



Les risques liés au stockage géologique du CO₂ en aquifère salin profond

Régis Farret, chef de projet





Le contexte :

1. La filière captage–transport– injection– stockage
2. Les travaux de recherche de l'INERIS

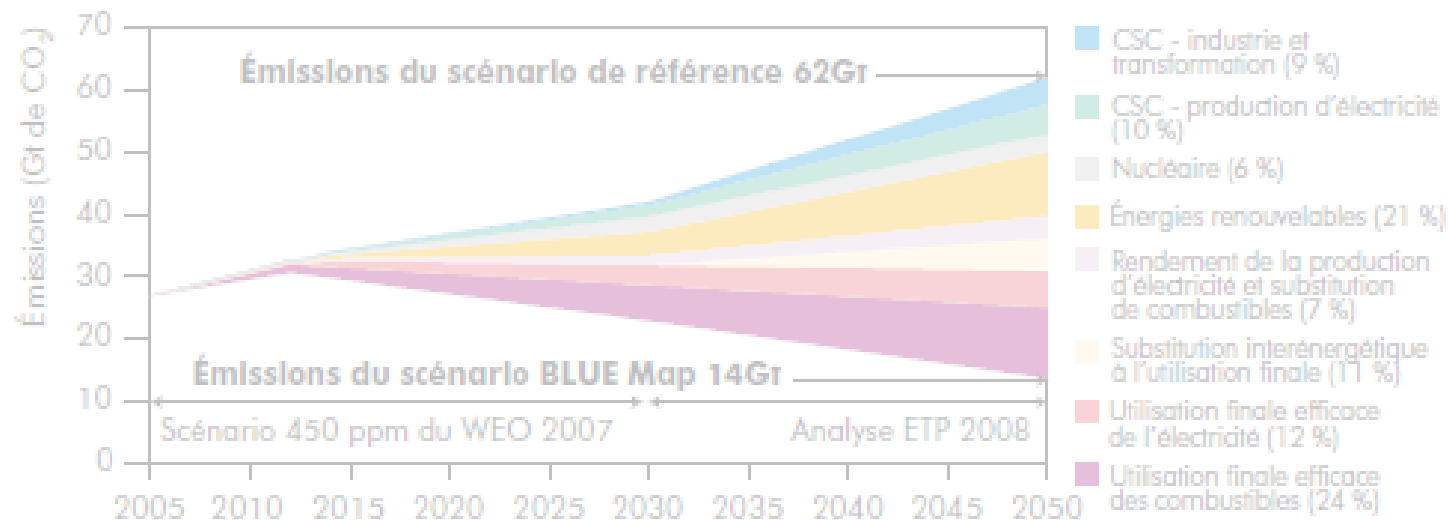
L'analyse des risques :

1. Les scénarios
2. Le terme source
3. Les transferts
4. Les impacts sanitaires

Les recommandations

Les stratégies de réduction des émissions de CO₂

Objectif -50% en 2050



Scénarios de référence et scénario « blue map », Source IEA , 2008

Quantités à stocker :

9 Gt/an en 2050,
soit 1000 à 3000 sites de 3 à 9 Mt/an,
Cumul sur 40 ans : 200 Gt

*Capacités de stockage : 2000 Gt ? - GIEC, 2006
(en France : 26 Gt dans le bassin parisien,
soit assez + de 30 ans ? -projets METSTOR, SOCECO2)*

Quantités à stocker pour une centrale de

500 MW: 3 Mt/an, ou 100 kg/s
Cumul sur 40 ans : 120 Mt, soit environ
150 Mm³,
soit 100m x 3 km x 5 km (porosité 10%)

Le système : Une « chaîne » de 4 maillons

CAPTAGE :

- Production oxygène / solvants
- Combustion
- Récupération CO2
- Compression

TRANSPORT :

- Canalisation ou bateau
- Pompage
- Stockage intermédiaire

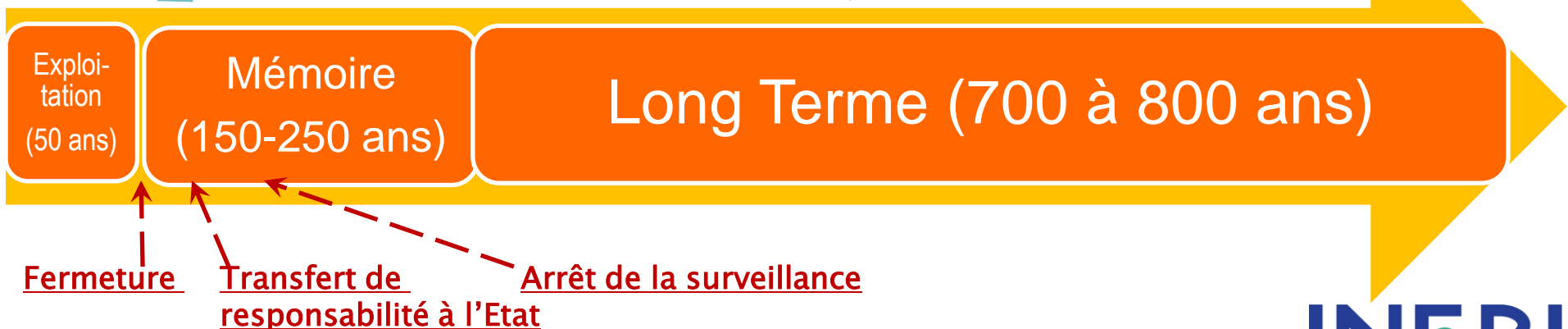
INJECTION :

- Tête d'injection
- Puits d'injection: tubage, ciment
- Zone proche-puits¹
- Utilités

STOCKAGE :

- Pied de puits
- Roche-hôte
- Substratum
- Couverture directe
- Recouvrements
- Autres puits
- Failles éventuelles

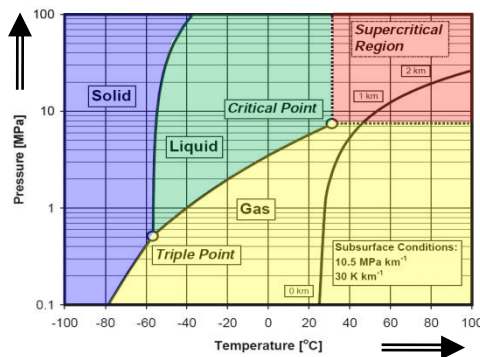
et 3 phases temporelles



Propriétés du CO₂

• Propriétés de base :

