

Mike Lane, *The Baltimore Sun* (2003)

Les gaz rares peuvent-ils
permettre de surveiller les
sites de séquestration
géologique de CO_2 ?

Stéphane LAFORTUNE

Institut de Physique du Globe de Paris

Bilan radiatif terrestre

Terre + atmosphère = système thermodynamique fermé

Entrant

Rayonnement
solaire
visible



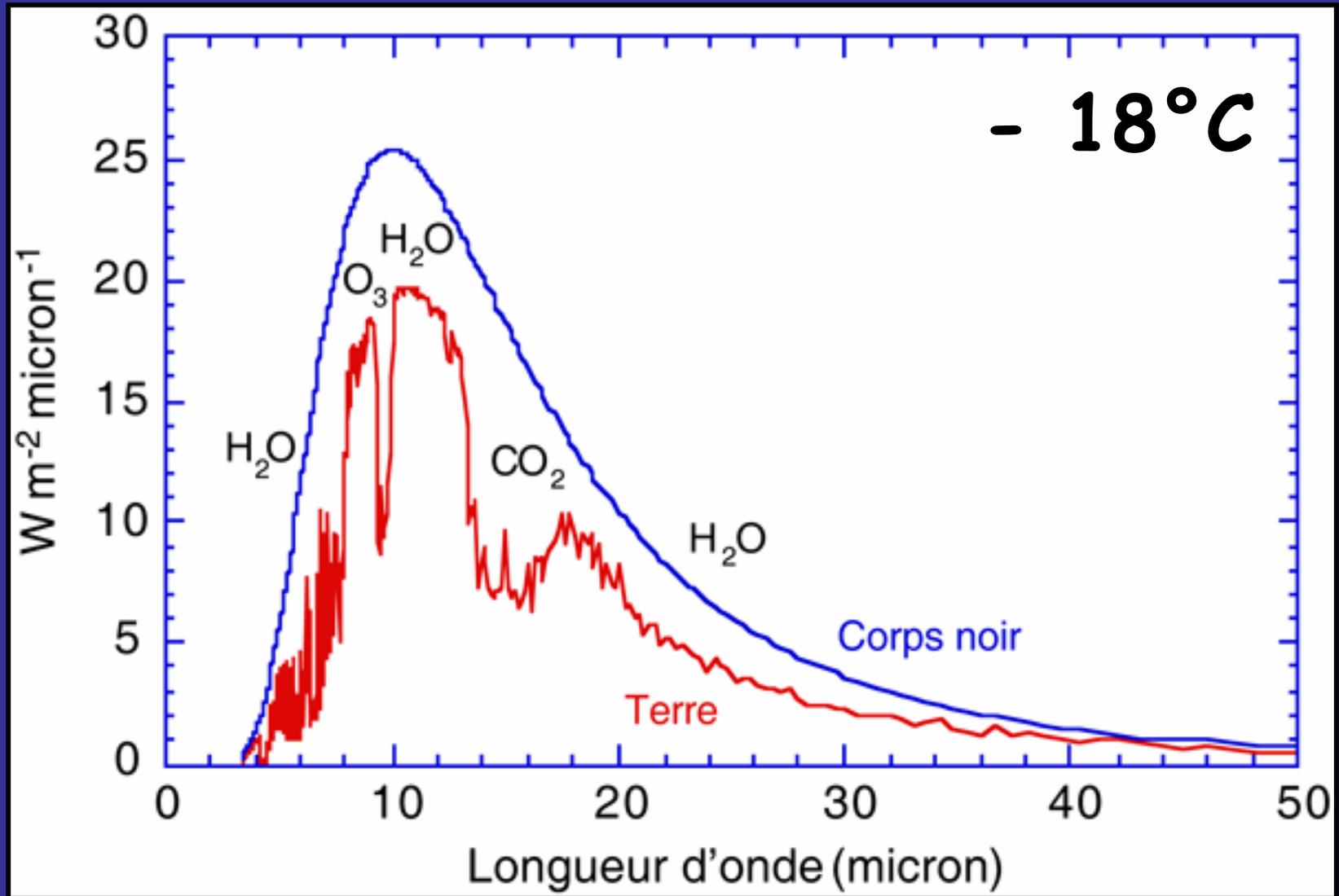
Sortant

Emission
terrestre
infrarouge

Transfert d'énergie sous forme de
flux radiatifs

Effet de serre

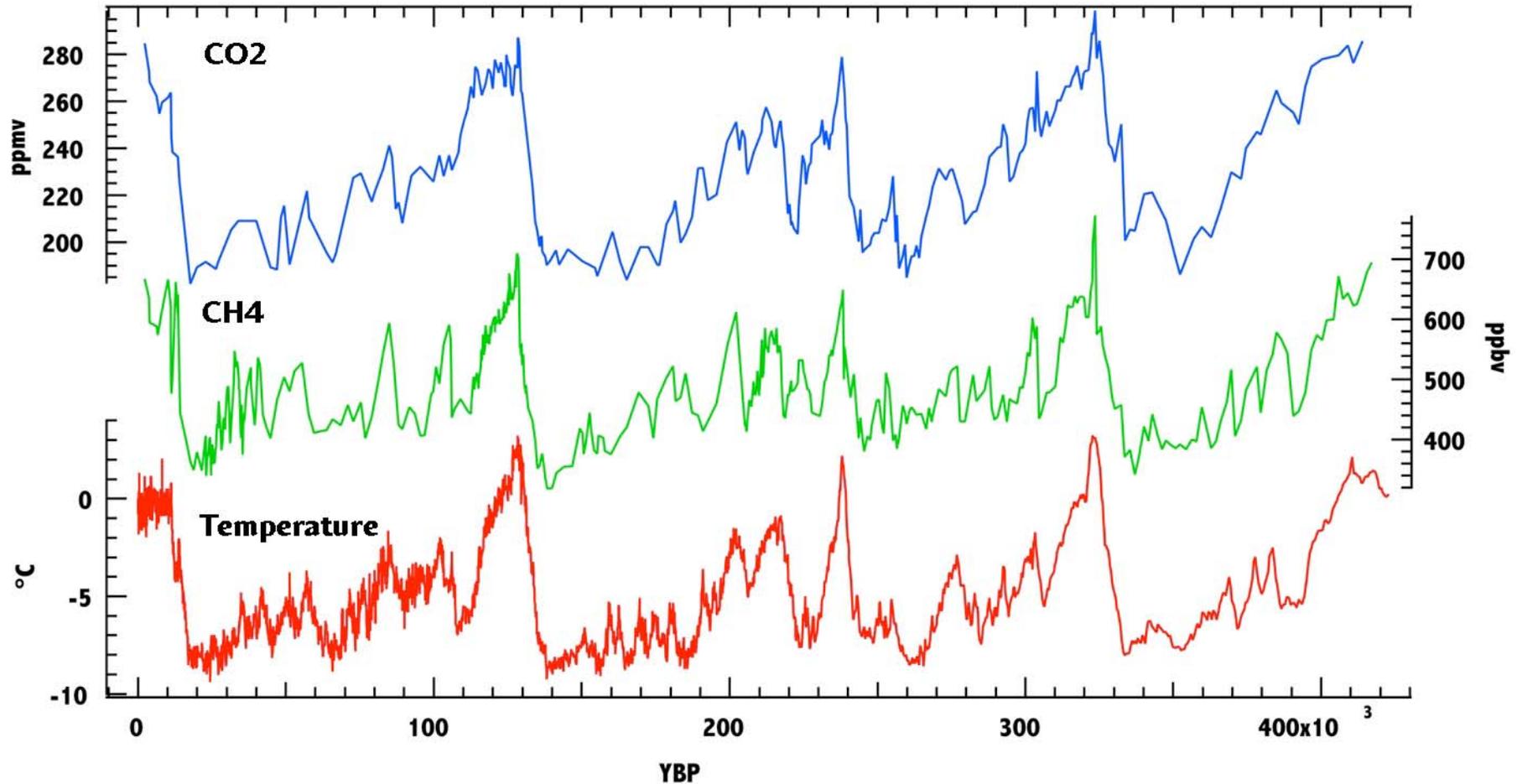
Kiehl et al., 1997



Absorption par les gaz à effet de serre

Indices historiques

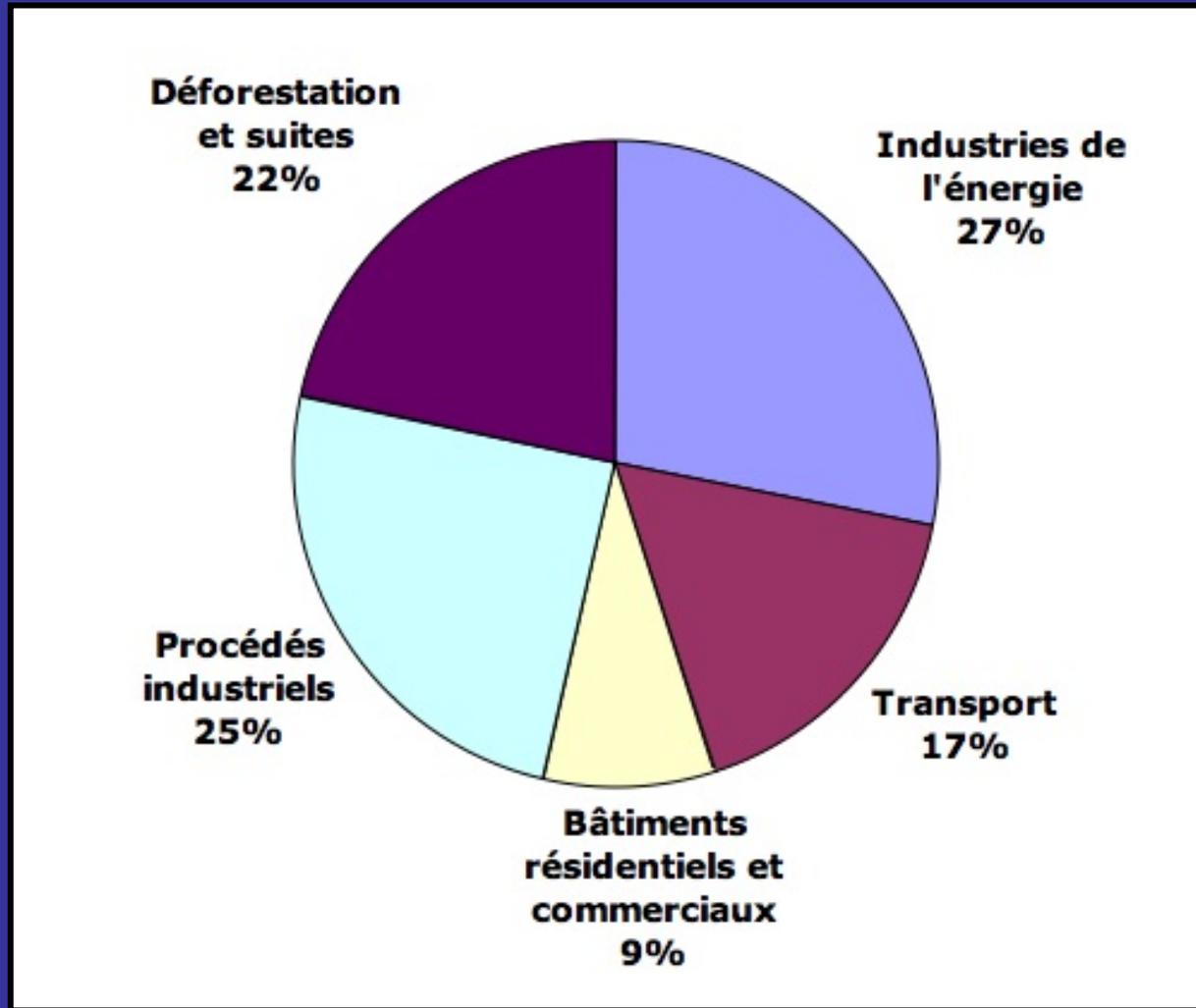
Petit et al., 1999



Variations **conjointes** [CO₂] et T° C

