siting, and planning for permitting
potential surface and pore space ownership issues. There are several	re AoR; it is recommended that the developer use a range of methods to
covered in this analysis. Model results should be examined for both pressure	

Figure 4.1. Process Flowchart for Site Selection.

source: DOE / NETL

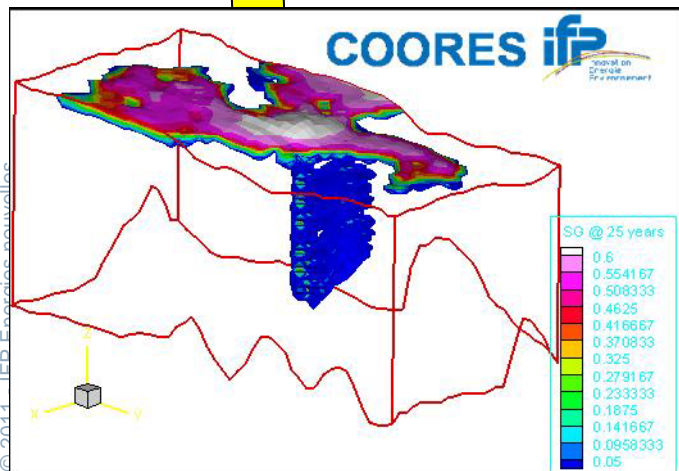


Etudes intégrées



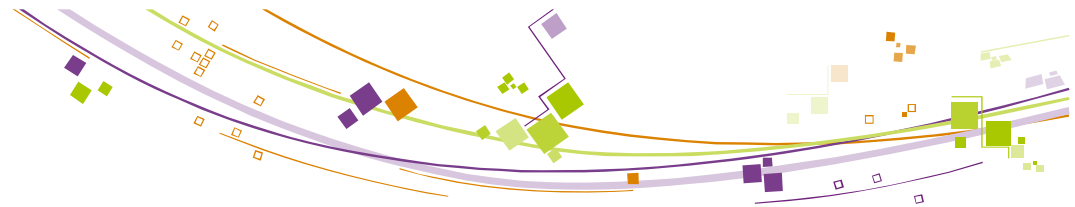
expérimentation réelle / mesures

modélisation numérique

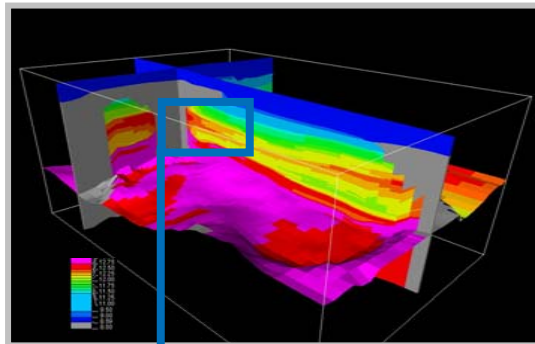


études en laboratoire





Modélisation multi-échelle



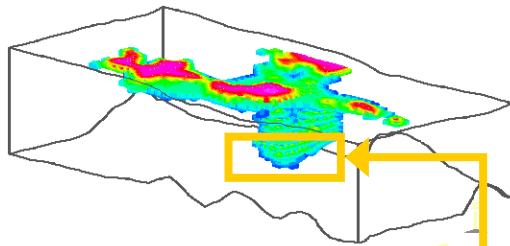
Basin scale

Hydrogeological analysis to assess:

- Initial state
- Boundary conditions for reactive flow

Reactive flow simulation to:

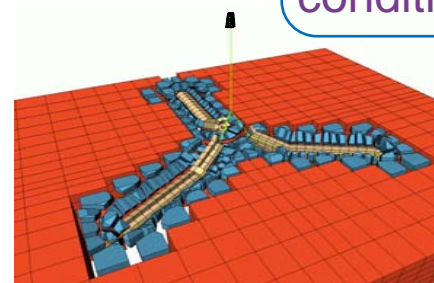
- Optimise and control CO₂ migration
- Assess porous media perturbation