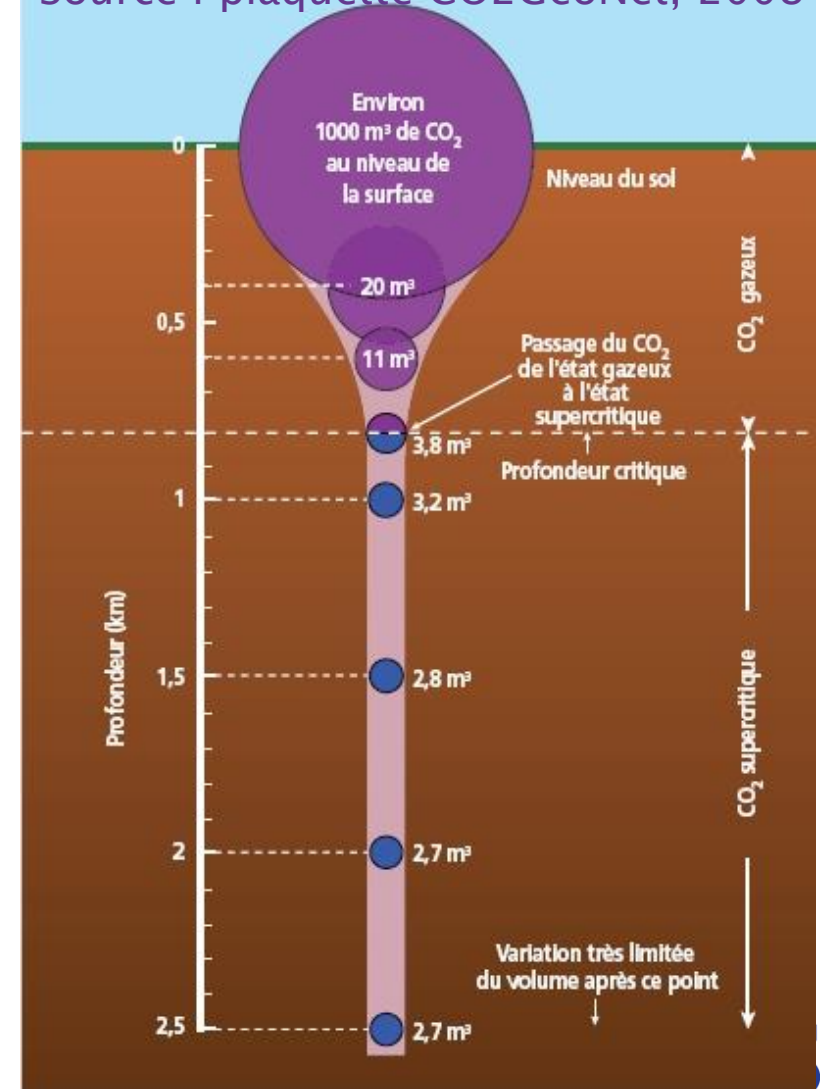
- ✓ **Gaz toxique** : effets létaux vers 10%
(IDLH = 40000 ppm = 4%)
- ✓ **Conc° atmosphérique** : 390 ppm (0.039 %)



• CO₂ supercritique :

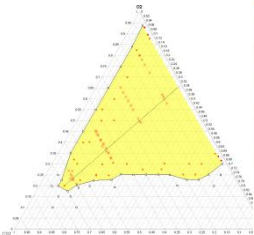
- ✓ au-delà du « point critique » : T=31°C, P=74 bar
- ✓ faible viscosité d'un gaz
- ✓ densité d'un liquide, c'est-à-dire volume très réduit

Source : plaquette CO2GeoNet, 2008

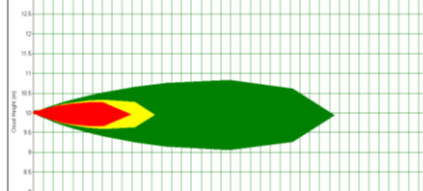


L'action de l'INERIS à travers différents programmes

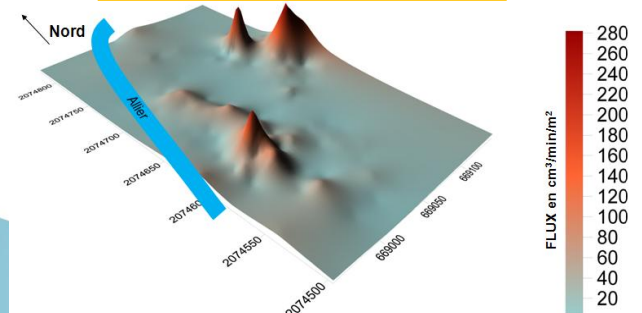
Sécurité du procédé : Ex. de domaine d'inflammabilité d'un mélange



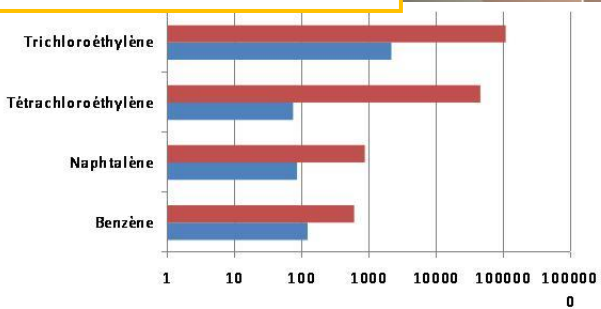
Sécurité du transport : Ex. de modélisation de la dispersion d'un nuage de gaz



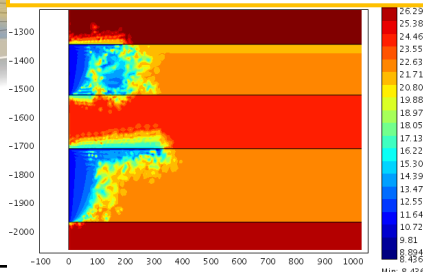
Surveillance des sites : Ex. de résultats de mesure de gaz en surface



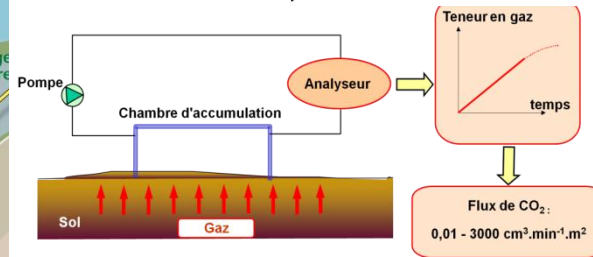
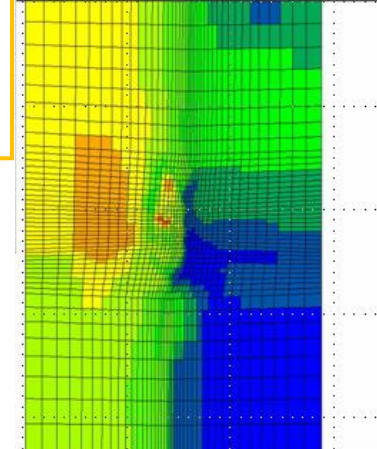
Etude des impacts sanitaires et environnementaux : Ex. de modélisation des seuils critiques pour les impuretés.



Etude du comportement souterrain : ex. de modélisation des transferts de fluides et des contraintes mécaniques



pressions hydrauliques imposées à M pour la couche A



EVARISTE, programme de recherche de l'INERIS : Comment évaluer les aléas et les risques de l'injection de CO₂ en aquifère profond, à court et à long terme ?