Emissions de CO₂ : répartition mondiale

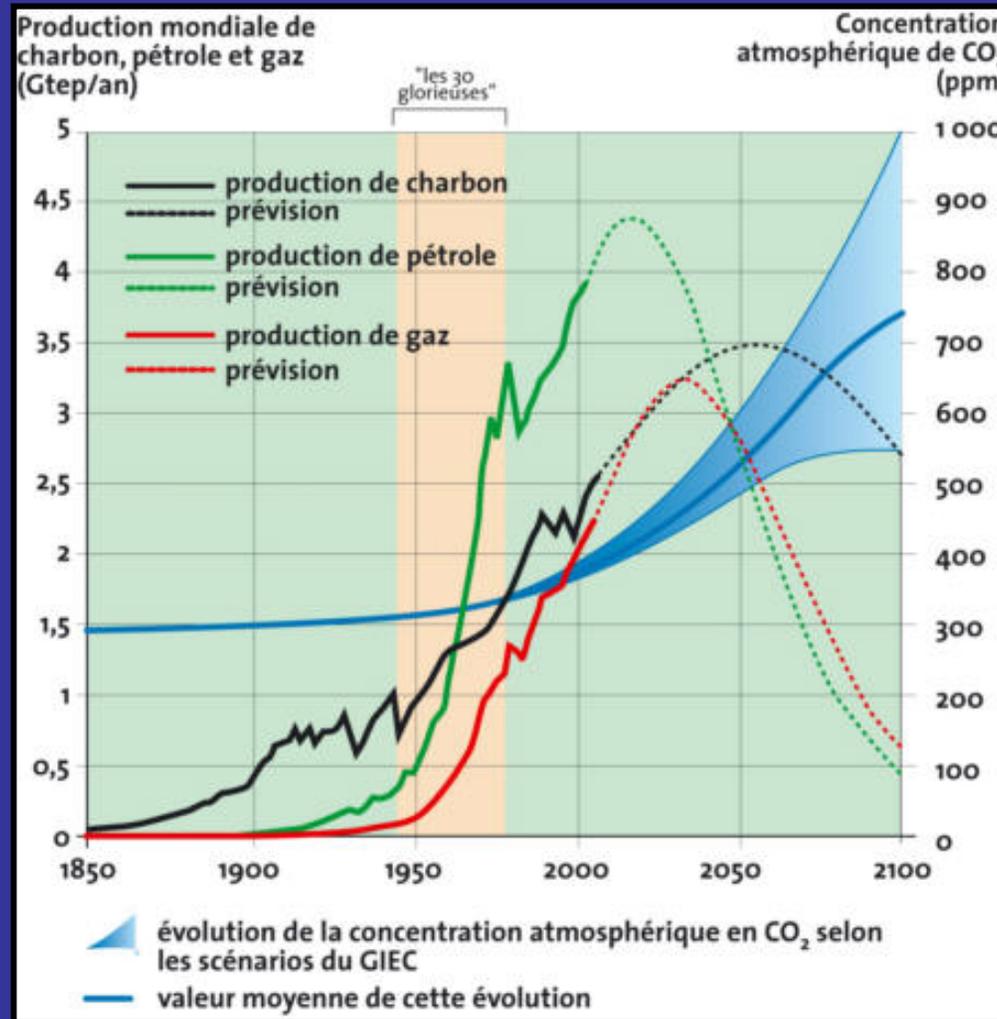
Jancovici, données 2004



Sources capturables = **50%** des émissions

Emissions de CO₂ : perspectives

IEA, 2004



Le mixte énergétique passera par le recours aux **énergies fossiles**



WORLD
COAL DEPOSITS

www.mapsofworld.com

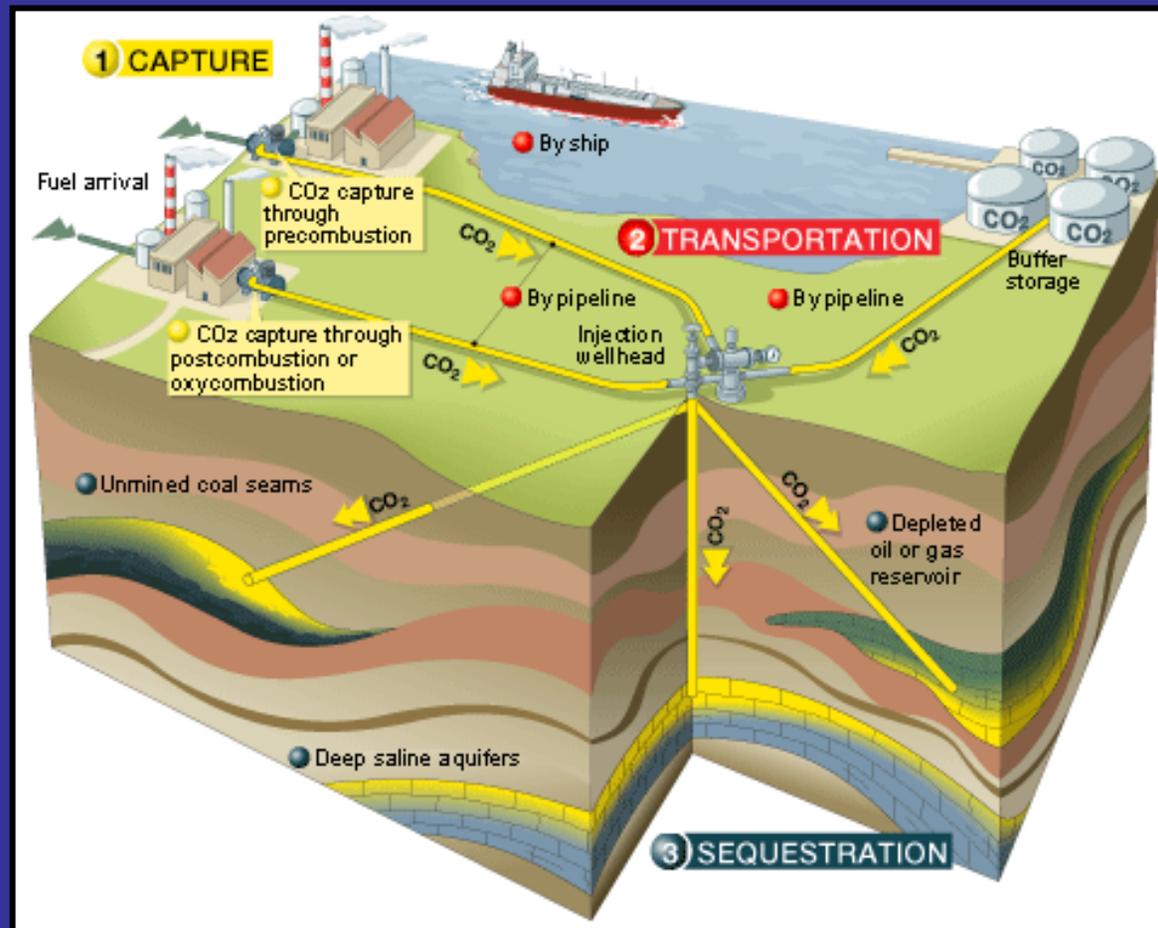
Map not to Scale

Copyright © 2006 Compare Infobase Limited

www.mapsofworld.com



De la capture à la séquestration

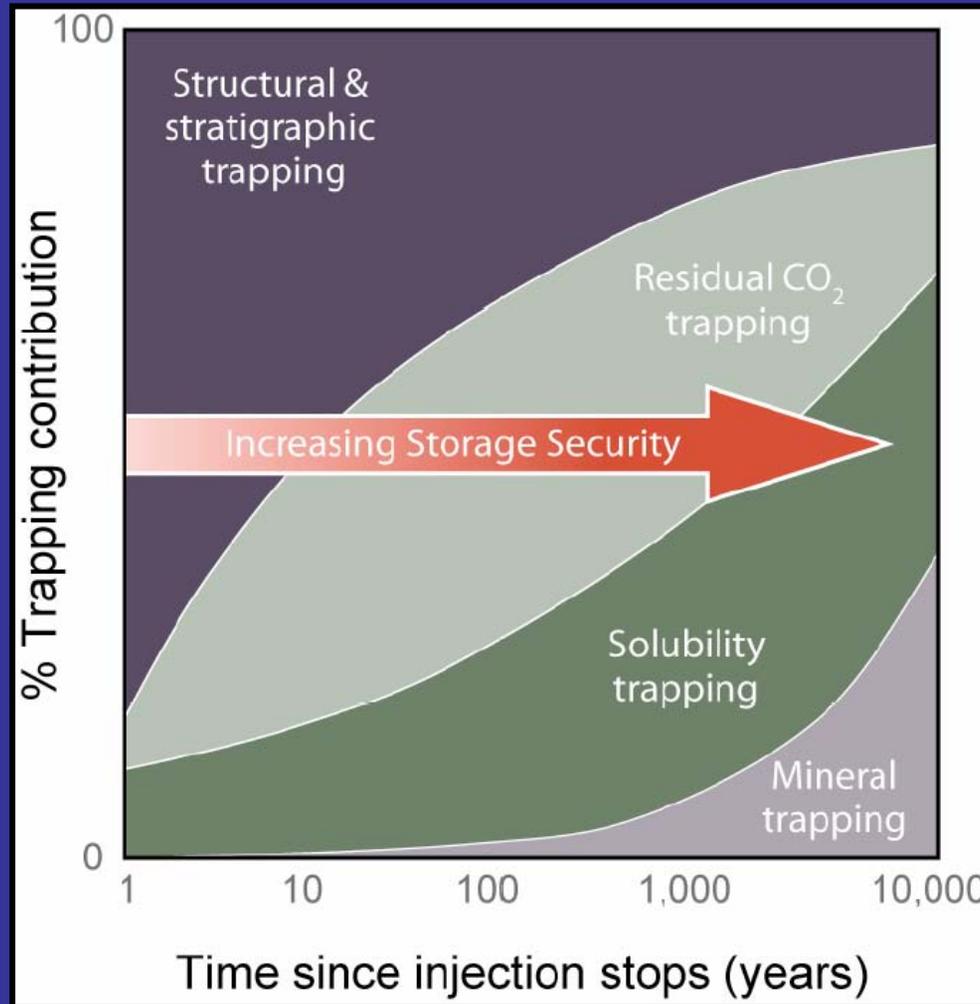


Total

Emissions mondiales = 6 Gt(C) soit 22 Gt(CO₂)/an
CO₂ capturable = 50% des émissions mondiales
Capacités de stockage entre 2 000 et 10 000 Gt(CO₂)