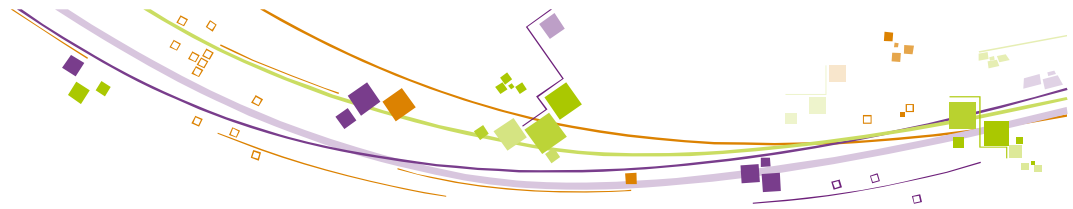
Storage & Storage complex scale

Injectivity assessment to:

- Assess wells Boundary conditions for reactive flow



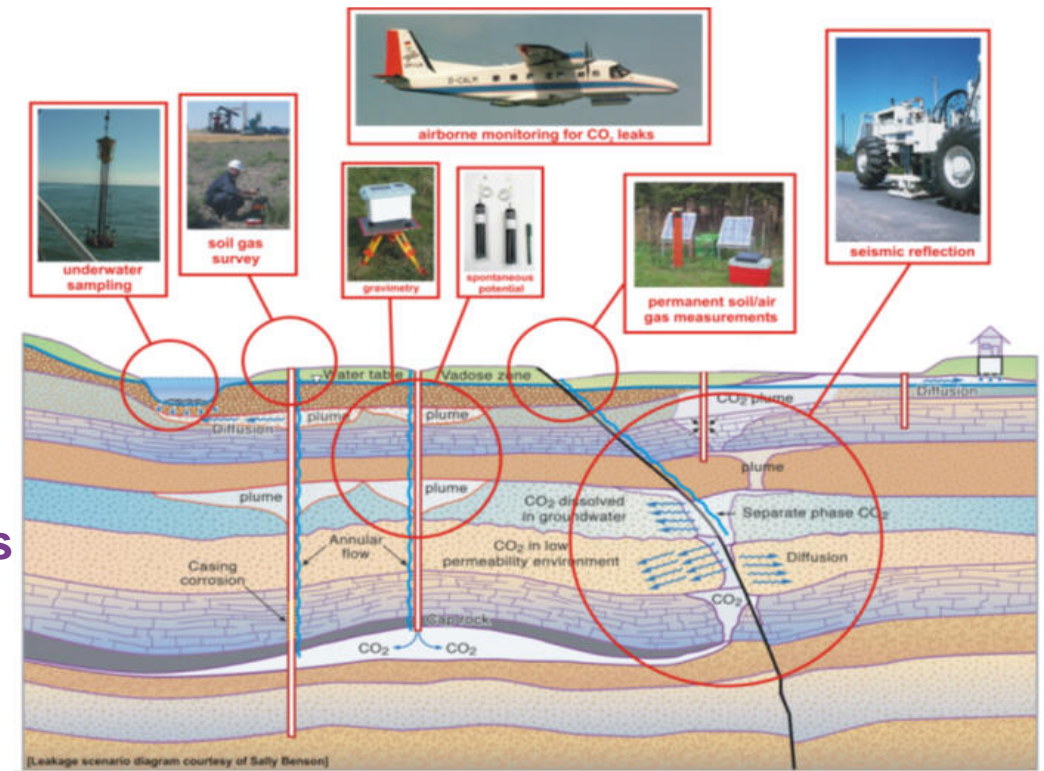
Near wellbore scale



Stockage géologique du CO₂

■ Monitoring et surveillance

- Méthodes sismiques pour l'imagerie du CO₂ injecté et la détection de fuites et méthodes d'interprétation
- Écoute passive microsismique
- Méthodes géochimiques à bases de traceurs isotopiques
- Technologies pour les prélèvements d'échantillons dans le stockage
- Monitoring quantitatif