1) Mécanismes d'interaction fluide injecté / encaissant :

- perturbations attendues (notamment en aquifère) : hydrauliques, géochimiques

Etudes connexes :

- Ademe - Eureka (Gombert, 2010)
- UE - Integ-Risk (Wilday & Farret, 2010)

2) Analyse des risques à l'échelle du site de stockage :

- Scénarios en évolution normale
- Scénarios de fuite en situation altérée : faille non détectée...

3) Maîtrise des risques :

- méthodes de surveillance adaptées ?
- prévention conception : méthodes de creusement et comblement des forages ?

- Un regard critique,
- Un accompagnement à la sécurité, en amont



Le contexte :

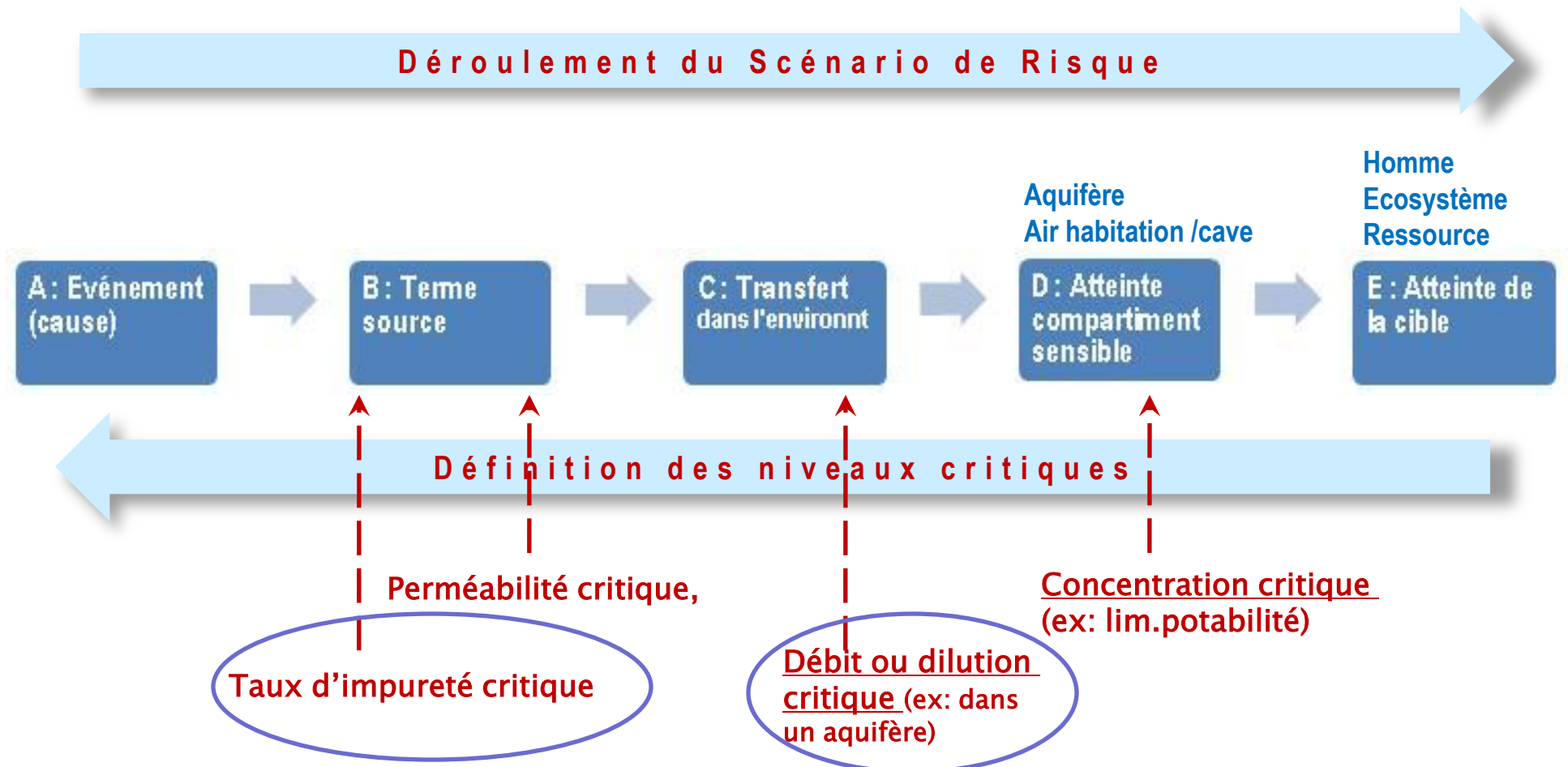
1. La filière captage–transport– injection– stockage cadre
2. Les travaux de recherche de l'INERIS

L'analyse des risques :

1. Les scénarios
2. Le terme source
3. Les transferts
4. Les impacts sanitaires

Les recommandations

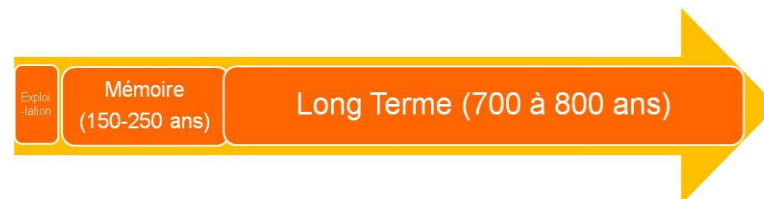
Scénario de risque & établissement de niveaux critiques



Evolution « normale » ou « altérée »

- Expérience inspirée d'autres types de stockage souterrains

- Les scénarios **d'évolution « normale »**



→ Y compris l'évolution à long terme (ex: dégradation des ciments)

→ *Appréciés par la modélisation détaillée*

- Les scénarios **d'évolution « altérée »**

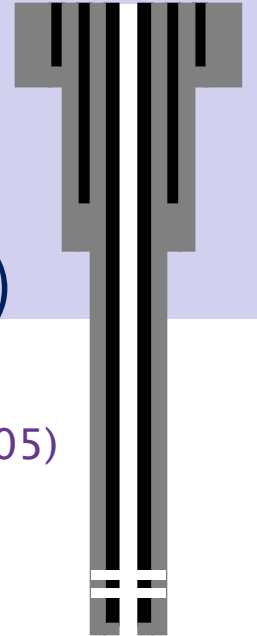
→ Une perméabilité plus grande, une dégradation plus rapide.

→ Un événement imprévu : séisme, incident en surface.

→ Un défaut : faille non détectée, cimentation défectueuse.