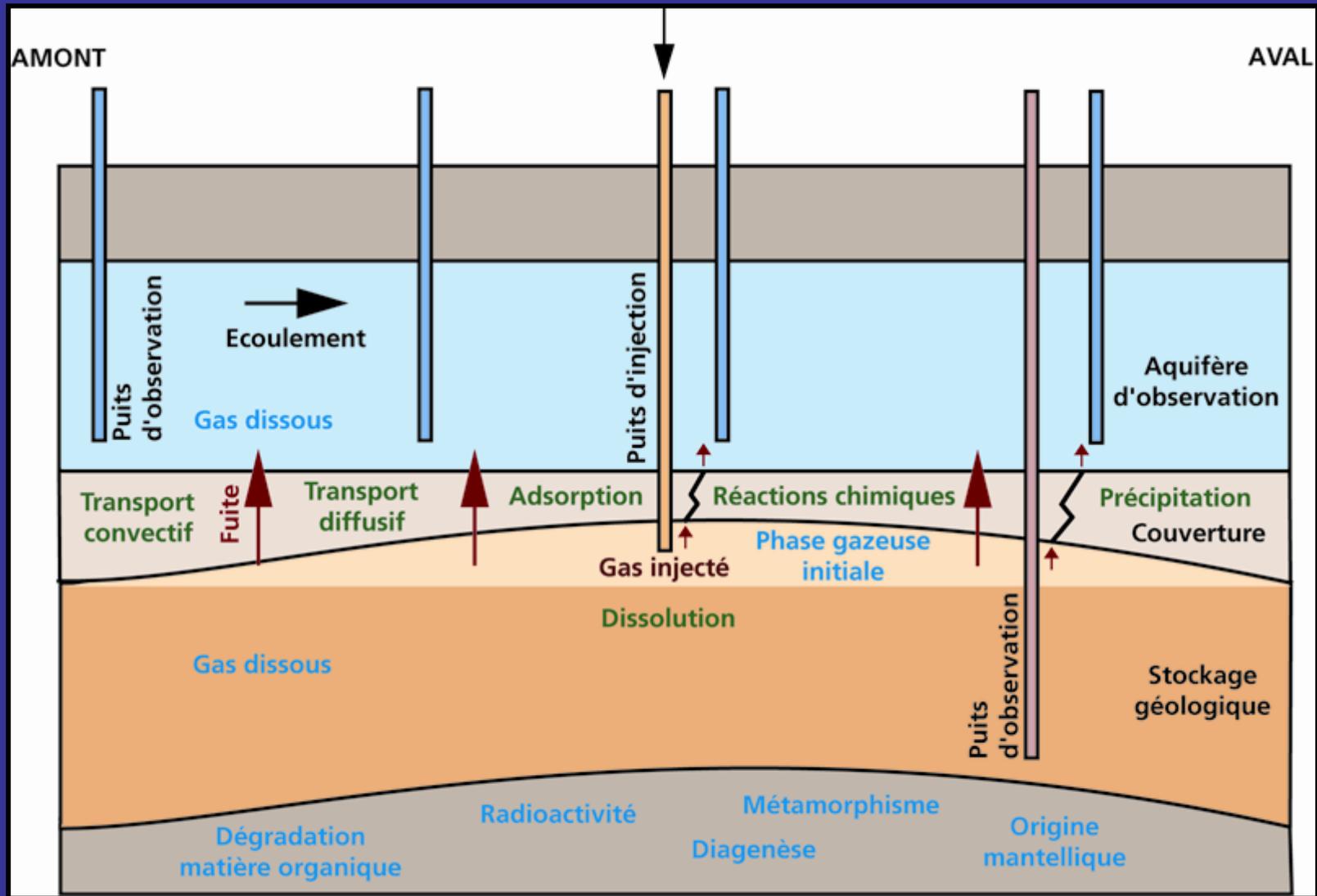
Intégrité des sites de stockage

Ennis-King
et al.



Le piégeage structural et stratigraphique est le **premier garant** du stockage

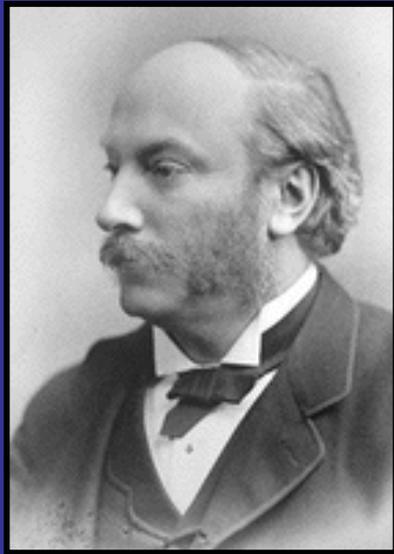
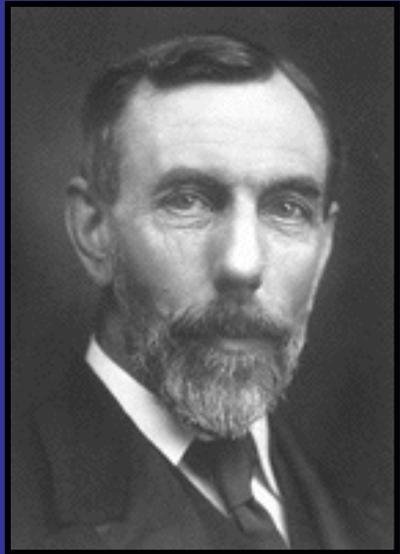
Suivi des sites de stockage



