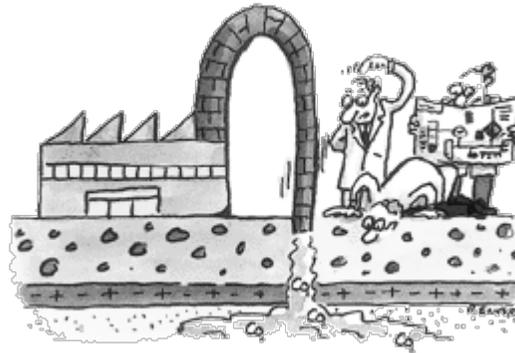


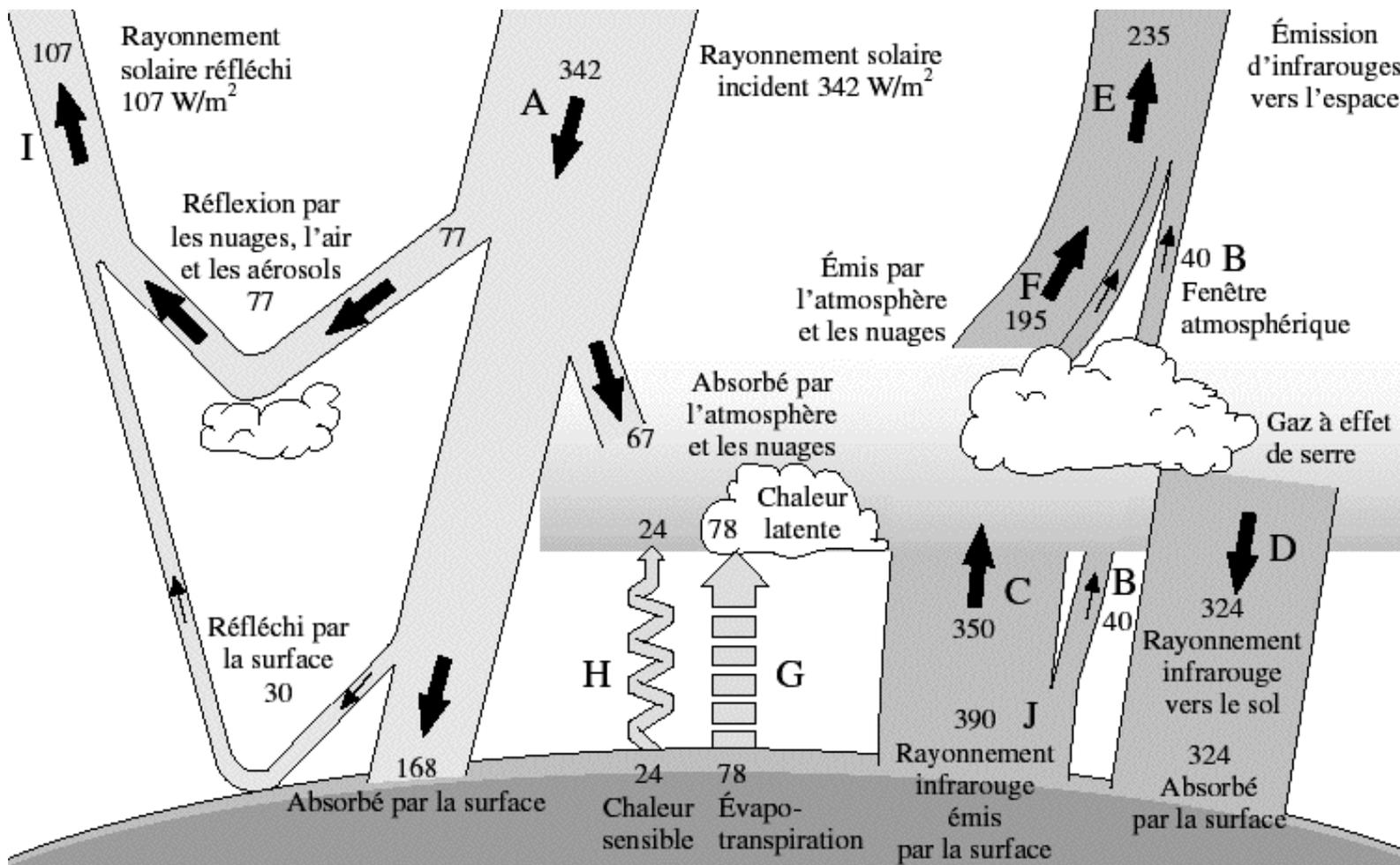
Le stockage géologique du CO₂



- l'effet de serre
- le changement climatique
- le CO₂
- les moyens de lutte
- le stockage géologique du CO₂

L' Effet de Serre

C'est un phénomène naturel :
des gaz de l'atmosphère sont opaques au rayonnement infrarouge.



Les gaz "naturels" à effet de serre (GES)

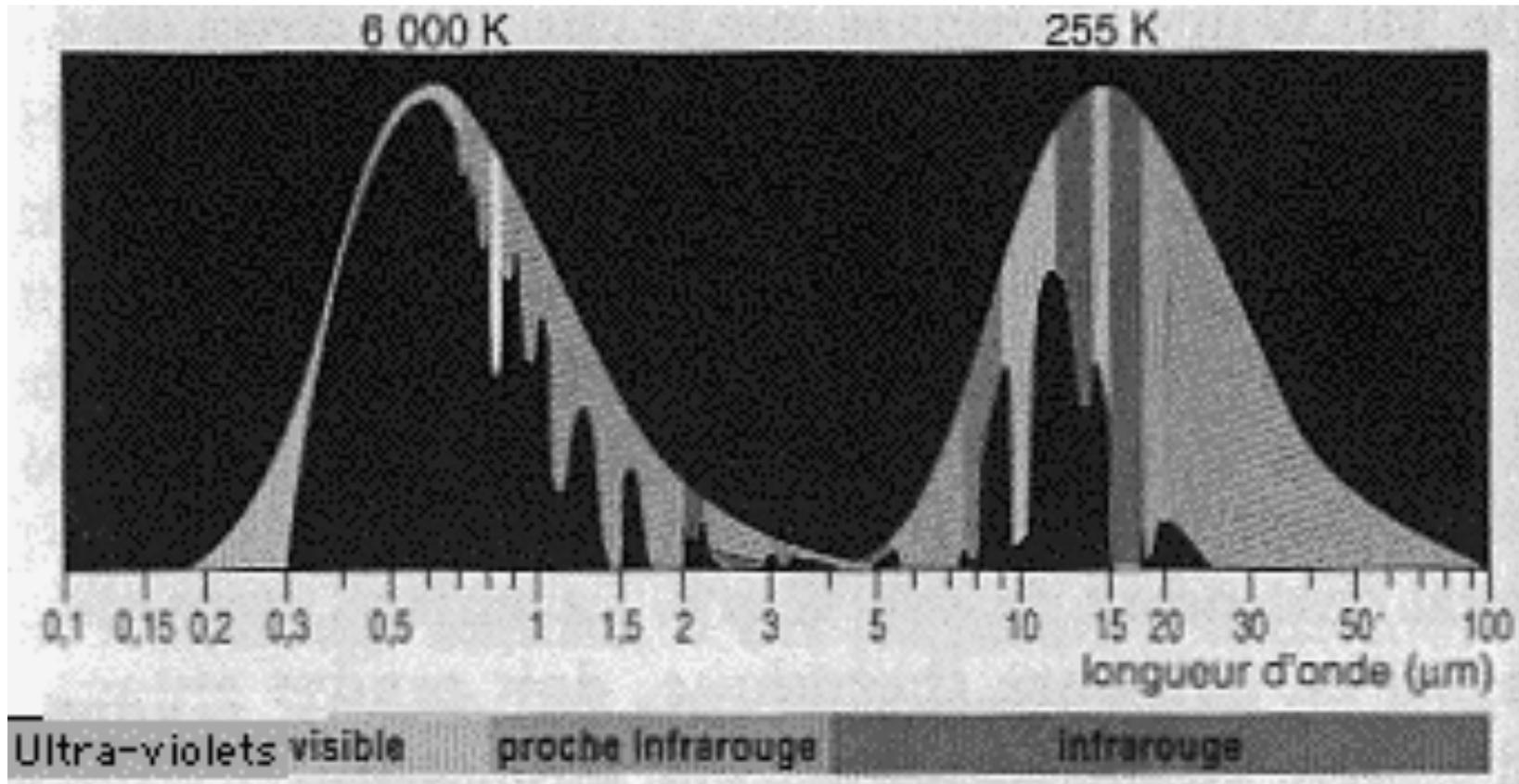
Les deux principaux gaz responsables (et pas seulement de son augmentation récente) sont :

- la vapeur d'eau (H_2O),
- le gaz carbonique (CO_2).

Les principaux autres gaz "naturels" à effet de serre sont :

- le méthane (CH_4),...le gaz naturel
- le protoxyde d'azote (NO_x),
- l'ozone (O_3)

Absorption et émission du soleil et de la Terre



Vapeur d'eau (H ₂ O)	Gaz carbonique (CO ₂)	Ozone (O ₃)
Méthane (CH ₄)	oxyde d'azote (NO _x)	Oxygène (O ₂)

Les Gaz à Effet de Serre

Le pouvoir de réchauffement global (ou PRG) d'un gaz se définit comme le "forçage radiatif" (c'est à dire la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol), cumulé sur une durée qui est généralement fixée à 100 ans, d'une quantité de gaz donnée.

Cette valeur ne se mesure pas dans l'absolu, mais relativement au CO₂.

Gaz	Formule	PRG relatif / CO₂ (à 100 ans)
Gaz carbonique	CO₂	1
Méthane	CH₄	23
Protoxyde d'azote	N₂O	298
Perfluorocarbures	C_nF_{2n+2}	6500 à 8700
Hydrofluorocarbures	C_nH_mF_p	140 à 11700
Hexafluorure de soufre	SF₆	23900

Temps de résidence

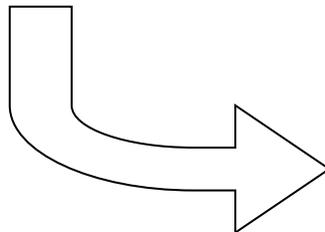
Gaz carbonique	100 ans
Méthane	12 ans
Protoxyde d'azote	120 ans
Halocarbures	jusqu'à 50.000 ans

Le réchauffement climatique

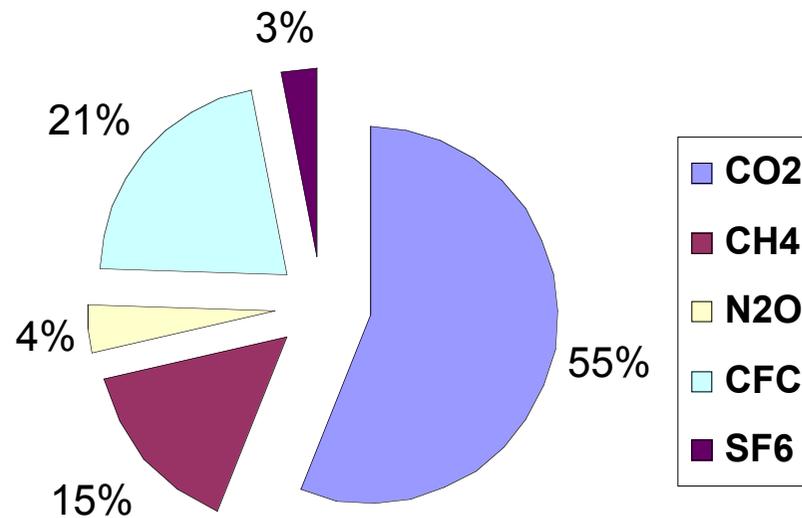
C'est le changement de climat global dû à l'augmentation de l'effet de serre elle-même liée à l'augmentation des dégagements de GES par les activités humaines.

Facteurs à prendre en compte :

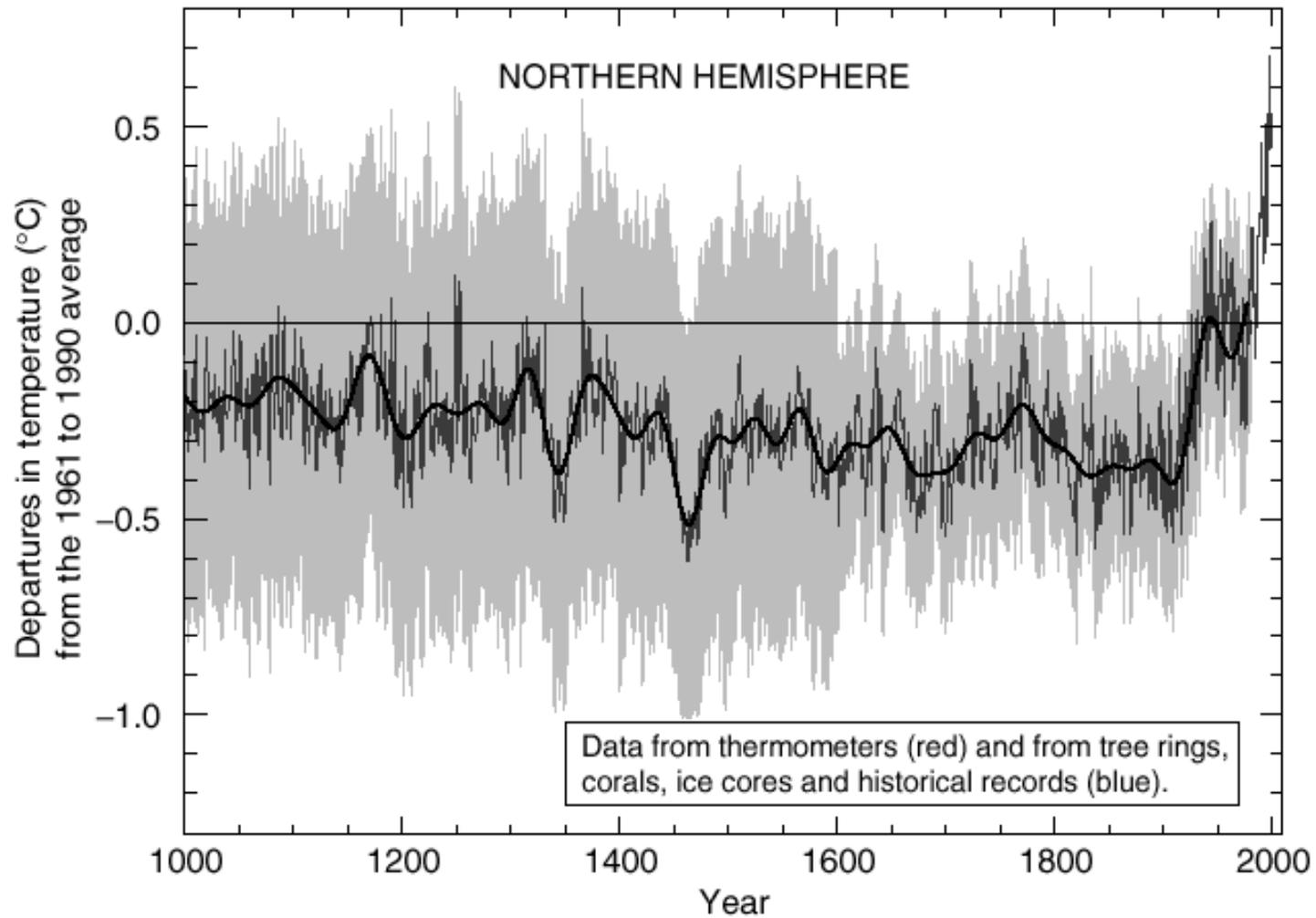
- Pouvoir de Réchauffement Global (PRG)
- Durée de vie du gaz dans l'atmosphère
- Quantité de gaz émis annuellement
- ...



Contribution à l'effet de serre additionnel



Evidence du réchauffement climatique...



Manifestations du réchauffement climatique

Depuis 1930, la température moyenne s'est élevée d'environ 0,6°C.

*A la fin du Petit Age de Glace
(1600-1820),
le front de la Mer de Glace
s'avancait jusqu'au village
des Bois en formant un lobe
impressionnant dans la vallée
de Chamonix.*

*Aquarelle de Samuel Bihmann :
village des Praz, 1823,
Musée de Bâle.
Document : Louis Reynaud,
LGGE-CNRS*



*Depuis cette époque, le glacier
a perdu environ 1,5 km
de longueur et son front
n'est plus visible du fond
de la vallée ; seules les
grandes moraines frontales*

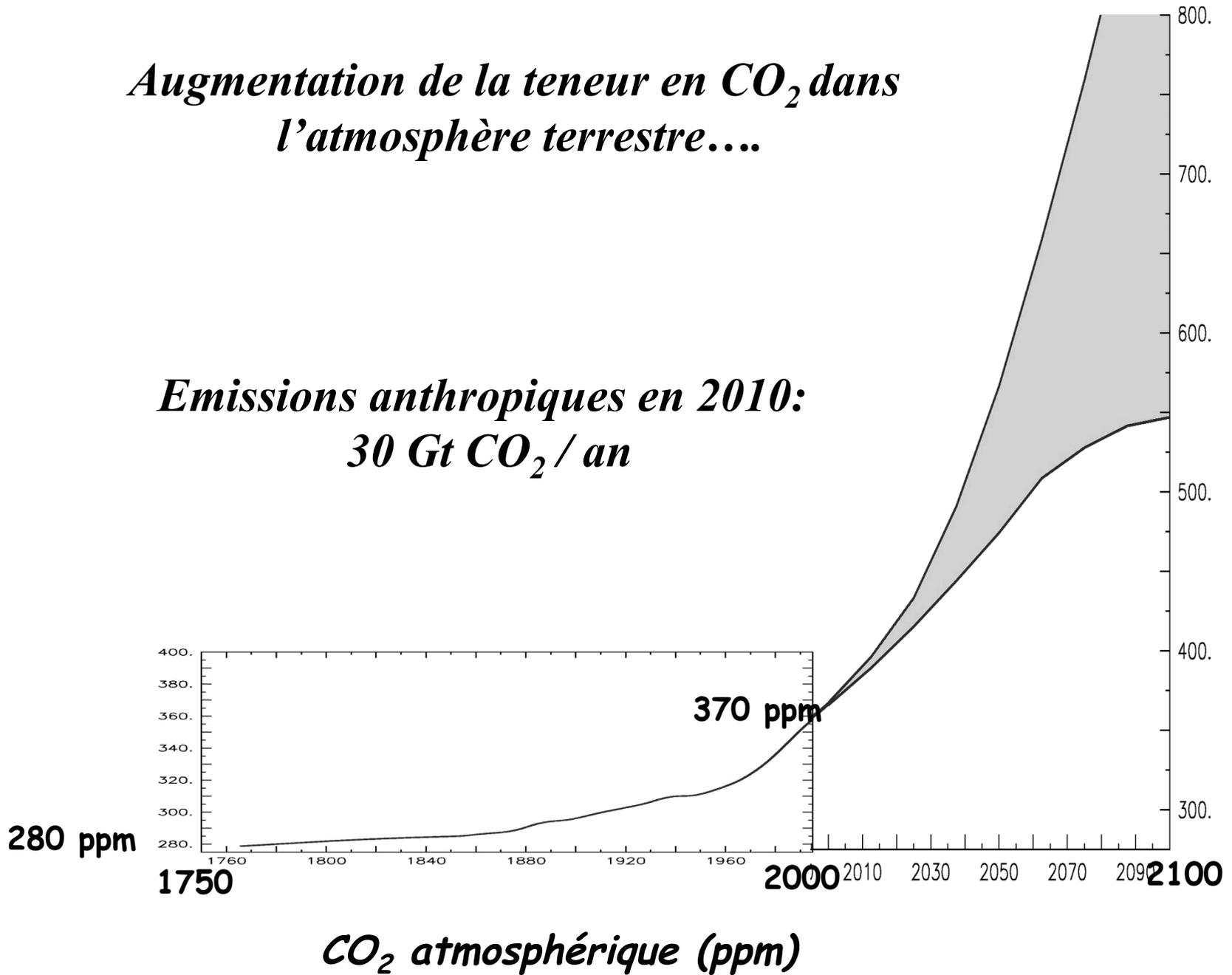


Les dernières prévisions de l'IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) pour 2100 sont :

- Hausse moyenne des températures de 1,5 à 6°C
- Teneur en CO₂ de l'atmosphère de 540 à 700 ppm
- élévation du niveau de la mer... 0,14 à 0,80 m.

Augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère terrestre....

*Emissions anthropiques en 2010:
30 Gt CO₂ / an*



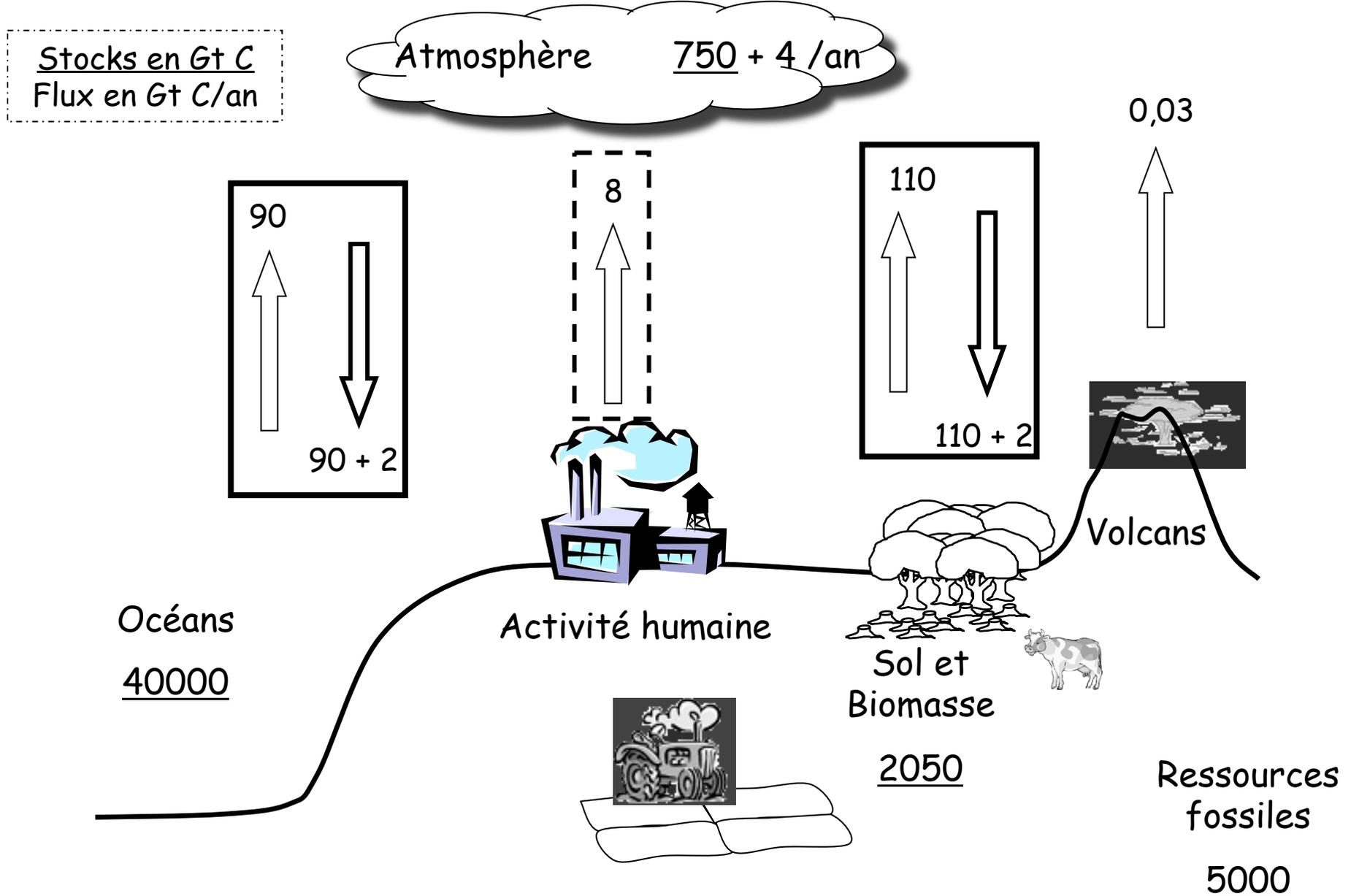
L'ensemble de la planète est un énorme réservoir de carbone. La fraction mobile de ce carbone circule essentiellement sous forme de CO₂.

	Carbone, Gt
Atmosphère	750
Océans	40 000
Sol superficiel	1 500
Biomasse	550
Couches géologiques	20 000 000

Depuis 1850, les activités humaines ont rejeté + de 400 Gt de carbone dans l'atmosphère sous forme de 1450 Gt de CO₂ (1t de carbone donne 3,7 t de CO₂). Ce chiffre représente un peu moins de 50% du volume contenu dans l'atmosphère.

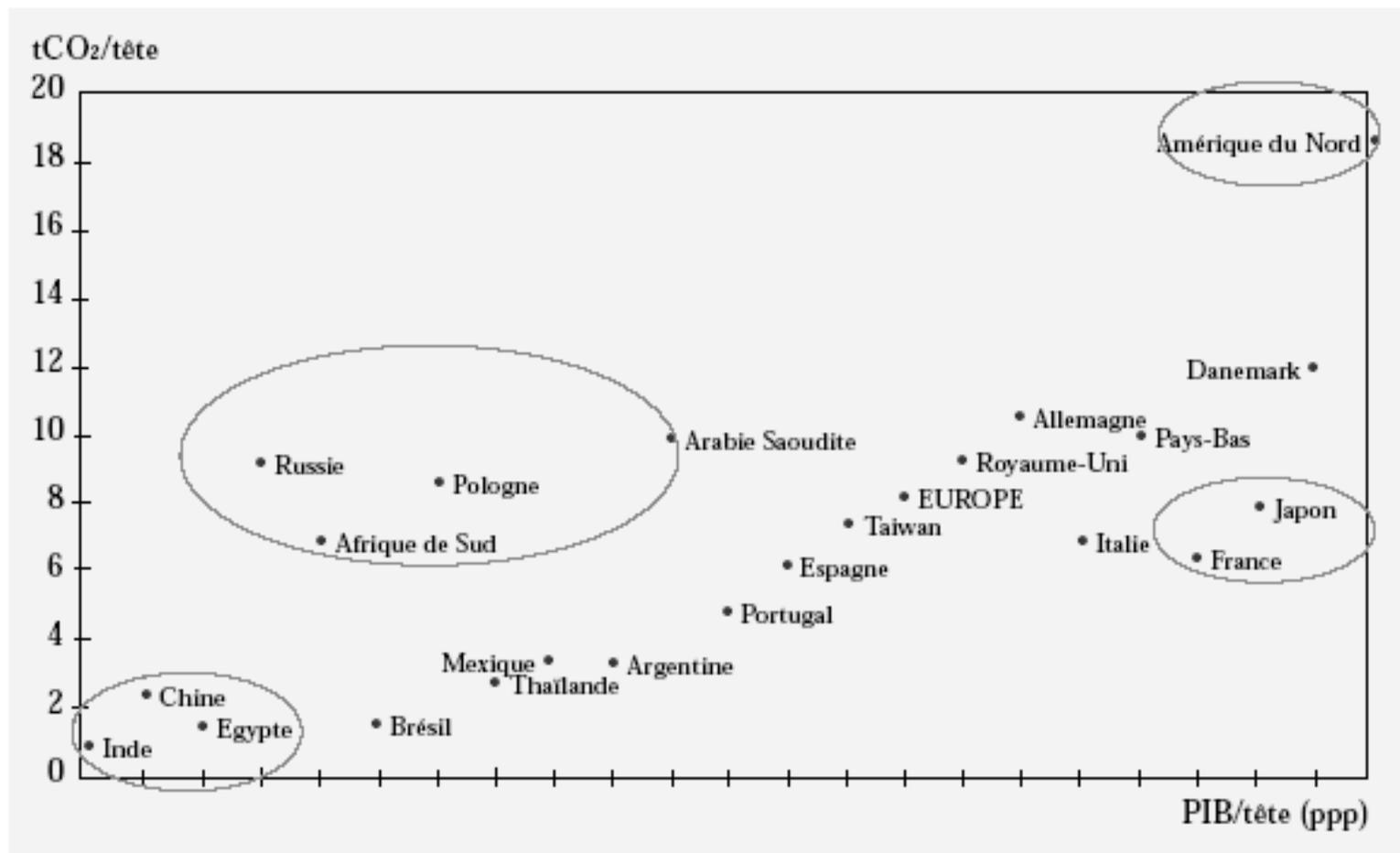
Dans le même temps, la teneur en CO₂ de l'atmosphère est passée de 280 ppm à 370 ppm soit environ 32% de plus -> une partie de ce CO₂ résultant de l'activité humaine a donc été recyclée, soit par échange avec les océans soit par la végétation.

Flux et stocks de carbone



Une situation nuancée sur le plan géographique...

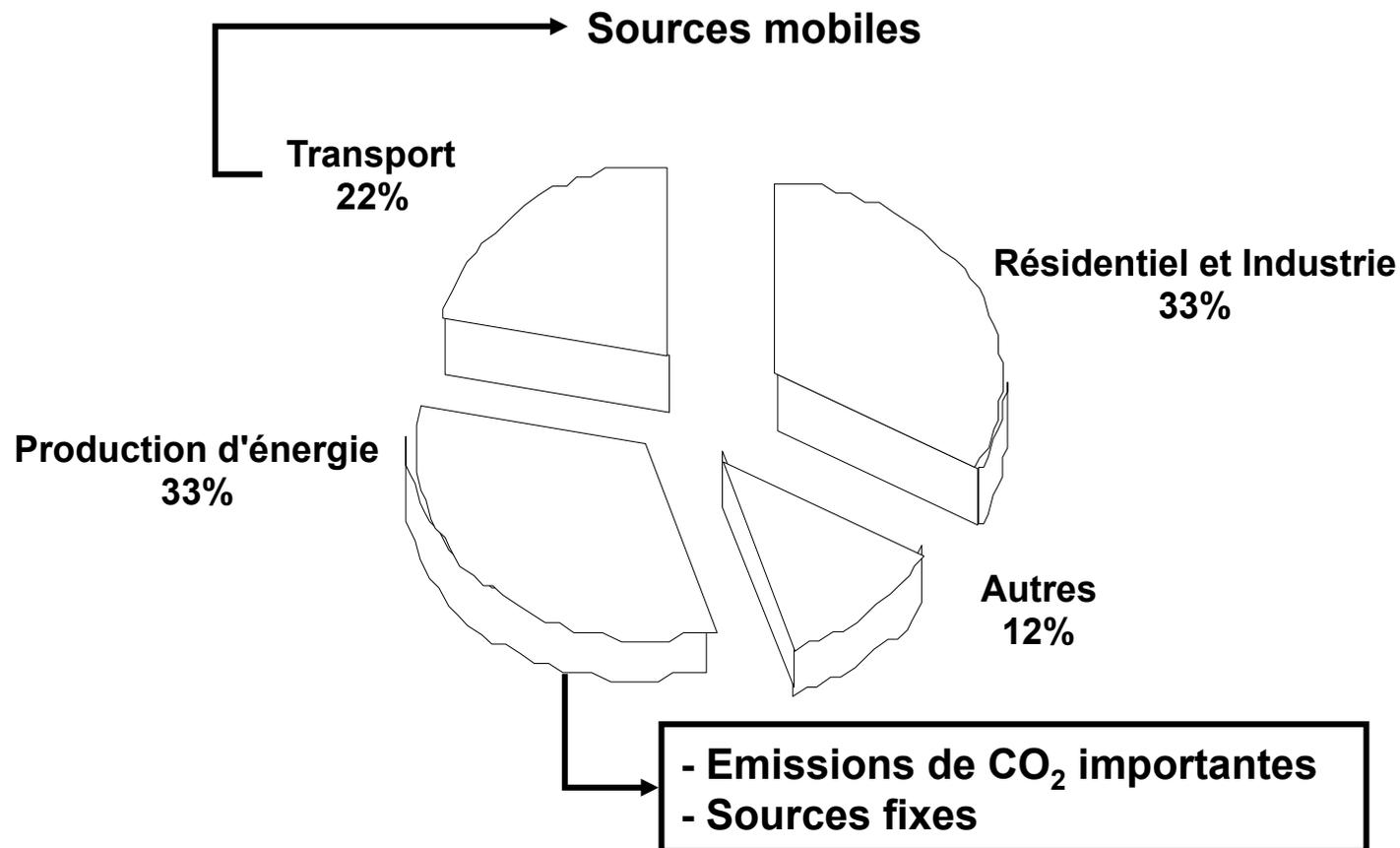
*Emissions de CO₂ et PIB (produit intérieur brut)
par habitant, en 1995*



Source : Enerdata, 1998

et sur le plan des sources...

Emissions anthropiques : 32 Gteq CO₂ / an
(9 Gt de carbone / an)



Ressources globales de Carbone Fossile

	Ressource Base GtC	Additional GtC
Pétrole (85 wt. % C)	250	
Huiles non conventionnelles	440	1550
Gaz (75% C)	240	
Gaz non conventionnel	250	220
Clathrates		10600
Charbon (70% C)	3400	2900
Total	4600	15300

Source Rogner, *Ann. Rev. Energy and Env.* 22, p. 249. Also used: 1 toe = 41.9 GJ;
20.3 kg(C)/GJ(oil); 13.5 kg(C)/GJ (gas); 24.1 kg(C)/GJ(coal).

Conversion en équivalents carbone

Pétrole en carbone :

8.6 milliards de barils/an = 1 GtC/an (10^9 tonnes de carbone), *ou*

23.6 million de barils par jour = 1 GtC/an

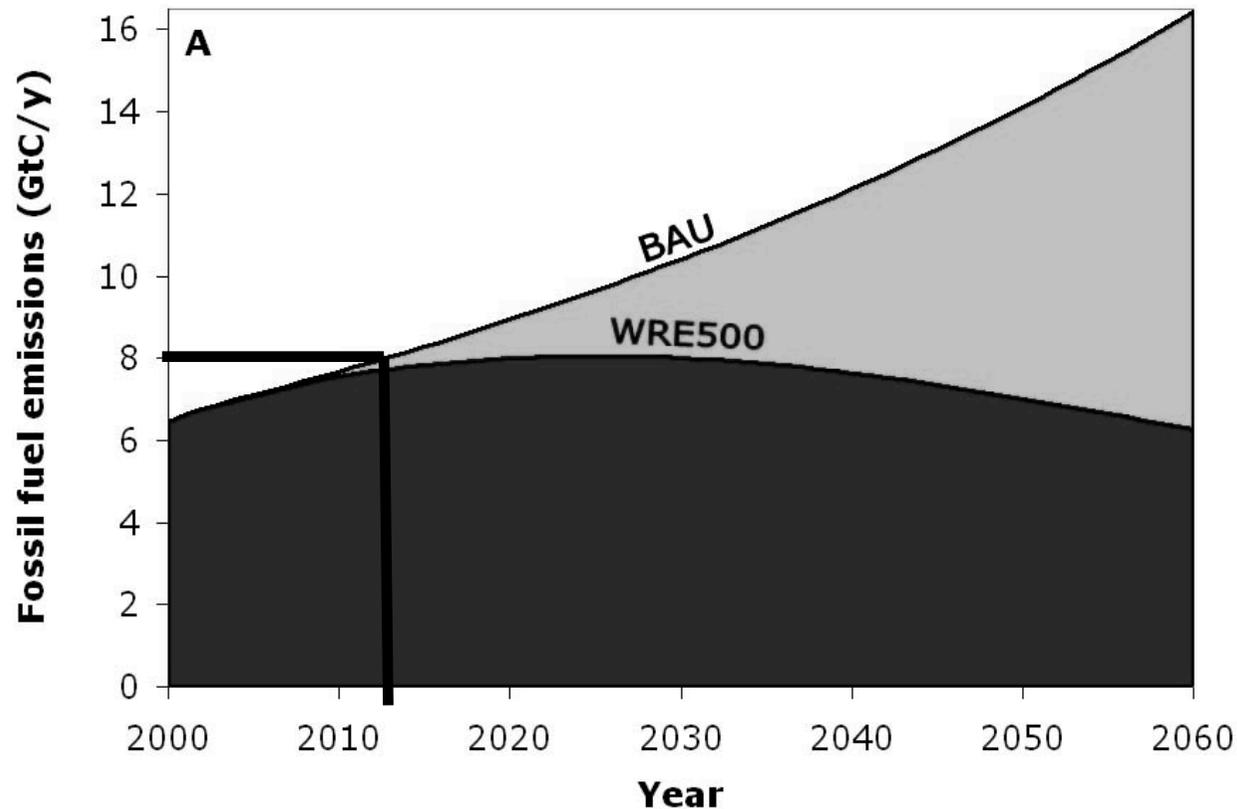
Gaz en carbone :

6 milliards de m³ par jour de gaz naturel = 1 GtC/an.

