



# Etude complémentaire de comparaison des scénarios de gestion des déchets et du site StocaMine après la fermeture et

## Mesures de Maîtrise des Risques pour réduire l'impact des déchets de StocaMine sur la nappe d'Alsace

**COPIL du 23 mai 2011**



*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

# Contexte et résumé des études déjà réalisées

- **PLAN DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR L'INERIS**

- Comparaison de différents scénarios en utilisant des outils d'analyse reconnus au niveau international (Méthode)
- ... afin de sélectionner un scénario à approfondir (Résultat phase 1: préconisation d'approfondir le scénario « StocaMine avec Barrières » après avoir vérifié que cette hiérarchisation restait valable après examen d'un scénario complémentaire « Herfa-Neurode »)
- ...Proposer des mesures de maîtrise des risques pour le scénario préconisé en phase 1 afin de satisfaire à des critères environnement et sécurité (Phase 2)

- **SCÉNARIOS ÉTUDIÉS EN PHASE 1:**

- Stockage illimité à StocaMine: avec ou sans barrières complémentaires
- Déstockage et stockage à Heilbronn (variante en laissant le bloc 15 à StocaMine, variante déchets relevant de la classe 1 mis sur le site de Drambon)
- Déstockage et stockage à Herfa-Neurode (variante en laissant le bloc 15 à StocaMine, variante déchets relevant de la classe 1 mis sur le site de Drambon)

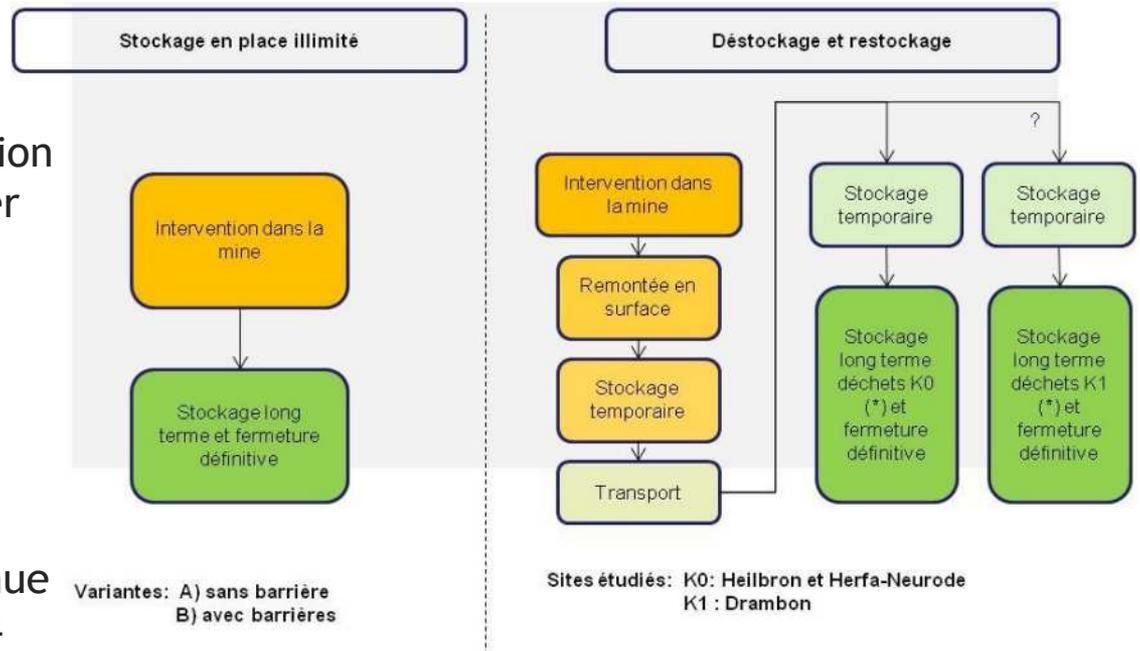
# Phase 1 - Méthodologie

- Logique de comparaison de scénarios du point de vue des « performances environnementales » permettant l'agrégation d'informations de natures différentes
  - Risques sanitaires aigus et chroniques (population générale et travailleurs)
  - Risques accidentels
  - Risques pour l'environnement
  - Risques à court et long termes

**ENJEUX NON PRIS EN COMPTE**

- IMPACTS SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE
- IMPACTS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR
- IMPACTS SUR LES RESSOURCES NATURELLES
- ENJEUX JURIDIQUES, FINANCIERS ET SOCIOPOLITIQUES

- S'appuyant sur des méthodologies d'évaluation existantes et publiées
- Permettant après simplification et homogénéisation de traiter des données hétérogènes en quantité et en qualité, et de sommer des informations de natures différentes
- Utilisant des indicateurs globaux de risque reconnus
- Démarche cohérente, reconnue et normalisée - ISO 14040/44



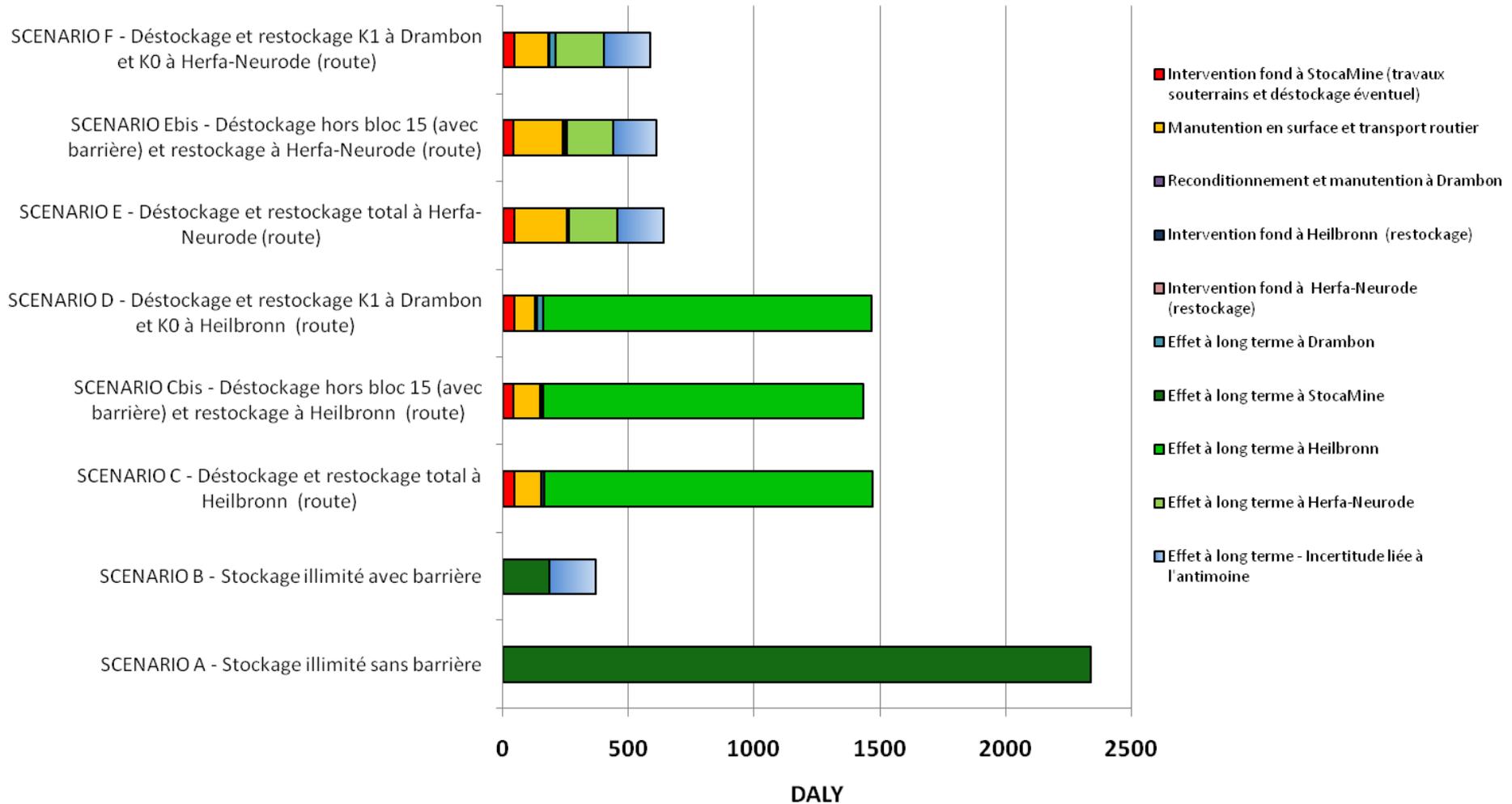
# Phase 1: présentation des indicateurs utilisés à des fins de hiérarchisation des scénarios

- **PDF - POTENTIALLY DISAPPEARED FRACTION**
  - 1 PDF.m<sup>2</sup>.an = disparition potentielle d'espèces sur 1 m<sup>2</sup> pendant un an
- **DALY - DISABILITY ADJUSTED LIFE YEAR**
  - 1 DALY = une année de perte d'espérance de vie pour une personne en bonne santé
  - Maladies et/ou infirmités prises en compte avec des facteurs de pondération
  - Prend en compte les effets immédiats et différés : par exemple, appliqué aux conséquences d'accidents de transport avec perte de déchets, plus de 75% des DALY découlent des impacts à long terme des substances toxiques libérées et une faible part résulte des décès ou blessés de l'accident lui-même

# Analyse comparative: impact sur la santé cumulé sur le très long terme

(Résultats déjà présentés au Copil du 01/05/2011 complétés par le scénario Herfa-Neurode)

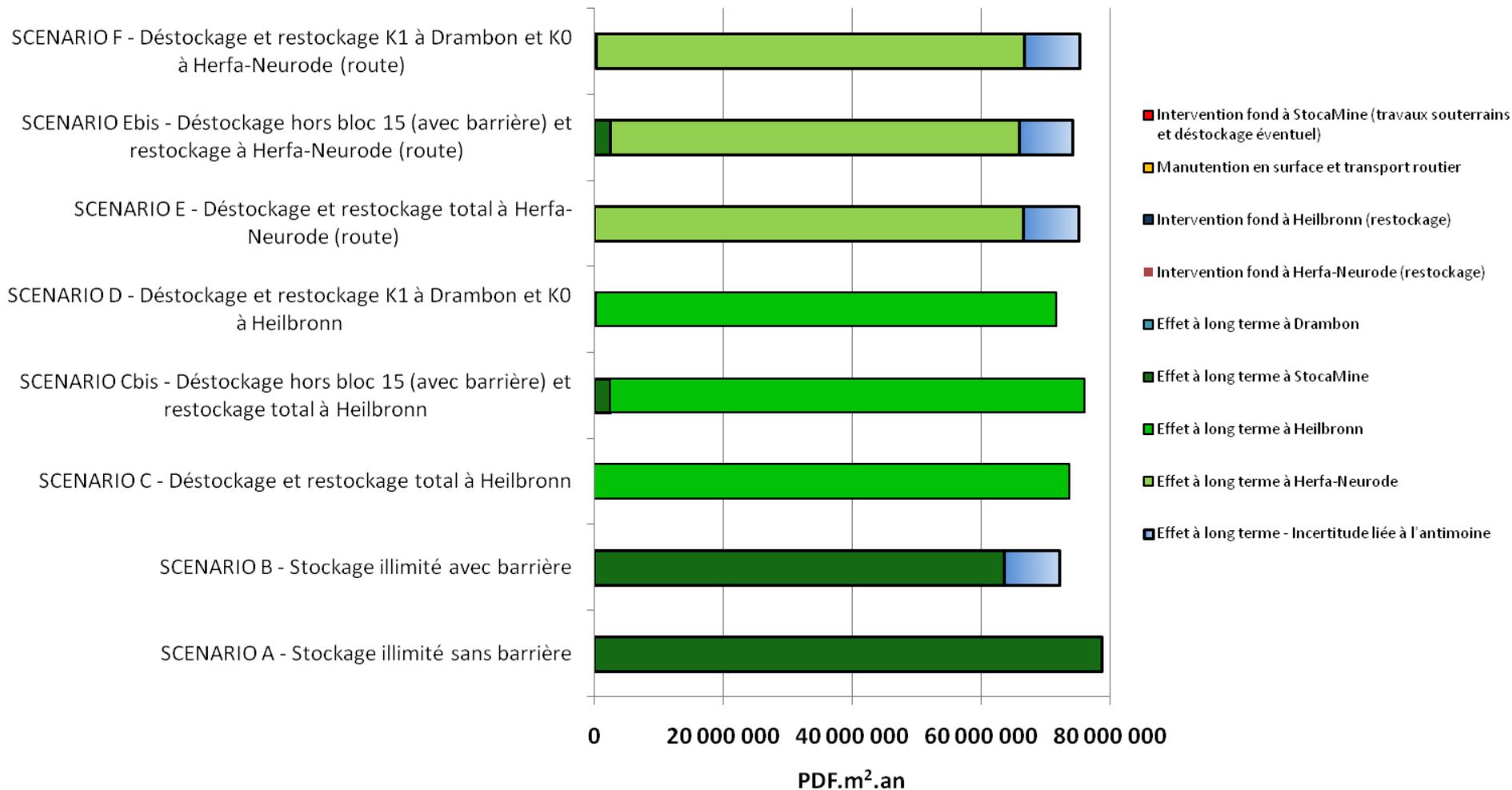
## Santé humaine



# Analyse comparative: perte de biodiversité cumulée à très long terme

(Résultats déjà présentés au Copil du 01/05/2011 complétés par le scénario Herfa-Neurode)