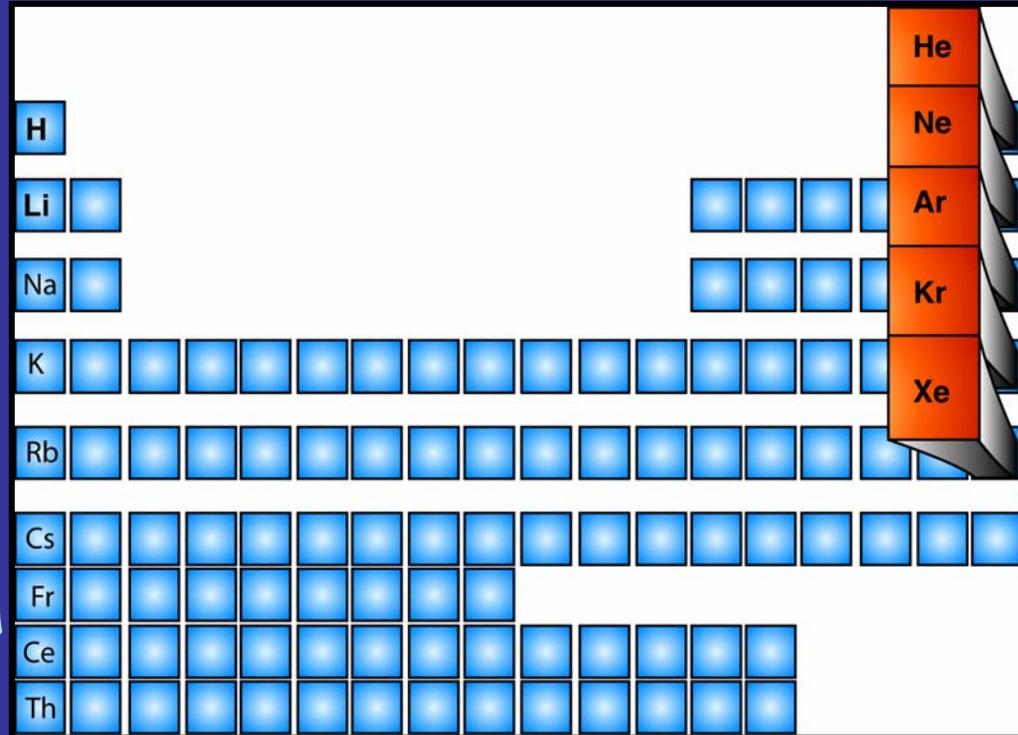
Modèle 2D d'un site de séquestration

La famille des gaz rares

Les orbitales atomiques sont saturées

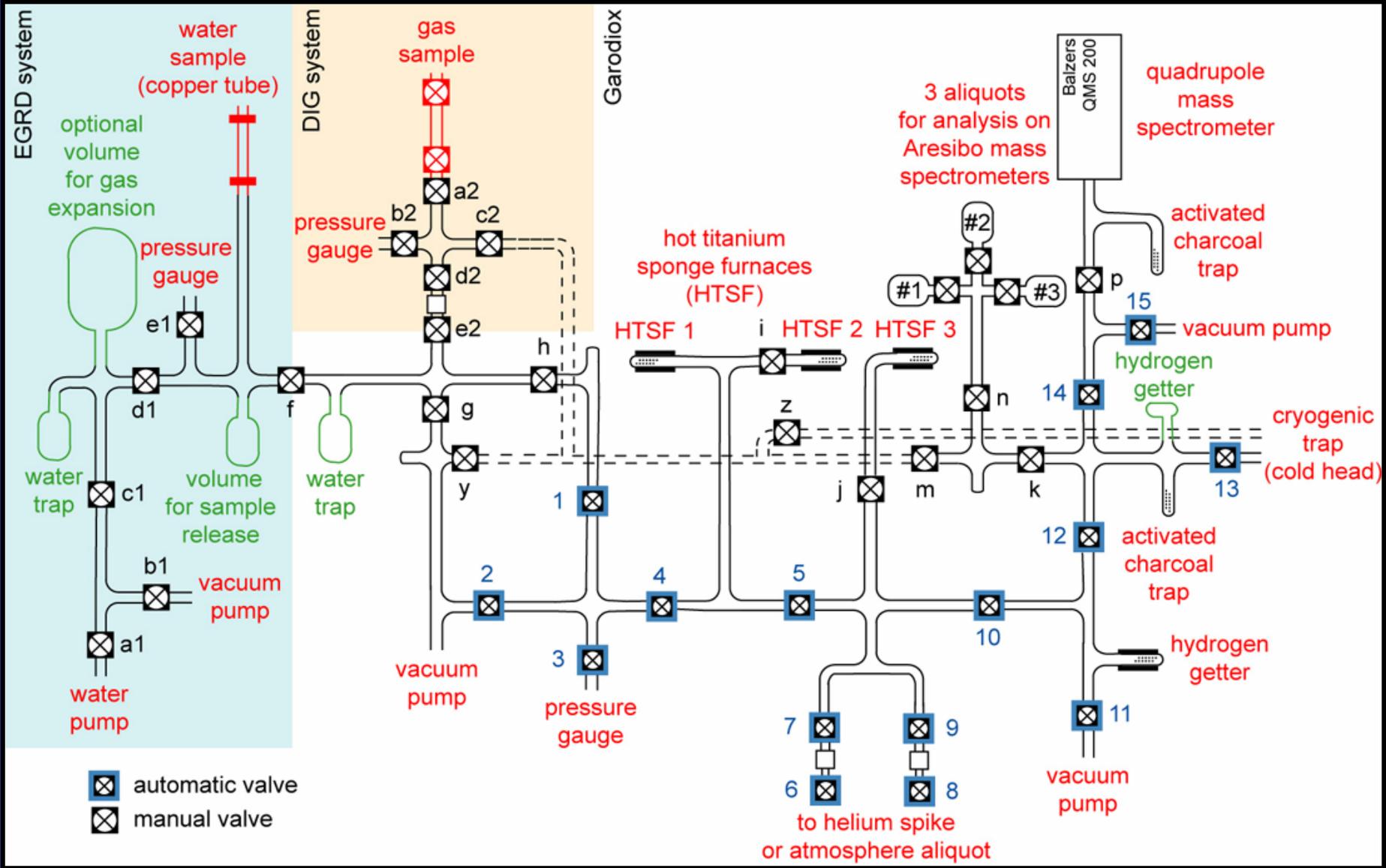


Sir Ramsay Lord Rayleigh
Prix Nobel en 1904



Globalement **inertes chimiquement**
Plusieurs isotopes pour chaque gaz rare

Ligne d'analyse Garodiox



Photographie de février 2007

une première approche au laboratoire
objectif futur de miniaturisation



Etude du lac Pavin

Lac stratifié

couche oxique / couche anoxique
apport mantellique profond (CO_2 , He)

1. Protocole d'extraction

amélioration du système Garodiox

2. Echantillonnage

mise au point d'un protocole

3. Validation scientifique

comparaison avec données historiques



Photos : D. Jézéquel

Résultats en ^4He sur le lac Pavin

Aeschbach-Hertig et al., 99

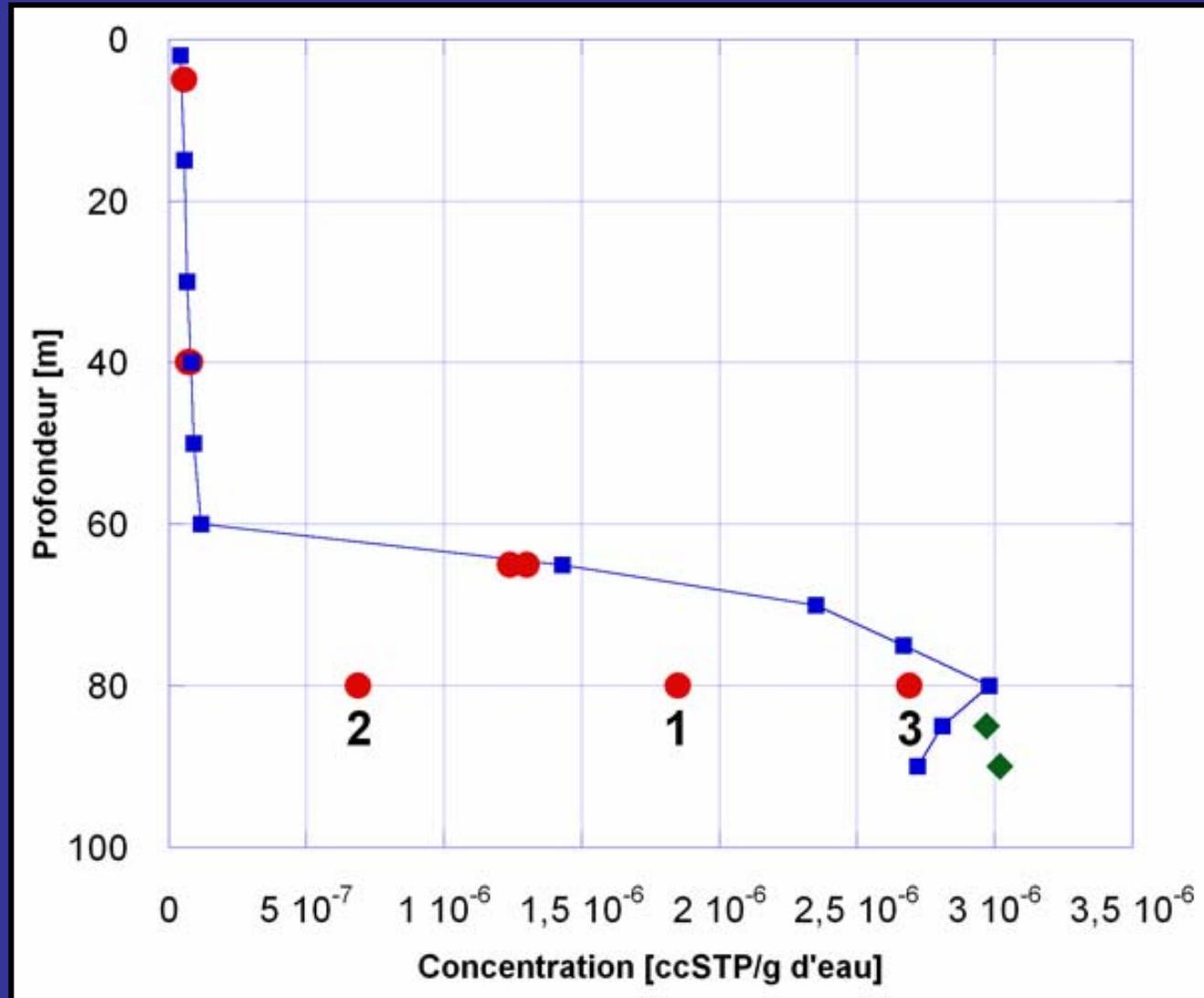
■ ETH brutes
◆ ETH corrigées

IPGP

● Garodiox

Mai 2006

« effet Perrier »



