



Stockage Souterrain pour l'Énergie et l'Environnement

ENPC, 25 novembre 2014

**Processus mécanique-transport régissant l'impact
environnemental du stockage des déchets toxiques
dans le sel**

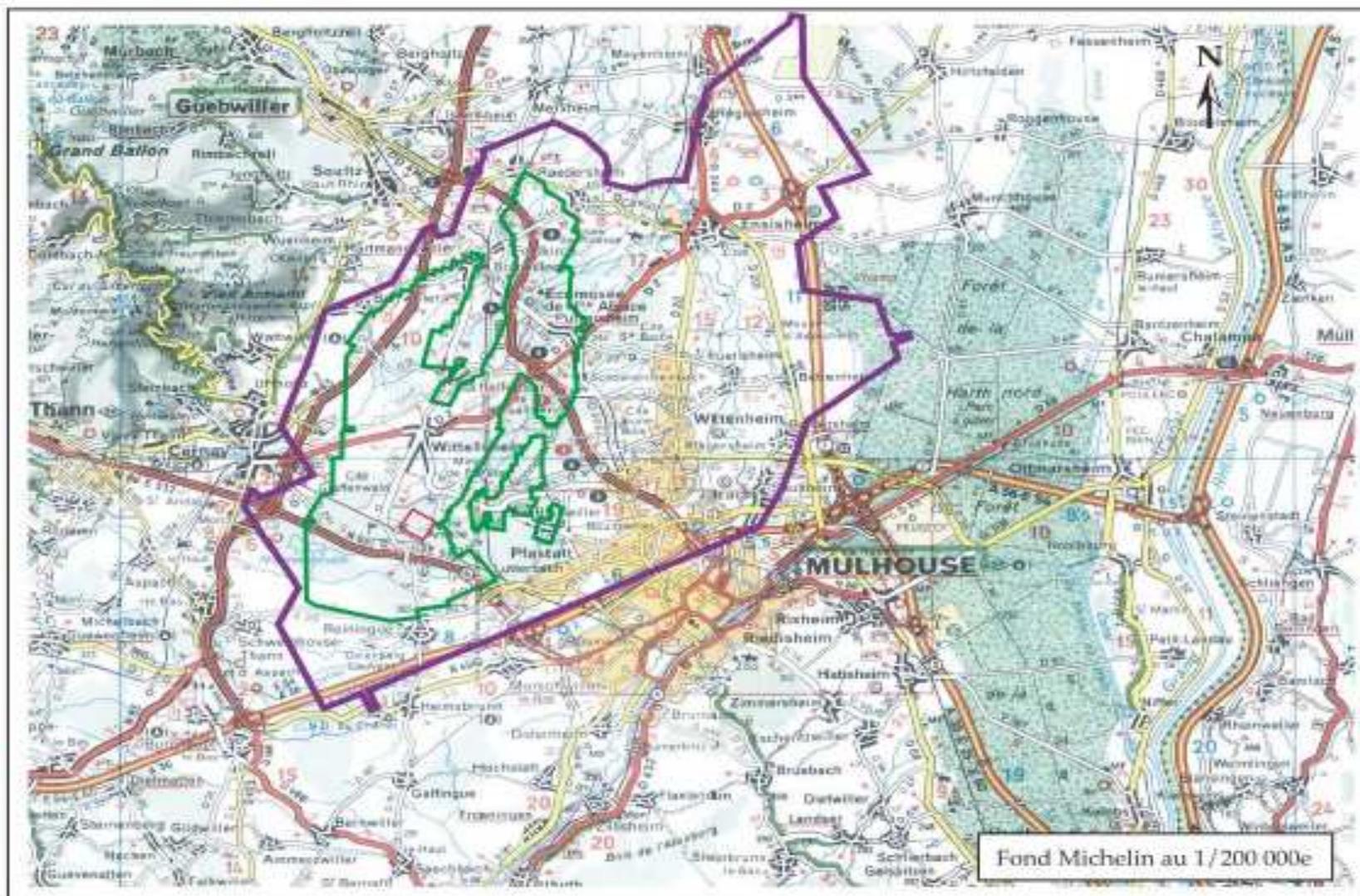
M. GHOREYCHI (INERIS)

INERIS



Sites de stockage de déchets industriels toxiques en Allemagne

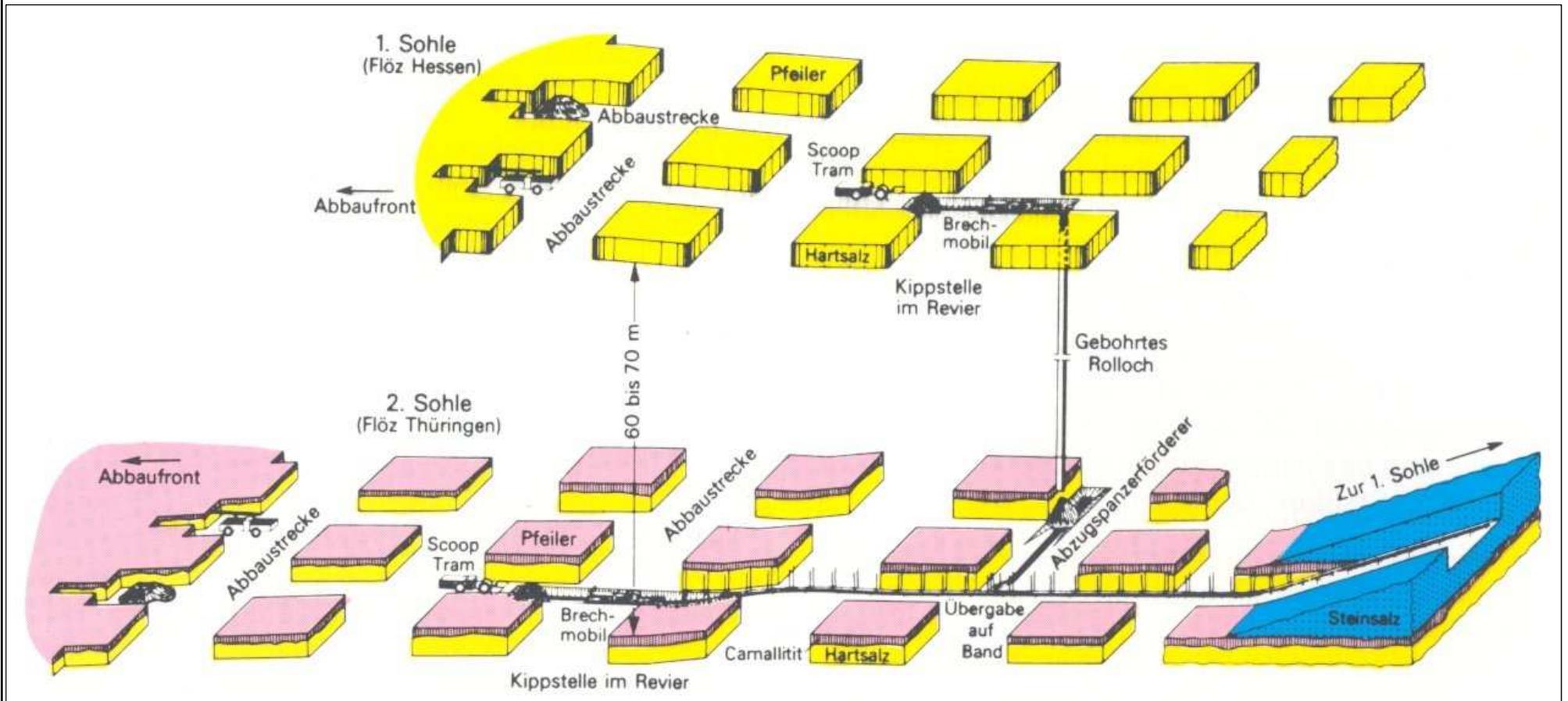
- Herfa Neurode (Hesse), depuis 1972
- Zielitz (Saxony-Anhalt), depuis 1994
- Heilbronn (Baden-Württemberg), depuis 1987
- Borth (Rhine-Westphalia). autorisée
- Teutschenthal (Saxony-Anhalt), depuis 1996
- Haigerloch-Stetten (Baden-Württemberg), depuis 1990
- Sondershausen (Thuringia), depuis 1995
- Unterbreizbach (Thuringia), depuis 1992
- Wintershall (Hesse), depuis 1993
- Hattorf (Hesse), depuis 1994.