Unité "Climatique" en carbone :

1 ppm de CO₂ dans l'atmosphère = 2.1 GtC

Les 50 prochaines années

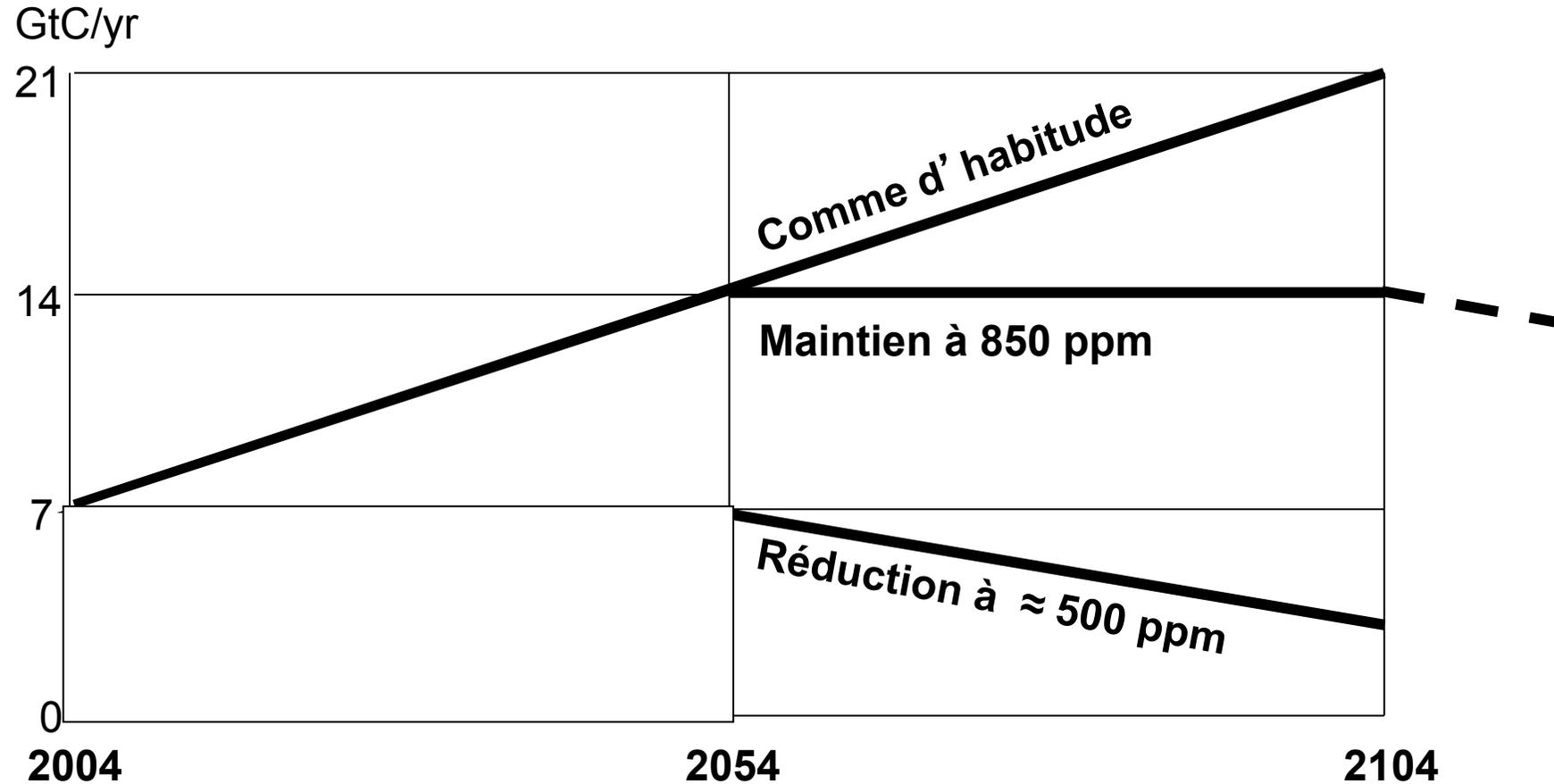


Deux modèles de prédiction des émission de CO₂:

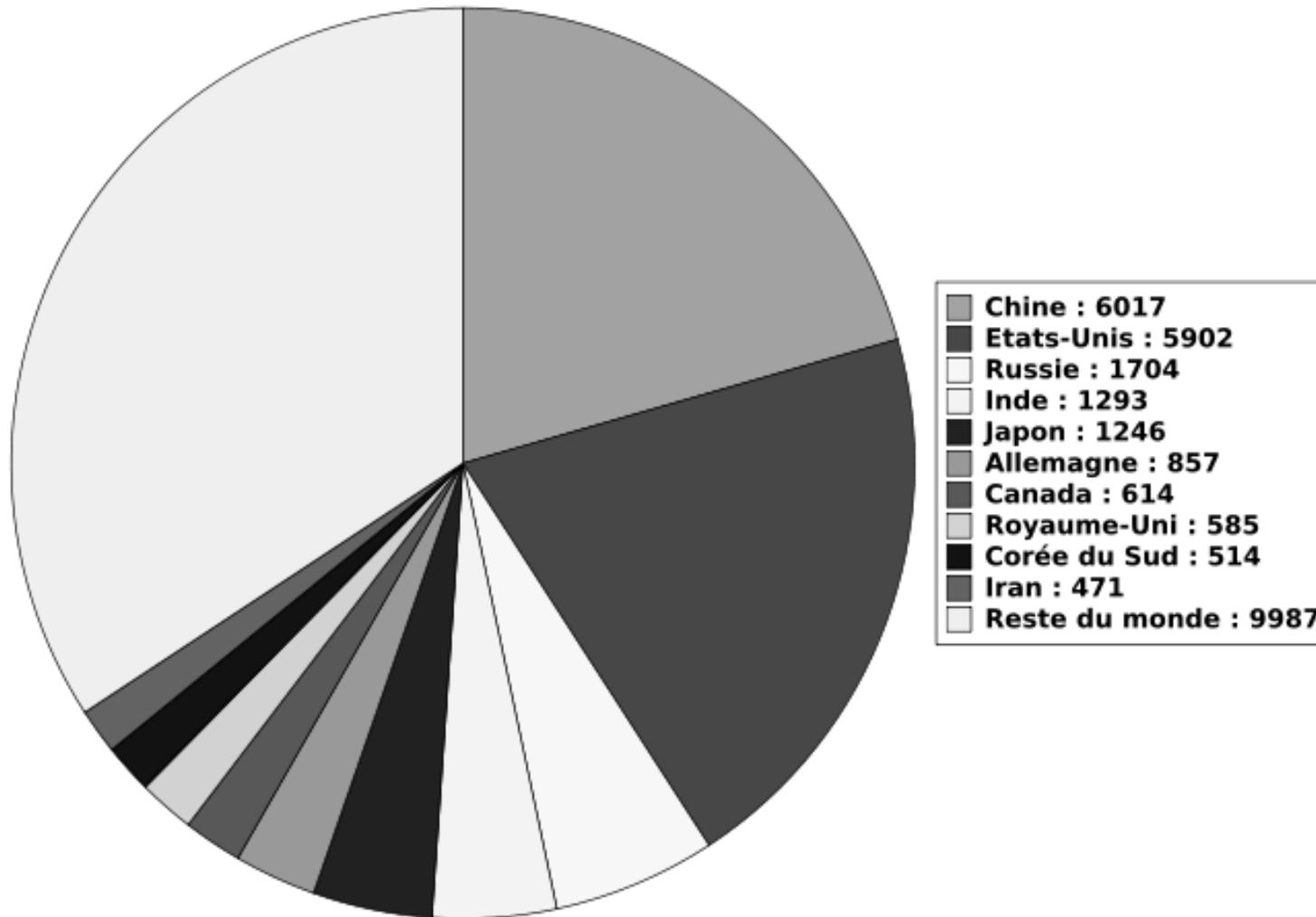
BAU: 1.5%/an (croissance exponentielle)

WRE500: modèle de Wigley, Richels, Edmonds (stabilisation à 500 ppm).

Le triangle de stabilisation



Les dix pays les plus pollueurs en 2006
Emissions de CO2, millions de tonnes



Source : Energy Emission Administration

Objectifs



**Respecter les engagements de Kyoto pris en 1997
afin de réduire l'effet de serre.**

échéance 2008-2012 :

réduction de 5.2% des émissions en CO₂ par rapport à 1990

pour l'Europe : réduction de 8%

En France : Grenelle de l'environnement - 75 % d'ici à

2030-2040 !!!

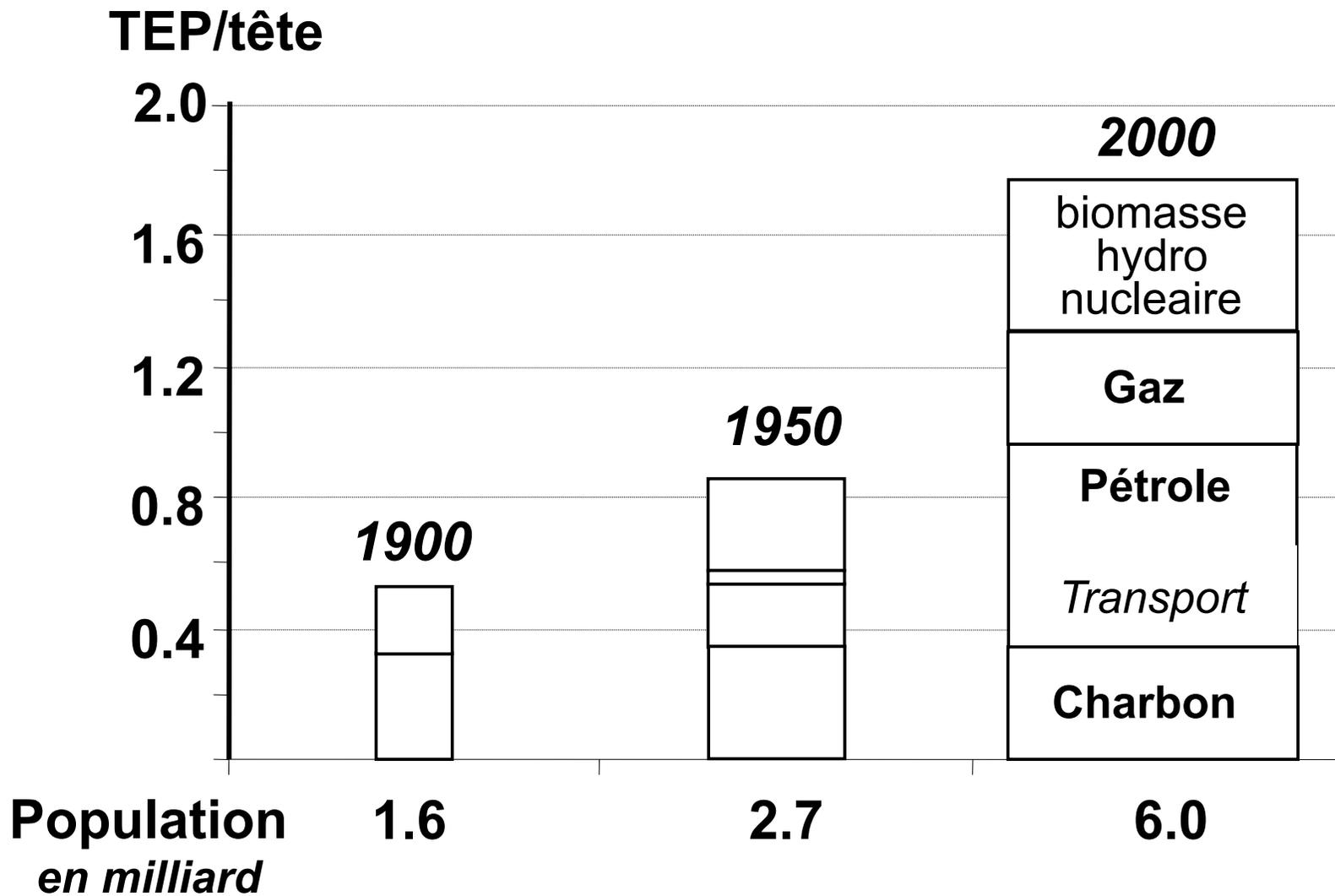
Pour la France...

La France a signé le protocole de Kyoto et s'est engagé à réduire sa production de CO₂, mais au rythme actuel et si rien n'est fait les émissions de CO₂ devraient atteindre :

2010..... 128,7 Mt de carbone (102 en 2009)
2020.....154,1 Mt de carbone

La base retenue dans le protocole de Kyoto étant de 104,5 Mt de carbone, la France devrait acheter des permis d'émission à partir de 2005 sur la base de 100 € la tonne de carbone, le coût total entre 2005 et 2020 serait donc de l'ordre de 50 milliards d'€!

rendre propre l'utilisation des hydrocarbures :
nécessité sociale et nécessité économique



Ressources énergétiques mondiales: Fossiles 85%
 Nucléaire 14%
 Renouvelables 1%

Moyens de réduction techniques

Evolution du mixte énergétique

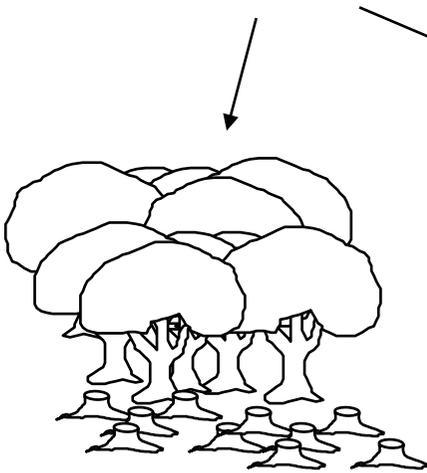
Charbon, pétrole \Rightarrow Gaz naturel \Rightarrow Energies renouvelables

Maîtrise de l'énergie

Rendement énergétique \nearrow

Utilisation rationnelle de l'énergie

Gestion du cycle du carbone



Stocks naturels de carbone

Séquestration physique

Capture & séparation du CO₂

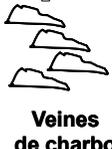
Séquestration dans l'océan

Concepts avancés

Séquestration géologique



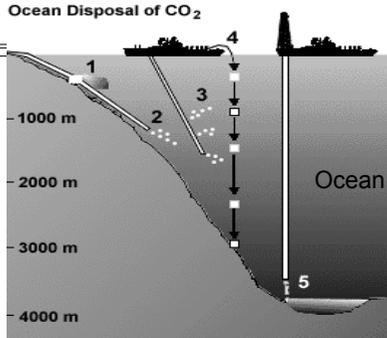
Gisements épuisés de gaz et de pétrole



Veines de charbon

Opérations à valeur ajoutée
EOR, EGR ECBM

Formations salines
Aquifère

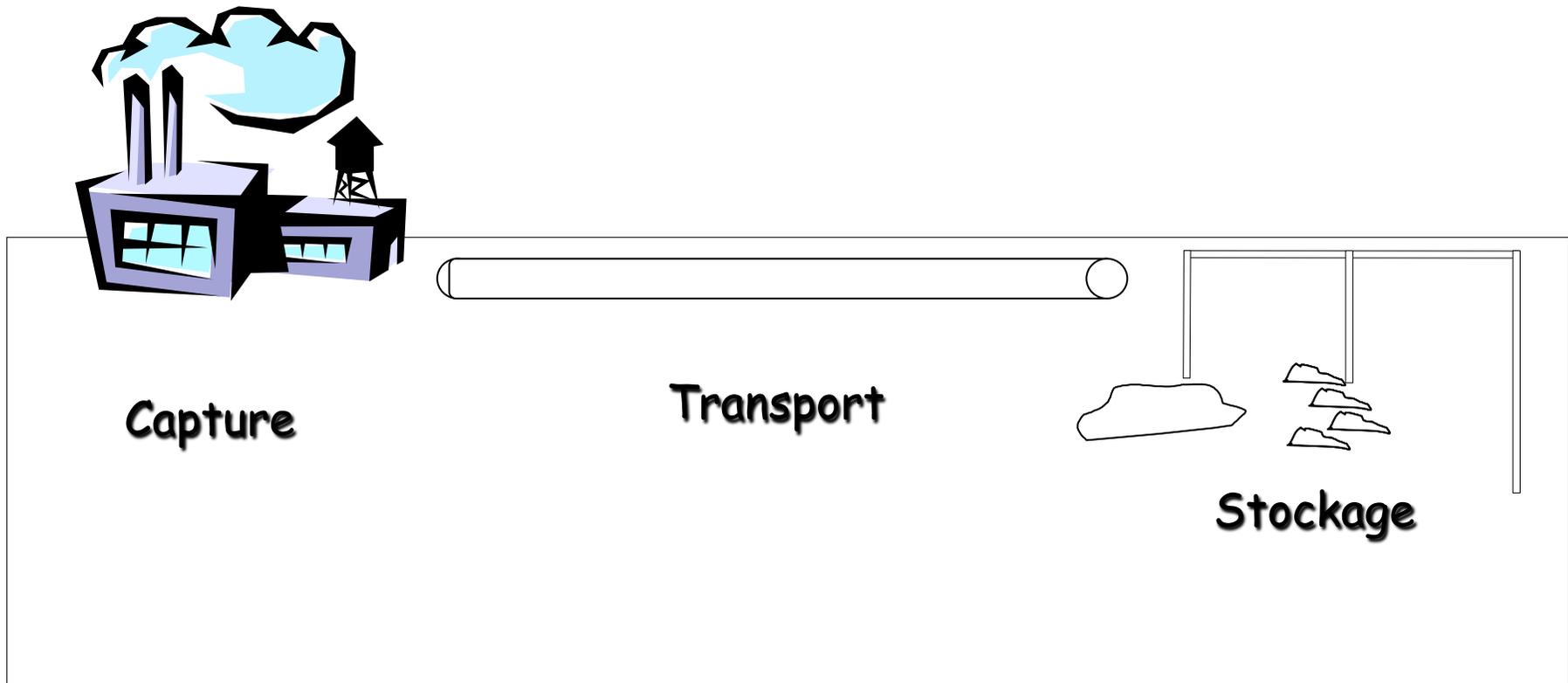


Dissolution 1 Dense Plume 2 Droplet Plume
Dispersion 3 Towed Pipe 4 Dry Ice
Isolation 5 CO₂ Lake