## Perte de biodiversité



## Conclusions de la phase de comparaison (rappel)

- L'impact sur l'environnement / biodiversité (PDF) est lié au mercure majoritairement. Le mercure ne précipite pas : pas de modification des quantités apportées aux nappes phréatiques sur le très long terme quel que soit le scénario étudié (sauf Heilbronn « sec »)
- Heilbronn « Sec » (scénario retenu en Allemagne) et StocaMine « avec barrières » sont comparables (même ordre de grandeur si l'antimoine précipite, 2 fois plus important pour StocaMine si l'antimoine ne précipite pas). Attention : risque de déstockage du bloc 15 sous-estimé => Même ordre de grandeur compte tenu des incertitudes.
- Le scénario Herfa-Neurode présente des impacts à long terme du même ordre de grandeur que StocaMine avec barrières. Les impacts liés au transport deviennent significatifs du fait de la distance.
- StocaMine avec barrières : scénario à privilégier pour impacts à court et long termes.
- Point identifié lors du COPIL du 1<sup>er</sup> avril : nécessité d'étudier des moyens de maîtrise du risque complémentaires permettant de respecter un seuil de 1µg/l de mercure dans la nappe à long terme

## Rappel des précédents résultats de l'étude d'impact sur la nappe

Les résultats préliminaires de la modélisation hydrodynamique (modèle MARTHE du BRGM) de l'impact des déchets sur la nappe d'Alsace (Copil du 1/4/2011) avaient indiqué un possible dépassement du seuil de potabilité en mercure

### Objectif

Définir les éléments permettant la conception et l'ingénierie des mesures de maîtrise des risques (MMR) en respectant en particulier la réglementation en vigueur

### MMR étudiées

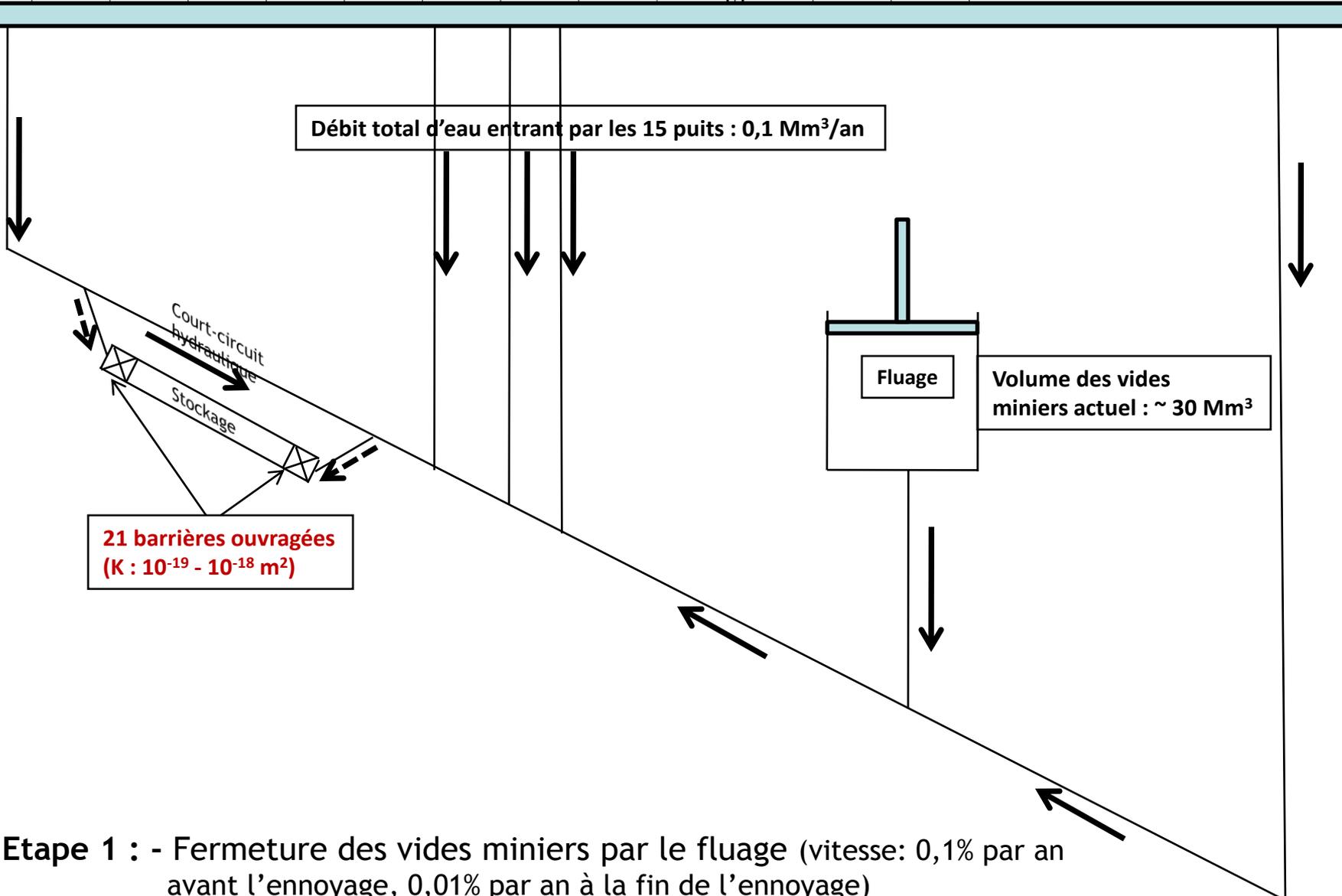
Mise en place de barrières ouvragées très faiblement perméables, à base d'argiles gonflantes, et création de courts-circuits hydrauliques

### Moteurs de transport vers la nappe

- **Fluage** (caractéristique des évaporites) : expulsion de la saumure sous l'effet de la fermeture progressive des vides souterrains sur le long terme (plusieurs milliers d'années – retenir 10 000 ans pour les terrains de foudroyage)
- **Diffusion moléculaire** : phénomène négligeable devant le transport lié au fluage mais toujours actif après l'arrêt du fluage. C'est un phénomène très lent à faible impact à très long terme (> 10000 ans)

# Etapes successives de l'évolution su site

Nappe d'Alsace



Débit total d'eau entrant par les 15 puits : 0,1 Mm<sup>3</sup>/an

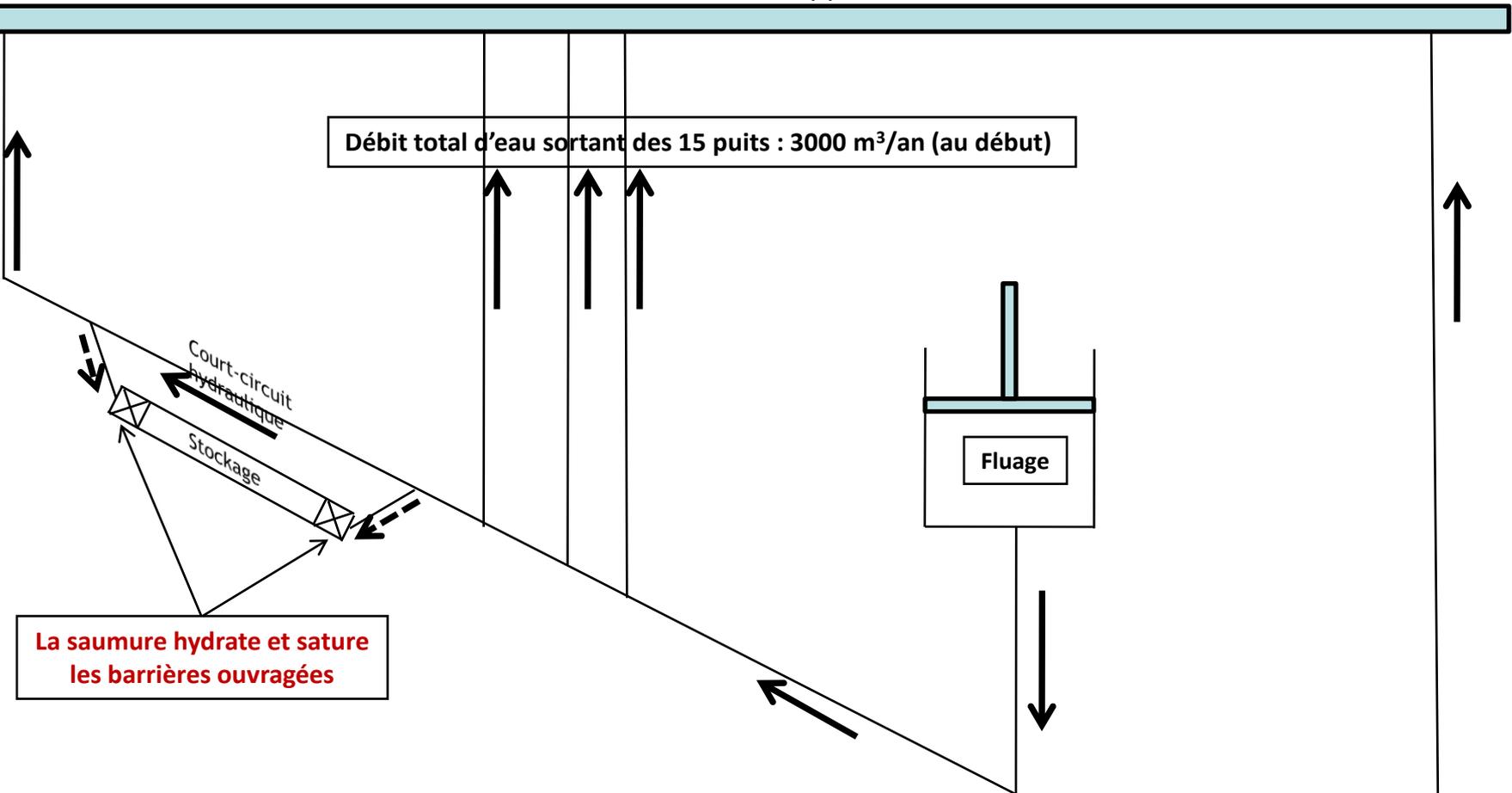
21 barrières ouvragées  
(K : 10<sup>-19</sup> - 10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup>)

Fluage  
Volume des vides miniers actuel : ~ 30 Mm<sup>3</sup>

- Etape 1 :**
- Fermeture des vides miniers par le fluage (vitesse: 0,1% par an avant l'ennoyage, 0,01% par an à la fin de l'ennoyage)
  - Ennoyage des vides miniers
  - Durée de l'ennoyage des vides miniers : ~ 300 ans (~ 30/0,1)