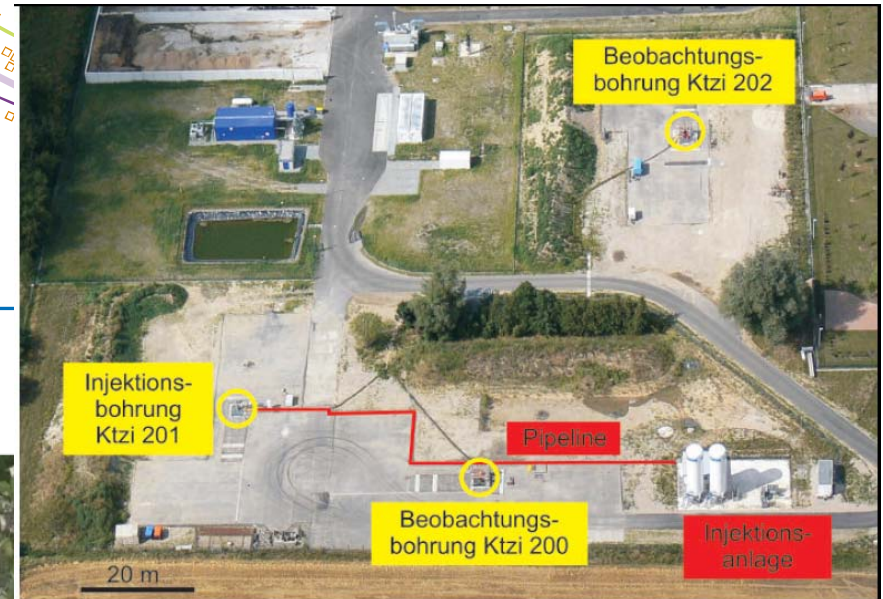
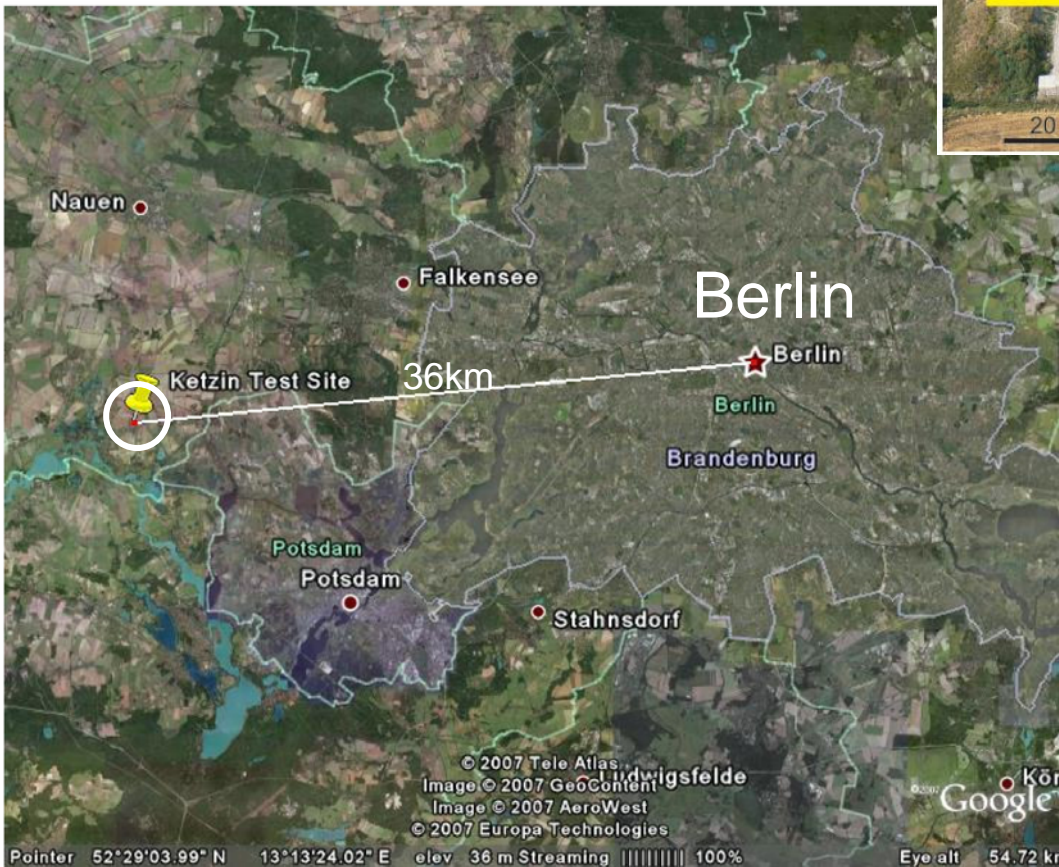