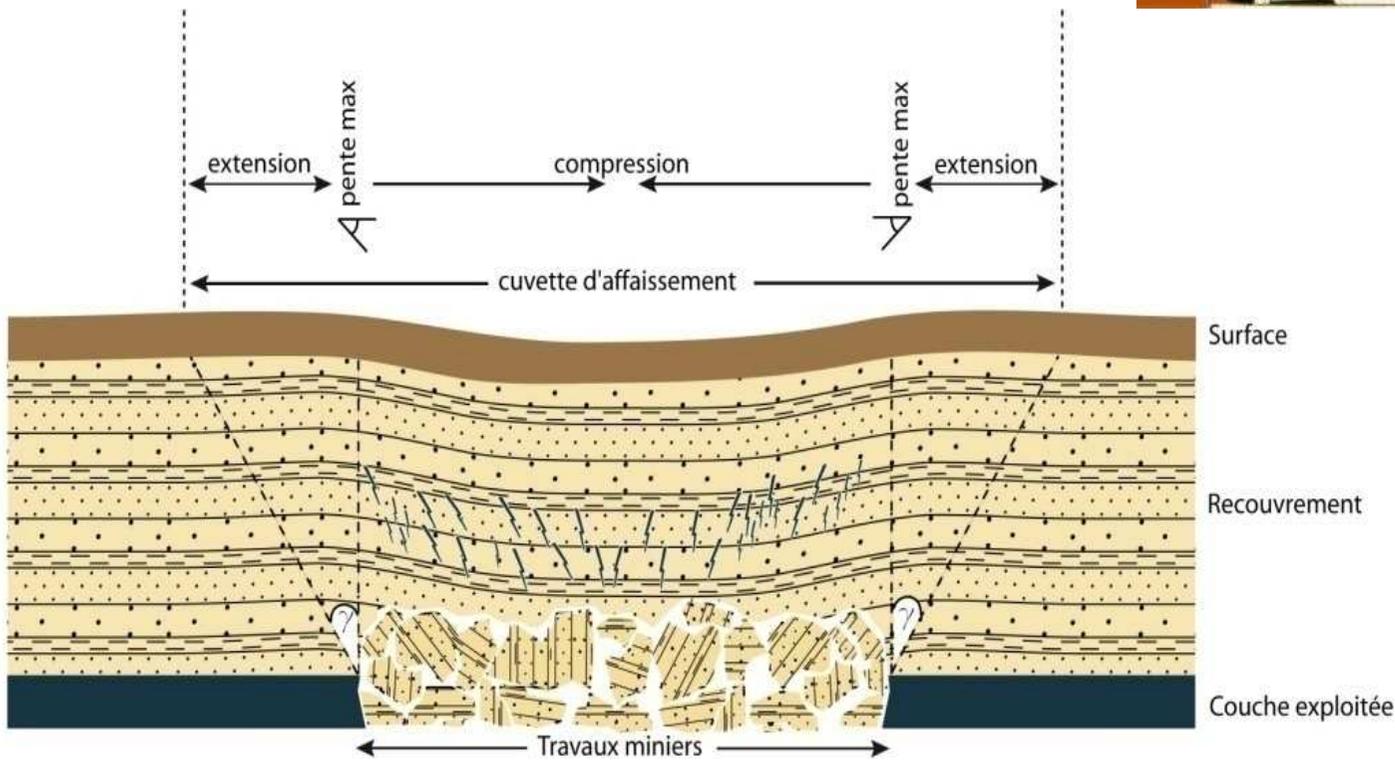
- Emprise approximative des concessions des Mines de Potasse d'Alsace
- Emprise des travaux miniers du "secteur ouest"
- Stockage Stocamine

StocaMine

Mines de sel ou de potasse exploitées par la méthode de chambres et piliers (profondeur 300-700 m)



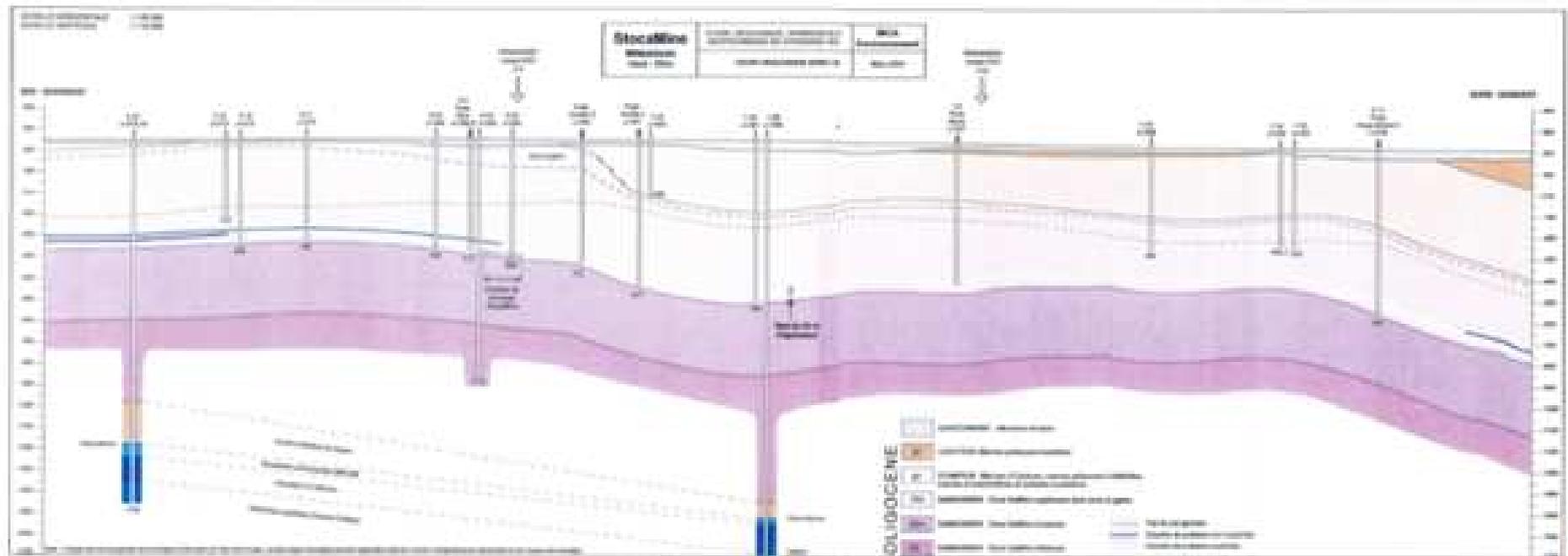
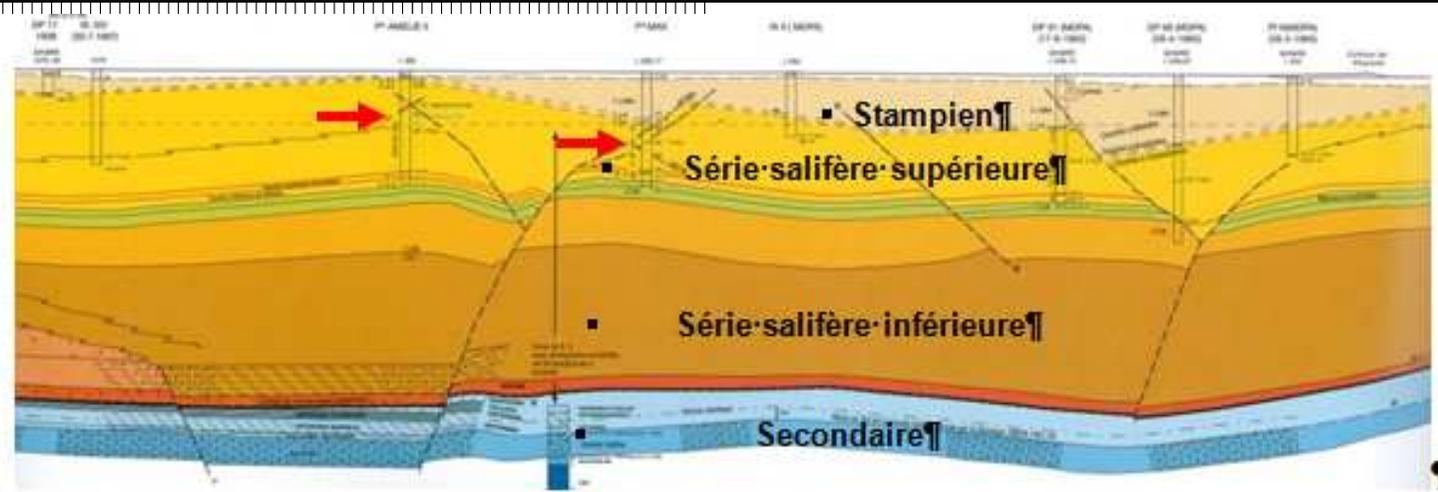
Exploitation par longues tailles avec foudroyage