Nappe d'Alsace

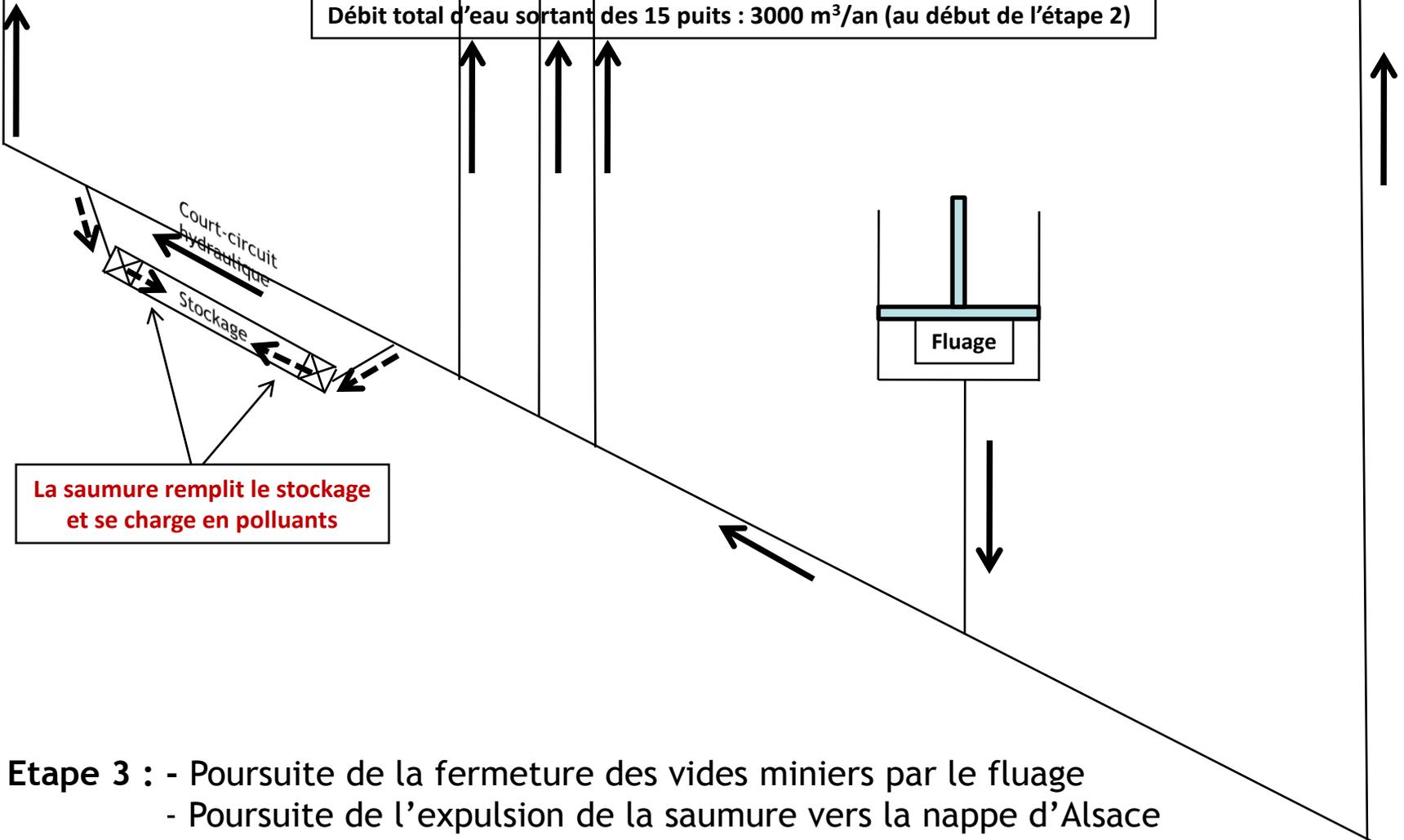
Débit total d'eau sortant des 15 puits : 3000 m<sup>3</sup>/an (au début)



La saumure hydrate et sature les barrières ouvragées

- Etape 2 :
- Envoilage terminé, poursuite de la fermeture des vides miniers par le fluage (vitesse : 0,01% par an)
  - Expulsion de la saumure vers la nappe d'Alsace
  - Durée de la saturation des barrières : quelques centaines d'années

Débit total d'eau sortant des 15 puits : 3000 m<sup>3</sup>/an (au début de l'étape 2)



La saumure remplit le stockage et se charge en polluants

- Etape 3 :
- Poursuite de la fermeture des vides miniers par le fluage
  - Poursuite de l'expulsion de la saumure vers la nappe d'Alsace
  - Durée du remplissage du stockage : quelques milliers d'années

Débit total d'eau sortant des 15 puits : 3000 m<sup>3</sup>/an (au début de l'étape 2)

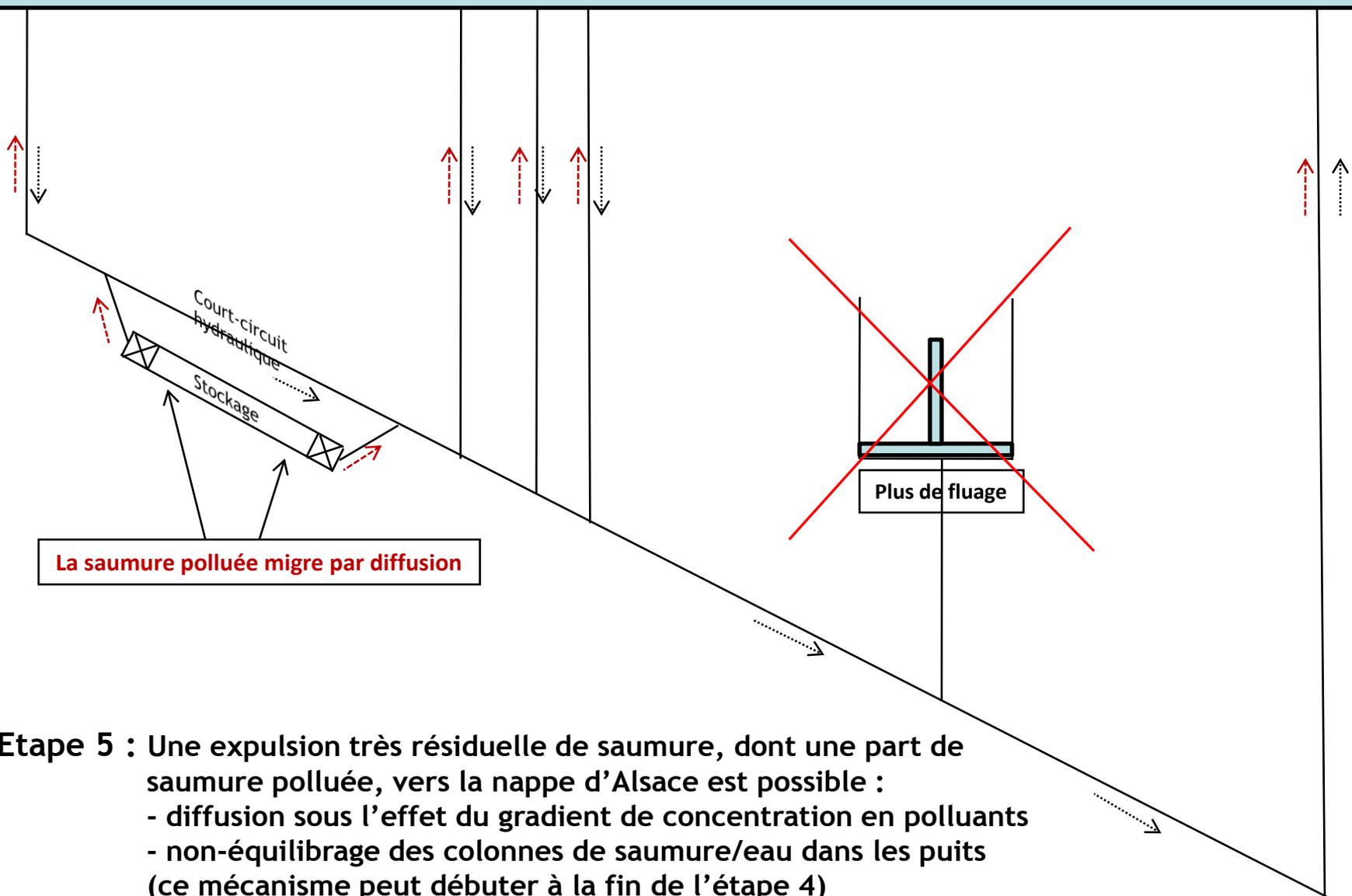
Court-circuit hydraulique

Stockage

Achèvement du fluage

La saumure polluée est expulsée du stockage

- Etape 4 :**
- Achèvement de la fermeture des vides miniers par le fluage
  - Achèvement de l'expulsion de la saumure, dont une part de saumure polluée, vers la nappe d'Alsace
  - Durée d'achèvement de l'expulsion de la saumure : quelques milliers d'années



**Etape 5 :** Une expulsion très résiduelle de saumure, dont une part de saumure polluée, vers la nappe d'Alsace est possible :

- diffusion sous l'effet du gradient de concentration en polluants
- non-équilibre des colonnes de saumure/eau dans les puits (ce mécanisme peut débuter à la fin de l'étape 4)
- Ces deux phénomènes, très lents par rapport aux précédents, ont un impact négligeable sur la nappe

# Facteurs dimensionnants (1/2)

1- En régime transitoire, l'écoulement de la saumure et le transport des polluants sont gouvernés par la perméabilité des barrières et les gradients hydrauliques. La durée de la phase transitoire est alors proportionnelle au ratio  $L^2 / K$

**L** : longueur de la barrière (m)

**K** : perméabilité intrinsèque (en  $m^2$  ;  $1 m^2 = 10^{-7} m/s$ )

2- En régime stationnaire, le processus ne dépend plus de la perméabilité ; il est gouverné par la vitesse de fluage

3 – En cas d'expulsion à long terme de la saumure polluée à travers les barrières, le flux diffusif étant négligeable comparé au flux convectif (la diffusivité moléculaire du mercure dans les argiles est très faible :  $D = 10^{-11} - 10^{-10} m^2/s$ ), la concentration du mercure à la sortie des puits, avant sa dispersion dans la nappe ( $C_s$ ), est donnée par  $C_s = C_0 * F_d$

**C<sub>0</sub>** : Concentration en Hg de la saumure en contact avec les déchets (terme source) en  $kg/m^3$

$$C_0 = M_{Hg} / V_{vd}$$

**M<sub>Hg</sub>** : Masse Hg mobilisable en kg ;      **V<sub>vd</sub>** : Volume de vides des déchets ( $m^3$ )

**F<sub>d</sub>** : facteur de dilution = débit de saumure polluée ( $q_p$  :  $m^3/an$ ) / débit total de saumure ( $Q$  :  $m^3/an$ )

En première approximation :  $q_p = V_{vd} * \varepsilon_s^\circ$  :  $\varepsilon_s^\circ$  : vitesse de fluage du stockage (année<sup>-1</sup>) et

$Q = V_{vt} * \varepsilon_{vt}^\circ$  :  $\varepsilon_{vt}^\circ$  : vitesse de fluage du réservoir minier (année<sup>-1</sup>)

**V<sub>vt</sub>** : Volume des vides au-dessus du stockage (6,2 Mm<sup>3</sup>)

$$C_s = (M_{Hg} / V_{vt}) * (\varepsilon_s^\circ / \varepsilon_{vt}^\circ) \text{ (en } kg/m^3 \text{)}$$

## Facteurs dimensionnants (2/2)

4- Ces éléments suggèrent de retarder autant que possible l'expulsion de la saumure polluée au travers des barrières (idéalement jusqu'au comblement de tous les vides par le fluage, pendant environ 10000 ans), à l'aide des facteurs suivants :

- **Un ratio  $L^2 / K$  des barrières aussi grand que possible permettant :**
  - **Un temps important d'hydratation des barrières (quelques siècles à quelques milliers d'années)**
  - **Un débit de saumure entrant dans le stockage très faible, permettant un temps substantiel de remplissage de l'espace vide des déchets (quelques milliers d'années pour 7000 m<sup>3</sup> de vides)**
- **Le fort contraste entre la résistance hydraulique des barrières et celle des courts-circuits**

5- Un ennoyage très retardé du stockage permet également une meilleure compaction des déchets (la vitesse de fluage assurant la compaction diminue au moins d'un facteur 10 après l'ennoyage) et, de ce fait, une diminution de la vitesse de fluage pour le stockage, en cas d'ennoyage à long terme (les déchets compactés et la saumure s'opposent au fluage des parements). Ce phénomène conduit à une diminution progressive du ratio « vitesse de fluage du stockage / vitesse de fluage du réservoir minier ( $\epsilon^{\circ}_s / \epsilon^{\circ}_{vt}$ ) »

6- Pour une masse de déchets mercuriels de 54 tonnes (initialement estimée à 78 tonnes), le respect du seuil réglementaire pour la concentration de mercure dans la nappe (1 µg/l) implique un ratio  $\epsilon^{\circ}_s / \epsilon^{\circ}_{vt}$  d'au plus 0,1, ce qui nécessite de retarder l'ennoyage du stockage d'un millier d'années (cf. différentes simulations numériques, disposition non considérée dans l'étude préliminaire présentée au Copil du 01/4/2011:

$\epsilon^{\circ}_s / \epsilon^{\circ}_{vt}$  pris égal à 1)

# Facteurs favorables

**A- Des barrières ouvragées à base de bentonite (largement adoptées dans le contexte du stockage de déchets radioactifs) présentent plusieurs propriétés favorables :**

- Une très faible perméabilité : typiquement  $10^{-18}$  à  $10^{-20}$  m<sup>2</sup> ( $10^{-11}$  à  $10^{-13}$  m/s)
- Une aptitude au gonflement lors de leur hydratation (la structure en feuillets à charge négative permet à l'eau de se placer entre feuillets en les écartant) : confinement de la paroi des galeries et diminution de la perméabilité
- Une succion (pression capillaire) très importante pouvant atteindre plusieurs 10 MPa, accompagnée d'une pression d'entrée d'air significative pouvant dépasser quelques MPa (taille de pores nanométrique à micrométrique) : hydratation difficile et très lente
- Un fluage des parements du stockage : amélioration des propriétés de perméabilité et de gonflement des barrières sous l'effet de la compaction progressive
- Une capacité d'adsorption et d'échanges cationiques permettant la rétention de certains éléments polluants (facteur de sécurité difficile à quantifier et donc non pris en compte directement)