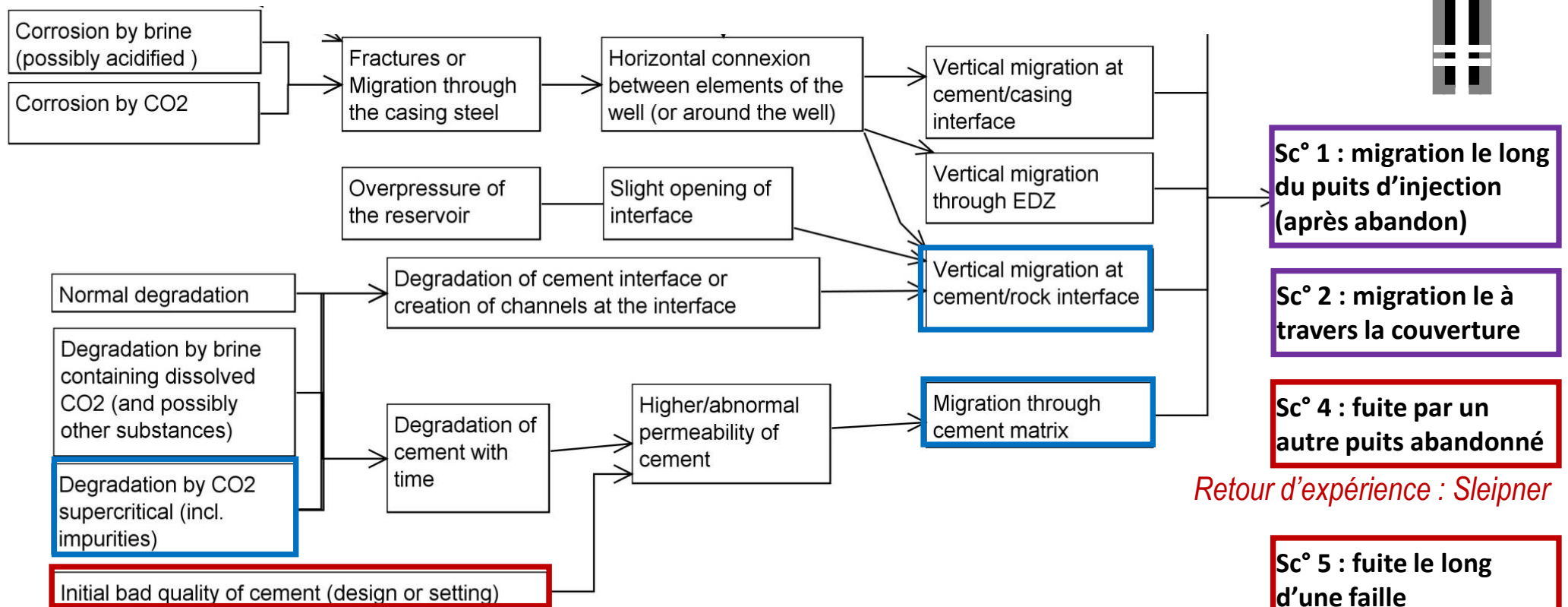
→ *Au-delà de la modélisation : étude des incertitudes, cas types*

Exemple d'exercice d'analyse de risques (méthode INERIS) : représentation des scénarios de fuite, zoom sur les différents le cas du puits d'injection (logiciel ARES)



Source : Wilday and Farret, Integ-Risk report, ErraA2-CCS (2010)

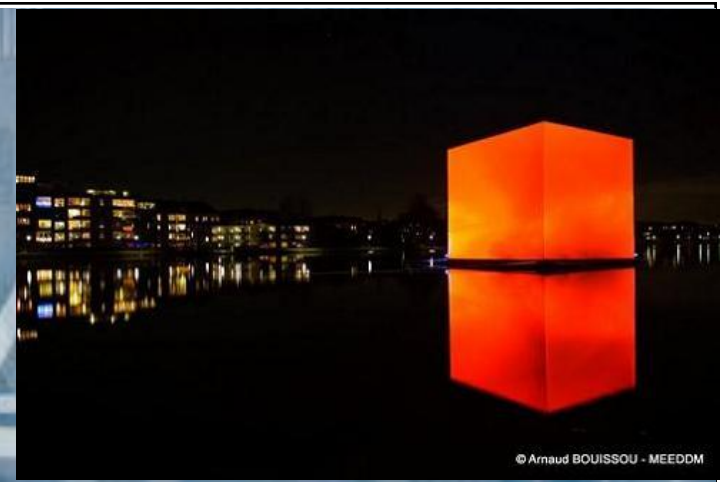
Ref. sous-jacentes : Celia et al (2004), Viswanathan et al. (2008), Benson & Cook (2005)



Retour d'expérience : Sleipner

Retour d'expérience : In Salah

En rouge : l'évolution « altérée »



© Arnaud BOUISSOU - MEEDDM

Le contexte :

1. La filière captage–transport– injection– stockage cadre
2. Les travaux de recherche de l'INERIS

L'analyse des risques :

1. Les scénarios
2. Le terme source
3. Les transferts
4. Les impacts sanitaires

Les recommandations

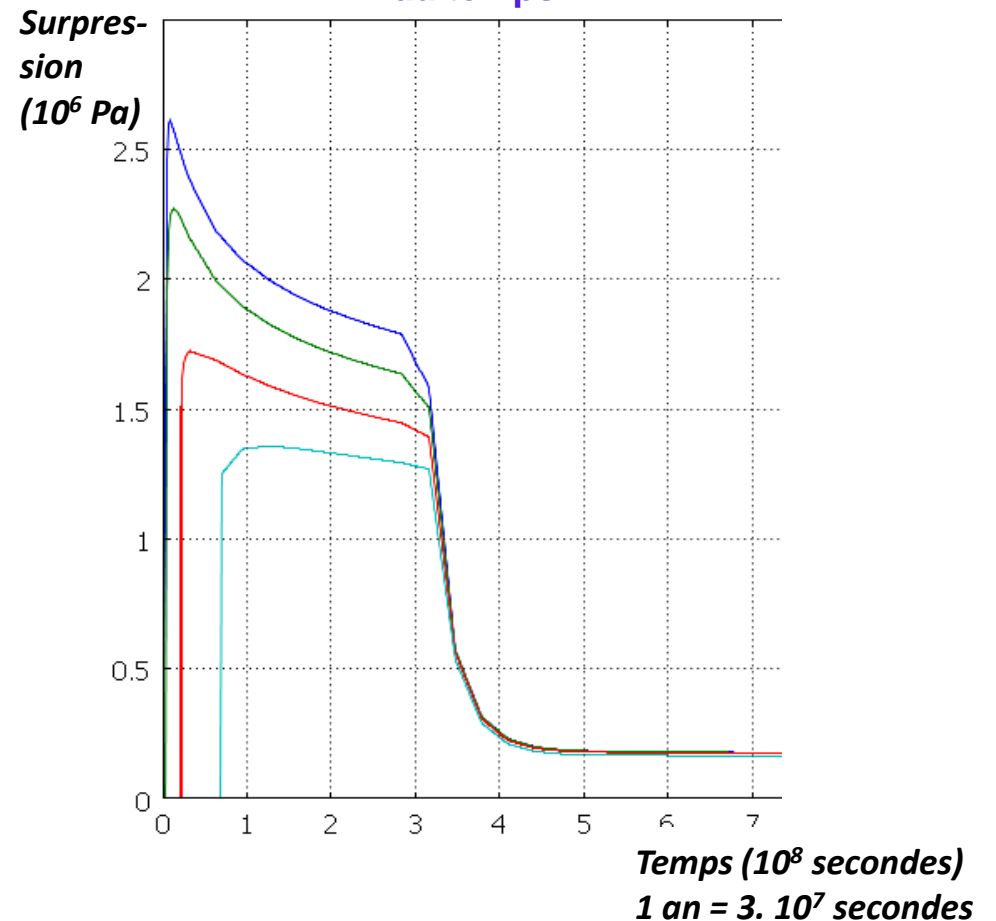
Terme source : les débits et surpressions (modélisation INERIS)

- Injection à 1500m de profondeur (réservoir du Dogger)
- Au milieu du réservoir
- Débit de 1 Mtonne de CO₂/an, soit 30 kg/s
- Durée d'injection : 50 ans

- Surpression estimée :
**de l'ordre de 1 MPa (10 bar)
au toit du réservoir**

- Dans ce qui suit :
 - Nous nous intéressons à la période d'injection et après, soit 100 ans environ
 - Nous supposons une surpression constante de 1 MPa

Evolution de la surpression de CO₂ en fonction du temps



Les 3 principaux types de « substances annexes »

Gaz injecté

CO_2 + Impuretés [*peu mesurées*]

Interaction avec la
matrice

Gaz natifs ⁽³⁾ (CH_4 , H_2S ...)