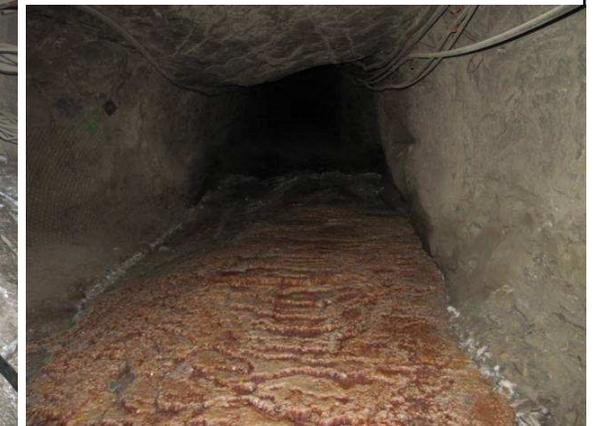
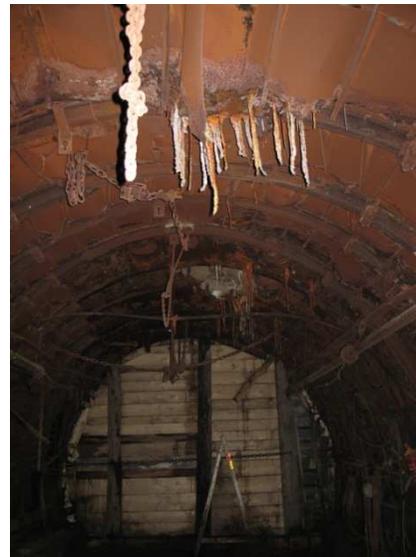
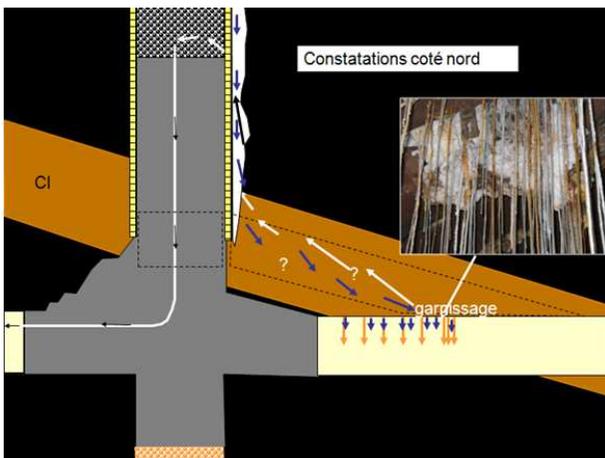
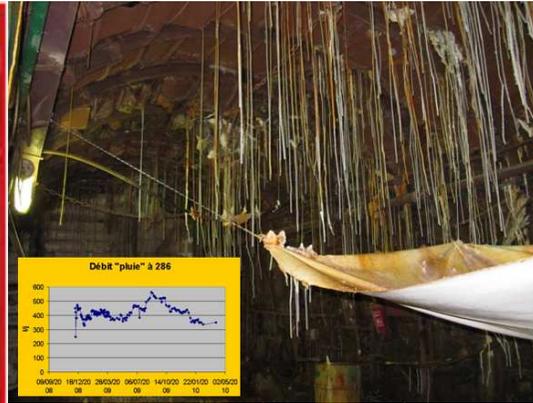
Stockage de déchets de Herfa Neurode en Allemagne (K+S)



Puits d'accès à la mine



Infiltration de l'eau à l'extrados de puits d'une mine de sel



Phénomènes de rupture brutale (rockburst) survenus dans les mines de potasse allemandes (W. Minkley, 1993)

Mine	Région	Date	Magnitude	Stockage dans le secteur
Krügershall	Saxe	25/05/1940	5,4	Teutschenthal
Heringen	Hesse	22/02/1953	5,4	Wintershall-Herfa
Merkers	Thuringe	08/07/1959	5,2	Unterbreizbach
Merkers	Thuringe	29/06/1961	3,7	Unterbreizbach
Aschersleben	Saxe Anhalt	04/04/1971	4,6	Bernburg
Sünna	Thuringe	23/06/1975	5,4	Unterbreizbach
Bleicherode	Thuringe	02/07/1983	3,3	Unterbreizbach
Völkershausen	Thuringe	13/03/1989	5,6	Unterbreizbach

DECHETS:

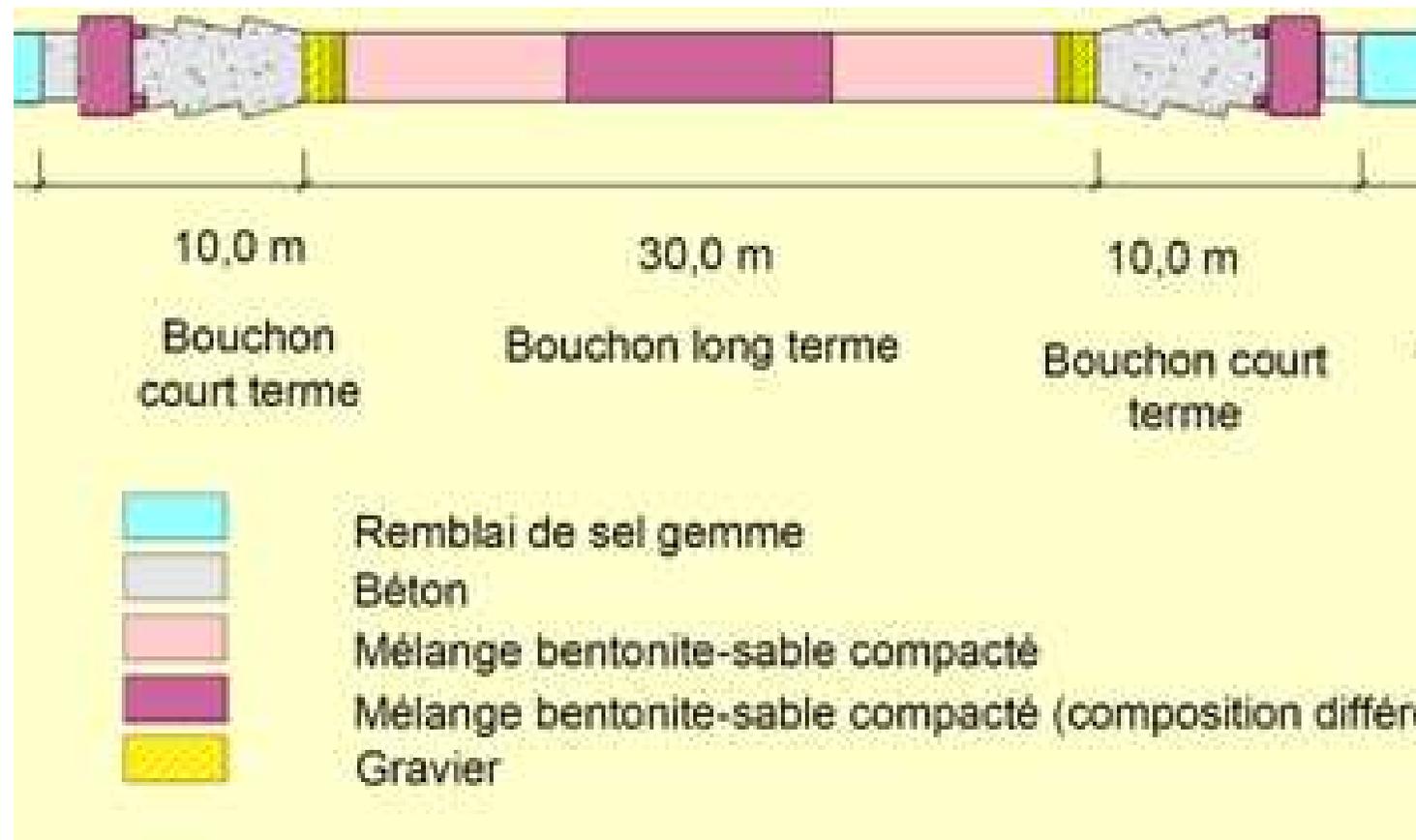
Déchets de laboratoire et industriels (métaux lourds (Mercure, Arsenic, Cadmium, Antimoine, Chrome, Plomb, Zinc, Cuivre), Cyanures...), Sols contaminés (pesticides), déchets de démolition (amiante), REFIOM : déchets d'incinérateurs HAP), déchets de transformateurs (PCB)...