Sources: Derived From NETL & IEA Illustrations

Techniques industrielles de capture et de stockage de CO₂

Séquestration physique du CO₂

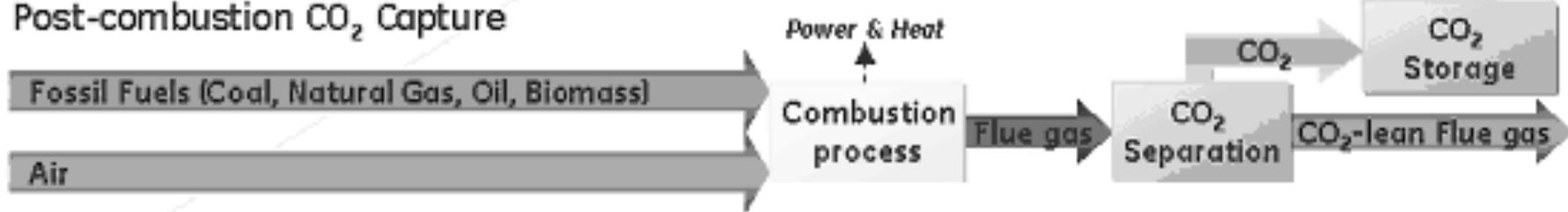


Capture du CO₂

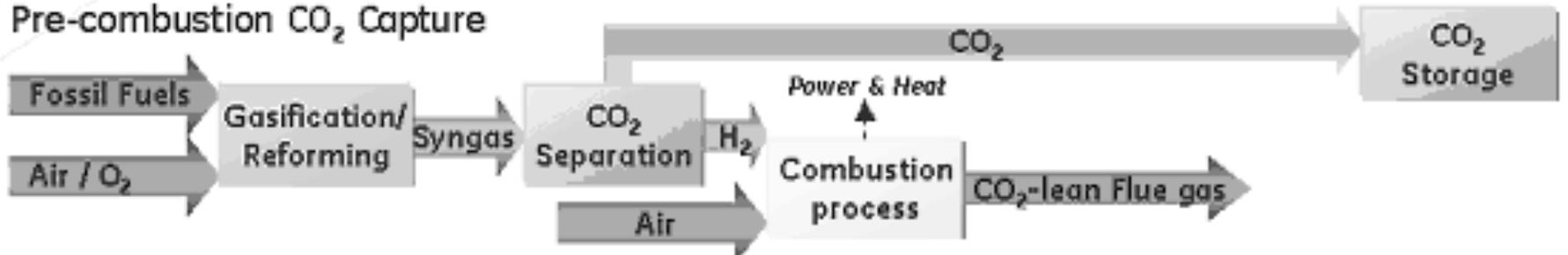


Main CO₂ Capture Routes for Fossil-Fired Power Plants

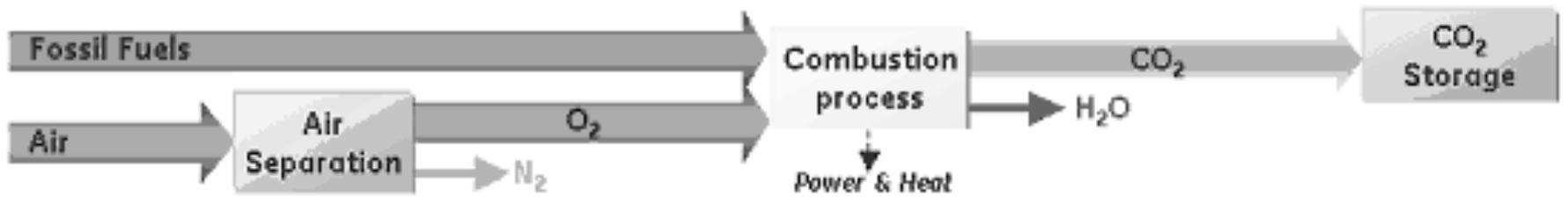
Post-combustion CO₂ Capture



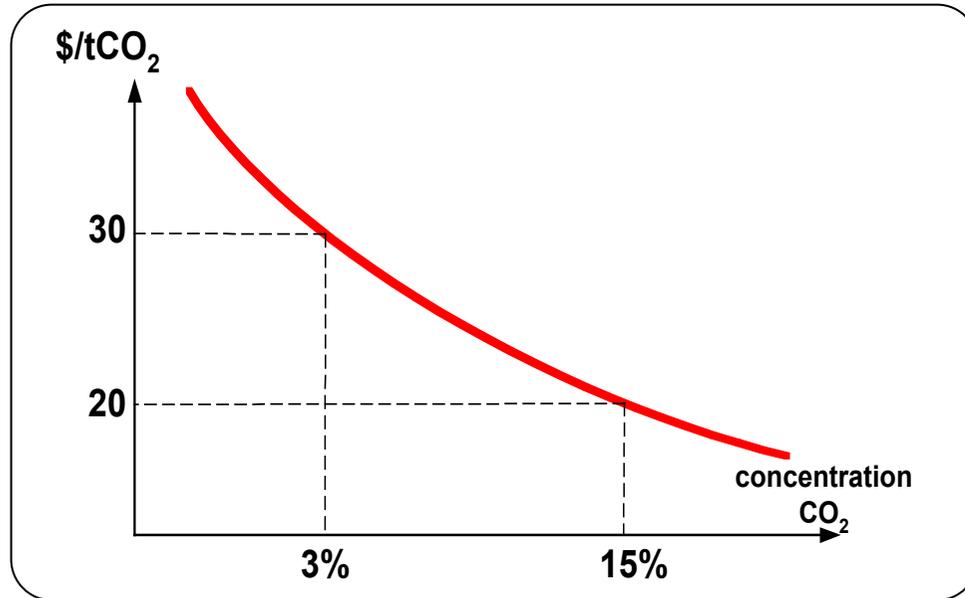
Pre-combustion CO₂ Capture



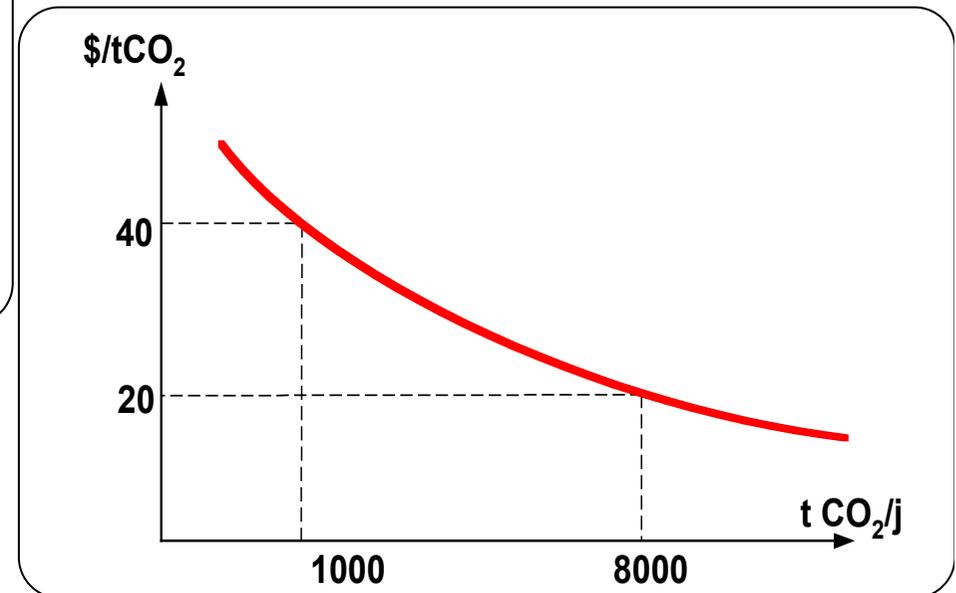
Oxyfuel-based CO₂ Capture



Coût de la capture



30 à 60 € par tonne de CO₂



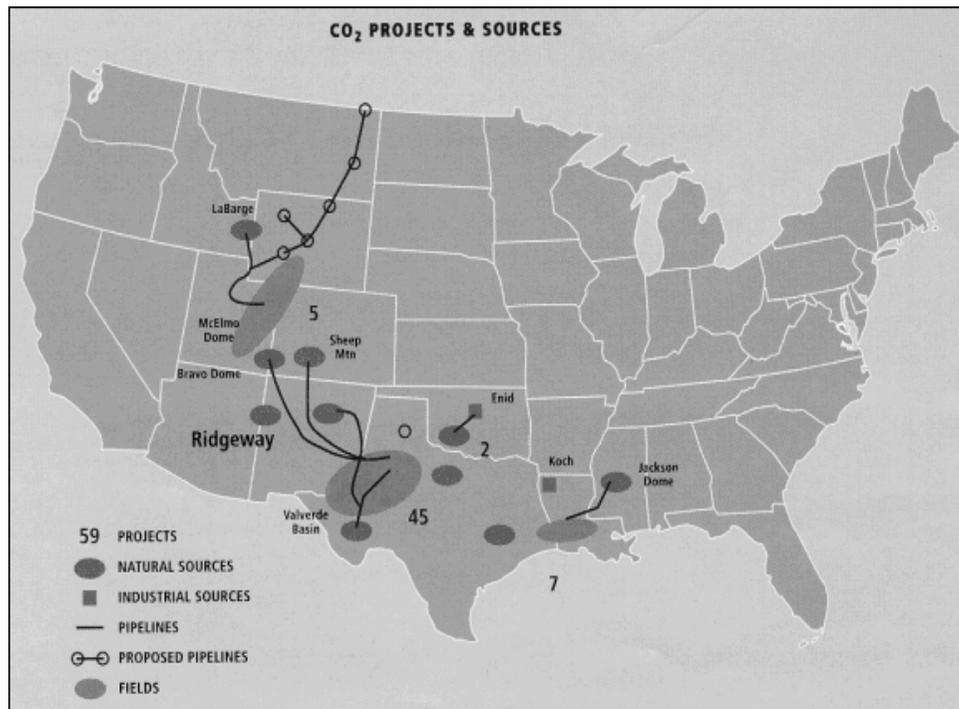
↪ Potentiel de réduction des coûts : amélioration des solvants, d'adsorbants...

Transport



Transport CO₂

Aux USA: plusieurs milliers de km pour des actions de RAH



⇒ pas de réglementation

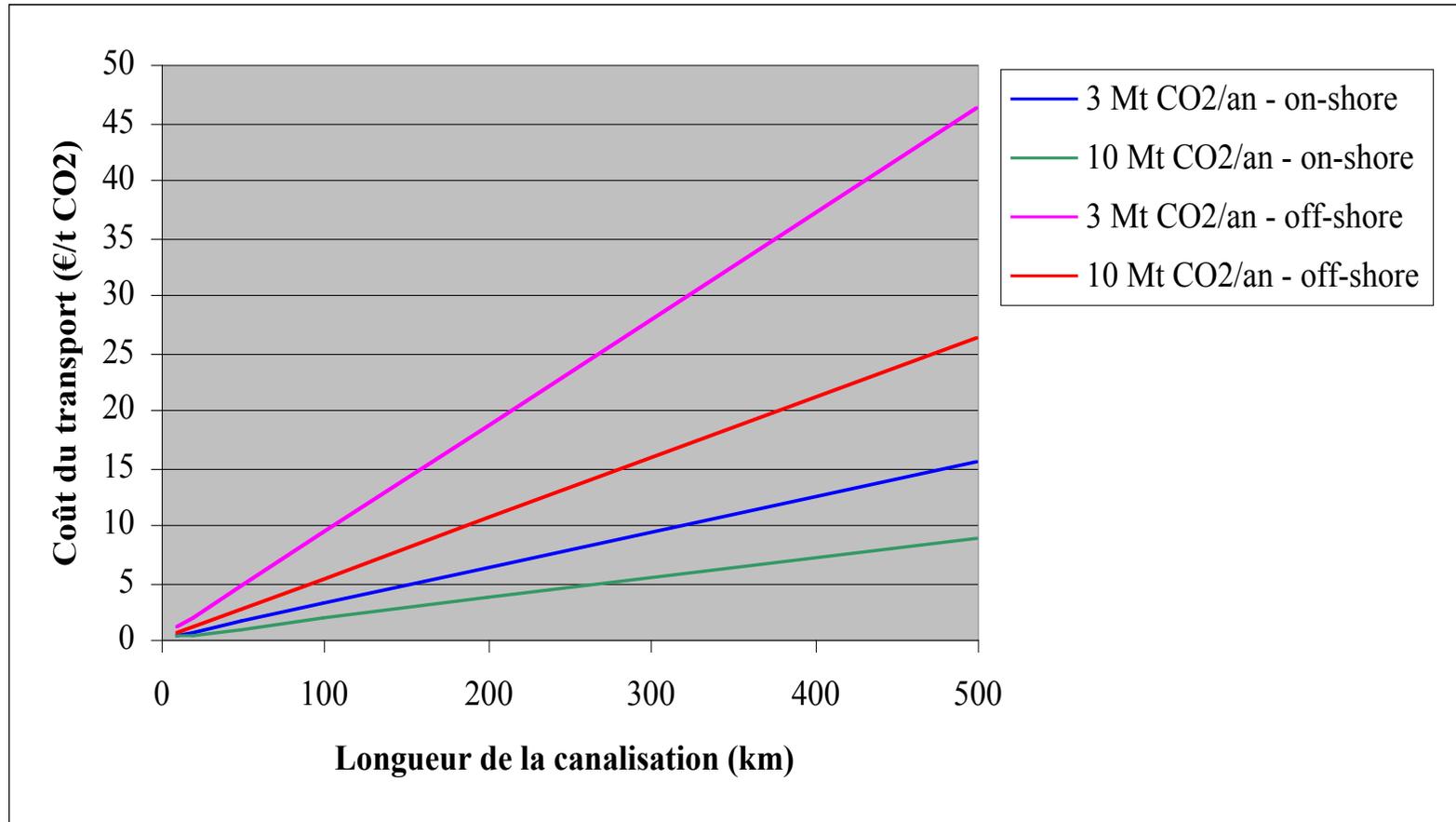
⇒ transport sous forme supercritique

⇒ risque de corrosion/hydrates

Coût du transport :

- Diamètre
- Epaisseur
- Longueur
- Lieu de pose (*on ou off-shore...*)

Coût du transport

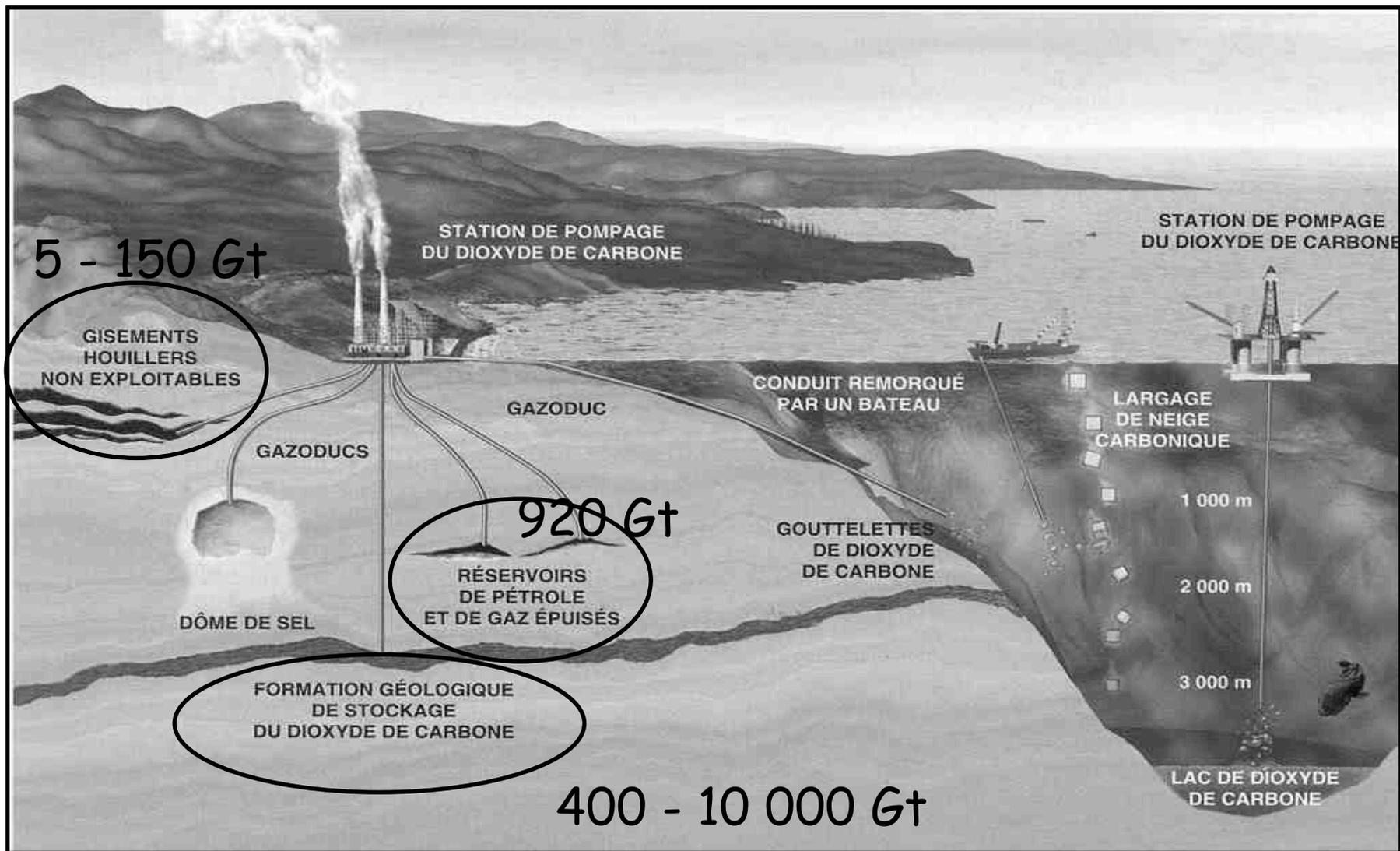


2 à 3 € par tonne de CO₂ pour 100 km



Stockage géologique du CO₂

- 1) Les grands types de réservoir**
- 2) Le CO₂ dans le sous-sol**
- 3) Expériences en cours**
- 4) Risques et surveillance**