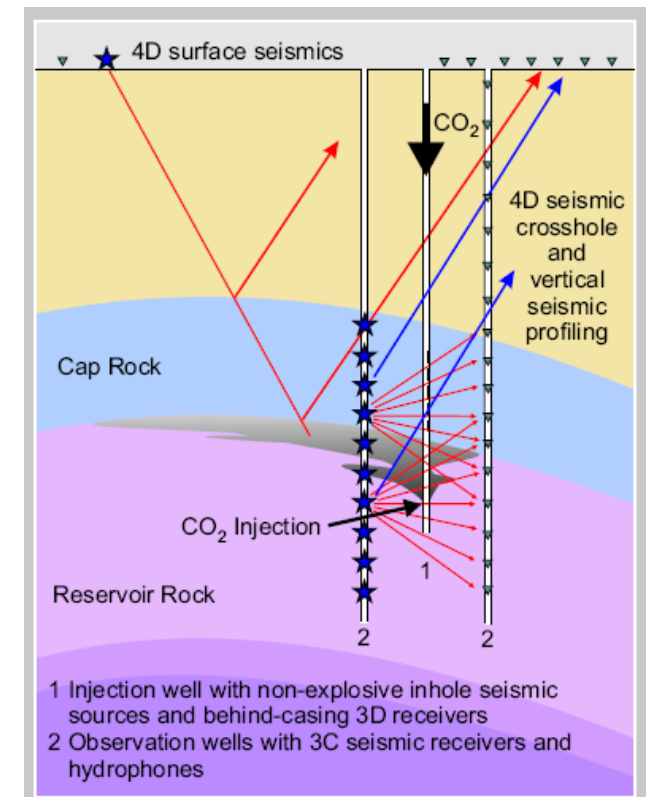
Sites naturelles



Ketzin (Allemagne)