**B- Des propriétés favorables du sel :**

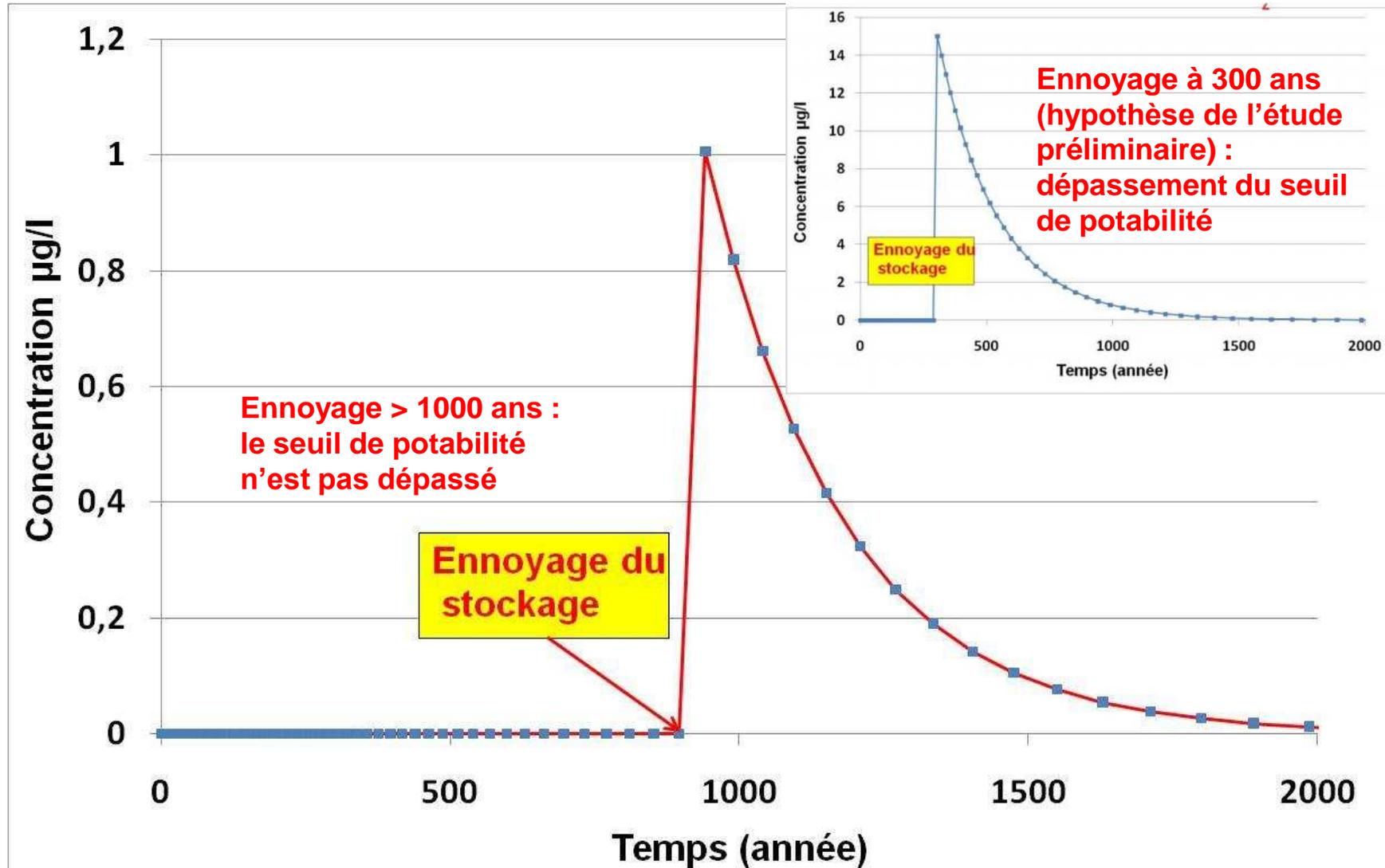
- La cicatrisation (healing) des fissures sous contrainte notamment en présence de la saumure : diminution progressive de la perméabilité de la zone endommagée, en particulier sous confinement
- La possibilité d'une fermeture partielle des galeries devenant étanches: piégeage d'une partie de la saumure

**C- Le comportement mécanique des déchets :** les déchets n'ayant pas nécessairement un comportement de fluide visqueux comme le sel, le fluage du stockage peut être ralenti, voire arrêté dans le temps,

## Points d'attention

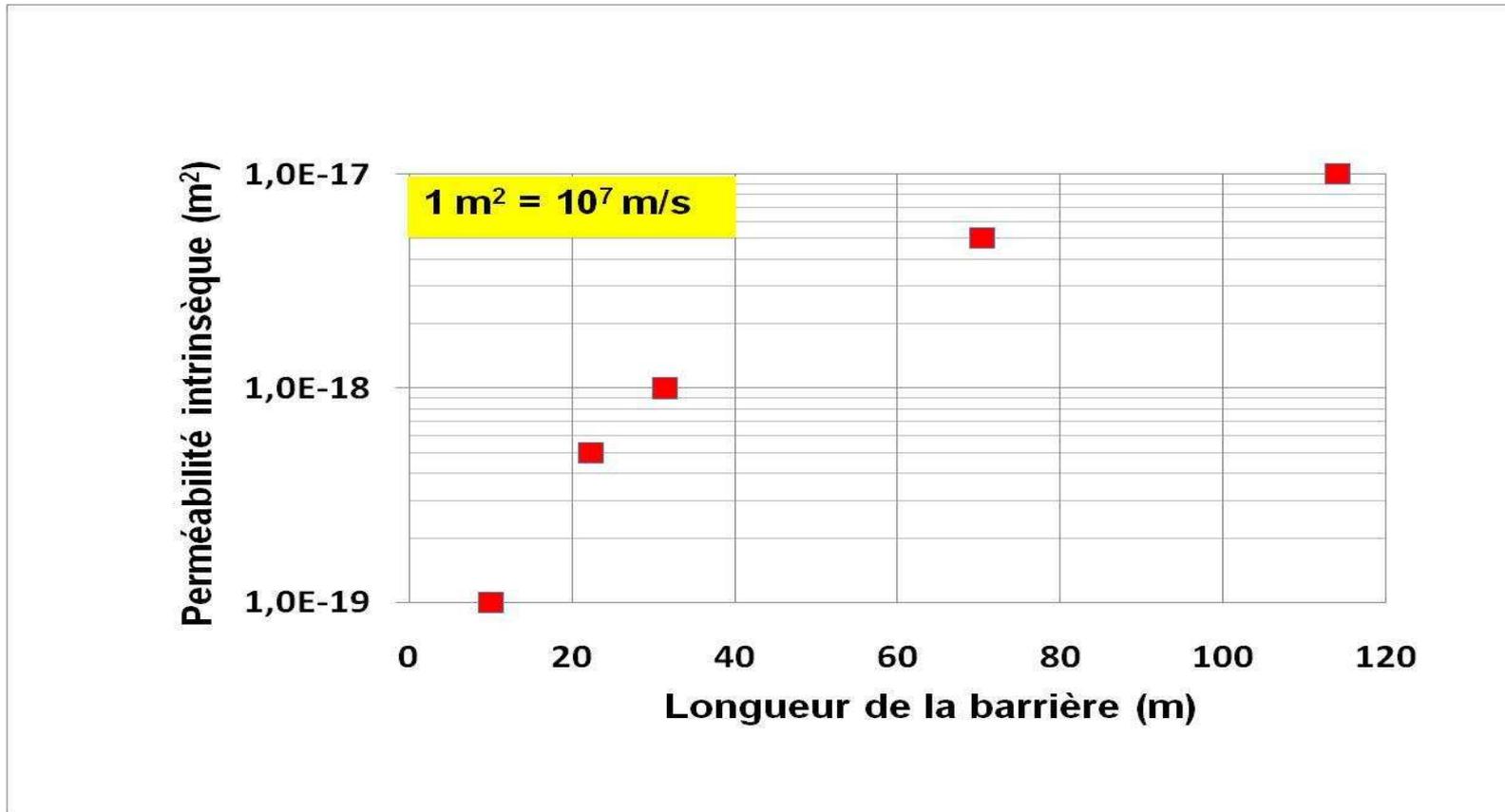
- La zone endommagée (EDZ - Excavation Disturbed Zone) autour des galeries d'accès au stockage : augmentation significative de la perméabilité du sel dans l'EDZ (cf. mesures in situ aux Etats Unis et en Allemagne) : **nécessité d'interrompre cette zone par une surexcavation sans créer de nouvelles fissurations et/ou instabilités mécaniques**
- Diminution des propriétés de la bentonite en présence de la saumure : **les propriétés demeurent néanmoins satisfaisantes**
- Nombre élevé des voies d'accès au stockage : **nécessité de construire 21 barrières en comptant les voies doubles ou triples**

**Diminution dans le temps de la concentration de mercure dans la nappe en fonction du retard d'envoyage du stockage imposé par les barrières ouvragées : le stockage ne doit pas être envoyé avant un millier d'années**



# Principales caractéristiques des barrières ouvragées

(estimées dans l'hypothèse d'un temps de transit de 10000 ans avec une perméabilité de la zone endommagée limitée à celle des barrières)



Nécessité d'un ratio perméabilité (m<sup>2</sup>) / carré de longueur (m) < 10<sup>-21</sup>

# Principales Mesures de Maîtrise des Risques (MMR) proposées

- 1- Isolation des déchets dans toutes les galeries d'accès par la construction de barrières assurant une perméabilité négligeable : à mettre en place après interruption de la zone endommagée par sur-excavation (mesure exigeant des précautions particulières)
- 2- Un ratio perméabilité intrinsèque ( $m^2$ ) / carré de la longueur inférieur ou égal à  $10^{-21}$  pour chacune des barrières
- 3- Des matériaux à base d'argiles gonflantes du type bentonite, à très faible perméabilité en présence de saumure saturée et ayant des propriétés favorables de rétention/adsorption de certains éléments
- 4- Une pression de gonflement de quelques MPa, proche de la pression de saumure au niveau du stockage (environ 6 MPa) assurant le bon confinement des barrières tout en évitant de fortes pressions de gonflement dépassant la contrainte lithostatique (11-12 MPa) et risquant la fracturation de la paroi des galeries
- 5- La mise en place, avant l'ennoyage du niveau de stockage, de deux galeries jouant le rôle de court-circuit hydraulique
- 6- La conception et l'ingénierie de ces courts-circuits et des barrières ouvragées par des entreprises spécialisées en prenant en compte les caractéristiques ci-dessus tout en assurant la stabilité mécanique à très long terme des barrières (tenue mécanique assurée pendant 10000 ans)

## Autres questions posées

- Traitement des deux puits non encore remblayés (Joseph et Else)
- Surveillance du stockage dans le temps
- Déstockage partiel des déchets mercuriels

**FIN DE LA PRÉSENTATION**

# ANNEXES

# Impact à long terme sur la nappe d'Alsace

(hypothèse d'un retard de 1000 ans de l'envoie du stockage)

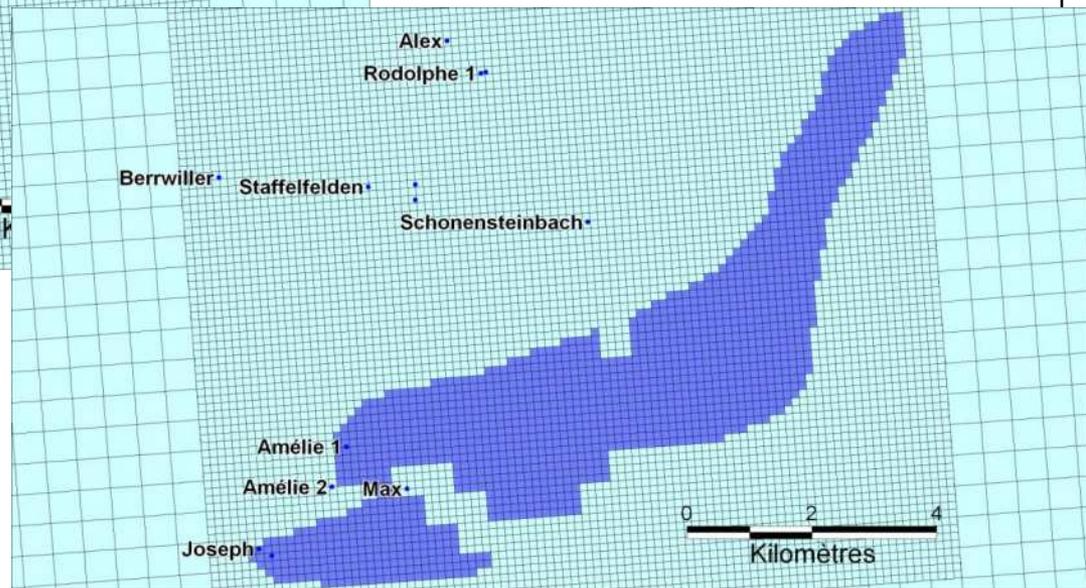
(sortie à l'extrados des puits correspondant au maximum de concentration dans le temps)

(Panaches de 0,1 µg/l de mercure)