Groupe de déchets admissibles
A1 - Sels de trempe cyanurés
A2 - Sels de trempe neutre
B3 - Déchets arséniés
C4 - Déchets chromiques
B5 - Déchets mercuriels
B6 - Terres polluées et résidus souillés par des métaux lourds
D7 - Résidus de l'électronique
C8 - Déchets de galvanisation, rétentats de filtration
E9 - Résidus d'incinération de déchets
B10 - Produits phytosanitaires non organiques
D11 - Catalyseurs usés
D12 - Déchets de laboratoire
E13 - Déchets contenant de l'amiante

Limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Substance	Seuil	Substance	Seuil
Antimoine (Sb)	5 µg/l	Barium (Ba)	0,7 µg/l
Arsenic (As)	10 µg/l	Sodium (Na)	200 mg/l
Cadmium (Cd)	5 µg/l	Benzène	1,0 µg/l
Chrome (Cr)	50 µg/l	Cyanures totaux	50 µg/l
Cuivre (Cu)	2 mg/l	Nitrates (NO ₃ ⁻)	50 mg/l
Mercure (Hg)	1 µg/l	Nitrites (NO ₂ ⁻)	0,5 mg/l
Nickel (Ni)	20 µg/l	Ammounium (NH ₄ ⁻)	0,1 mg/l
Plomb (Pb)	10 µg/l	Chlorures (Cl⁻)	250 mg/l
Aluminium (Al)	200 µg/l	Fluores (F ⁻)	1,5 mg/l
Sélénium (Se)	10 µg/l	Sulfates (SO ₄ ⁻)	250 mg/l
Fer (Fe)	200 mg/l	COT	2,0 mg/l
Magnésium (Mg)	50 mg/l	HAP totaux	0,1 µg/l
Bore (B)	1,0 mg/l	Pesticides totaux	0,5 µg/l

Concept de barrières ouvragées à très faible perméabilité dans un stockage de déchets



Principe de modélisation

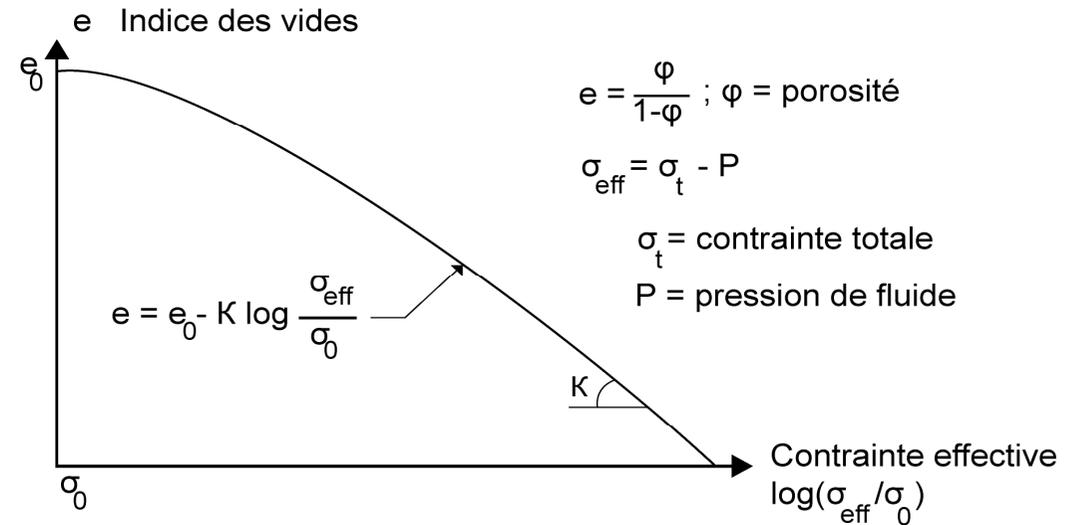
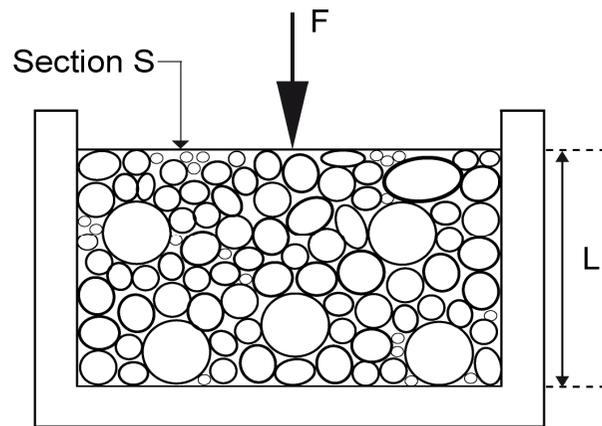
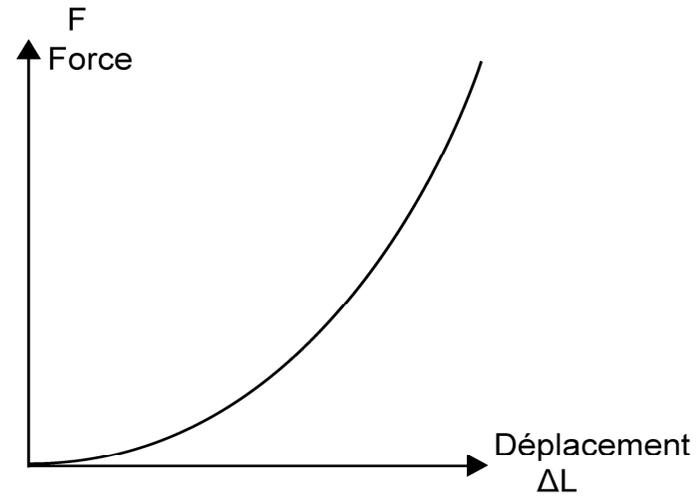
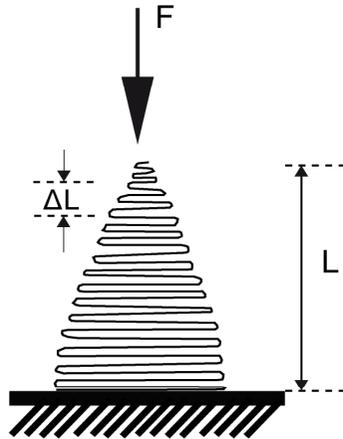
- Le stockage est constitué de piliers de sel et de déchets
- Les piliers se déforment pratiquement à volume constant (**propriétés de fluage de sel**)
- La compaction des déchets sous l'effet du fluage du sel est un phénomène non linéaire (**augmentation de la raideur avec la compaction**)
- La pression développée par la compaction des déchets et la pression de saumure s'opposent au fluage du sel sans pouvoir l'arrêter
- Le stockage se comporte globalement comme un milieu poreux (**vides intra/inter déchets**)
- Le modèle se déduit de la conservation de la masse liquide (**saumure contaminée**), des lois de comportement du sel et des déchets et des conditions aux limites au niveau des barrières (**milieu poreux**)
- Les résultats font l'objet d'une étude paramétrique (sensibilité aux paramètres)
- Leur cohérence est analysée par des considérations physiques simples