Composés présents
dans le sous-sol
(phase gazeuse ou liquide)

CO_2

+ Composés
dissous ⁽²⁾

(*Fe, Mg, Pb, U,*
terres rares,...)

[*peu étudiés*]

+ Impuretés ⁽¹⁾

(*NOx, H₂S, HAP,*
benzene, Ni, Pb...)

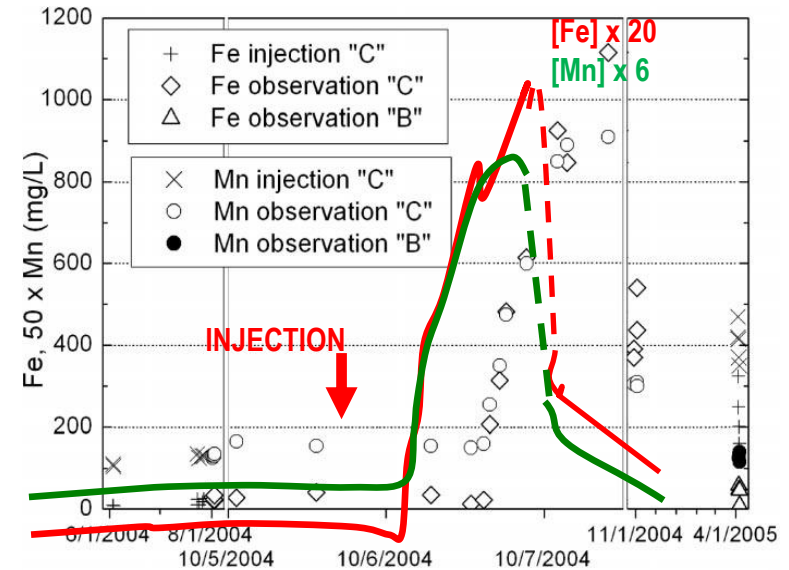
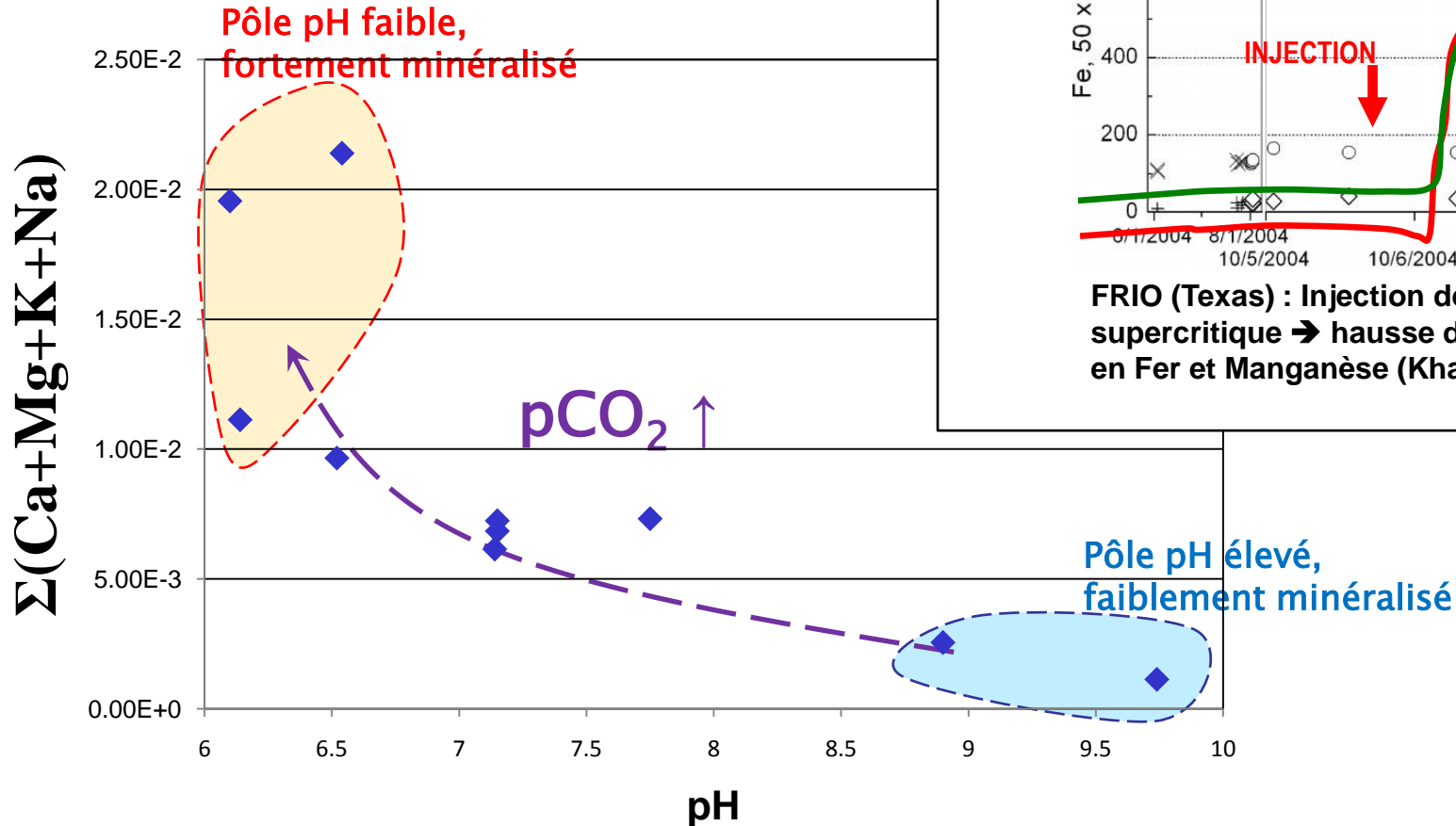
(1) Impuretés co-injectées : leurs potentiels transferts et effets sanitaires seront étudiés ci-après

(2) Composés dissous à partir de la roche : processus explicité ci-après

Le CO₂ induit une remise en solution de certains composés

On constate une corrélation entre :