Couche supérieure de la nappe

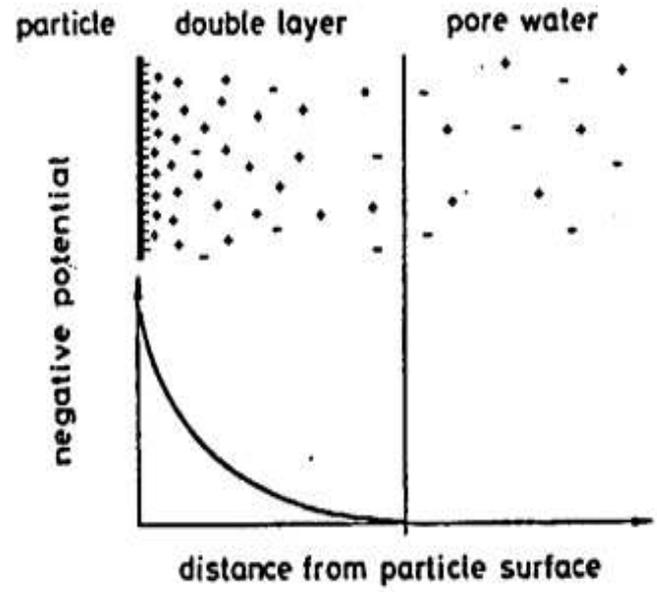
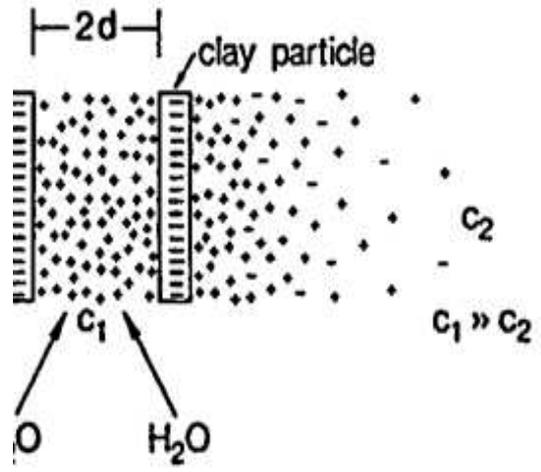
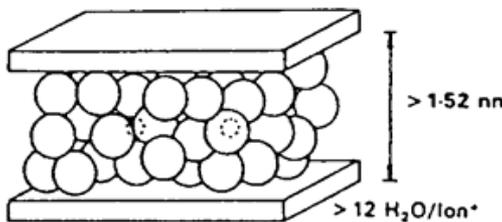
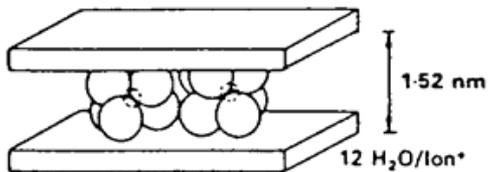
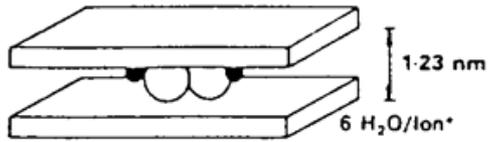
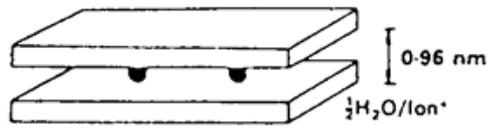
**Aucun dépassement du seuil de potabilité de 1 µg/l de mercure**



Couche inférieure de la nappe

# Structure en double couche des smectites à l'origine des propriétés de capillarité, de gonflement, d'échange cationiques/adsorption et de faible perméabilité

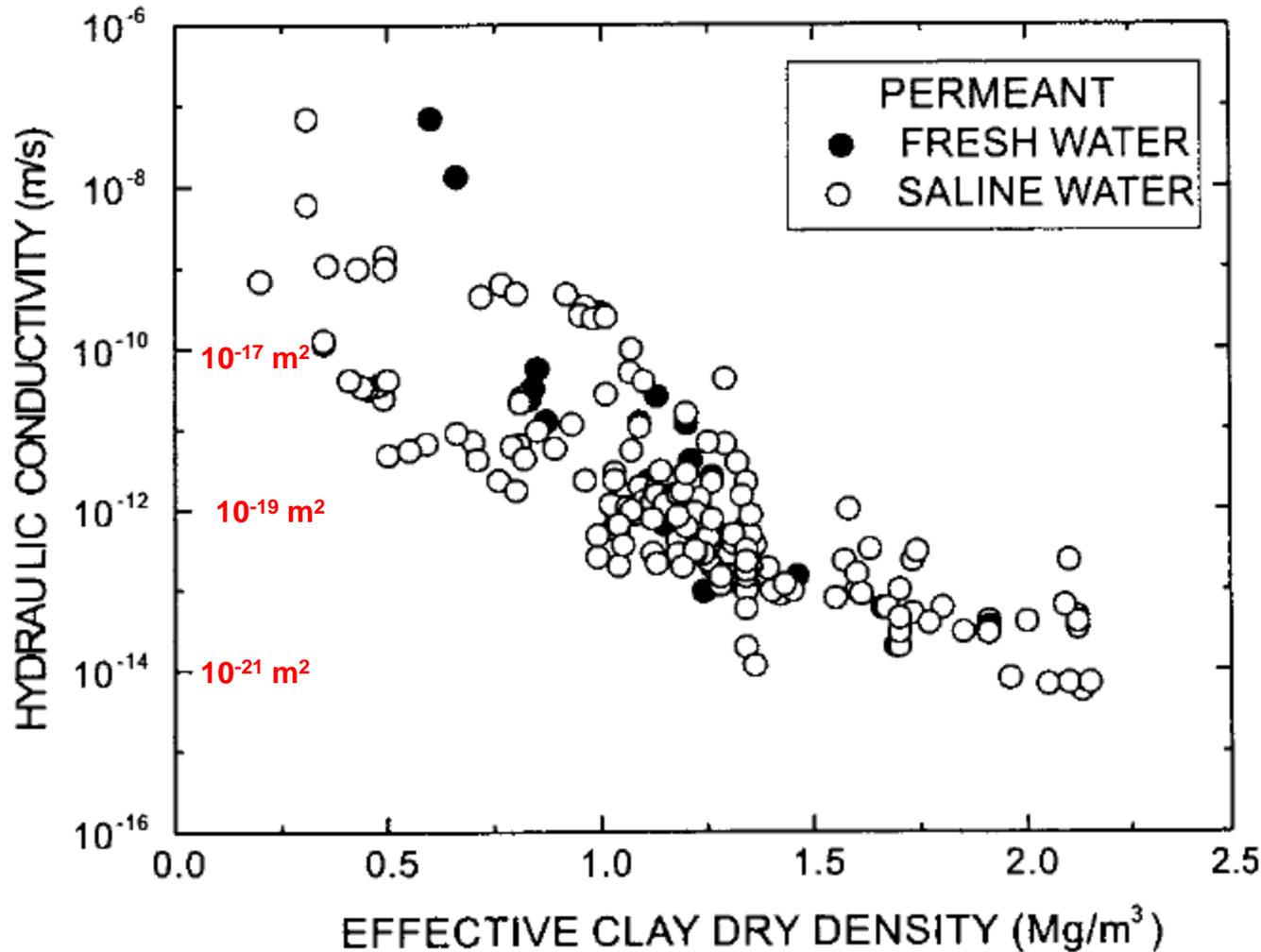
(Madsen et Muller-VonMoos, 1989)



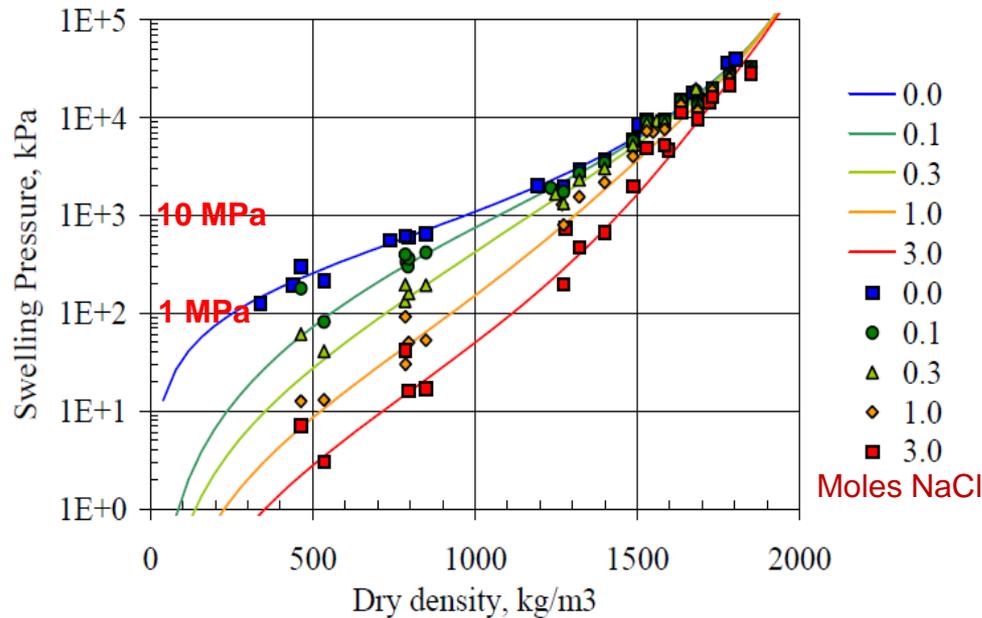
Feuillets d'argiles chargés négativement

Gonflement provoqué par les ions de  $\text{H}_2\text{O}$  entre feuillets

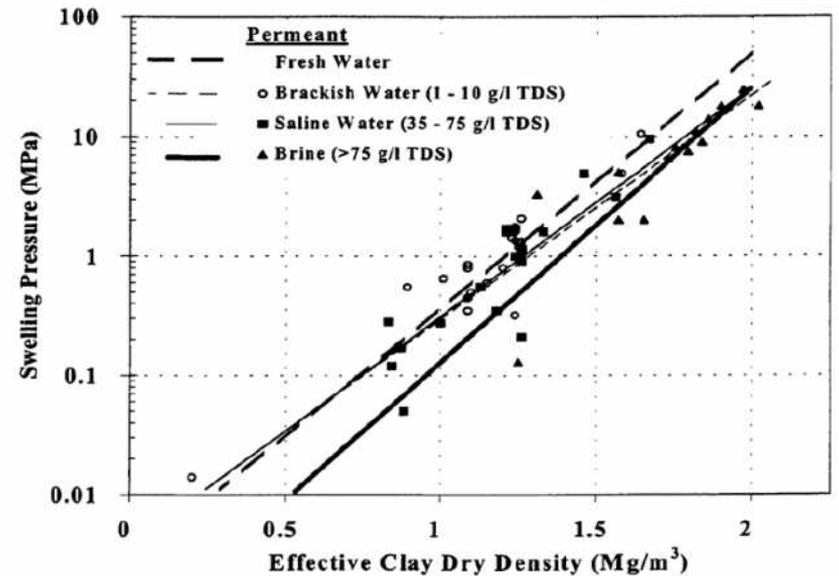
La perméabilité de la bentonite est d'autant plus faible qu'elle est compactée (Dixon et al, 1999)



La pression de gonflement de la bentonite augmente avec la compaction (densité sèche) et diminue avec la salinité de l'eau (concentration en moles de NaCl). Les propriétés demeurent néanmoins satisfaisantes en présence de saumure