Premiers échantillons, premiers essais

Résultats en ^4He sur le lac Pavin

Aeschbach-Hertig et al., 99

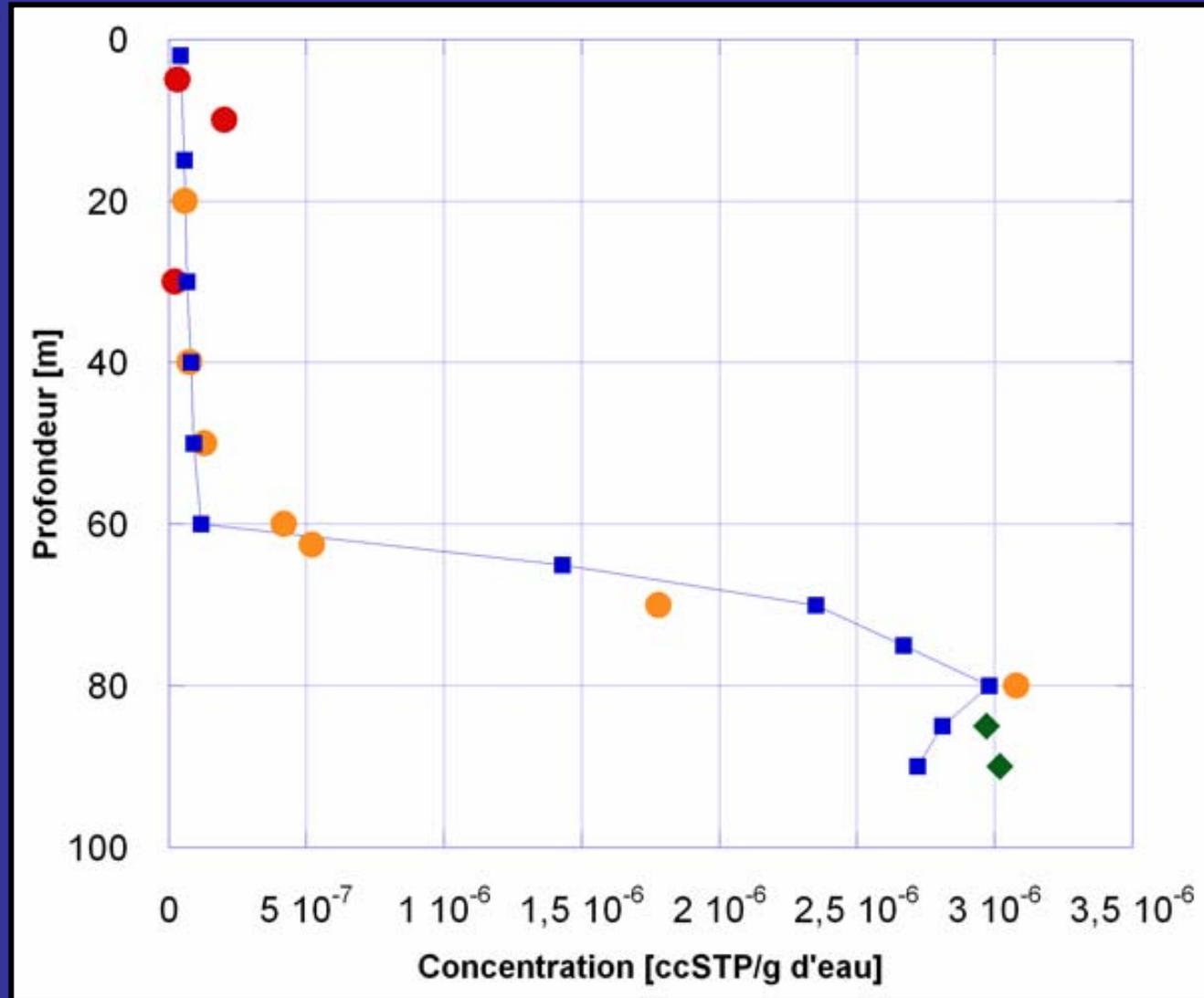
■ ETH brutes
◆ ETH corrigées

IPGP

● Garodiox

● Aresibo I

Juillet 2006



Bon accord avec les données historiques

Résultats en ^4He sur le lac Pavin

Aeschbach-Hertig et al., 99

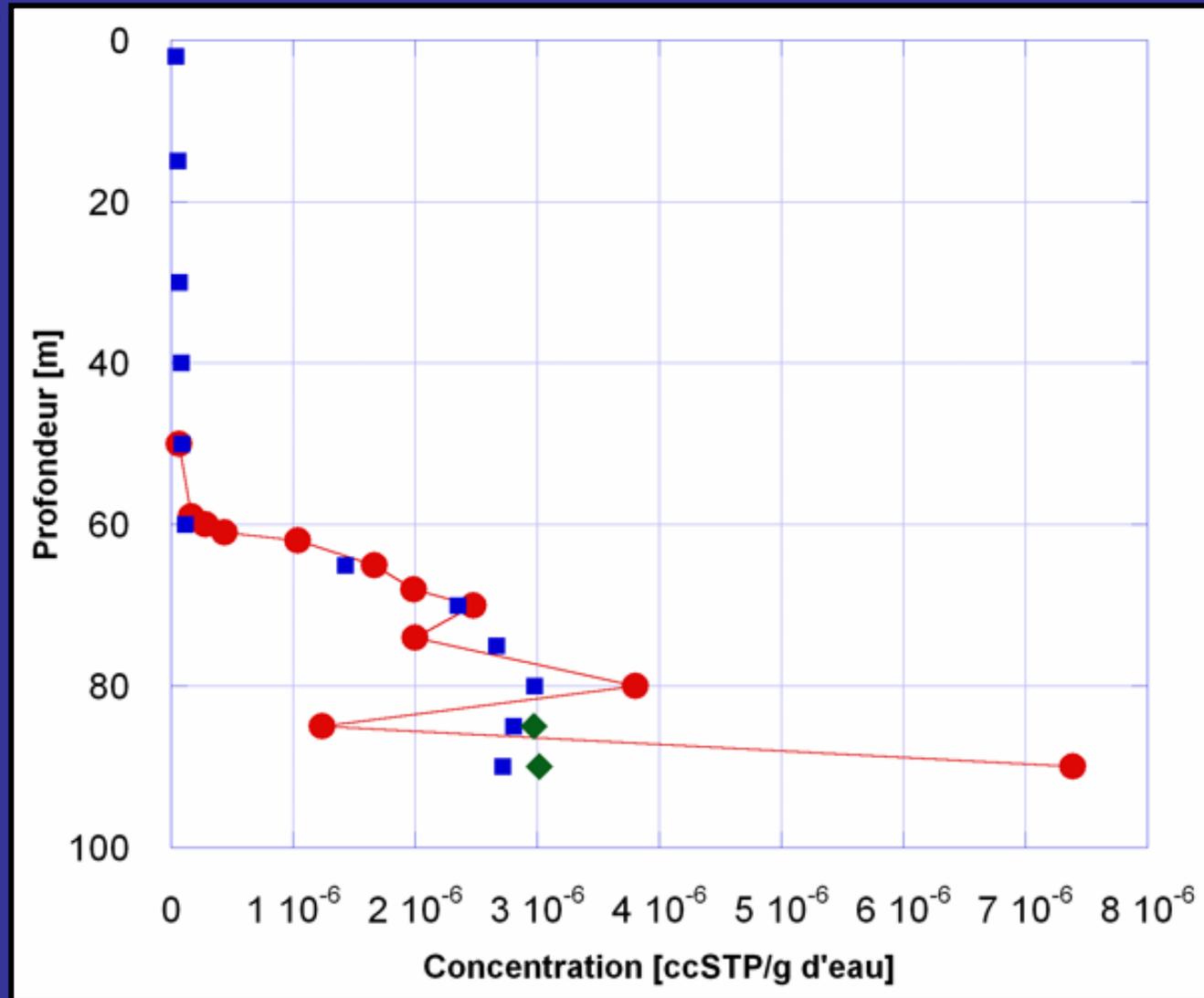
■ ETH brutes
◆ ETH corrigées

IPGP

● Garodiox

Juin 2007

« effet Perrier »



Limites de la méthode adoptée

Après deux ans...

Bilan des deux premières années

Construction d'un
outil analytique
adapté au sujet

Nouvelle ligne Garodiox

Choix d'un protocole
de prélèvement

Sur le lac Pavin

Echantillons non-sursaturés

Illustration de la
méthodologie de
surveillance

Etude d'un site analogue

Démonstration
faisabilité et intérêt

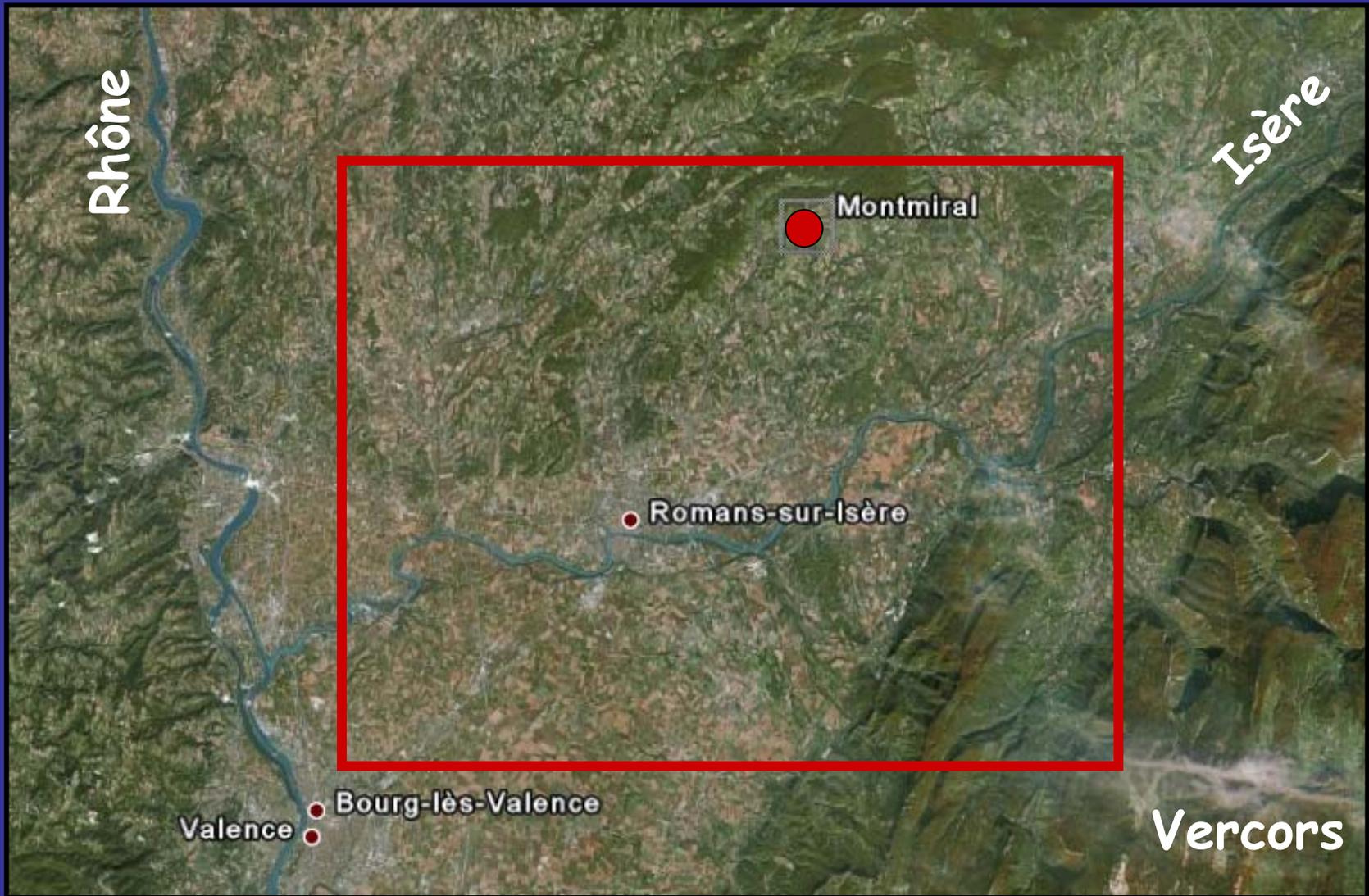
Première approche conjointe
sur le terrain et au labo



Etude d'une accumulation naturelle

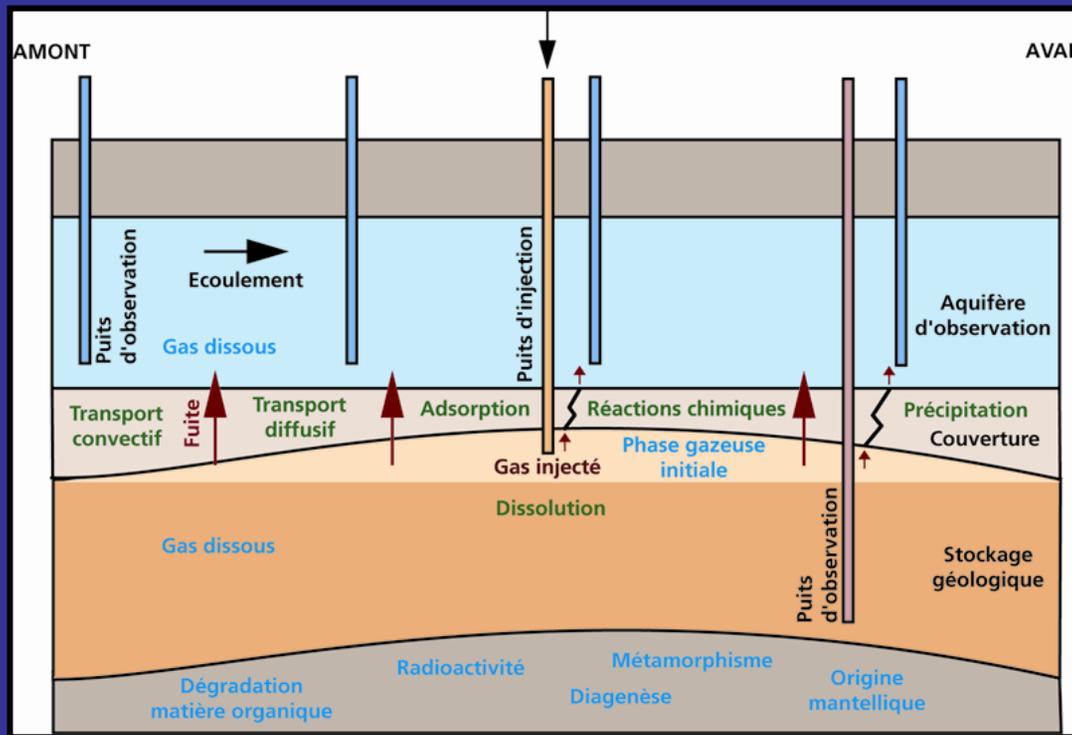
Contrôle de l'intégrité du réservoir de Montmiral