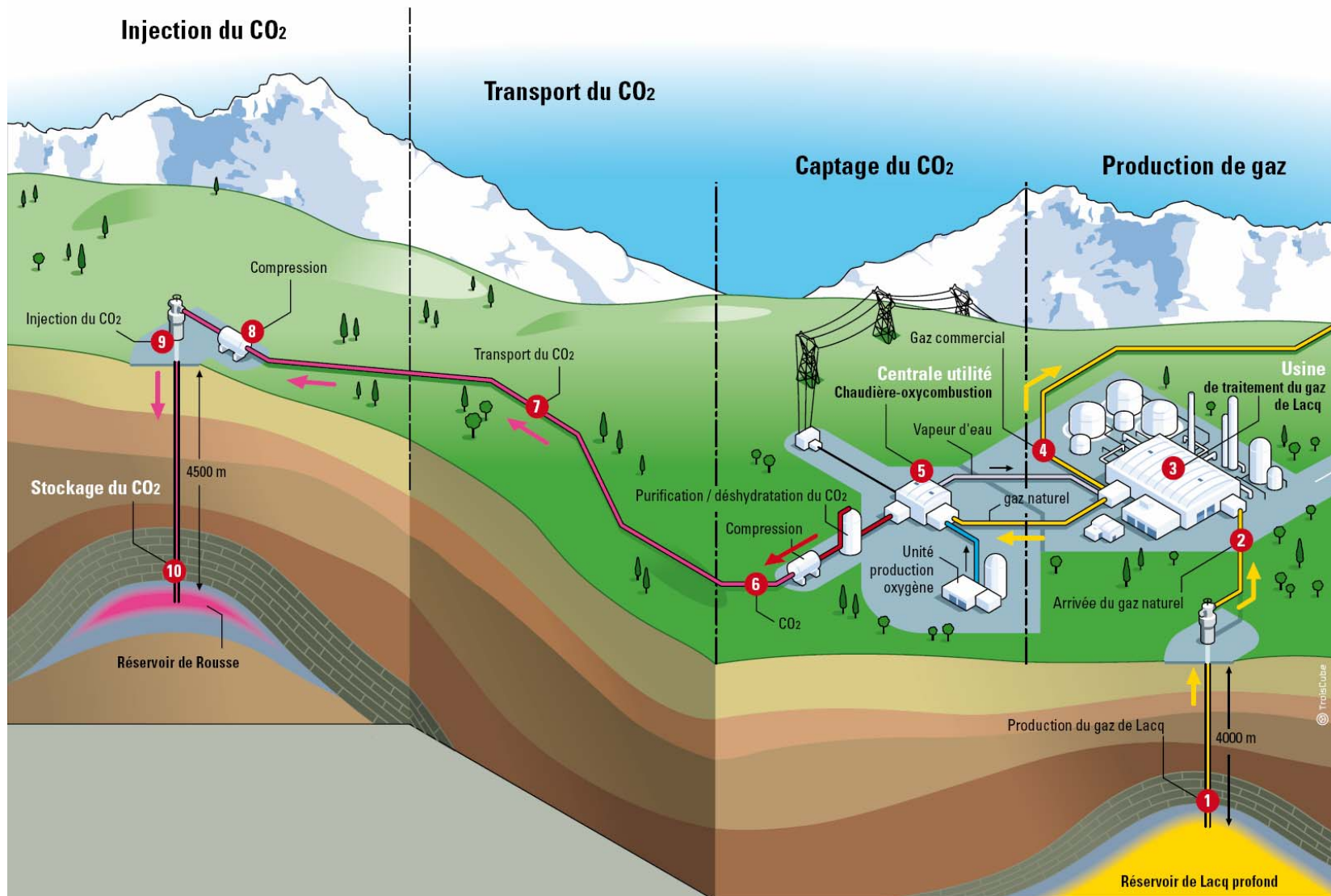


source: GFZ





Lacq / Rousse (TOTAL)





Les travaux futurs

- **Besoin d'unités pilotes et démonstrateurs industriels**
 - valider les concepts, méthodes et outils

- **R&D**



Les travaux de R&D

- **Technologies de complétion de puits**
 - Nouvelles formulations de ciments
 - Étude des interfaces
- **Modélisation prédictive du stockage**
 - De l'échelle du puits à celle du bassin
 - Écoulements polyphasiques, thermodynamique, couplage avec la géochimie et la géomécanique
- **Monitoring & Surveillance**
 - Suivi géophysique et géochimique
 - Détection et remédiation des fuites
- **Gestion des risques**

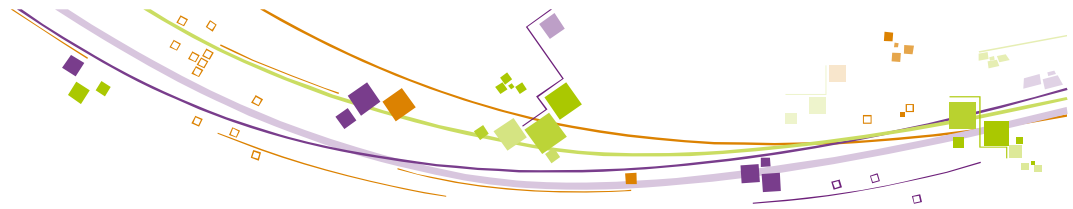


Conclusions

- **Le captage et stockage du CO₂ peut contribuer de façon très significative à la réduction des émissions de CO₂**



source: <http://www.interiorcontrol.co.uk>



Le captage et stockage du CO₂

■ **Attraits**

- réduction massive des émissions dans l'atmosphère
- rend l'utilisation des énergies fossiles moins néfaste
- évolution du système énergétique
- permet de gagner du temps
- ➔ contribue à une transition économiquement viable

■ **Conditions**

- coût compétitif (cf captage)
- assurance de la sécurité du stockage
 - pour l'homme et l'environnement
 - pour le climat
- ➔ mise en place de pilotes / démonstrateurs

**YOU CONTROL
CLIMATE CHANGE.**



TURN DOWN. SWITCH OFF. RECYCLE. WALK. CHANGE

Merci pour votre attention

andreas.ehinger@ifpen.fr