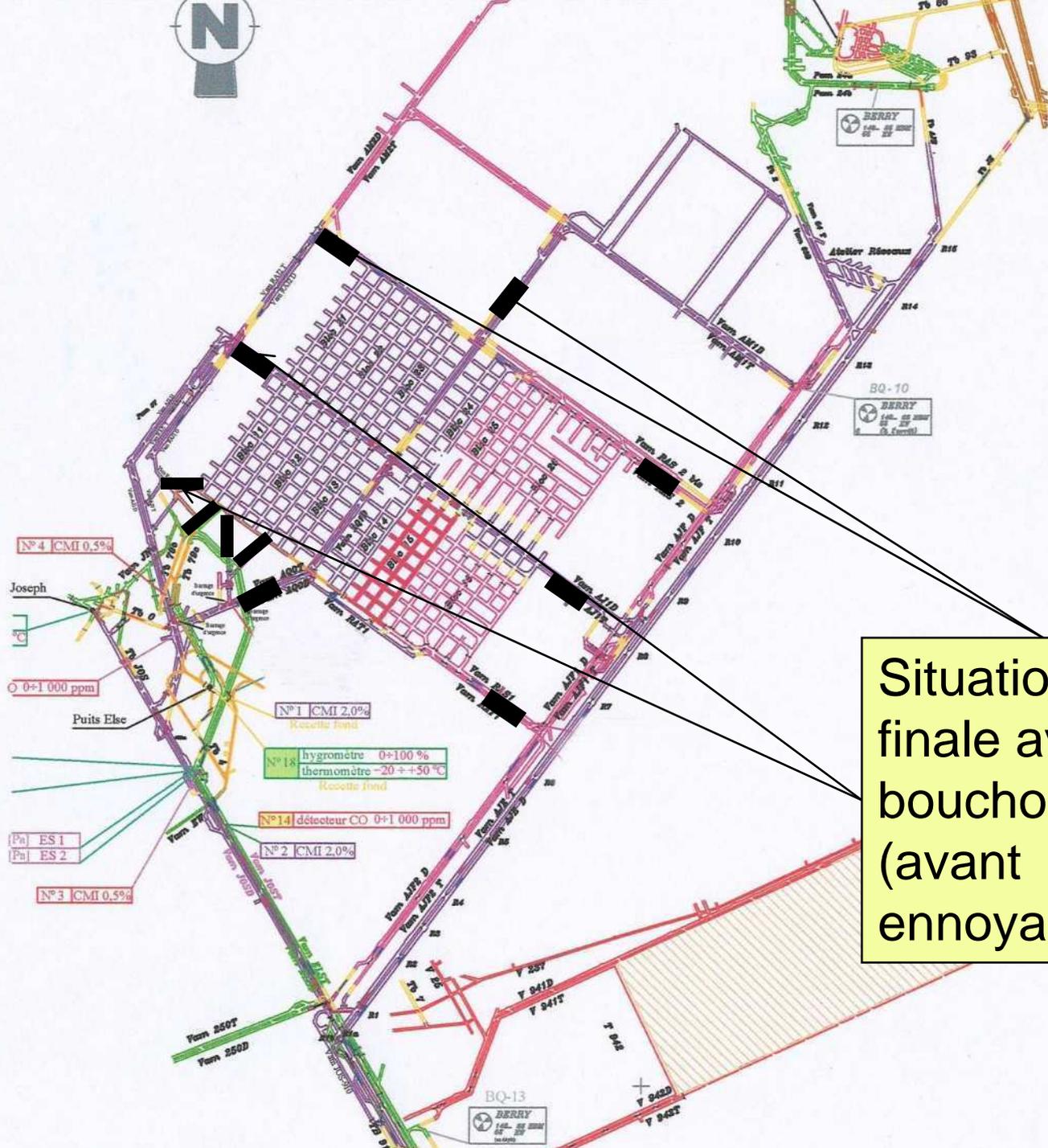
(Karnland et al, 2002)



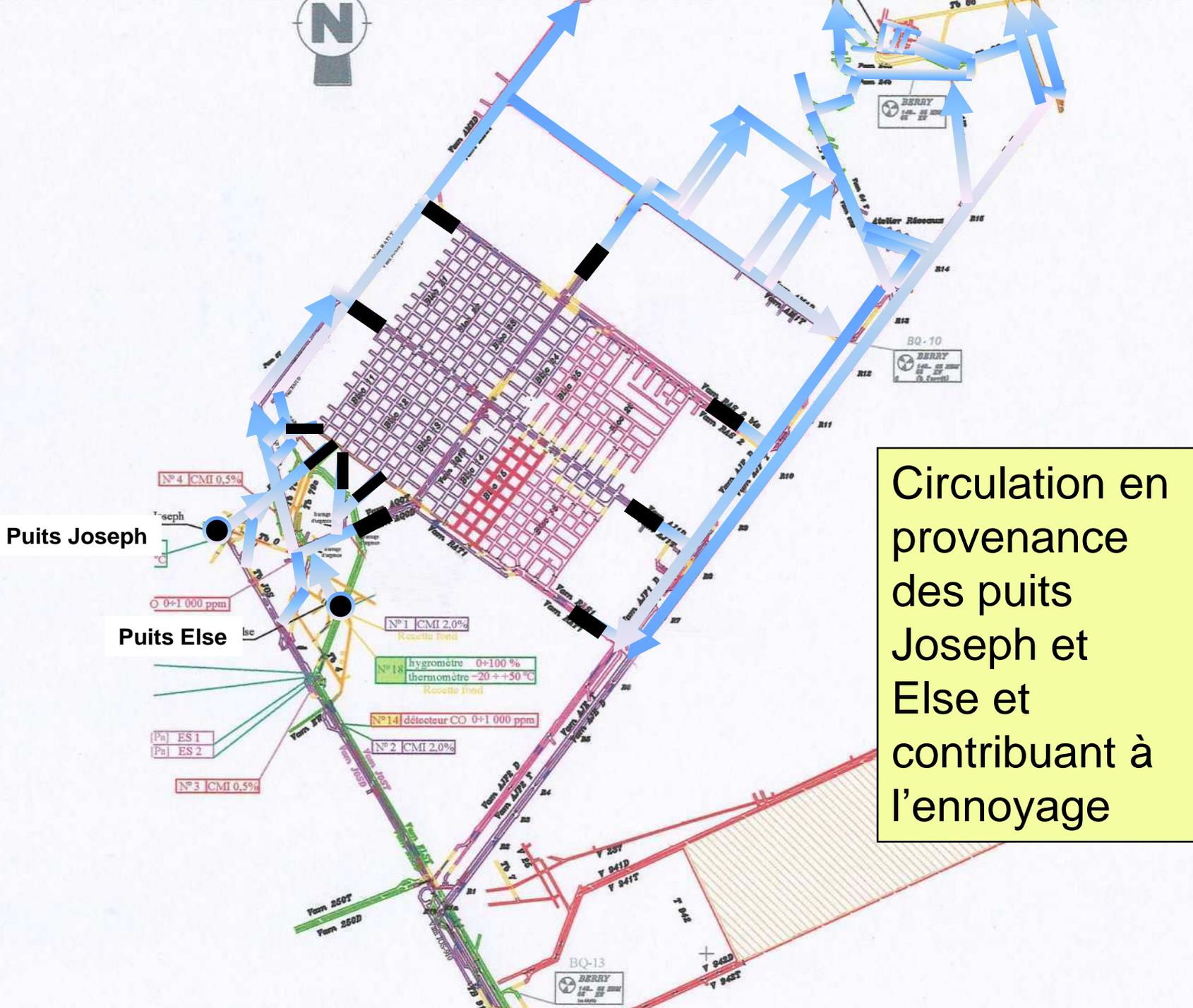
(Dixon, 2000)

# Quantité d'éléments disponibles dans les déchets

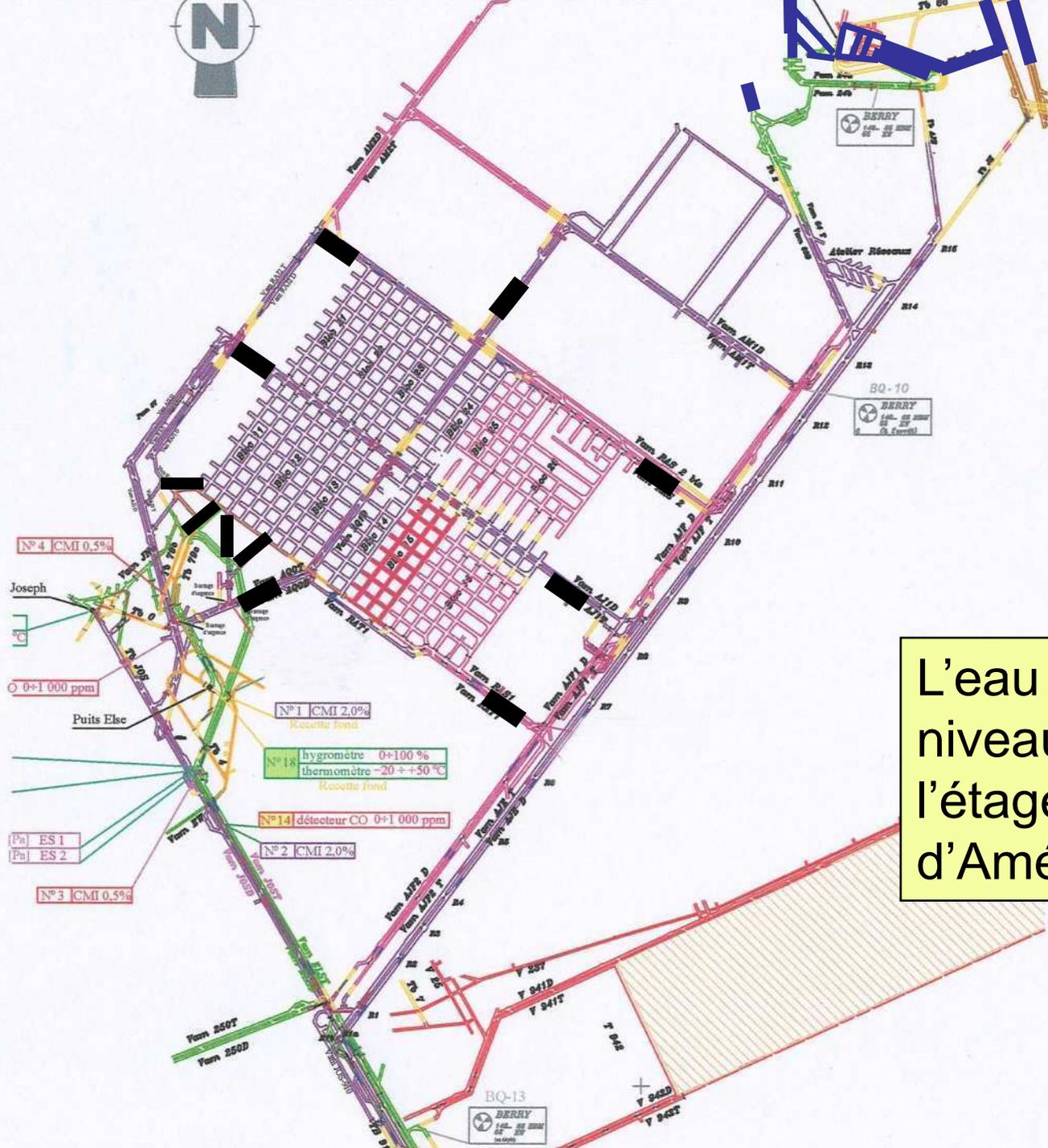
Eléments	Estimation BMG (tonnes)	Estimation INERIS avant levée d'incertitudes (tonnes)	Valeurs INERIS affinées (tonnes)
As	2 566	1 231	1 183
Ba	-	257	202
Cd	138	32	30
Cr total	131	51	50
Cu	115	89	89
Hg	47	78	54
Mo	n.q.	15	11
Ni	71	39	34
Pb	237	231	215
Sb	107	83	79
Se	-	3	1
Zn	351	296	297
Cyanures libres	159	5,00	4,34
<b>Total</b>	<b>3 922</b>	<b>2 410</b>	<b>2 249</b>



Situation finale avec bouchons (avant ennoyage)