- pH,
- pression en CO₂,
- teneur en minéraux et métaux



FRIO (Texas) : Injection de 1 600 t de CO₂ supercritique → hausse de la concentration en Fer et Manganèse (Kharaka et al 2009)

Ref:
Kharaka et al., 2009
Rillard (INERIS), 2010

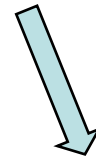
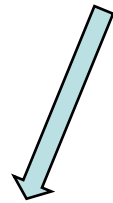
Valeurs mesurées pour les composés mis en solution

Extrait de l'étude Eureka (INERIS-Ademe : Gombert, 2010),

Catégorie	Élément	Facteur de variation	Valeur initiale dans la saumure ou dans des analogues naturels pauvres en CO ₂	Valeur dans la saumure après injection de CO ₂ ou dans des analogues naturels riches en CO ₂	Références
Physicochimie	pH	- 2,5 à -2,2	5,75 à 7,95	3,55 à 5,41	Zuddas 2009
Éléments mineurs	Fe	x 22	# 50 mg/l	# 1100 mg/l	Carpenter 1974, Kharaka et Hanor 2007, Kharaka et al. 2009
	Mn	x 8	2,75 mg/l	22 mg/l	
Éléments Trace Métalliques	Plomb	x 1000 x 1000	# 0,02 µg/l # 0,01 µg/l	# 20 µg/l # 10 µg/l	Kharaka 1987
	Aluminium	x 100 à 1000		Teneurs + 2 à 3 ordres de grandeur	Giordano 2000 Wang et Jaffe 2004
Radioéléments	Uranium	x 100 à 1000	# 0,001 à 1 µg/l	# 0,0001 à 1 mg/l	Zuddas 2009

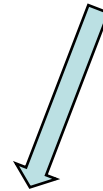
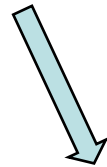
Pourquoi le CO₂ induit-il une remise en solution des métaux ?

- L'injection de CO₂ provoque un **déséquilibre acido-basique**

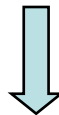


- Présence de **HCO₃⁻** (& ligands organiques)

- Dissolution des **métaux (ETM)** qui sont alors **mis en solution**



- La formation de **complexes** métalliques est facilitée



- La stabilité en solution et le **transport des métaux (ETM)** sont ainsi facilités, et **gouvernés par les processus d'oxydo-réduction**



Le contexte :

1. La filière captage–transport– injection– stockage cadre
2. Les travaux de recherche de l'INERIS

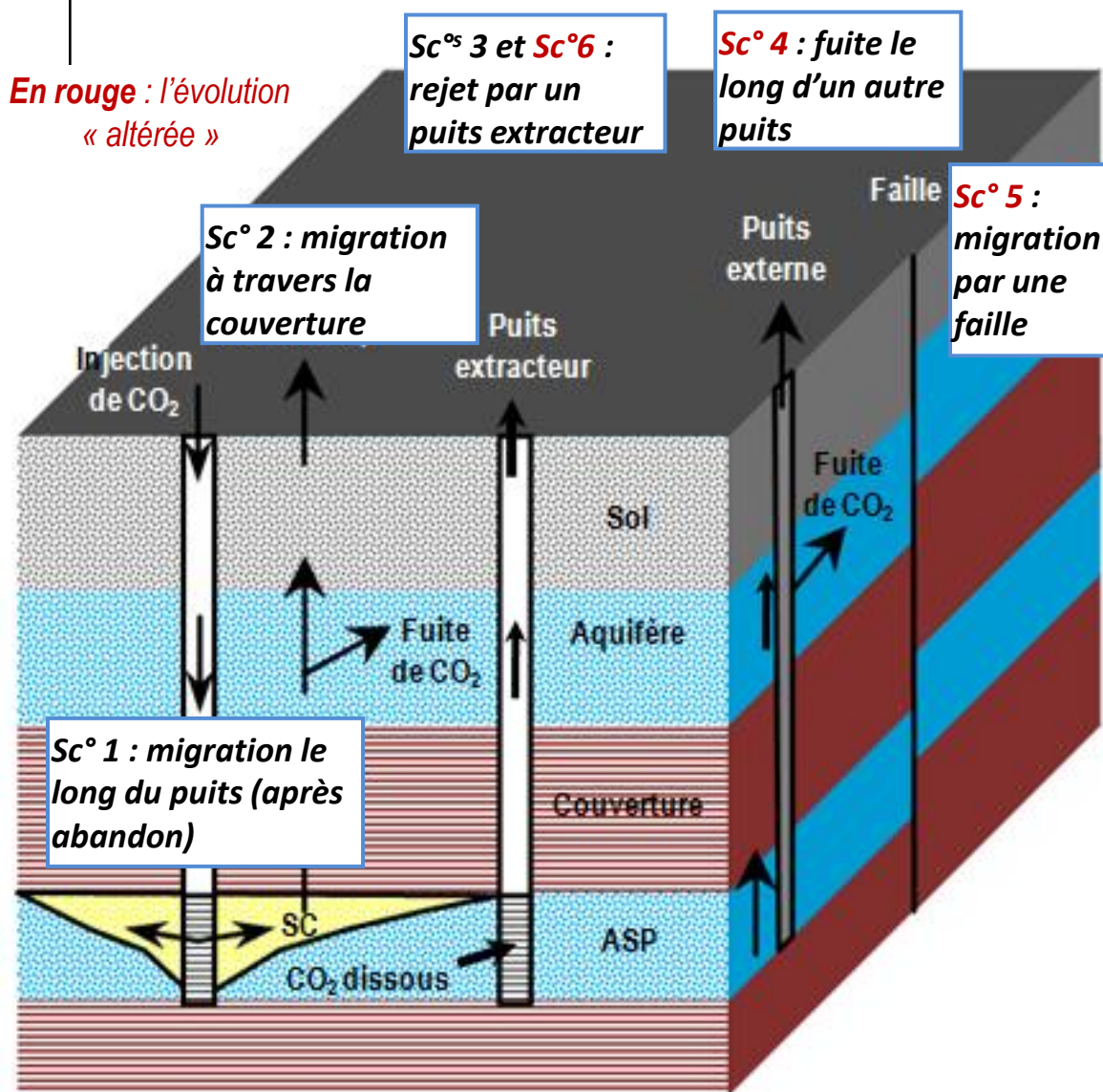
L'analyse des risques :

1. Les scénarios
2. Le terme source
3. Les transferts
4. Les impacts sanitaires

Les recommandations

Le modèle conceptuel et les scénarios majeurs de fuites

En rouge : l'évolution « altérée »



Cas 1 : migration vers un aquifère sus-jacent

Hypothèses	L'aquifère piège tout le CO ₂ La dilution est instantanée
Hauteur de nappe	30 m
Vitesse d'écoulement de la nappe	0,3 m/an (perméabilité 10 ⁻¹² m ² , gradient hydraulique 1‰), <i>inspiré de nappe de l'Albien</i>
Surface concernée	10 km ² (2 x 5 km, <i>inspiré de Sleipner</i>)