Loi de fluage du sel

- **Modèle élasto-viscoplastique de Norton** (Langer 1981, Munson & Dawson 1982), Wawersik 1981):
- **Fluage stationnaire : convergence linéaire de toute cavité saline dans le temps**
- **Fluide visqueux sans seuil: fermeture de toute cavité à long terme**
- **Loi de puissance en contrainte déviatorique avec un exposant de 3-5 : vitesse de convergence multipliée par 8-32, si la profondeur est doublée**
- **Loi exponentielle en température : diminution de la viscosité, le point de fusion de sel est 800 °C << aux autres roches)**

$$\underline{\dot{\epsilon}}^{vp} = A \exp(-B / T) (Q / Q_0)^n \frac{\partial Q}{\partial \underline{\sigma}}$$

Modèle de compaction œdométrique



Expression du modèle

Conservation de la masse fluide (m_f):

$\partial m_f / \partial t = \text{div}(\mathbf{q}_f)$; q_f : débit (m^3/an) $\mathbf{q}_f = K/\eta \text{ grad } P$ (dans les barrières)

K: perméabilité: (m^2), η : viscosité de la saumure (10^{-3} Pa.s), P: pression de fluide

A: Dans le stockage: $\Phi_1 \beta \partial P_1 / \partial t + 2(1 + \Phi_1) \partial \varepsilon / \partial t = q_{f1}$ (entrant dans les barrières)

Dans les barrières: $\Phi_2 \beta \partial P_2 / \partial t = \text{div}(\mathbf{q}_f) = K/\eta \partial^2 P_2 / \partial x^2$ Φ_1 : porosité des déchets, Φ_2 : porosité des barrières; β : compressibilité de la saumure = $4 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$, K: perméabilité des barrières (m^2), η : viscosité de la saumure: 10^{-3} Pa.s ; $\partial \varepsilon / \partial t$: vitesse de fluage du stockage

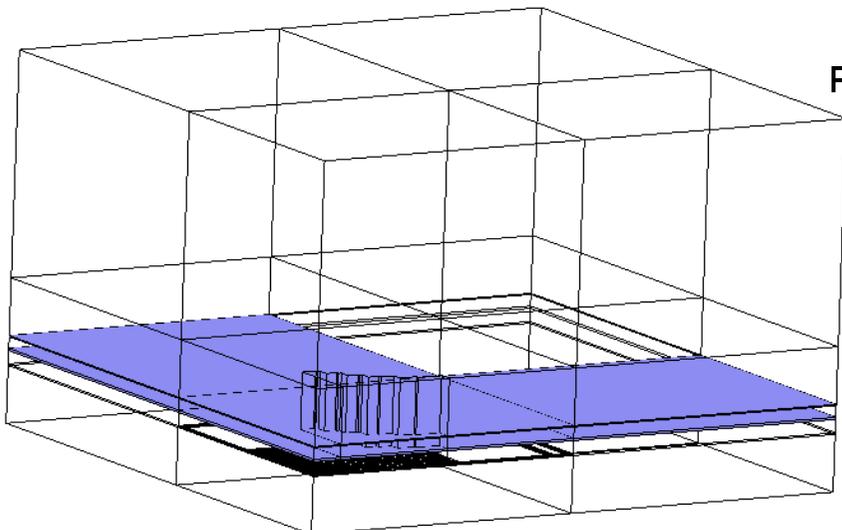
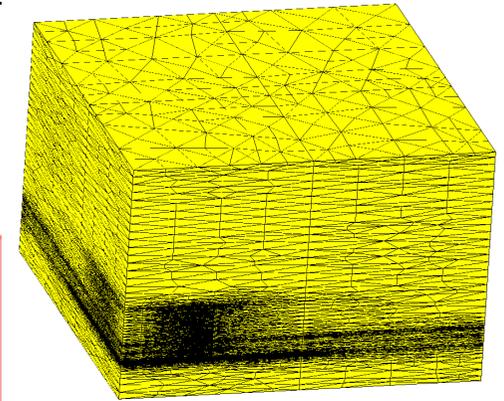
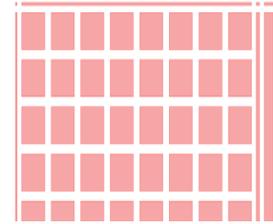
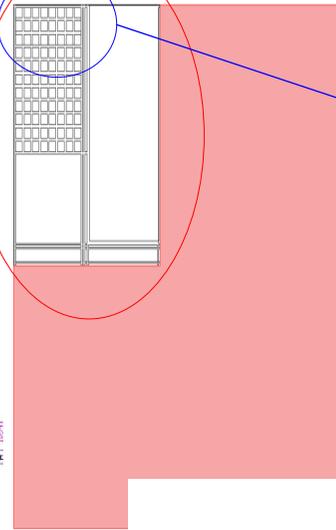
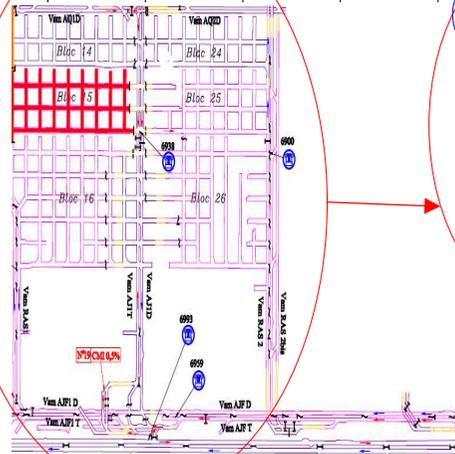
B: Fluage: $\partial \varepsilon / \partial t = A (\sigma_d - \langle \sigma_{\text{déchets}} - P_{\text{saumure}} \rangle)^n$, σ_d : contrainte déviatorique in situ, A et n : paramètres du fluage de sel

C: Débit: $q_f = K/\eta \cdot \partial P / \partial x$: débit de fuite des barrières donné par la loi de Darcy

D: Flux massique: $q_m = \text{flux convectif} + \text{flux diffusif (négligeable)} = C \cdot q_f + D \cdot S \cdot \text{grad } C$ (loi de Fick); S: section