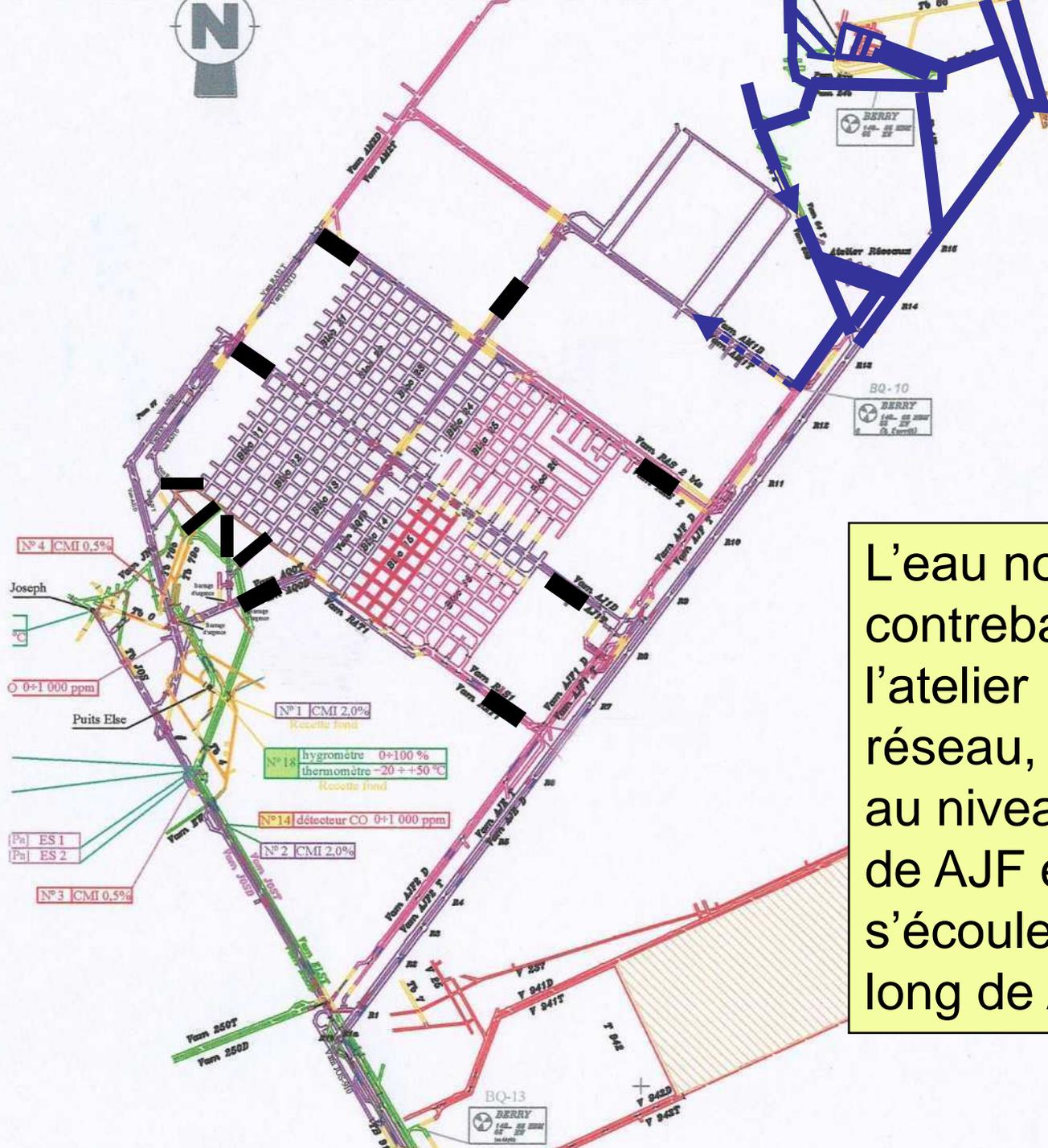


Circulation en provenance des puits Joseph et Else et contribuant à l'ennoyage



L'eau arrive au niveau de l'étage 286 d'Amélie 2





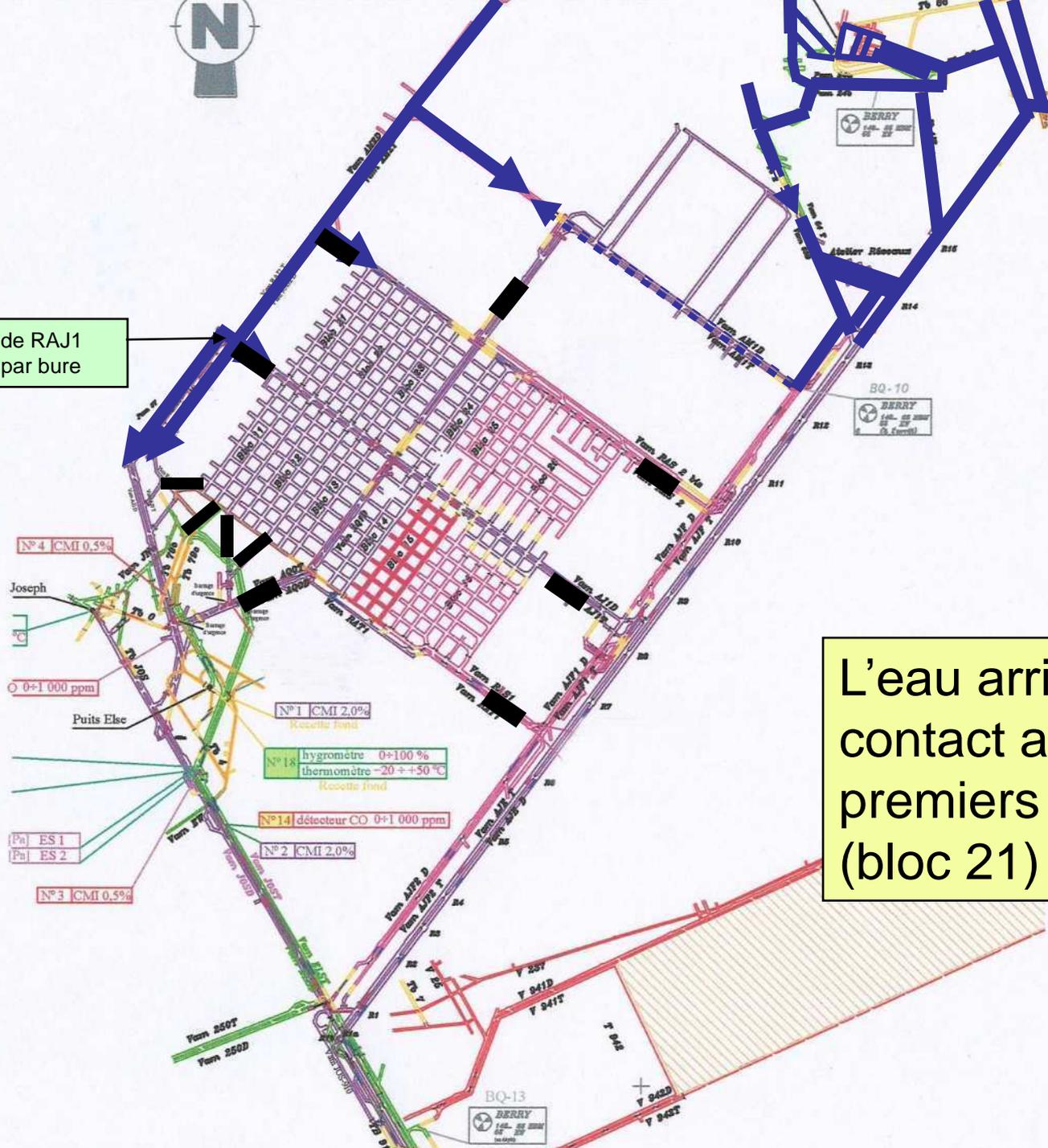
L'eau noie les contrebass de l'atelier réseau, passe au niveau 25 de AJF et s'écoule le long de AM1



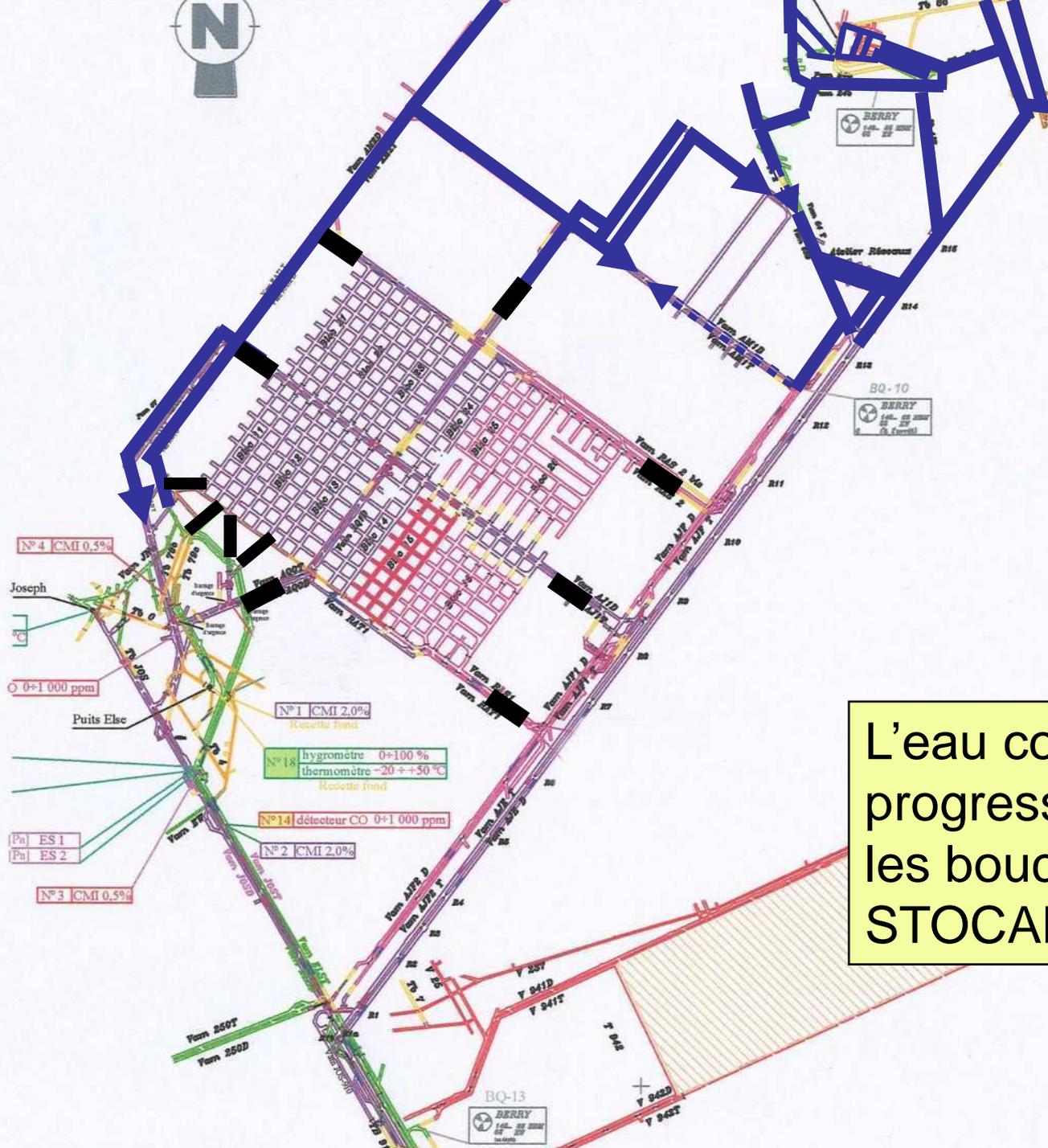
L'eau s'écoule le long de AM1 et noie AM2



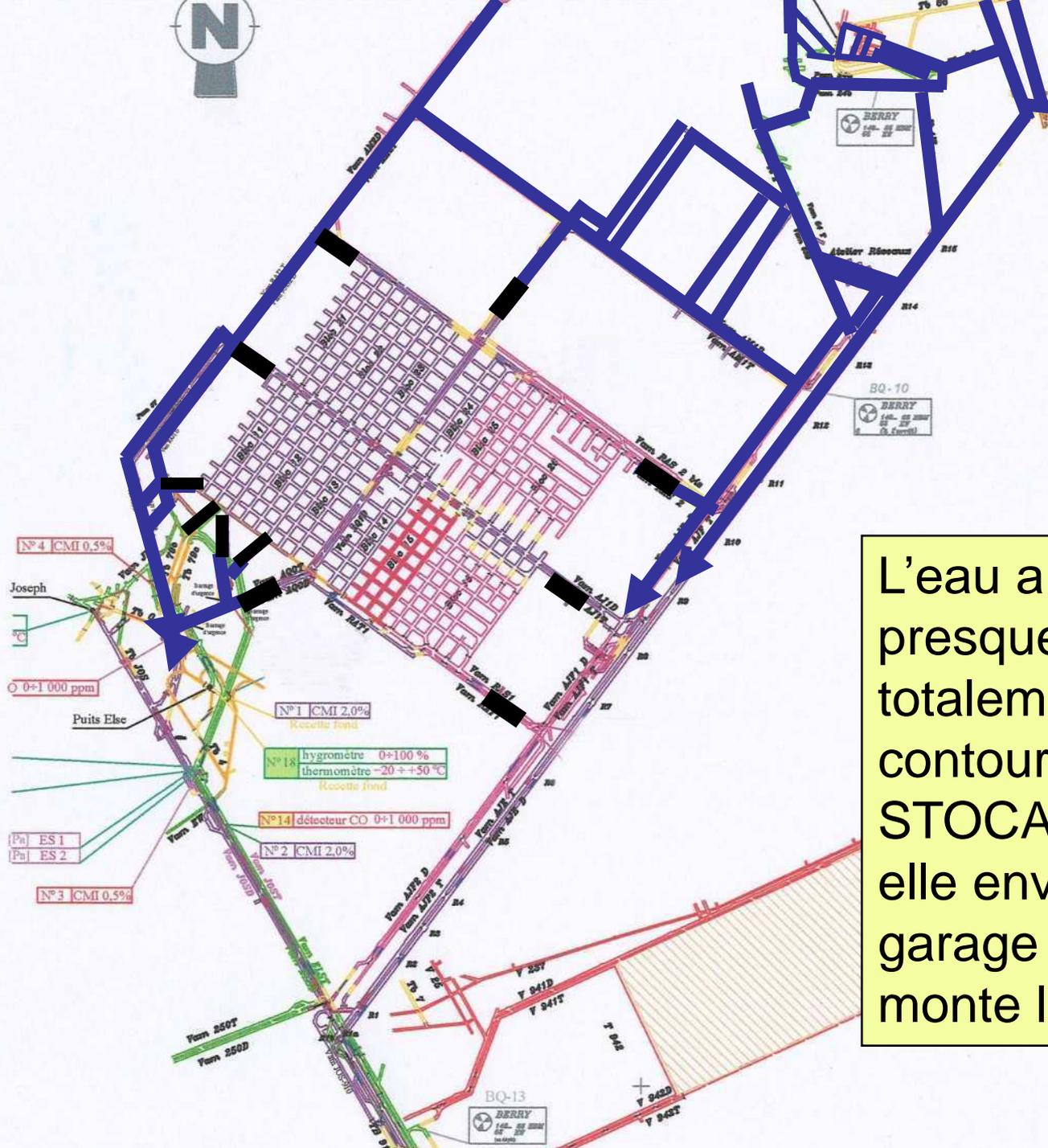
Passage de RAJ1 vers AJ2 par bure



L'eau arrive en contact avec les premiers bouchons (bloc 21)