CNES, Spot Image



Principe de l'étude menée

Travail sur un **contexte analogue** aux sites de séquestration géologique



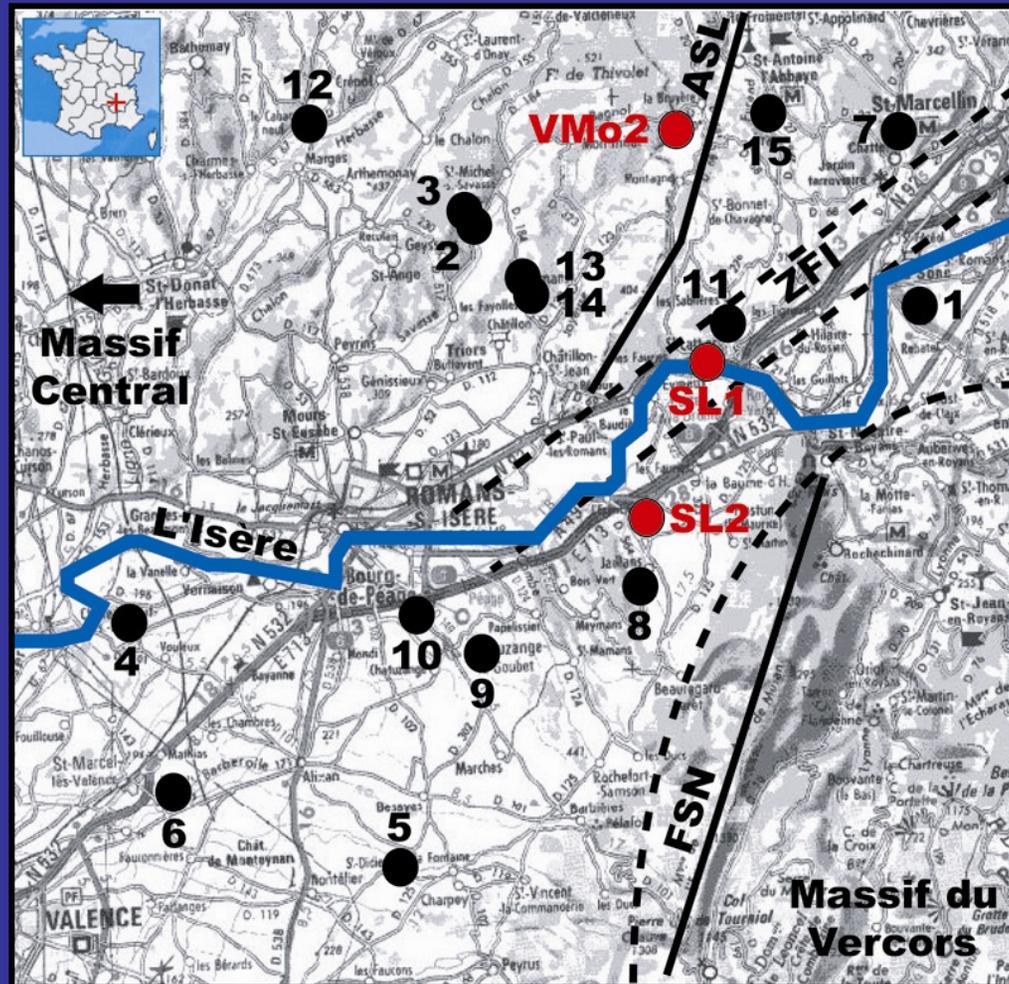
~ 100 m

~ 2 500 m

Accumulation naturelle = Stockage

Nappes d'eau de surface = Surveillance

Points d'échantillonnage



1 forage pétrolier (VMo2)
15 puits du réseau AEP ou d'irrigation

Caractérisation du gaz

Données issues de la littérature

$$\delta^{13}\text{C PDB} = -3,2 \text{ ‰}$$

Blavoux et al., 1990

Données obtenues sur la ligne Garodiox

$${}^4\text{He} = 301 \pm 29 \text{ ppmv (air : } \sim 5 \text{ ppmv)}$$

en accord avec Pauwels et al., 2007

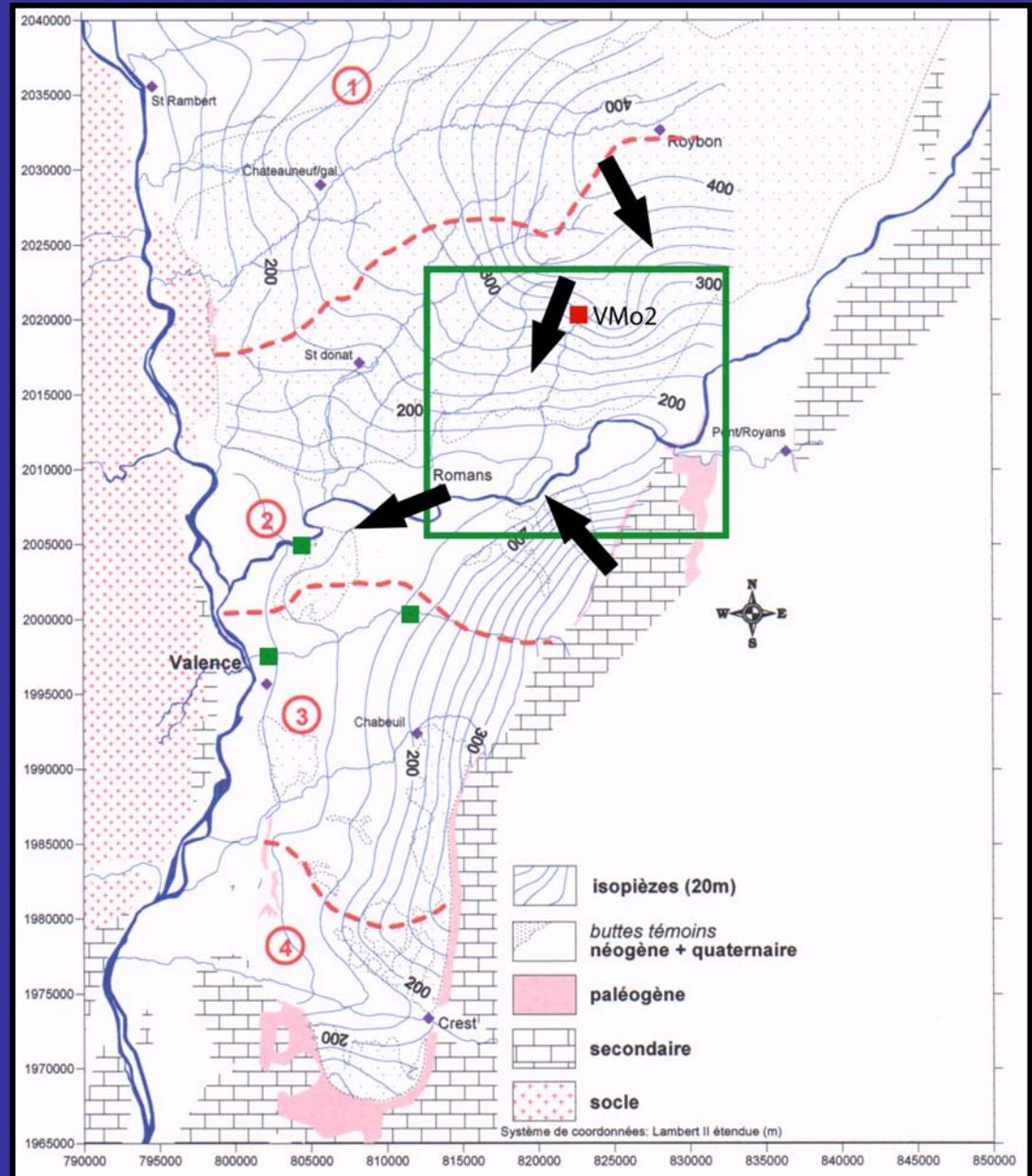
$${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne} = 364 \pm 48 \text{ (air : 0,32)}$$