Modèle 3D

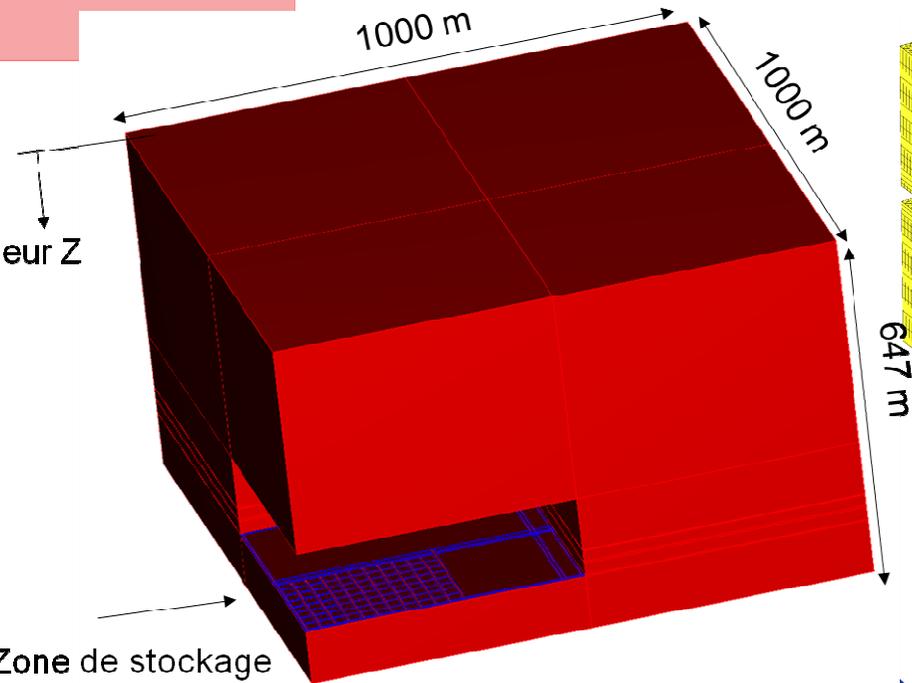
Code Elements
Finis COMSOL
multiphysics)



Modèle géométrique

Profondeur Z

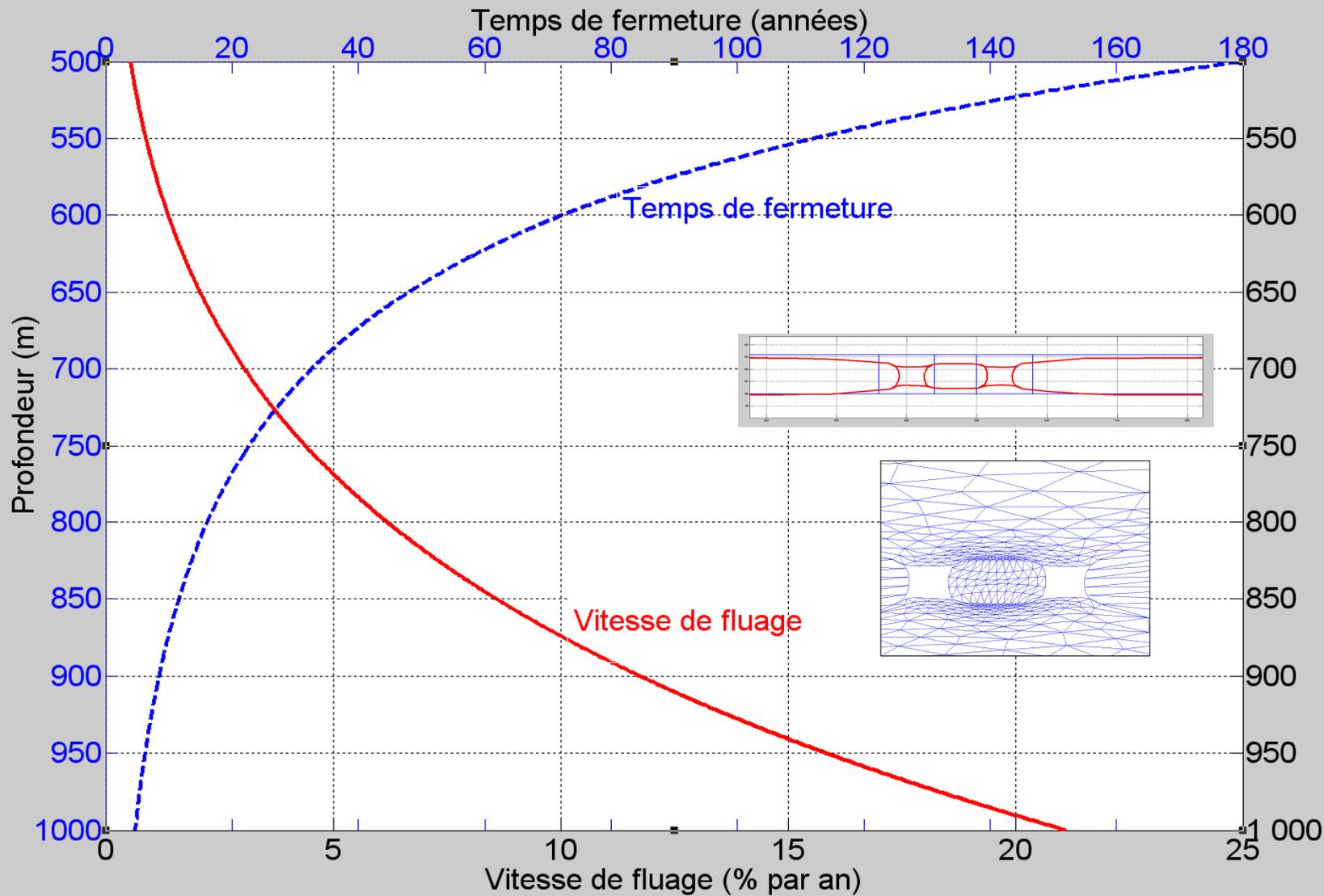
Zone de stockage



Maillages 3D



Estimation de la vitesse de fluage et du temps de fermeture des galeries à différentes profondeurs (avant l'ennoyage)

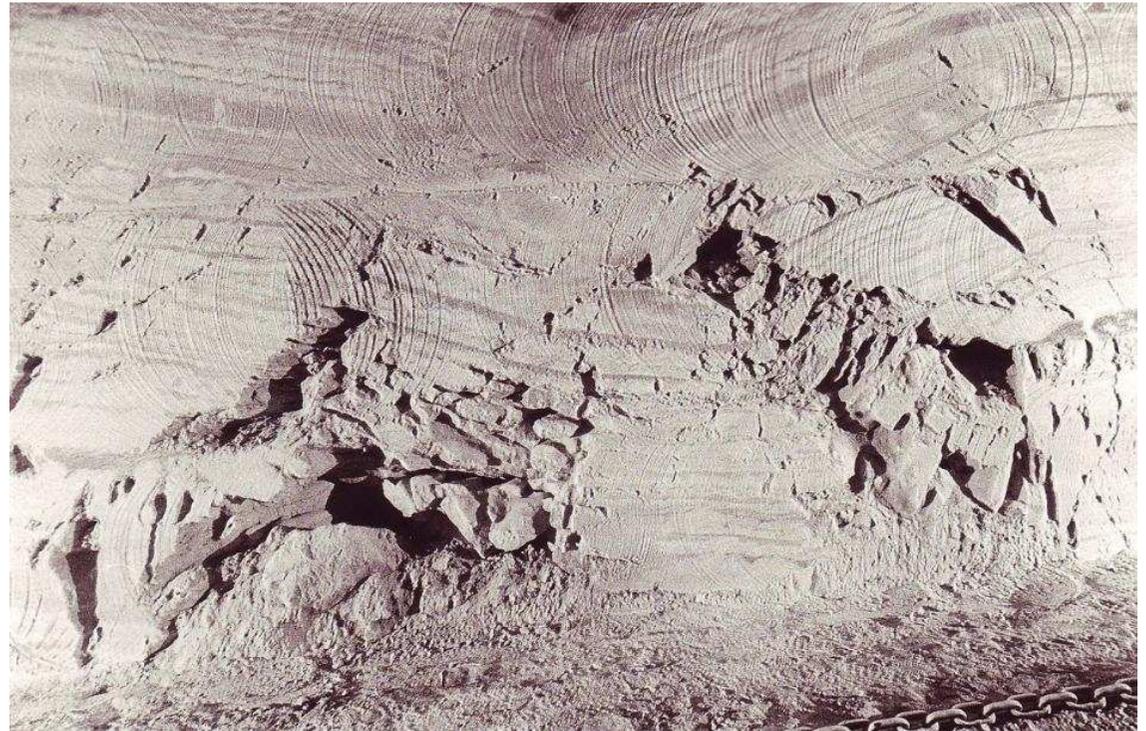


- Prof. 550 m
- Tempér: ~35 °C
- Vitesse de convergence
- 0,9% par an
- Fermeture dans ~1 siècle