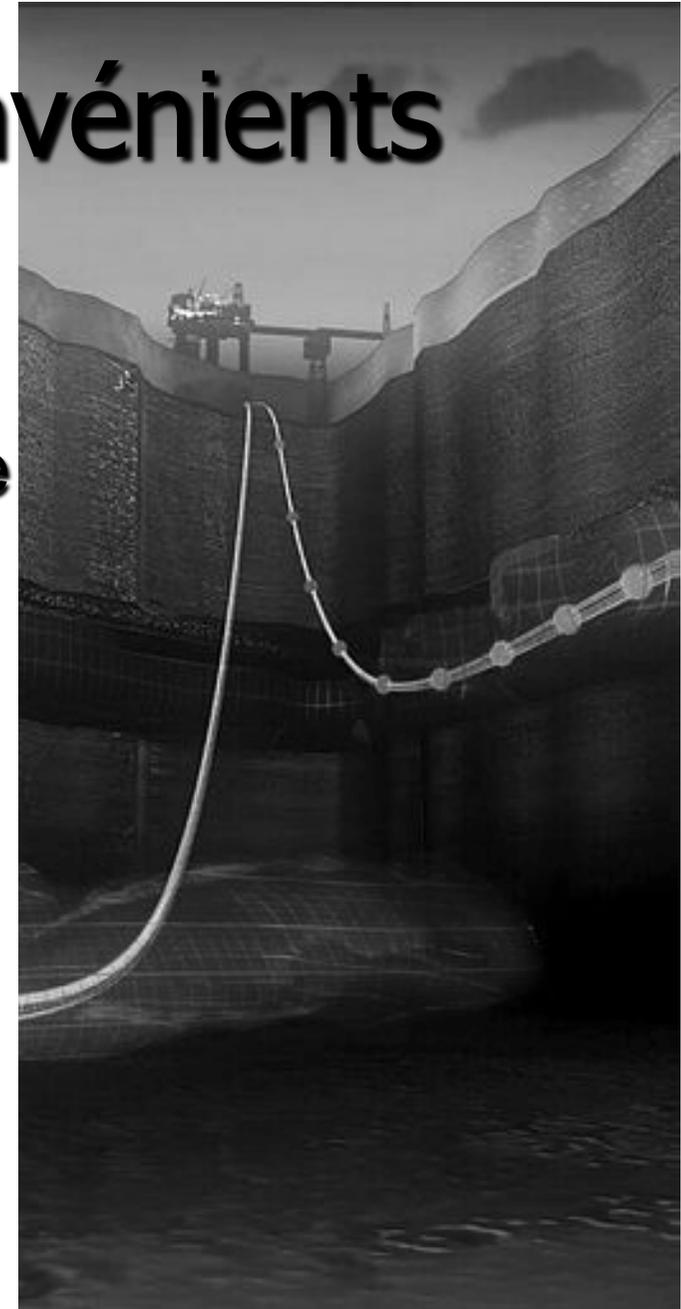


Avantages / inconvénients

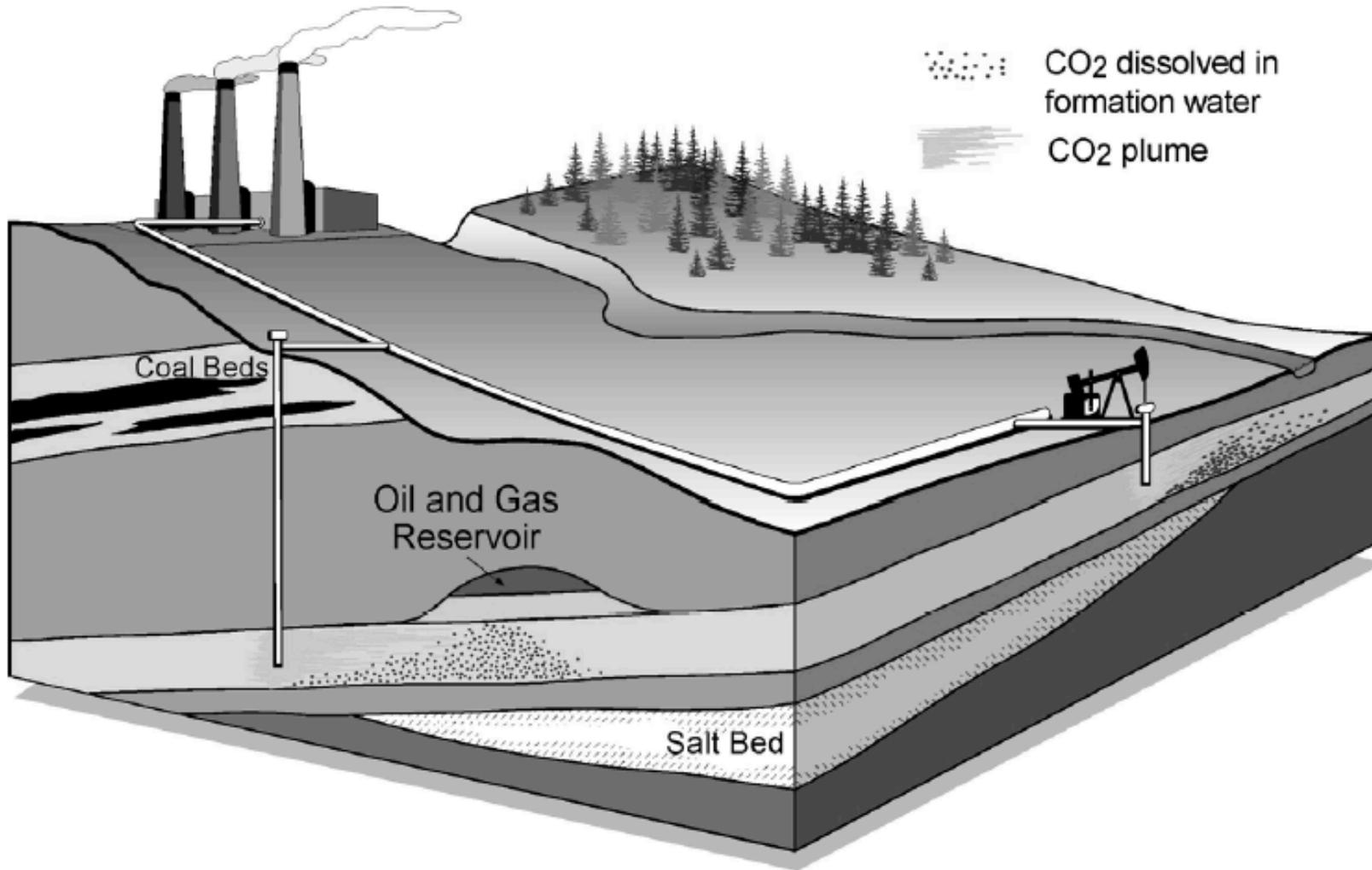
- **Gisements d'hydrocarbures (huile / gaz)**
 - Structures piégeantes
 - Etanches (aux gaz non réactifs)
 - Objets bien connus
 - Intérêt économique via EOR / EGR
- **Veines de charbons (non exploitées)**
 - Volumes poreux et perméabilité faibles
 - Récupération de méthane possible

Avantages / inconvénients

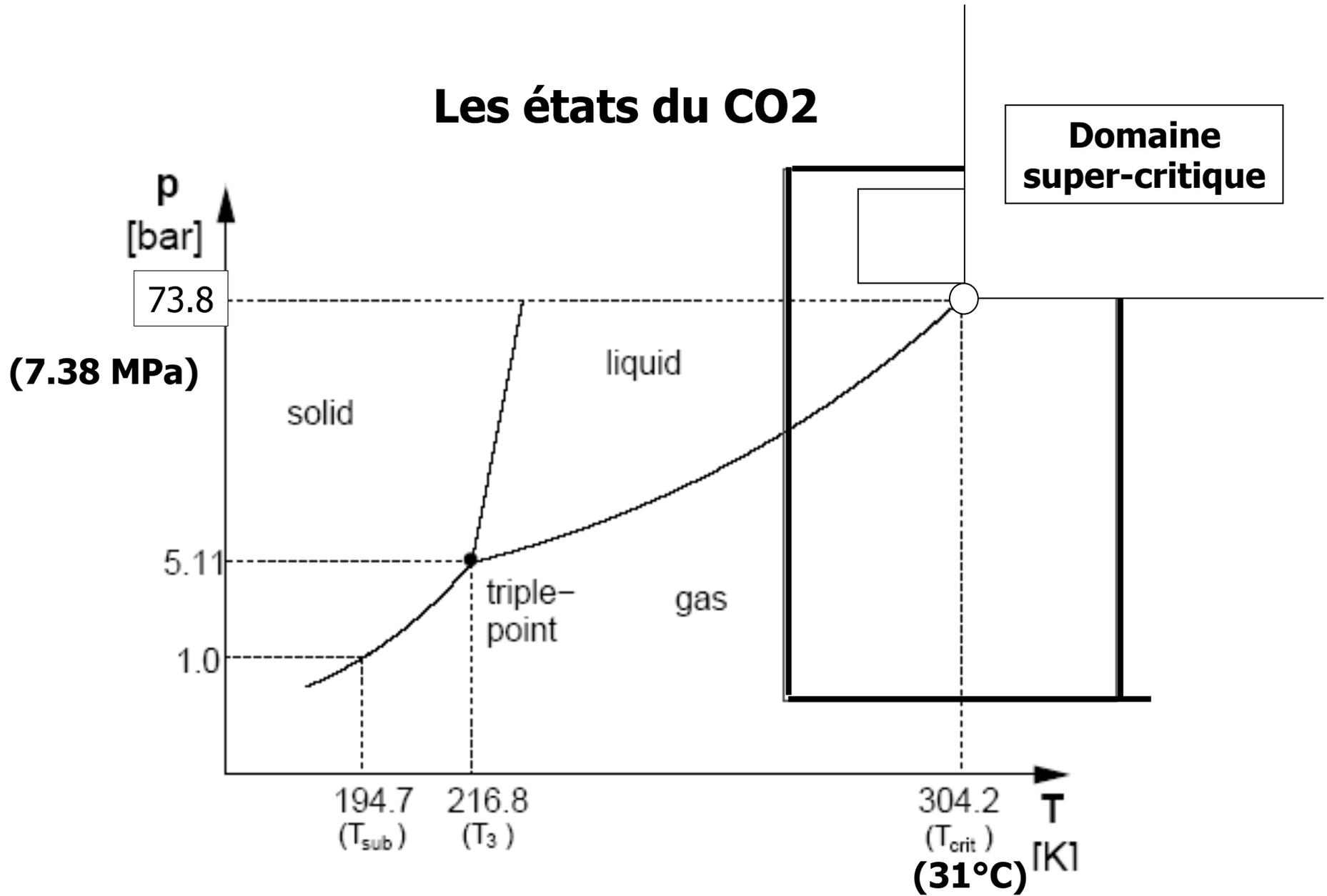
- **Aquifères salins**
 - Grande capacité de stockage
 - Eau non potable
 - Généralement peu connus
- **Roches basiques**
 - Volumes poreux et perméabilité faibles
 - Stockage minéral



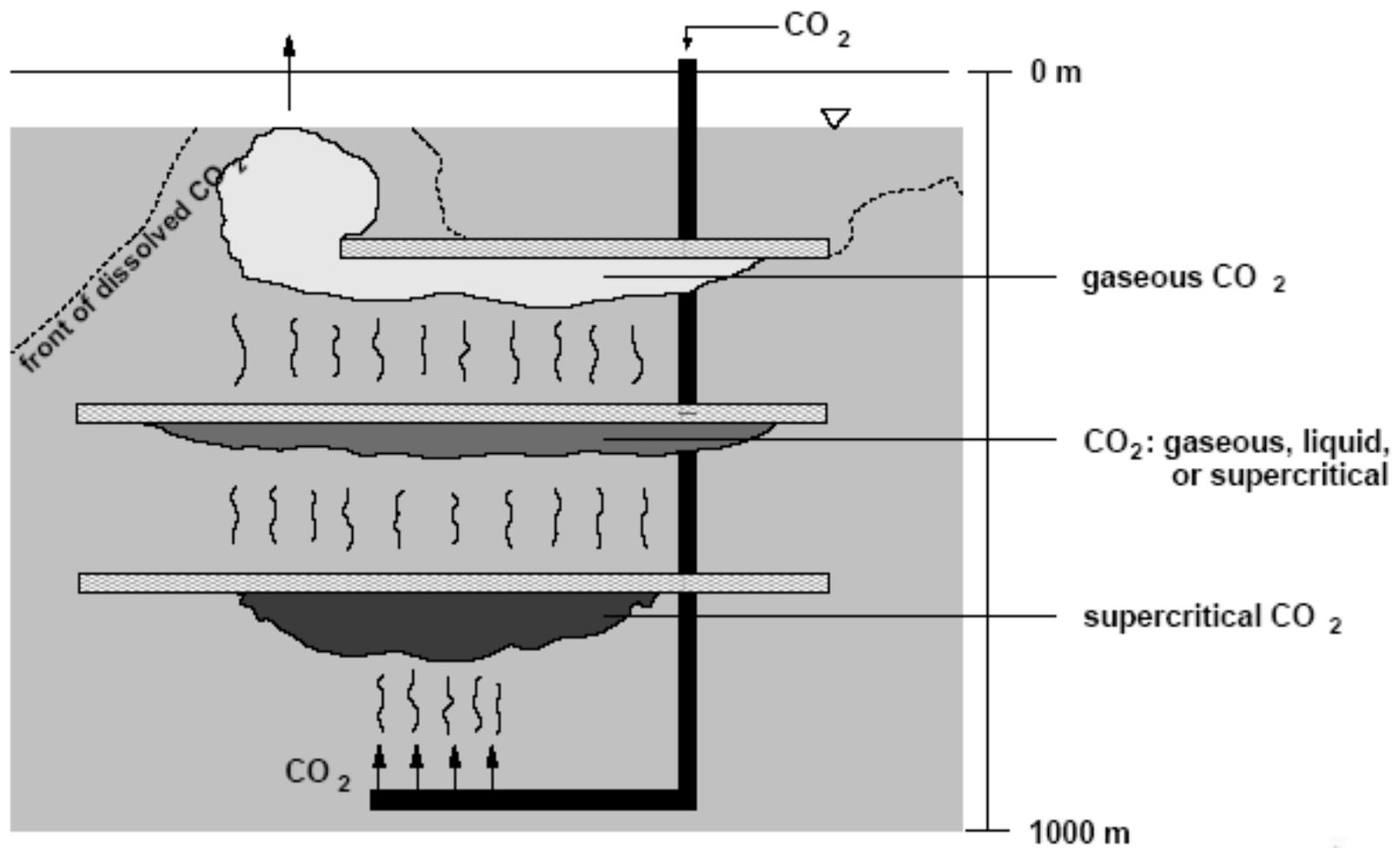
Le stockage du CO2 dans les aquifères



Les états du CO2



Pour $P > P_c$ et $T > T_c$, le CO2 est à l'état supercritique.

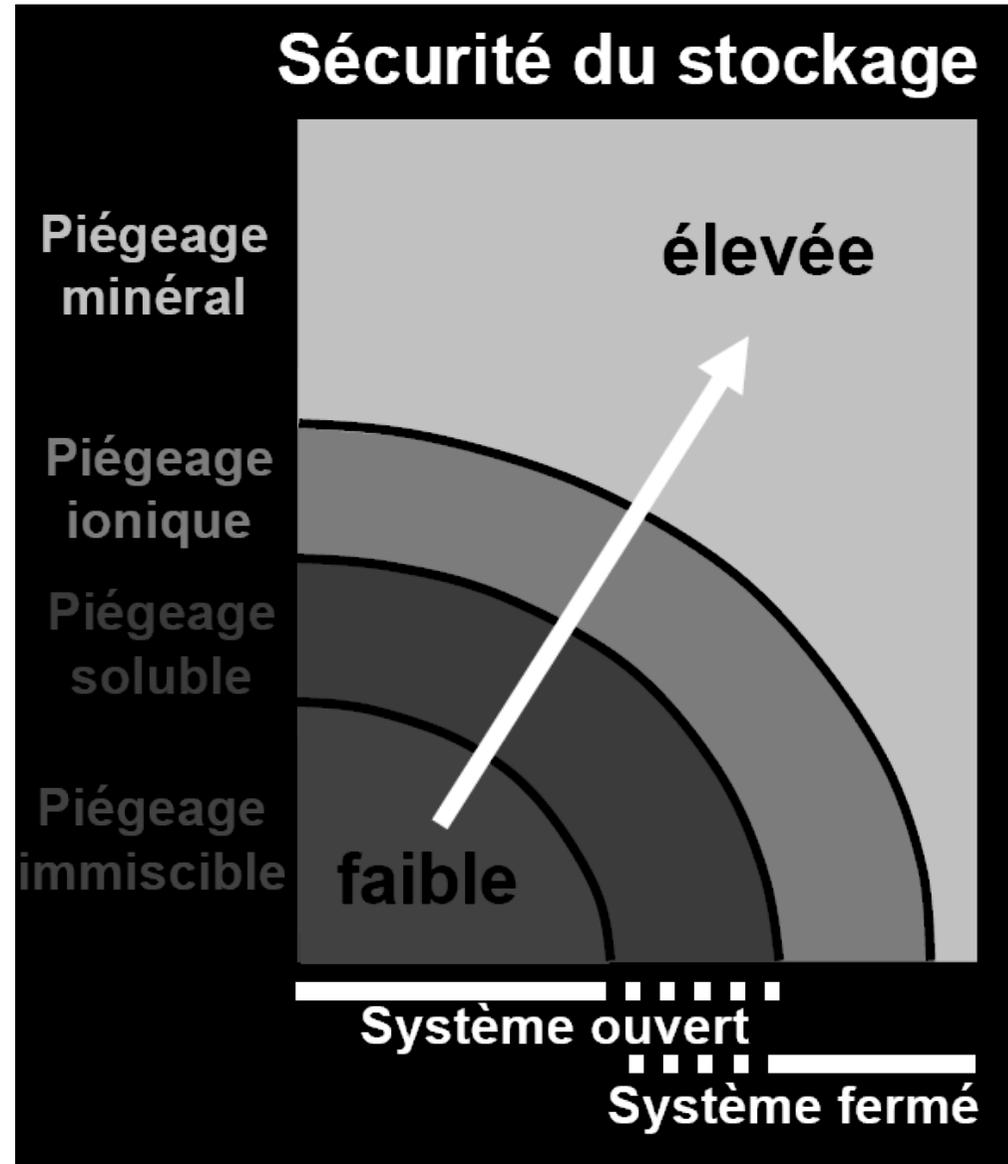


Types de piégeages

Piégeage en phase résiduelle gazeuse
"irréductible" dans l'espace poreux

Dissous dans la phase liquide pré-
existante aqueuse ou hydrocarbonée

Minéralisé ou adsorbé sur les
surfaces des solides minéraux ou
organiques



Les mécanismes de piégeage

Piégeage par dissolution dans l'eau

$\text{CO}_2 \Rightarrow [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$ et est transporté par diffusion-advection dans l'aquifère.