$${}^4\text{He}/{}^{22}\text{Ne} = 3259 \pm 537 \text{ (air : 3,12)}$$

Contexte hydrogéologique

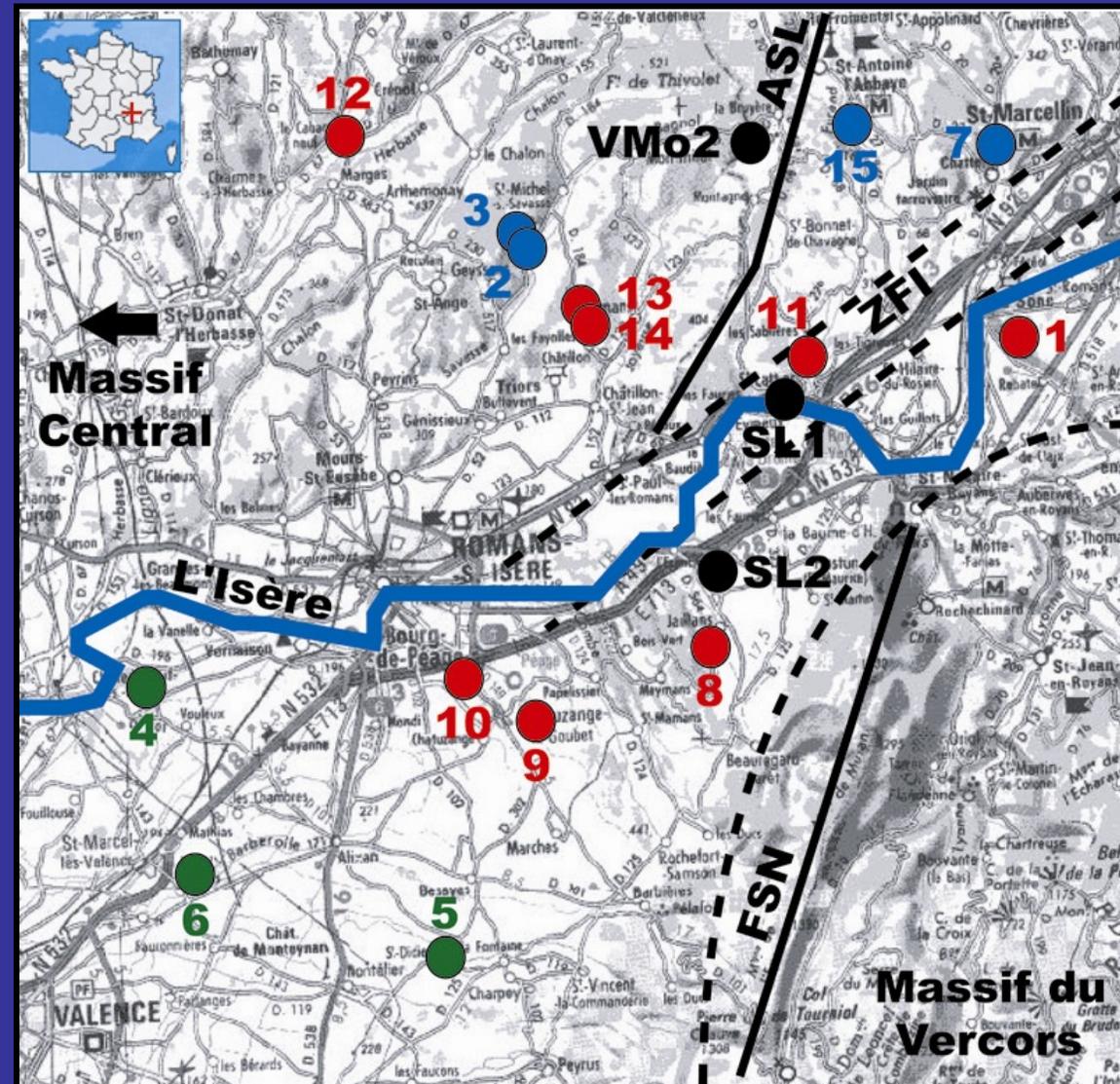
Carte
piézométrique
donnant les directions
d'écoulement des nappes

de La Vaissière,
2006



Nature des échantillons d'eau

3 domaines hydrogéologiques distincts

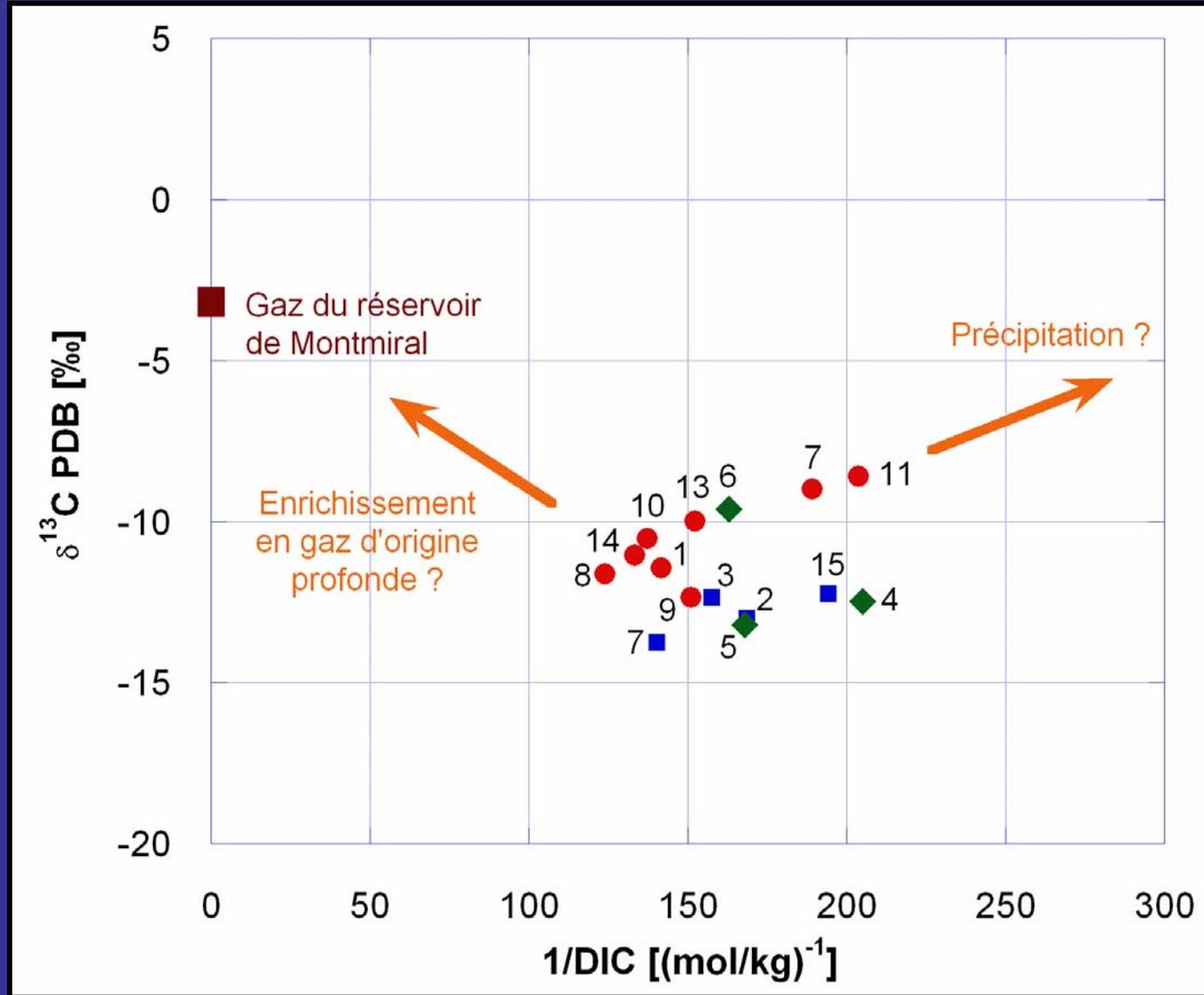


- Eaux superficielles
- Eaux profondes
- Eaux lointaines

Synthèse des données :
côtes NGF de prélèvement
hauteur des crépines
sens des écoulements
âges ^3H et ^{14}C

Apport en carbone profond ?

- Eaux :
- superficielles
 - profondes
 - ◆ lointaines
- Carbone Inorganique Dissous (DIC)



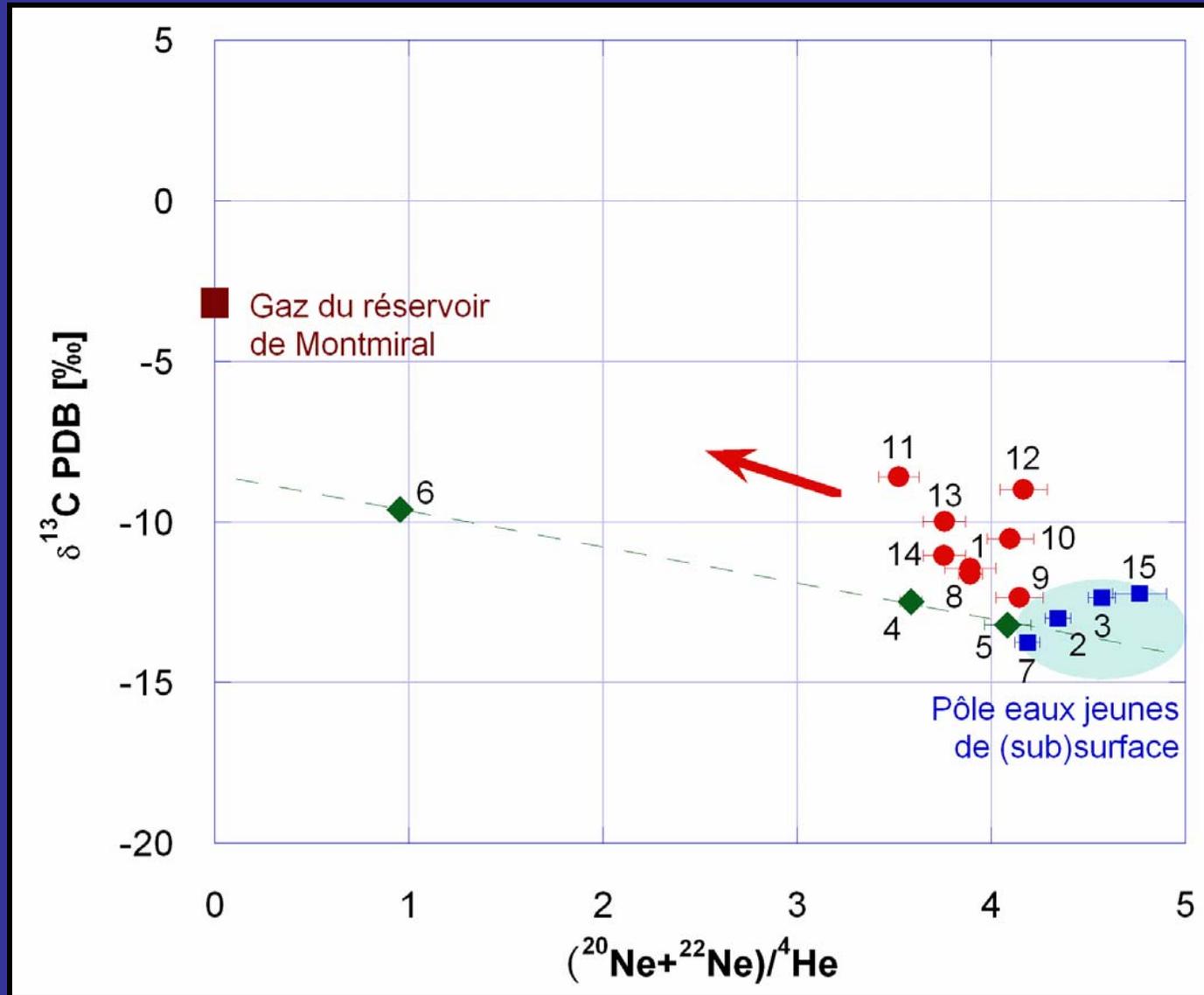
Superposition chimie et physique

Apport en hélium profond ?