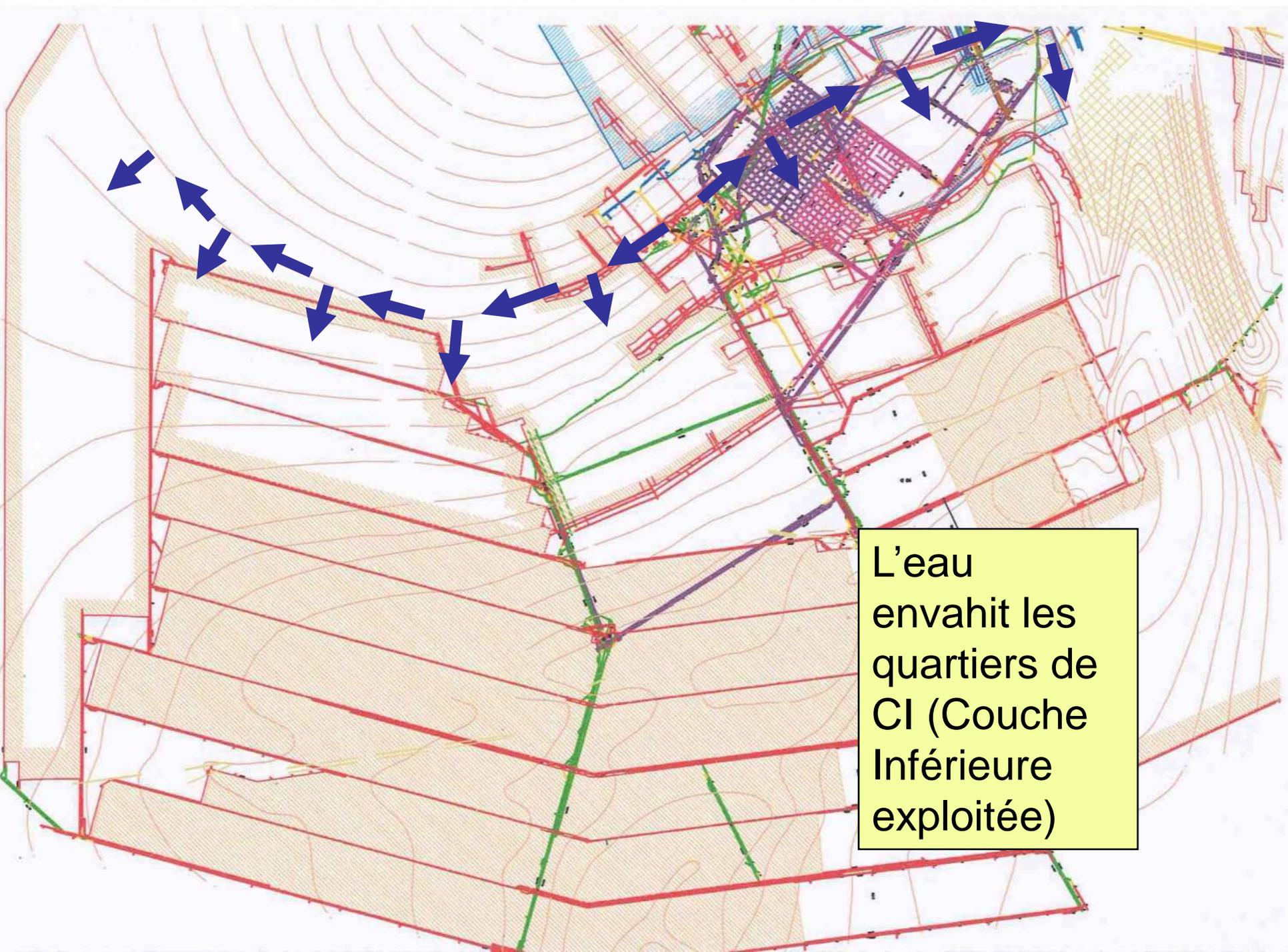


L'eau contourne progressivement les bouchons de STOCAMINE



L'eau a presque totalement contourné STOCAMINE: elle envahit le garage et monte le TB 0



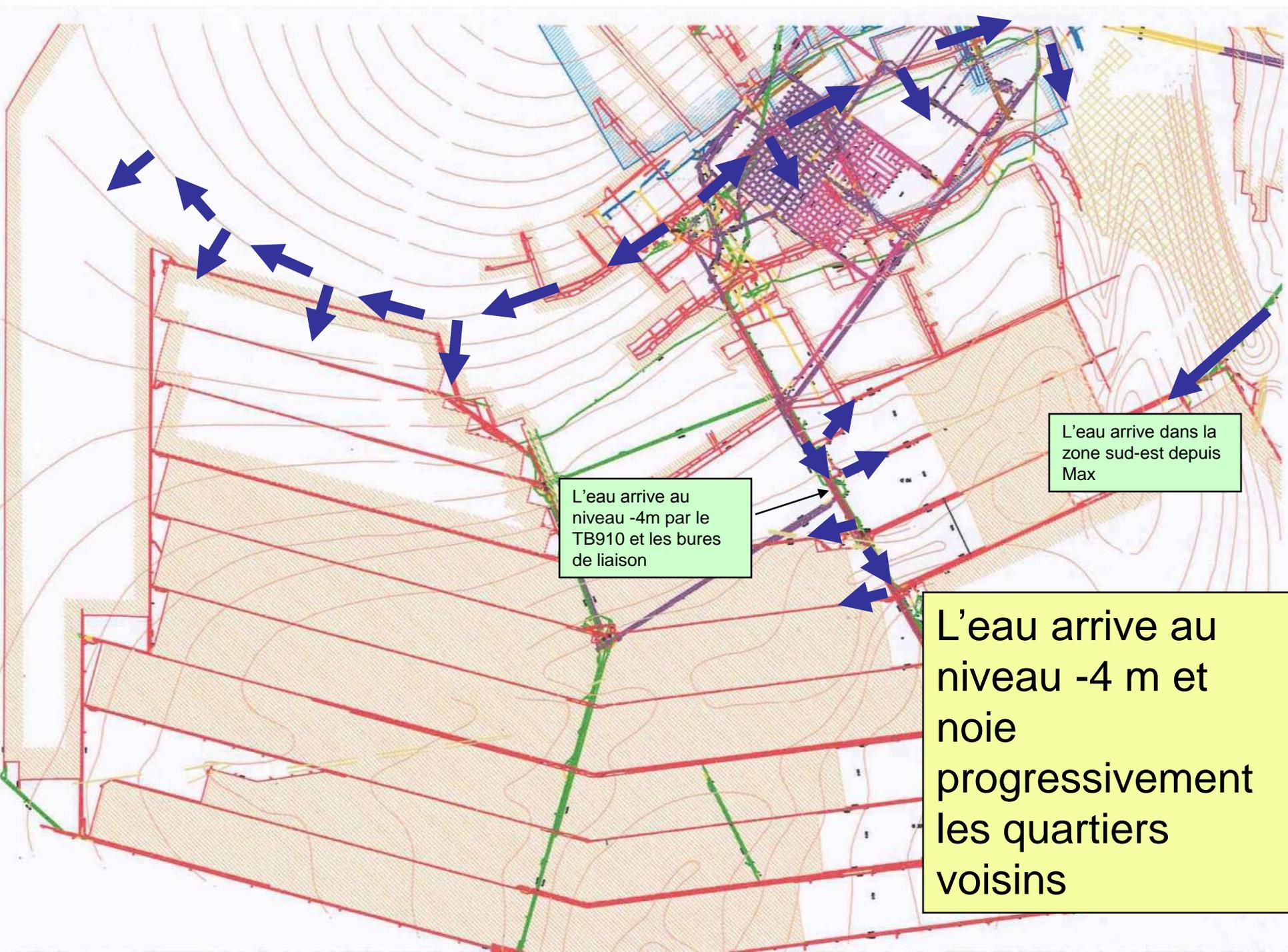


L'eau envahit les quartiers de CI (Couche Inférieure exploitée)



Envoilage de la jonction Joseph-Else depuis les bures de StocaMine

L'eau est arrivée au pied du TB 910



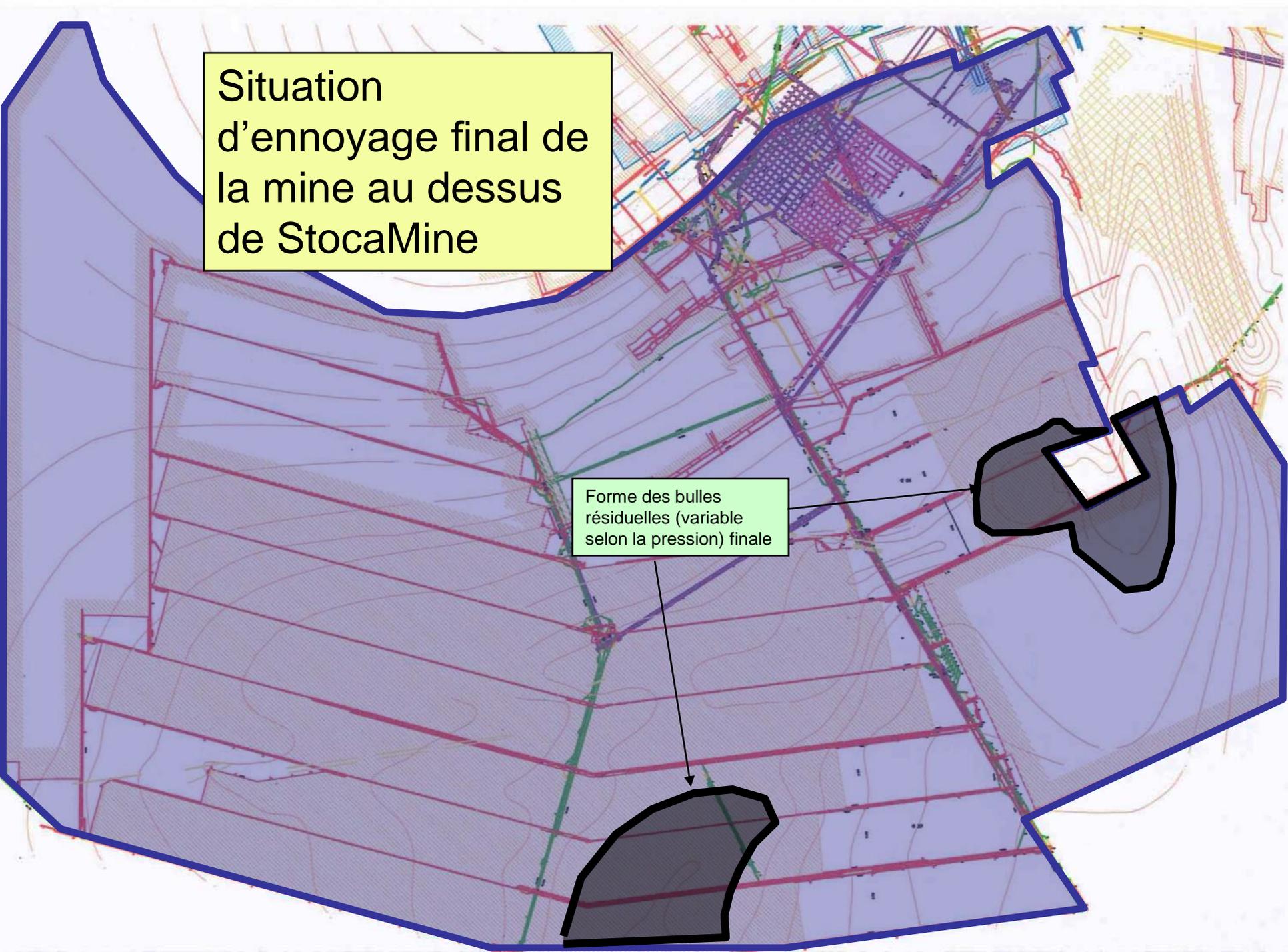
L'eau arrive dans la zone sud-est depuis Max

L'eau arrive au niveau -4m par le TB910 et les bures de liaison

L'eau arrive au niveau -4 m et noie progressivement les quartiers voisins

Situation  
d'ennoyage final de  
la mine au dessus  
de StocaMine

Forme des bulles  
résiduelles (variable  
selon la pression) finale



# Projection verticale (schématique) des travaux miniers