A l'interface CO_2 -eau, l'équilibre est rapidement atteint, mais à l'échelle globale du réservoir, le temps pour mettre à l'équilibre le CO_2 injecté avec l'eau de formation sera du même ordre de grandeur que celui du transport advectif dans le réservoir. La diffusion moléculaire dans les eaux de formation ne jouant qu'à l'échelle de quelques mètres sur des temps de 10 ans [distance parcourue = $(Dt)^{1/2}$ avec $D \approx 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$].

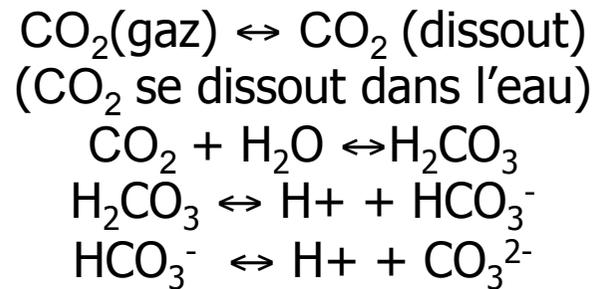
Piégeage minéral

Par ce mécanisme, le CO₂ est piégé par la formation de carbonates (carbonates de Ca, Fe et Mg).

Piégeage hydrodynamique

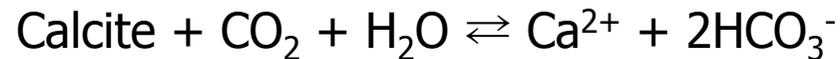
Le CO₂ reste dans le réservoir à la faveur de pièges structuraux ou stratigraphiques et des contrastes de densité entre la phase supercritique CO₂ et l'eau de formation.

Réactions chimiques de base



La dissolution du CO_2 , (1ère réaction) est l'étape la plus lente ($\approx 10^{-7}$ mole/kg/sec), les cinétiques des réactions acido-basiques successives sont considérablement plus rapides

Dissolution de minéraux



Les lois de dissolution des carbonates et des silicates, ainsi que celles de précipitations sont très mal connues pour les milieux naturels en particulier avec une quantité de CO_2 aussi importante. Il existe des travaux sur leurs dépendances avec la salinité le pH, T et les concentrations en Ca^{2+} , Mg^{2+} , par exemple. Les carbonates sont généralement les minéraux les plus mis à contribution lors de ce processus, leur solubilité est assez grande et leur vitesse de dissolution importante.

Ces jeux de dissolution/précipitation vont contribuer de façon complexe à l'évolution de la porosité de la roche réservoir.

Précipitation de carbonates



Si l'état de saturation vis-à-vis des ces minéraux peut être aisément estimé, les vitesses et les mécanismes de formation de ces minéraux dans les conditions du stockage sont aujourd'hui mal connus, or ce piégeage par précipitation de carbonate est la voie imaginée pour le stockage en lithologie basaltique

Les interactions entre les eaux de formation, le CO₂ supercritique et les minéraux sont fondamentales pour évaluer les capacités et la pérennité du stockage d'un aquifère profond. Il est à noter que les interactions directes entre le CO₂ supercritique et les minéraux sont généralement considérées comme inefficaces, elles ne se réaliseraient que par l'intermédiaire des espèces dissoutes du système des carbonates en solution.

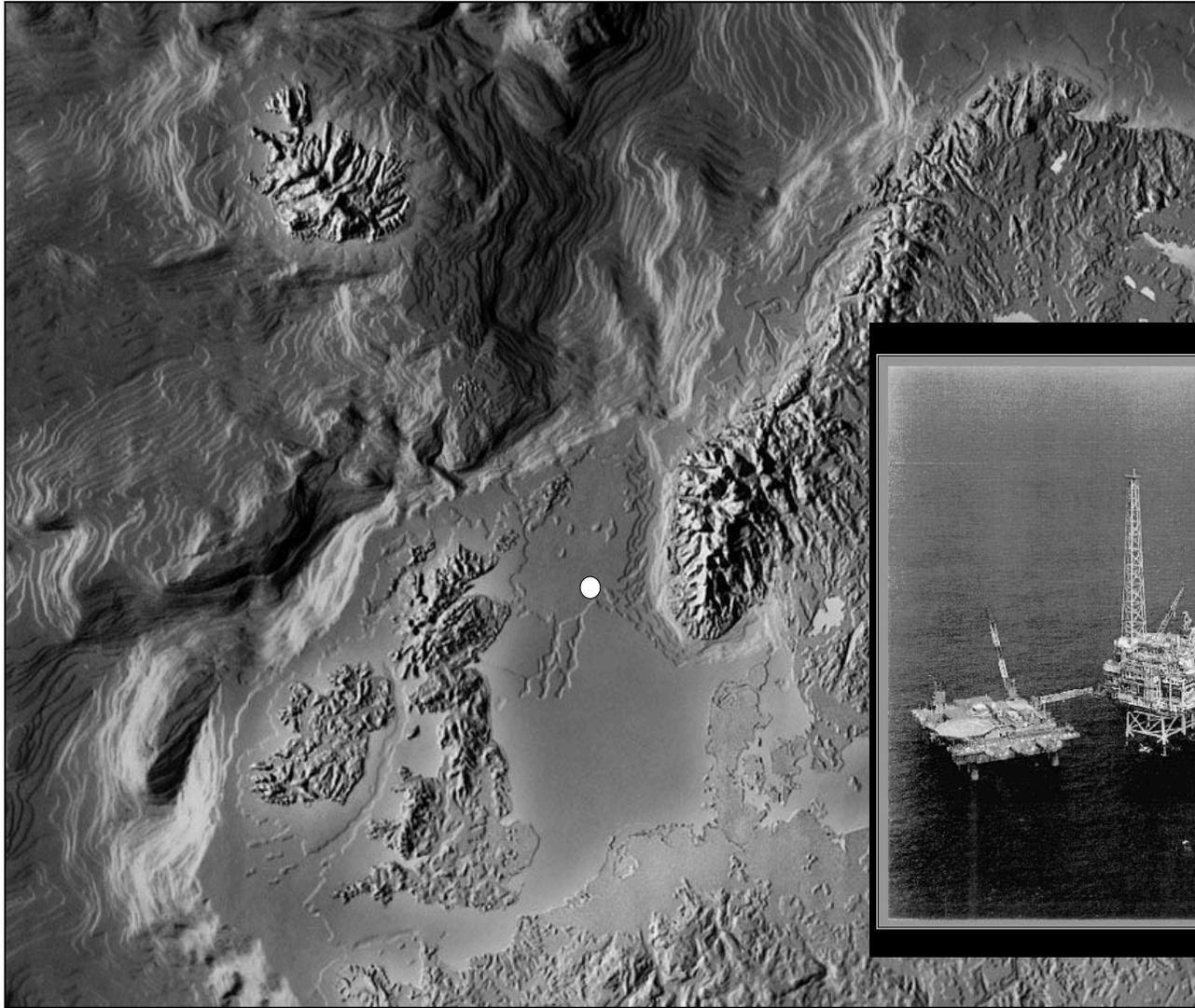
Aquifères gréseux et aquifères carbonatés

Cette classification est une simplification car en général les roches des réservoirs sont plutôt des complexes hétérogènes qui associent ces deux types de roche.

Les capacités des **aquifères carbonatés** dépendent essentiellement de la porosité et de son évolution en réponse à l'injection de CO₂. Cette évolution est contrôlée par les recristallisations et les précipitations diagénétiques des carbonates. La capacité de stockage par piégeage minéral est très limitée du fait de l'absence de source d'ions Ca²⁺ et Mg²⁺ nécessaires pour la formation des carbonates .

Les aquifères gréseux présentent généralement de bonnes porosités et de bonnes perméabilités primaires (5 à 20% de porosité et 5 à 100 mD de perméabilité). Ils sont potentiellement plus intéressants pour le piégeage minéral du CO₂ parce que les réactions de dissolution des aluminosilicates, comme les feldspaths, les zéolites, les illites, les chlorites et les smectites consomment des H⁺ et libèrent Ca²⁺ et Mg²⁺ qui sont ensuite disponibles pour la précipitation des carbonates. Ces réactions faciliteront la formation de la kaolinite et par conséquent la neutralisation de l'acidité induite par la dissolution du CO₂. Leur capacité de stockage est considérée comme plus grande que celle des autres aquifères (Gunter et al., 1996)

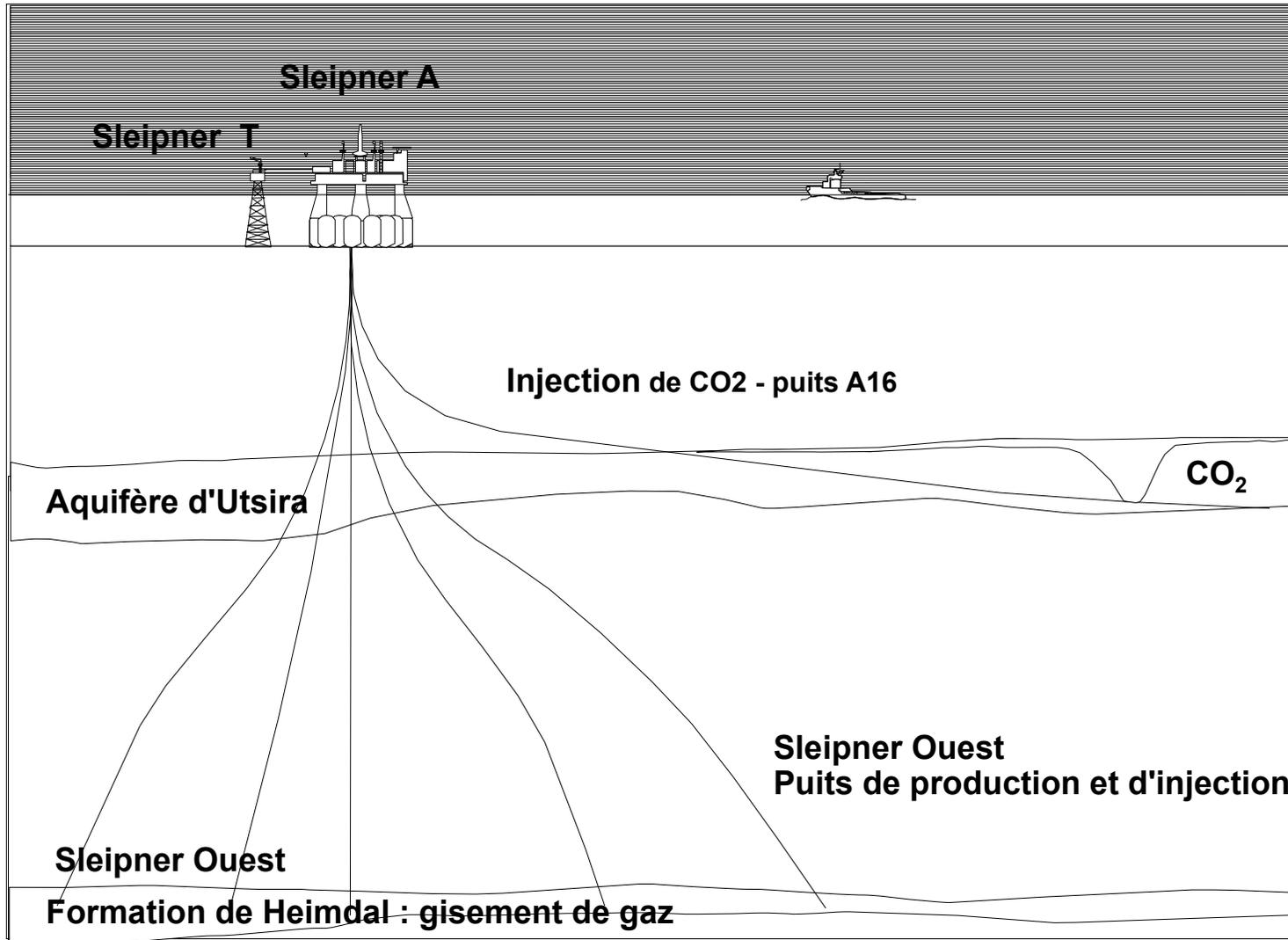
Un exemple de stockage de CO₂ dans un aquifère, champ de Sleipner, Norvège



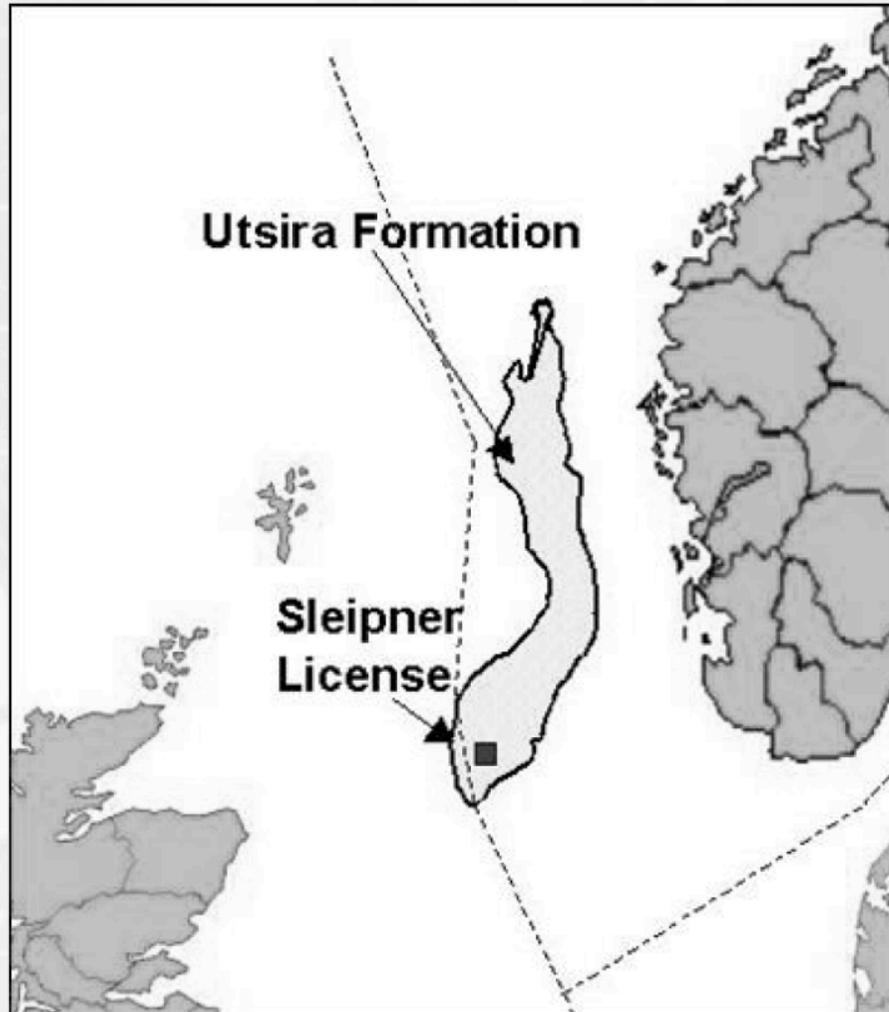
Stockage à Sleipner : pourquoi ?