Eaux :

- superficielles
- profondes
- ◆ lointaines

Données en gaz rares obtenues sur la ligne Garodiox

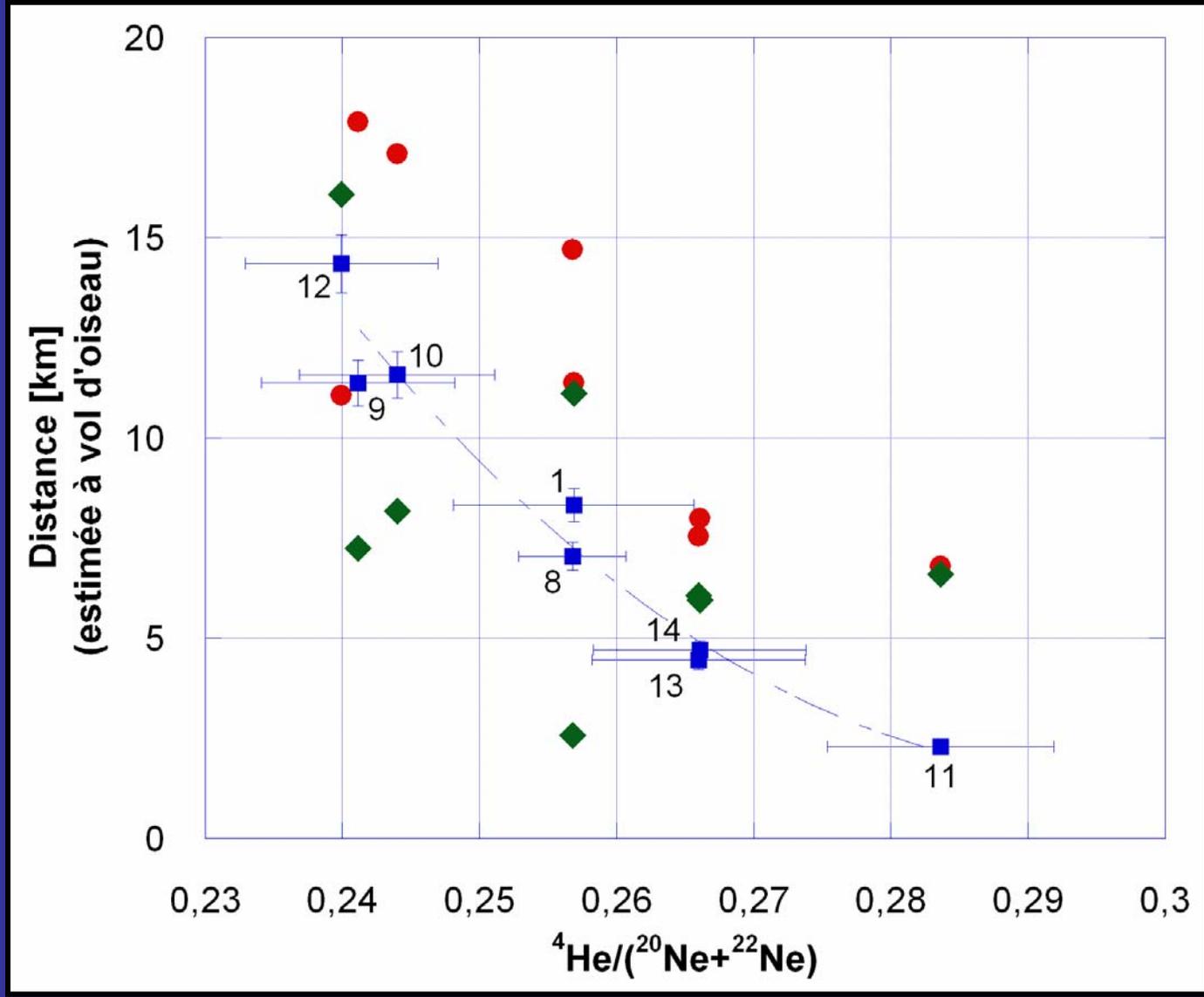


Discrimination chimie et physique

Traçage de l'origine de l'apport

- Distances :
- forage VMo2
 - forage SL1
 - ◆ forage SL2

Un tel traçage n'est pas possible avec les données en Carbone



Le forage SL1 est l'origine de l'apport

Fuite au travers d'un forage

Forages SL1 et
SL2 abandonnés
vers 1960

Bouchons de ciment

SL1 : entre 40 et 90 m

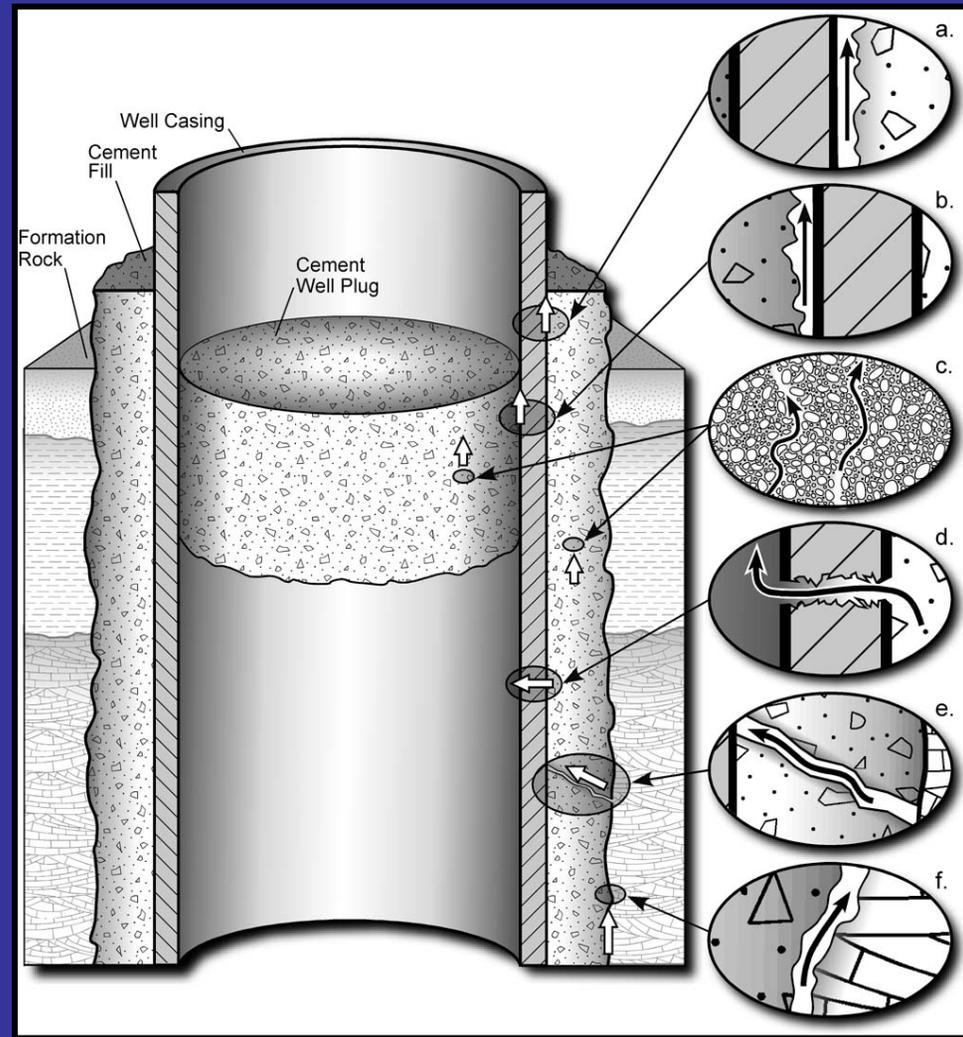
SL2 : à 300 et 1 800 m

Réservoir d'origine
de la fuite ?

2 indices de gaz pour SL1

N_2 + 1% Ar à 2 400 m

CO_2 à 2 600 m



Alberta Env.

Conclusions

Les gaz rares peuvent-ils permettre de surveiller les sites de séquestration géologique de CO_2 ?

Démonstration de la faisabilité technique

au laboratoire :

construction d'une ligne adaptée et accessible

sur le terrain :

définition d'un protocole de prélèvement et d'une méthode

Démonstration de l'intérêt scientifique

illustration d'une méthodologie de surveillance géochimique qui pourrait être approfondie avec des données isotopiques

Est-ce envisageable ?

Coût(s)

€/t de CO₂ évitée
40 €/t < estimation < 60 €/t
20 €/t < souhaitée < 30 €/t

Capture : 30 à 60 €/t (500 MW)
Transport : 2 à 7 €/t (terrestre)
Stockage seul : 2 à 20 €/t
Suivi et surveillance : ? €/t

Source : Gaz de France, 2006

Origines des gaz rares injectés

1- Le gaz injecté contient des gaz rares

Cas du site pilote de Weyburn ? - Manque de connaissances approfondies

2- Le gaz injecté est contaminé par de l'air atmosphérique

He : 5 ppmv - Ne : 18 ppmv - Ar : ~1% - Kr : 1,1 ppmv - Xe : 0,1 ppmv (air sec)

3- Le gaz injecté est « dopé » (spike)

Avantage : maîtrise isotopique - Inconvénient : prix ?

B.A.-BA de la surveillance

Présence de puits d'observation

dans le réservoir et les formations voisines
pour permettre la collecte régulière d'échantillons

Connaissance géochimique du site

caractérisation pour pouvoir contraindre géochimiquement
= état zéro + caractérisation du gaz injecté

Reconnaissance des zones de faiblesses

relier géochimie, géophysique et recherches historiques
pour repérer les faiblesses géologiques potentielles
et les éventuels puits abandonnés et oubliés



photographie trouvée sur Internet



photographie trouvée sur Internet

Remerciements

Fabien Guillon, Jean-Louis Militon

Stéphane Moulin, André Lecomte, Yves Gamblin, Aude Raquin, Antonio Viera
et toute l'équipe de Géochimie et Cosmochimie de l'IPGP

Pour le travail sur le lac Pavin :

Didier Jézéquel, ainsi que tous les participants au projet d'étude du lac Pavin

Pour le travail sur l'accumulation naturelle de Montmiral :

Anne Battani, IFP et par ordre de rencontre sur le terrain :

M. Cousin, MM. Griot et Mallard

MM. Gelly et Vuillod, Mairie de Saint-Romans

M. Berne, ferme de Rivoiron

M. Guiral, Syndicat des Eaux (SE) de la Plaine de Valence

M. Brunel, SAUR Saint-Marcellin

M^{me} Nury et M. Escoffier, SE de Rochefort-Samson

M. le Maire, MM. Chabert et Revol, Mairie de Saint-Lattier

M. Bonnet, SE de l'Herbasse

M. Chardon, Mairie de Saint-Antoine-L'Abbaye

Ce travail de doctorat a bénéficié d'un financement Electricité de France (EDF)

Avec le soutien financier :

du Programme de Recherches IPGP - Total - Schlumberger sur le stockage géologique du CO₂

de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)

de l'Agence Nationale pour la Recherche (Projet ANR Metanox)

Ces travaux ont été primés par l'ADEME, dans le cadre du prix des Techniques Innovantes
pour l'Environnement 2007.

www.ipgp.jussieu.fr/~lafortun/these