Cas 2 : émanation en surface

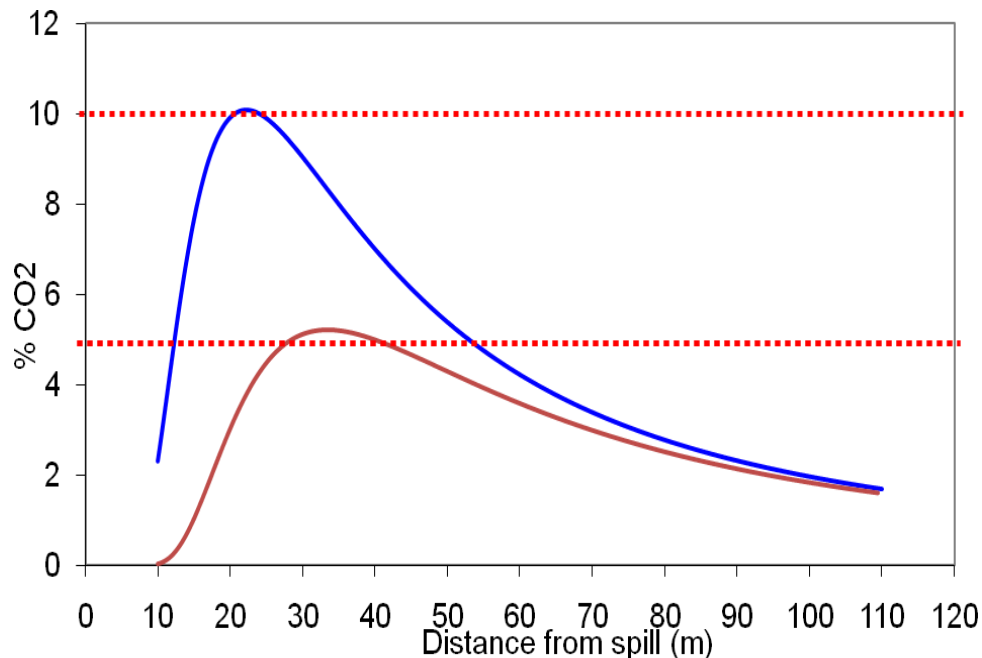
Hypothèses	Milieu confiné (habitation, cave) - Les aquifères ne piègent pas le CO ₂ Approche comparative entre les substances
------------	--

Evolution « normale » ou « altérée »: scénarios de fuites (étude INERIS)

Conditions normales						
Scé- nario	Fluide	Chemin de fuite	Temps d'arrivée	Débit retenu	% de la quantité stockée (si fuite pendant 100 ans)	Autres valeurs de la littérature
1	CO ₂	Puits abandonné et colmaté, Rayon = 0,15 m - Perméabilité du ciment = 10 ⁻¹¹ m ²	jour	10 ⁻⁵ kg/s (300 kg/an)	négligeable	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁵ kg/s (Giraud, 2009) 1,4. 10 ⁻⁵ kg/s (LeNeveu 2007) 10 ⁻⁴ kg/s (Bouc 2010) 10 à 100 kg/an (REX In Salah)
2	CO ₂	Couverture Surpression 1 MPa Perméabilité = 10 ⁻¹⁷ m ² Epaisseur = 100 m	millénaire	0,12 kg/s (0,4 kg/an/m ²) <i>Débit 1000 fois moindre si perméabilité=10⁻¹⁸</i>	0,8%	
Conditions altérées						
4	CO ₂	Puits externe ouvert Rayon = 0,10 m	-	1 kg/s	6%	0,350 kg/s (REX Gouveia 2006)
5	CO ₂	Faille ouverte sans remplissage, Ouverture = 0,1 mm – Longueur = 1 km	-	0,2 kg/s (0,1 kg/s/km sur 2 km)	1,3%	0,02 kg/s/km (Bouc 2010, faille plus large, perméabilité plus faible)

Les rejets en surface : le rejet accidentel sur une canalisation

Conditions accidentelles				Distance d'effet létal	Détails	
T.SE1	CO ₂	Effacement de joint/ point de corrosion, pression 10 MPa	-	env. 10 kg/s	10 à 20 m.	- Variations selon conditions météo, température du CO ₂
T.SE3	CO ₂	Rupture de canalisation diamètre 150mm, pression 10 MPa	-	env. 100 kg/s	30 à 100 m	- Rejet supposé horizontal



Terme source 10 kg/s, rejet horizontal





Le contexte :

1. La filière captage–transport– injection– stockage cadre
2. Les travaux de recherche de l'INERIS

L'analyse des risques :

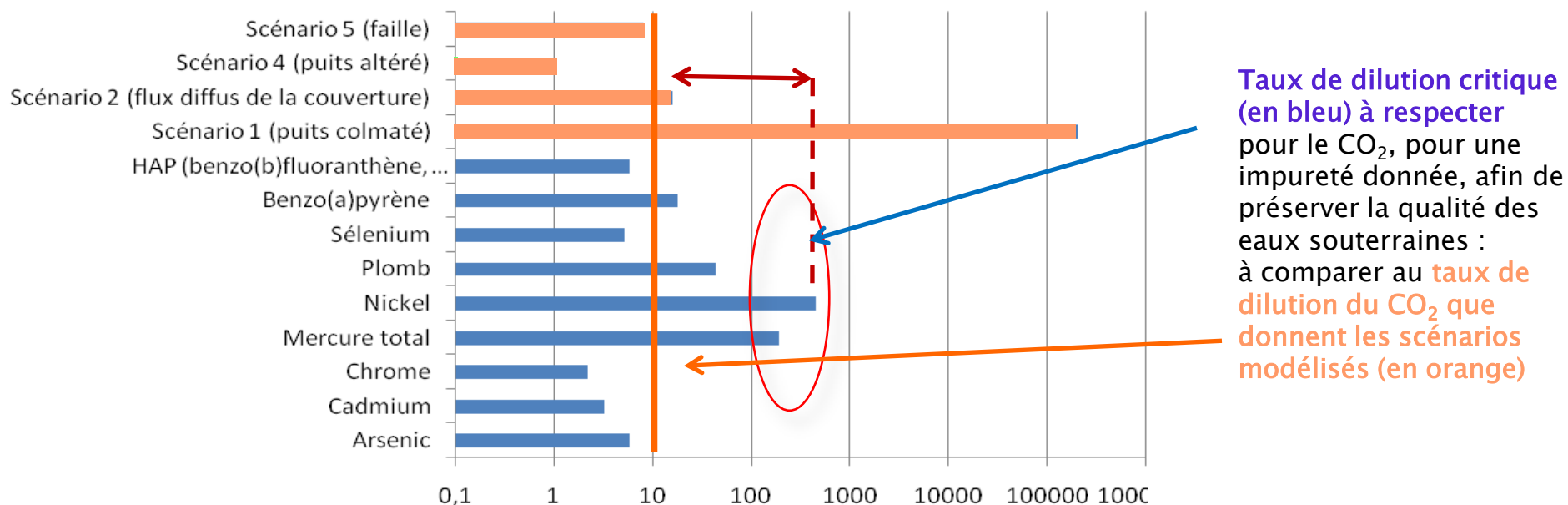
1. Les scénarios
2. Le terme source
3. Les transferts