- Prof. 1000 m
- Tempér: ~50°C
- Vitesse de convergence: 20% par an
- Fermeture en quelques années

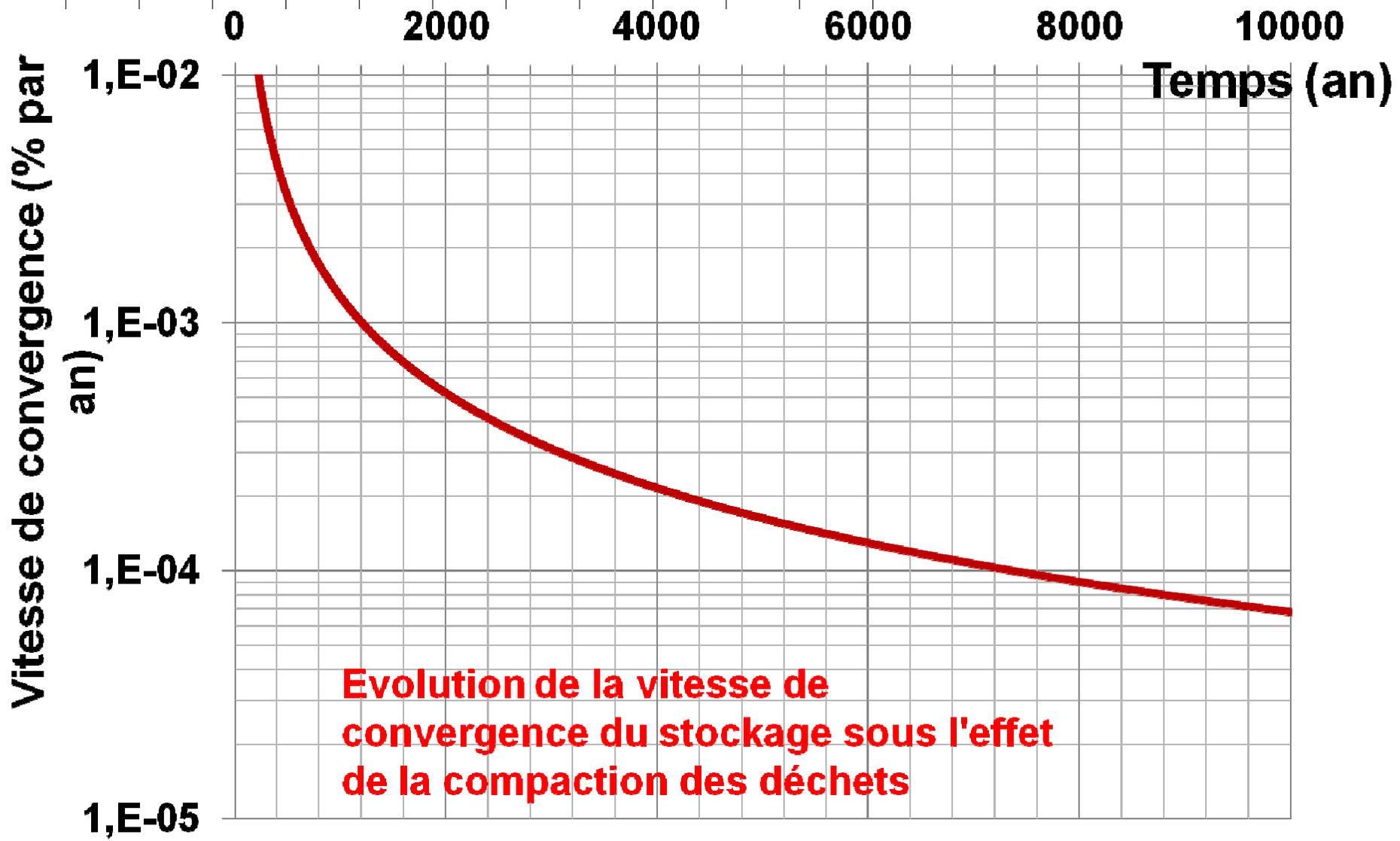
Photographies d'anciennes galeries, voies doubles et tailles recoupées par une excavation

(MDPA, Feuga, 2010)



Fermeture progressive des ouvrages

INERIS



Evolution de la vitesse de convergence du stockage sous l'effet de la compaction des déchets

Facteurs dimensionnants (1/2)

1- La concentration de mercure dans le stockage (terme source) peut être estimée à C_0 (kg/m^3) = $M_{\text{Hg}} / V_{\text{stockage}}$ (plusieurs ordres de grandeur supérieures au seuil réglementaire): M_{Hg} : Masse Hg mobilisable en kg ; V_{stockage} : Volume de vides du stockage (m^3)

2- Cette concentration est diluée dans la saumure « non contaminée » remontant des vides miniers). Le facteur de dilution vaut:

$F_d = q_{\text{stockage}} / q_{\text{vides}}$: débit de saumure contaminée / débit de saumure des vides miniers

- **Débit de saumure contaminée** : $q_{\text{stockage}} := V_{\text{stockage}} * \epsilon_{\text{stockage}}^{\circ}$; $\epsilon_{\text{stockage}}^{\circ}$: vitesse de fluage du stockage (année^{-1})
- **Débit de saumure non contaminée** : $q_{\text{vides}} = V_{\text{vides}} * \epsilon_{\text{vides}}^{\circ}$; $\epsilon_{\text{vides}}^{\circ}$: vitesse de fluage des vides miniers (année^{-1}); V_{vides} : Volume des vides au-dessus du stockage

$$F_d = q_{\text{stockage}} / q_{\text{vides}} = (V_{\text{stockage}} / V_{\text{vides}}) * (\epsilon_{\text{stockage}}^{\circ} / \epsilon_{\text{vides}}^{\circ}) \sim V_{\text{stockage}} / V_{\text{vides}}$$

Concentration de la saumure contaminée sortant des puits (plus forte que la limite de qualité d'eau potable)

Facteurs dimensionnants (2/2)

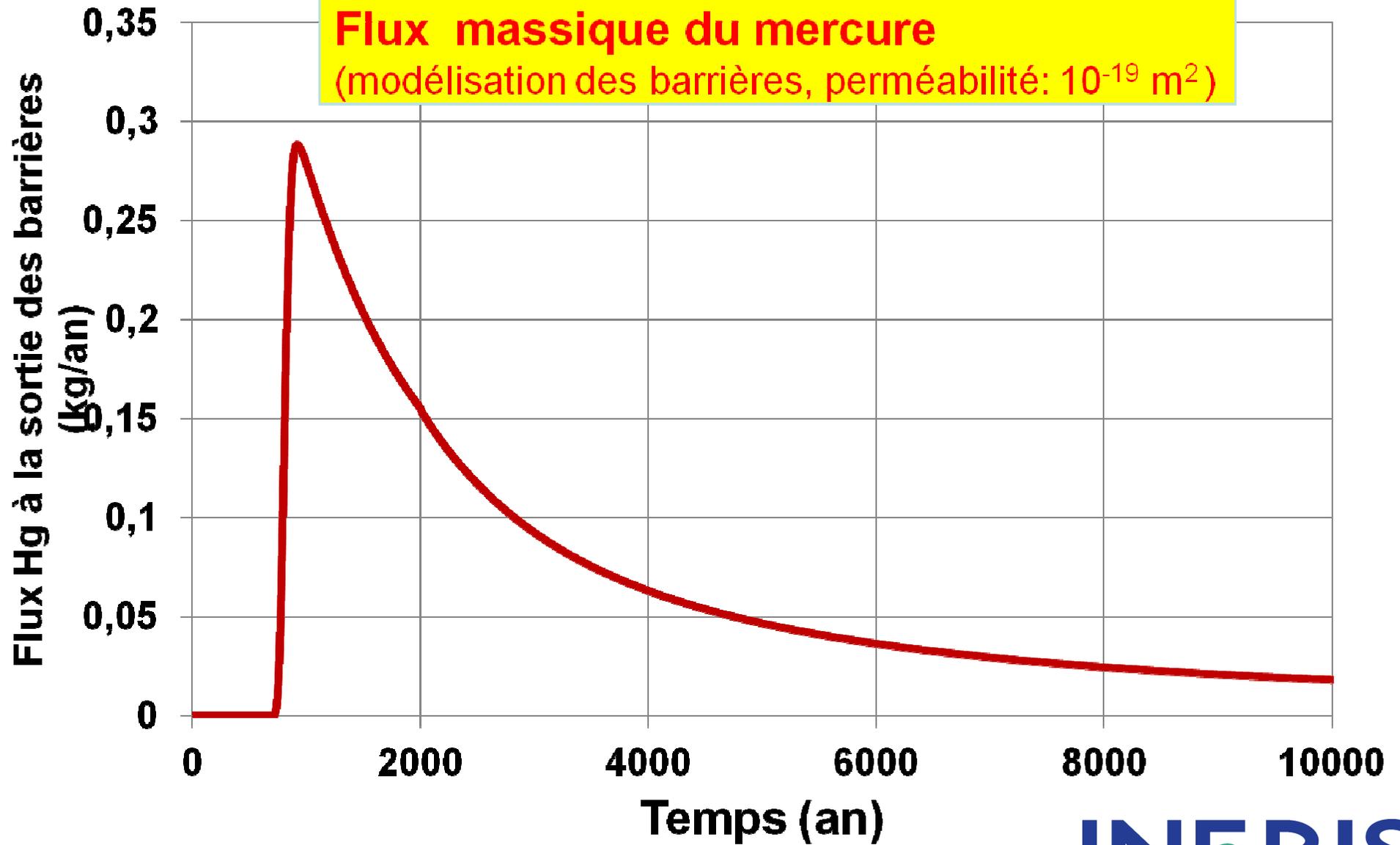
3- Le débit massique de mercure à la sortie des barrières :

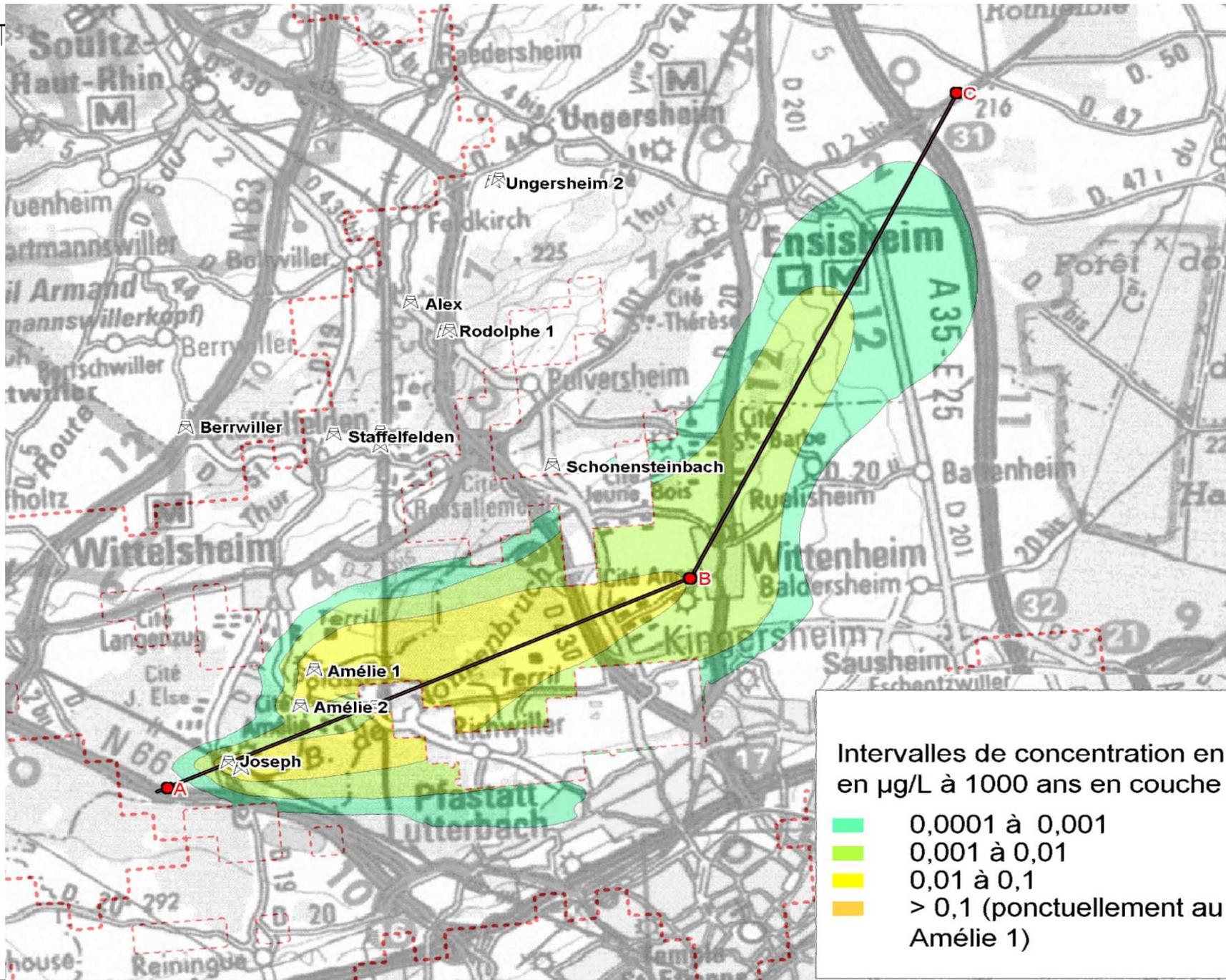
$$q_{\text{Hg}} = C_0 * q_{\text{stockage}} = (M_{\text{Hg}} / V_{\text{stockage}}) * (V_{\text{stockage}} * \varepsilon_{\text{stockage}}^{\circ}) = M_{\text{Hg}} * \varepsilon_{\text{stockage}}^{\circ}$$

- Seules la masse mercure et la vitesse de compaction des déchets interviennent
- Pour une masse de mercure donnée, il convient de retarder l'envoi pour permettre une diminution suffisante de la vitesse de fluage du stockage par une compaction avancée des déchets.

4- Cela pourrait se faire par

- Des barrières ouvragées perforantes, par exemple à base d'argiles gonflantes avec un ratio carré de longueur / perméabilité (L^2 / K) aussi grand que possible permettant :
 - un temps important d'hydratation des barrières;
 - un débit de saumure entrant dans le stockage très faible, permettant un temps important de remplissage de l'espace vide des déchets.



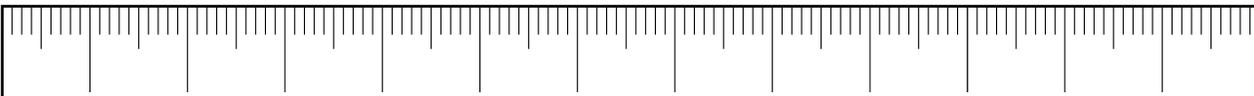


Intervalles de concentration en mercure en $\mu\text{g/L}$ à 1000 ans en couche 3 :

- 0,0001 à 0,001
- 0,001 à 0,01
- 0,01 à 0,1
- > 0,1 (ponctuellement au puits Amélie 1)

Conclusion

- L'ennoyage à long terme des anciennes mines de sel est très probable à travers notamment les puits d'accès
- Le risque de transport des matériaux contaminés ne pourrait pas être écarté pour un stockage de déchets dans une ancienne mine de sel
- Toutefois, la mise en place de barrières performantes à très faible perméabilité permettrait de retarder l'ennoyage, de ralentir le fluage des vides (moteur de transport) et de réduire la concentration des contaminants dans les aquifères.
- La gestion à long terme des déchets toxiques est une question ouverte du fait de leurs impacts environnementaux et sanitaires à long terme.



Merci pour votre attention !

INERIS