- Le gaz naturel du gisement de Sleipner contient 9% de CO₂ dans le réservoir.....les spécifications pour la vente du gaz autorisent un maximum de 2,5%
- La décision de réinjecter le CO₂ a été prise en 1991, suite à l'introduction en Norvège d'une taxe sur les émissions de CO₂ de 50 €/tonne CO₂ émise
- L'injection a débuté en septembre 1996 (1 Mt / an)

Stockage de CO₂ dans l'aquifère d'Utsira

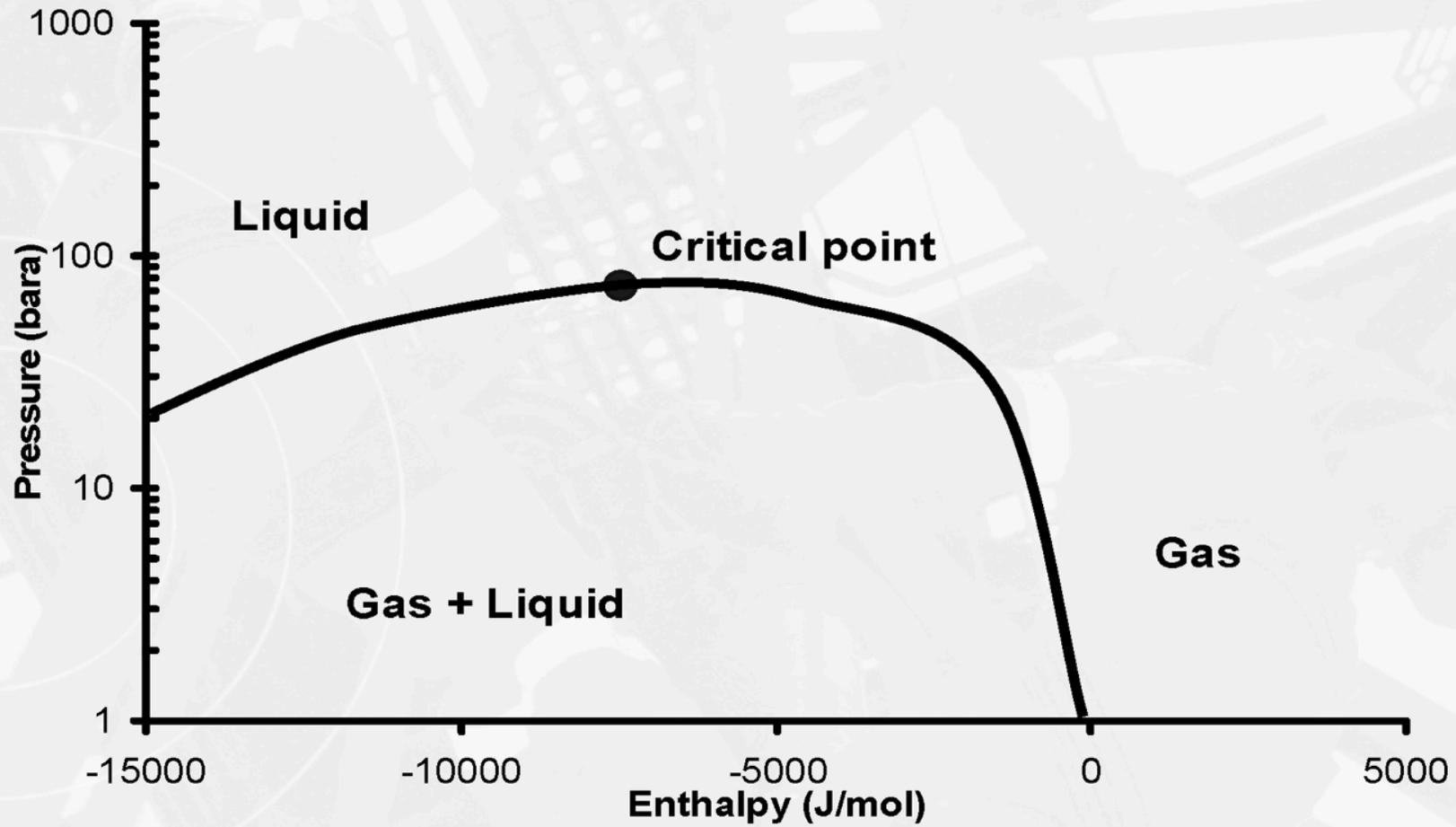


The Utsira Formation

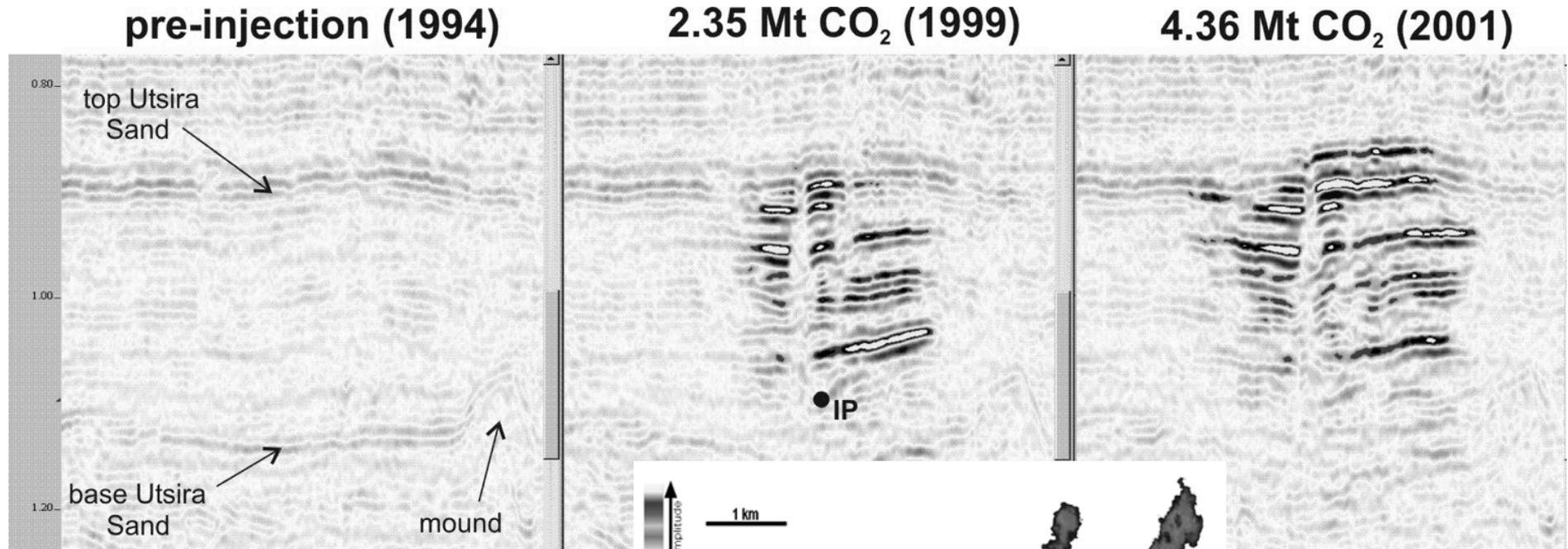


The storage capacity is more than hundred times the annual European emissions

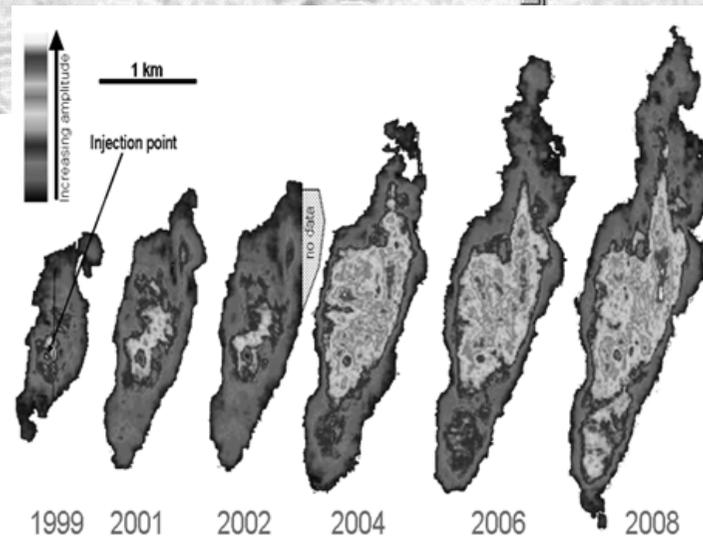
Thermodynamics



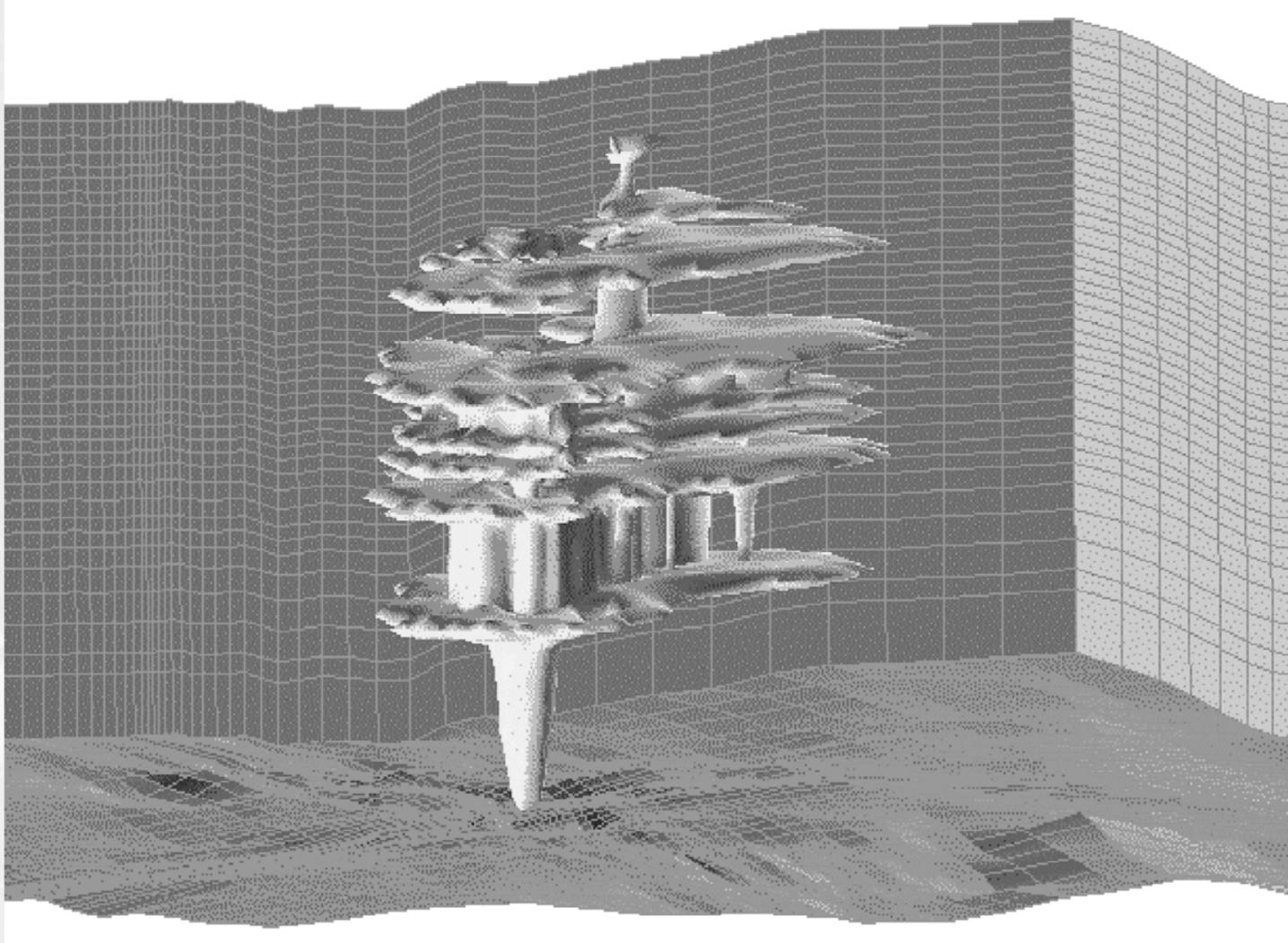
Suivi par méthode sismique de l'injection de CO₂



En 2013 : 8 million de t



Reservoir model of CO₂ after 3 years



Exemple de site en activité

Weyburn, EOR, Saskatchewan, Canada

Dakota Gasification
Company à Beulah (ND-
USA)

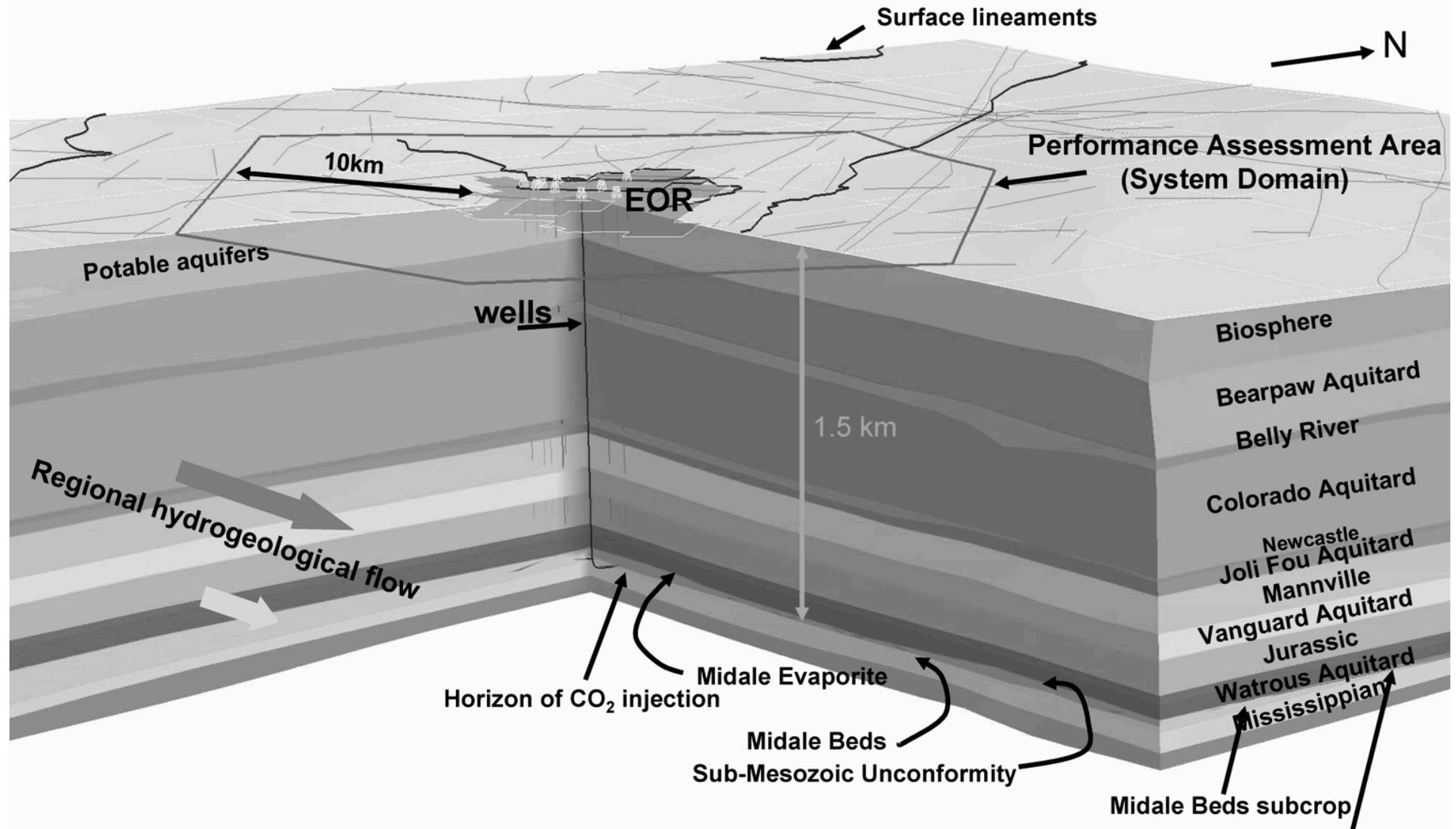
7.1 millions m³/jour de CO₂
issu de la gazification du
charbon (lignite)

2.7 millions m³/jour
contractuel capturé et
injecté à Weyburn par
Encana (Saskatchewan,
Canada)

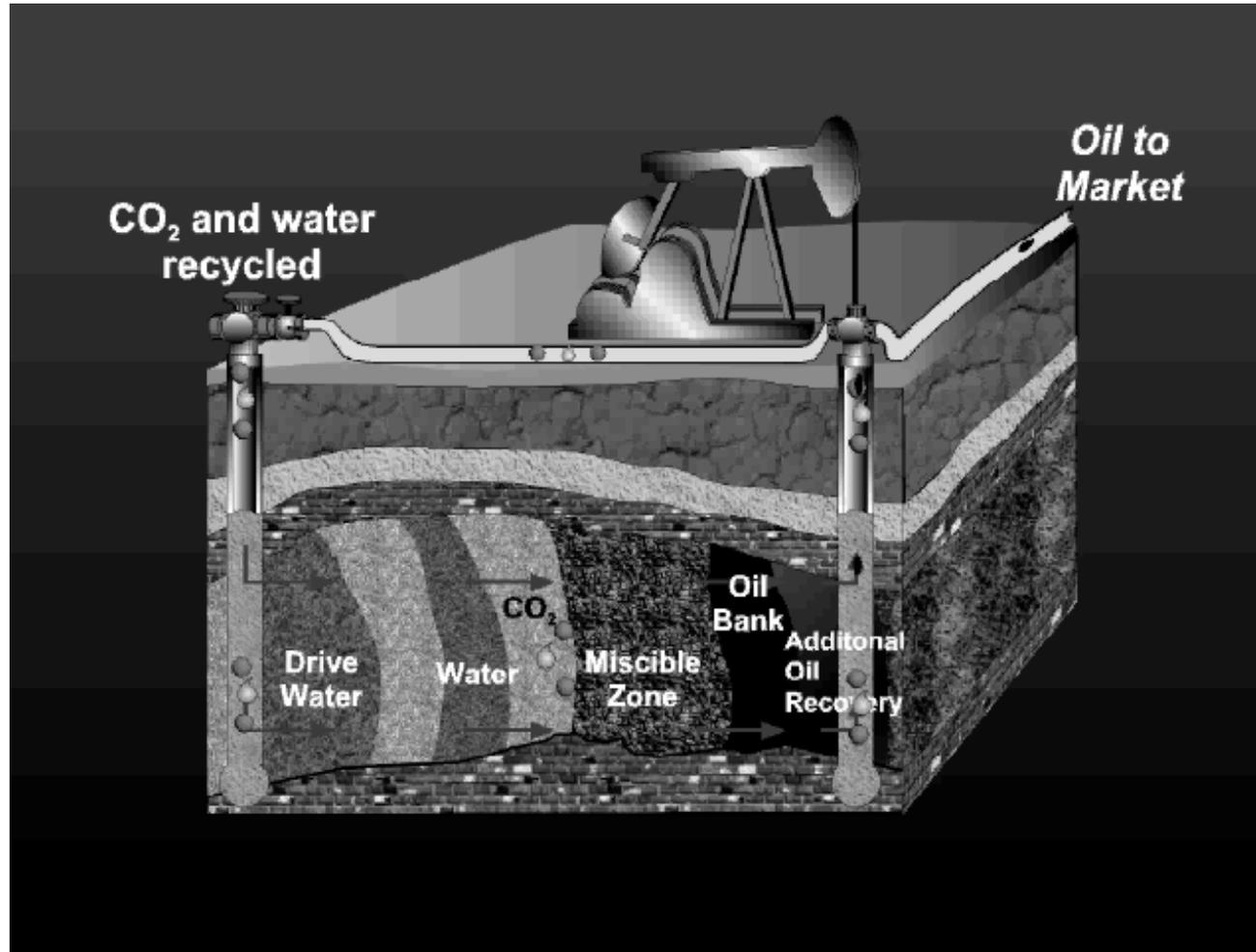
CO₂ pur à 95%



Exemple de sites en activité: Weyburn



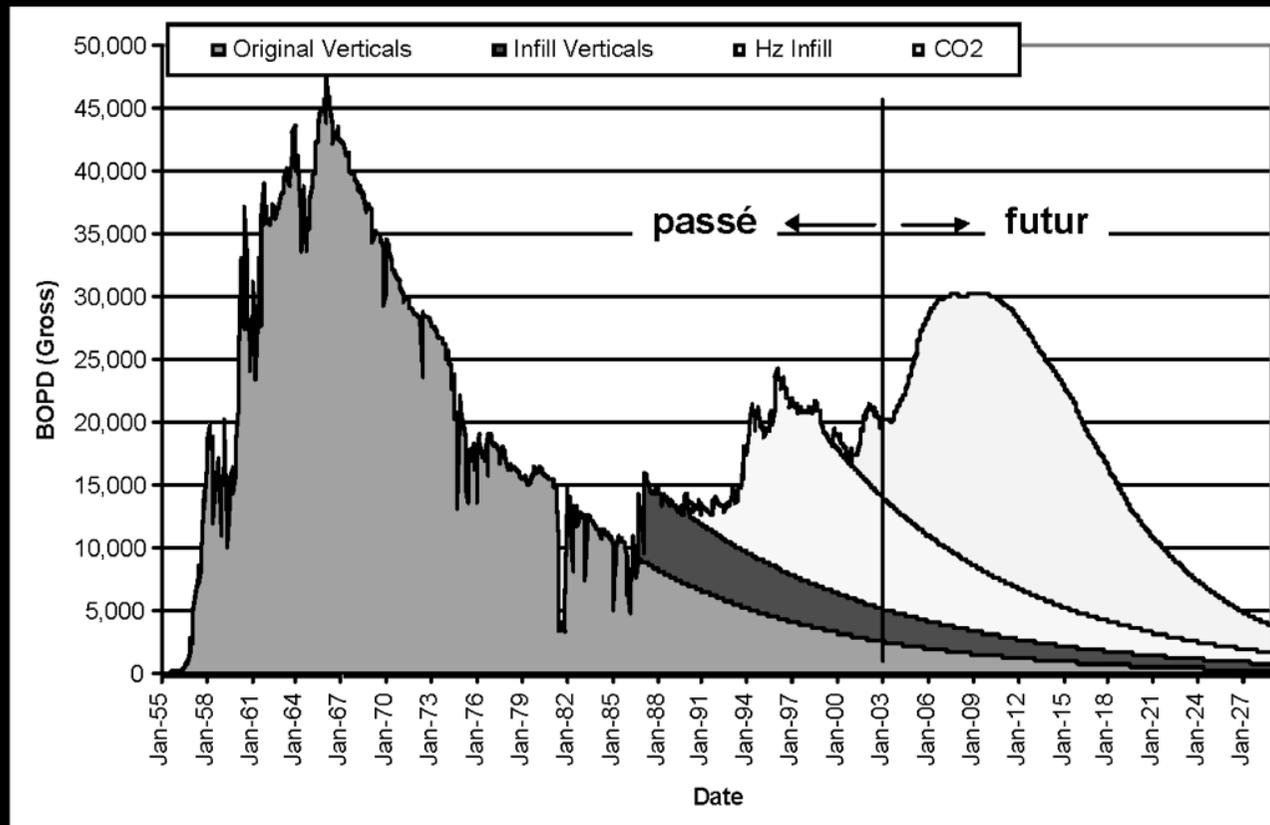
Principe



Récupération de 130 millions de barils d'huile supplémentaires

Weyburn: résultats attendus

75 points d'injection prévus pour les 10 ans à venir
42 points actifs en 2004
Pic à 30 000 bopd
Gain cumulé: 130 MMbbls



Weyburn: résultats attendus

Recherche + monitoring

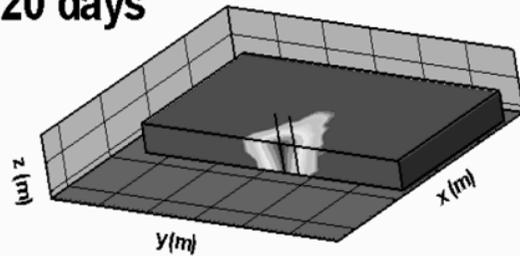


Prédiction du panache

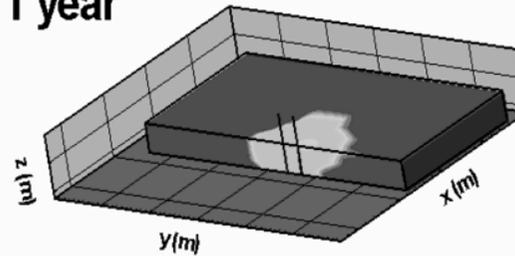
Panache avec forte saturation résiduelle en gaz

Top row: $S_{gr} = 0.23$

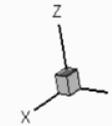
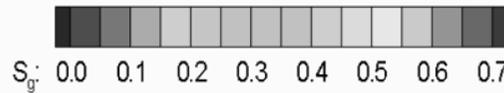
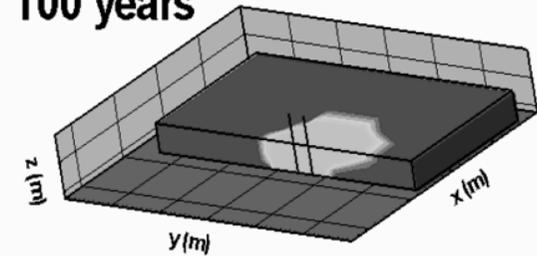
20 days



1 year

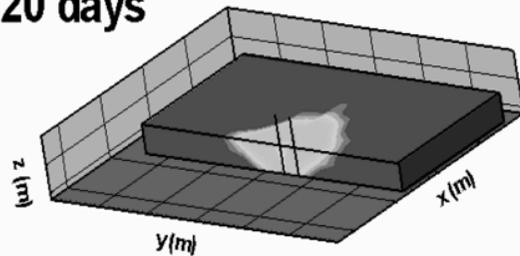


100 years

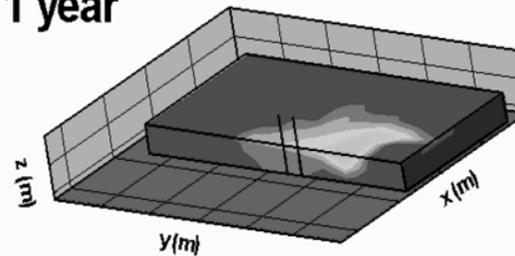


Bottom row: $S_{gr} = 0.05$

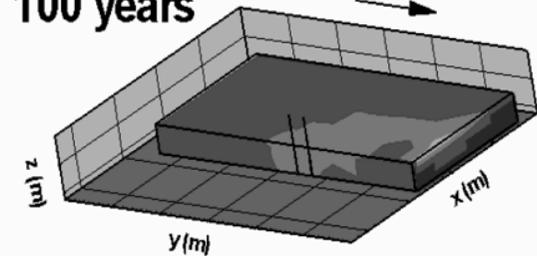
20 days



1 year

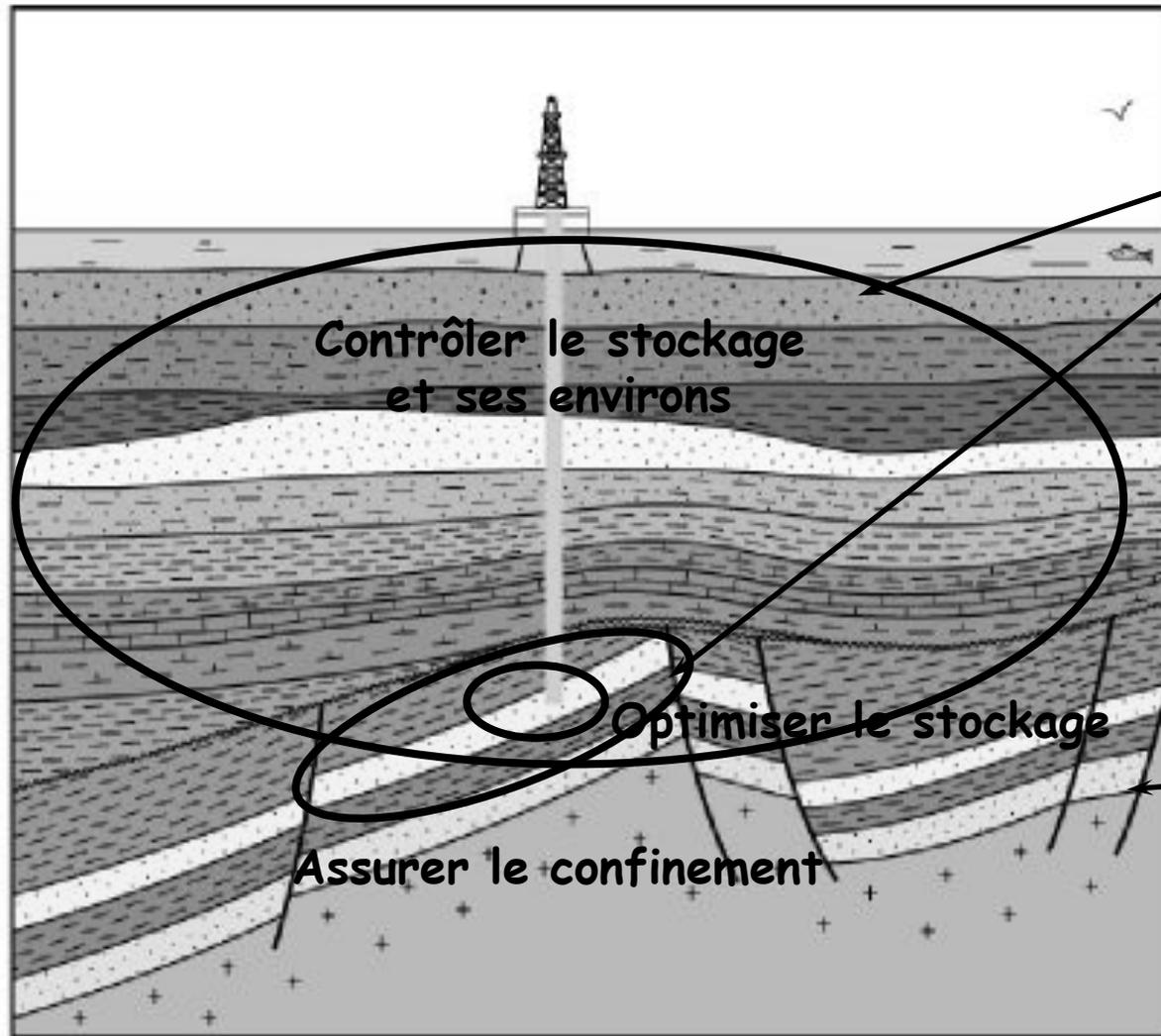


100 years



Panache avec faible saturation résiduelle en gaz

Enjeux techniques



Techniques de contrôle :
Méthodes sismiques, traceurs, capteurs

Modélisation numérique :
échelle régionale, temps longs (5000 ans)
échelle locale, temps courts (20-40 ans)

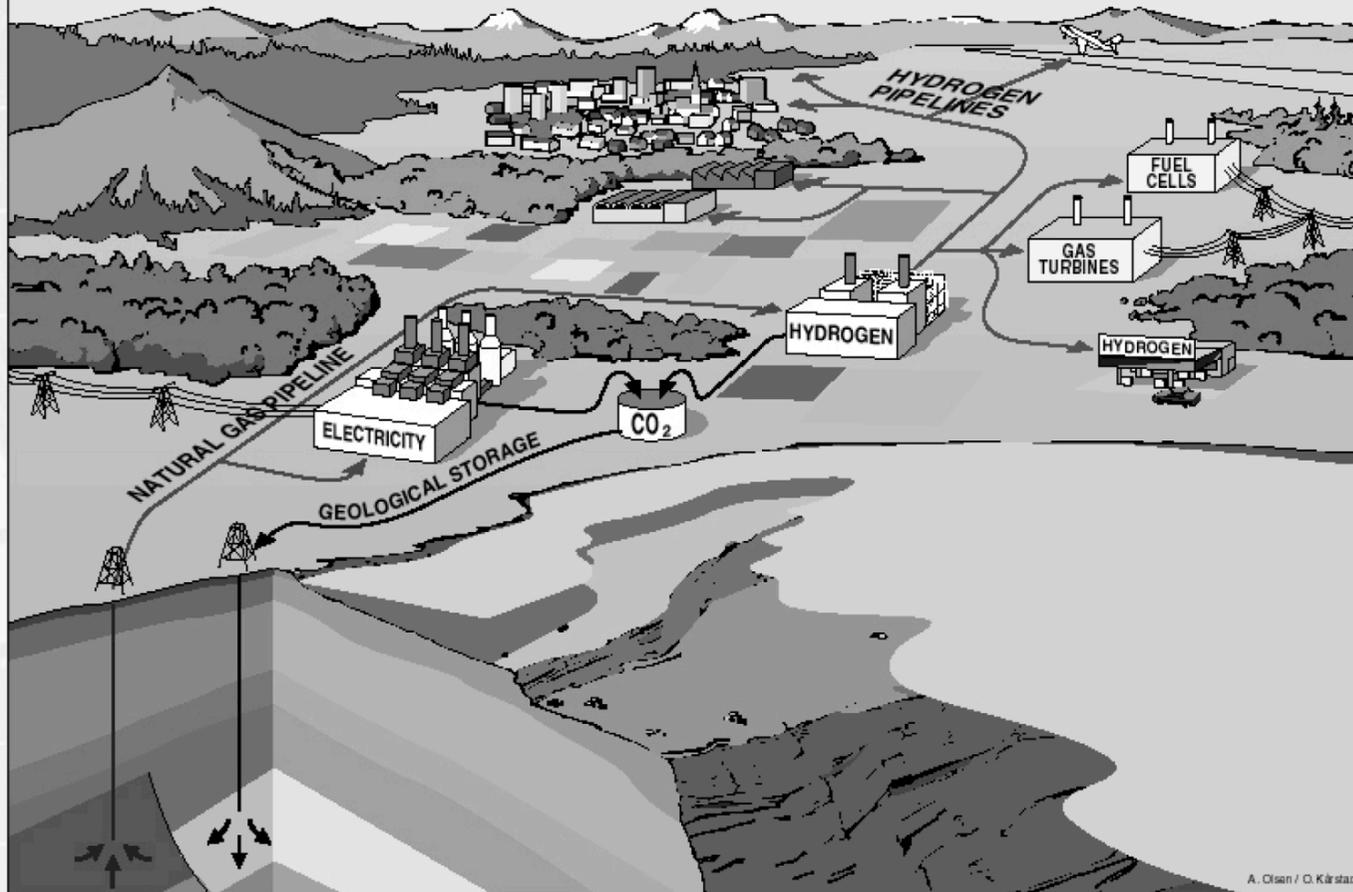
Enjeux scientifiques

- ◆ **Impact d'une injection de gaz acides sur une matrice rocheuse carbonatée - modifications minéralogiques, pétrophysiques**
- ◆ **Investigations à deux échelles de temps :**
 - Echelle de l'injection (qq 10^{aines} d'années)
 - Echelle du stockage (10 000 ans)
- ◆ **Influence et valeur ajoutée du couplage géochimie/écoulement**

Vision à 2050

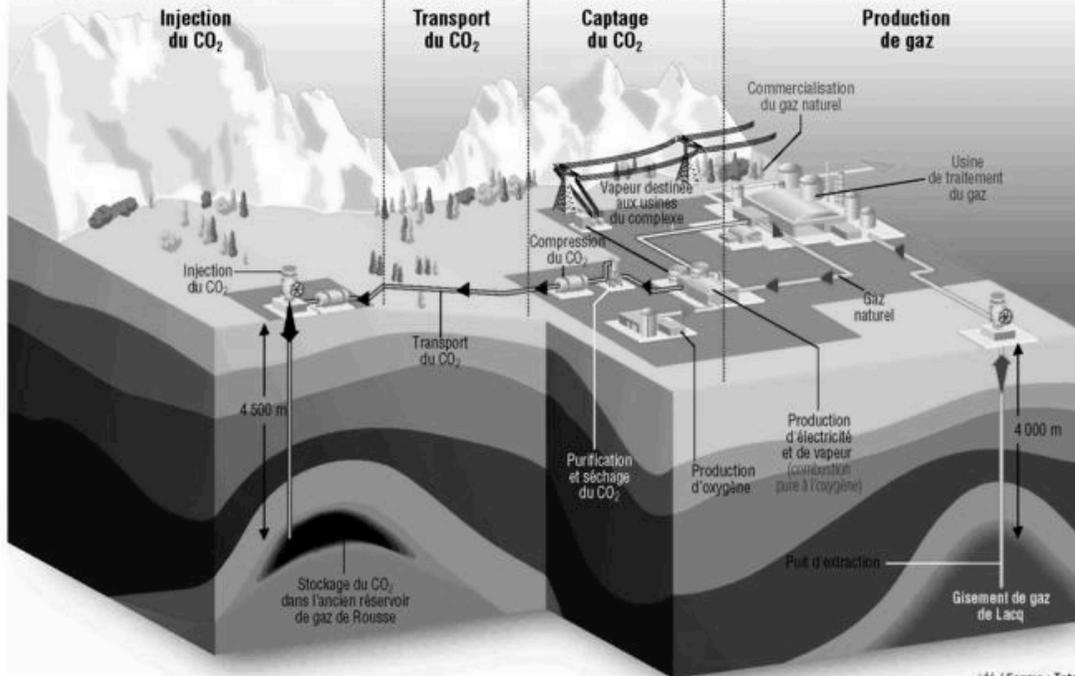
	Fortes contraintes techniques et/ou sociologiques	Faibles contraintes techniques et/ou sociologiques
Mesures incitatives et réglementaires faibles	Déploiement du CSC est marginal	CSC réservé à quelques gros émetteurs et secteur industriel ne pouvant appliquer des mesures alternatives de réduction des émissions de CO₂
Mesures incitatives et réglementaires fortes	Forte mutualisation et stockage géologique du CO₂ en offshore privilégiés	Déploiement du CSC à grande échelle

DECARBONISATION OF FOSSIL FUELS TO ELECTRICITY AND HYDROGEN



En France ?

Total exploite son site de Lacq pour tester la séquestration de CO₂



Lacq CO₂ pilot CO₂ injection - monitoring system