4. Les impacts sanitaires

Les recommandations

Cas 1: Estimation des impacts liés aux impuretés : migration vers un aquifère

- On suppose un taux d'impuretés injectées avec le CO₂; (Nota : manque de données précises)
- calcul d'un « taux de dilution critique pour le CO₂ » dans la nappe , pour une impureté donnée
- plus ce taux critique est élevé pour une substance donnée, plus son impact sanitaire potentiel est fort



Taux de dilution critique (en bleu) à respecter pour le CO₂, pour une impureté donnée, afin de préserver la qualité des eaux souterraines : à comparer au **taux de dilution du CO₂** que donnent les scénarios modélisés (en orange)

→ Impact potentiel des impuretés

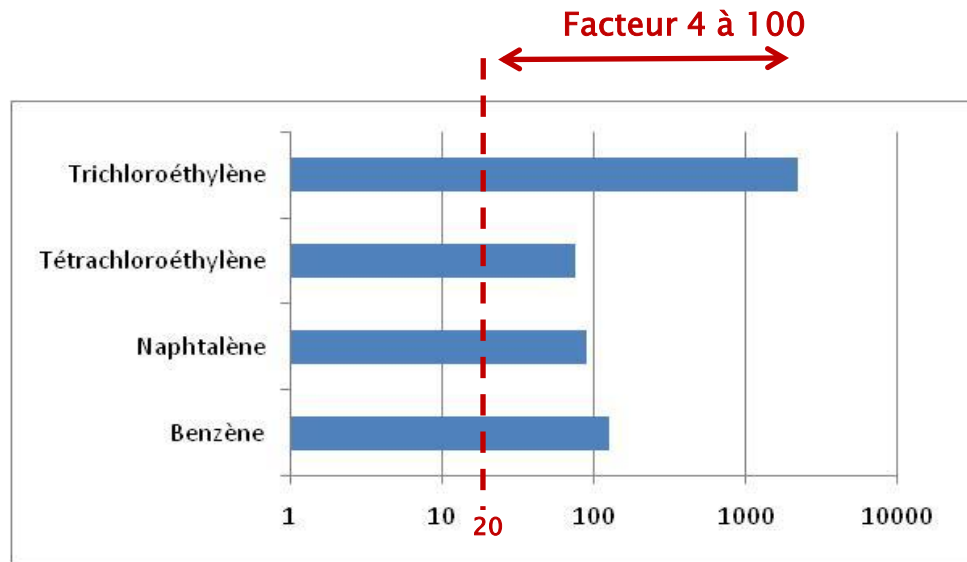
Par exemple : pour le scénario 5 de migration par une faille : Ni et Hg, puis Pb, B(a)P)

Dit autrement, à l'étape de captage il faudra atteindre un abattement d'un facteur 100 pour ces substances (soit un taux d'épuration de 99%)

- Besoin d'affiner ces résultats: 1) **par une meilleure caractérisation des impuretés** et 2) **par la connaissance du milieu et des paramètres de modélisation**

Cas 2 : Emissions de gaz en surface - Cas d'un milieu confiné de type cave

- Calcul de taux de dilution critique *en milieu confiné (air d'une cave)*, à appliquer au CO₂ pour chaque impureté
- Puis comparaison avec le taux de dilution critique du CO₂ en tant que toxique lui-même = 20 (car concentration critique de 5%, premiers symptômes d'intoxication)



Taux établis sur la base des valeurs guides dans l'air de l'OMS ou de l'AFSSET (bleu),

→ Impact potentiel des impuretés > à celui du CO₂ lui-même (jusqu'à un facteur 100)



Le contexte :

1. La filière captage–transport– injection– stockage cadre
2. Les travaux de recherche de l'INERIS

L'analyse des risques :

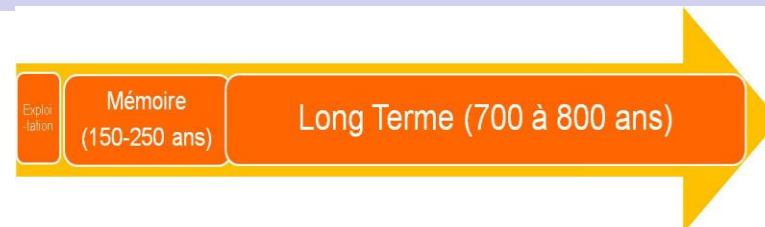
1. Les scénarios
2. Le terme source
3. Les transferts
4. Les impacts sanitaires

Les recommandations

Quelques enseignements

■ Intégrer le facteur temps :

- Des scénarios peu probables à court terme sont plus prévisibles à long terme (séisme ? intrusion ??)
- En termes organisationnels, assurer la surveillance à (très) long terme
- En termes scientifiques, réduire les incertitudes



■ Prendre en compte l'impact des impuretés, et si besoin imposer des limites basées sur le risque

■ Définir les scénarios **d'évolution « normale »** ET les scénarios **d'évolution « altérée »** Ce qui est probable ou certain (ex: dégradation géochimique des ciments et de la roche) n'est pas le plus impactant, comparé à la fuite le long d'une faille près d'une zone habitée)

■ Assurer un « Retour d'expérience » transparent

→ regrouper tous les incidents (fuites + incidents de surveillance par ex.)

Stratégie 1 : critères de choix des sites

- Caractéristiques du stockage :
capacité (porosité, épaisseur...), injectivité (perméabilité), réactivité chimique
- Caractéristiques de la roche couverture :
forme, imperméabilité, épaisseur, résistance mécanique
- Absence de discontinuités :
failles naturelles, puits antérieurs
- Stabilité géologique (absence de sismicité importante)
- Caractéristiques des recouvrements et de leur vulnérabilité :
absence de ressources minérales, vulnérabilité et vitesse d'écoulement des aquifères,
vulnérabilité et habitations en surface

➔ Il faudra cumuler 1°) une approche « a minima » (avec des guides qui définiront les critères et seuils) et 2°) des études d'impact au cas par cas

Stratégie 2 : fonctions de sécurité

Déclinaison concrète cumulant des **mesures de conception** et des **mesures de prévention des risques** :

- Préconisations de conception : techniques de creusement des puits, localisation, ciments employés
- Conditions d'exploitation du stockage : pression et débit d'injection, vannes automatiques de sécurité
- Spécifications de composition (impuretés) du gaz injecté
- Modalités de comblement des puits (type de ciments ou de matériaux)
- Stratégie de surveillance adaptée aux phases de vie (*ex: puits connus, aquifères de contrôle*)
- Le cas échéant, mesures correctives (à prévoir dès le dossier d'autorisation)

➔ **Il y aura des étapes décisionnelles et réglementaires successives:**

ex : permis d'exploration, autorisation d'exploiter, fermeture, abandon (transfert à l'Etat).

➔ **Il faudra cumuler une approche « a minima » (scénarios à considérer, barrières à imposer) et des études au cas par cas (étude d'impact)**



Merci de votre attention

Dossier p. 7

Changement climatique :

L'ENJEU DU CO₂

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable