



CoPil de StocaMine du 9 décembre 2010 à Strasbourg

Synthèse des connaissances sur le comportement hydrogéologique du site de stockage après sa fermeture

(étude réalisée pour le compte de StocaMine)

Philippe GOMBERT

Responsable de l'unité « Eaux Souterraines et Emissions de Gaz »

INERIS
maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Plan de la présentation

→ Liste des principaux documents consultés pour l'étude

1) Contexte géologique et hydrogéologique

2) Délimitation du « bloc-hôte » et vecteurs de transfert potentiels

3) Scénarios d'ennoyage de la mine après sa fermeture

4) Devenir de la mine après son ennoyage

5) Conclusions

Liste des principaux documents consultés pour l'étude

DOCUMENTS EXISTANTS :

- ✓ MDPA (2008). Mémoires techniques des mines de potasse d'Alsace : 1904-2008.
- ✓ COMBES & LEDOUX (1990). Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la mine Amélie. Approche des problèmes liés à l'hydrogéologie.
- ✓ MICA ENVIRONNEMENT (2004). Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de StocaMine.
- ✓ CESAME (2006). Synthèse sur l'ennoyage de la mine de potasse : Secteur Ouest.
- ✓ CESAME (2008). L'ennoyage des mines de potasse. Dossier commun aux secteurs Est et Ouest.

AVIS D'EXPERTS :

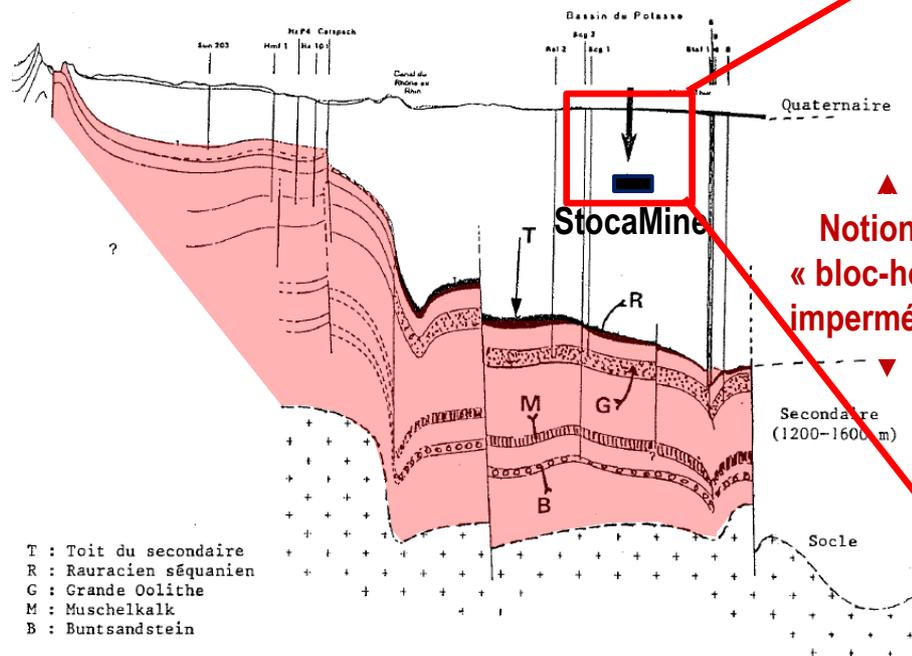
- ✓ F. CORNET (2010). Prise en compte du risque sismique dans le dossier de cessation d'activité du site de stockage souterrain de déchets ultimes dans la mine de potasse de Wittelsheim. 11 p.
- ✓ M. BONNET (2010). Analyse critique des documents traitant du risque d'écoulement spontané de l'eau d'ennoyage de la mine StocaMine. 16 p.
- ✓ B. VENDEVILLE (2010). Avis d'expert relatif au risque de diapirisme ou de montée de sel dans le cadre du stockage de déchets industriels ultimes dans la mine de Wittelsheim. 2 p.

1 - Contexte géologique et hydrogéologique

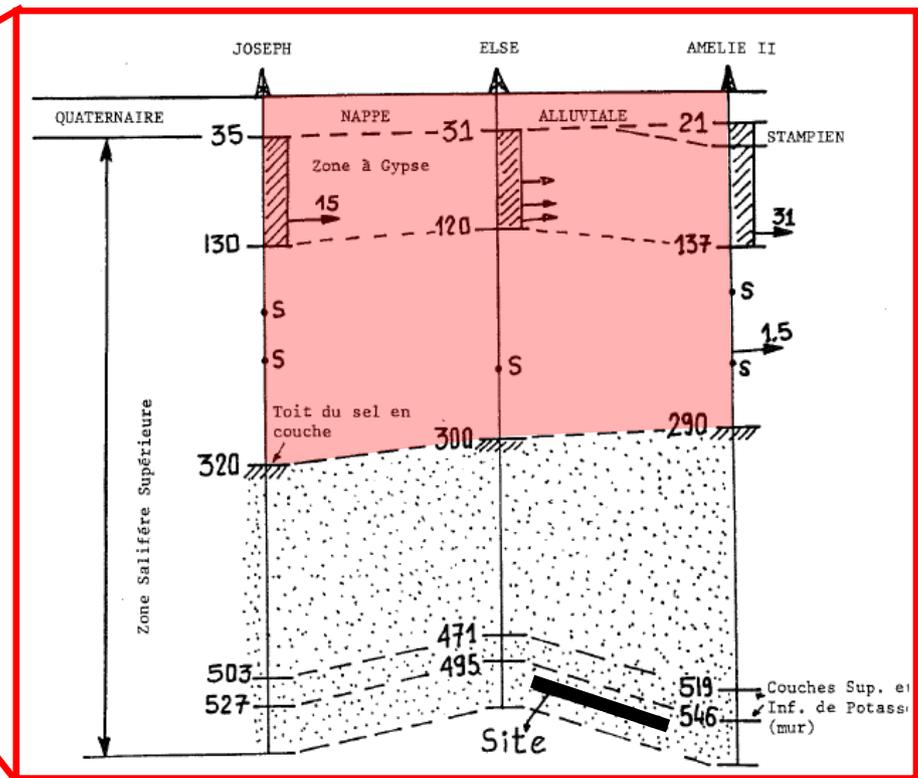
Géologie

Le site de stockage se trouve vers 550 m de profondeur dans la zone salifère du Sannoisien, comprise entre :

- à la base, les terrains du Secondaire vers 1500 m de profondeur,
- au sommet, le toit du sel vers 300 m de profondeur.



▲
Notion de
« bloc-hôte »
impermeable
▼



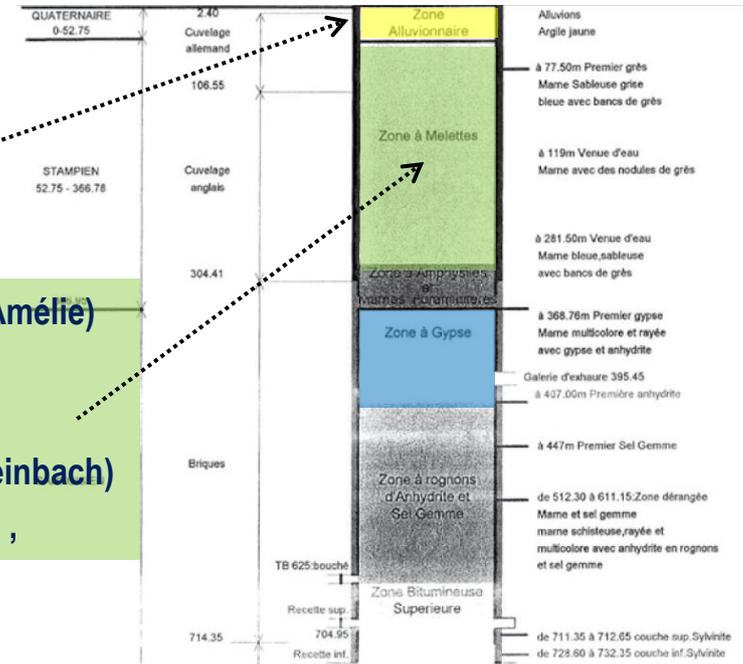
Hydrogéologie

L'eau souterraine est absente du bloc-hôte mais présente :

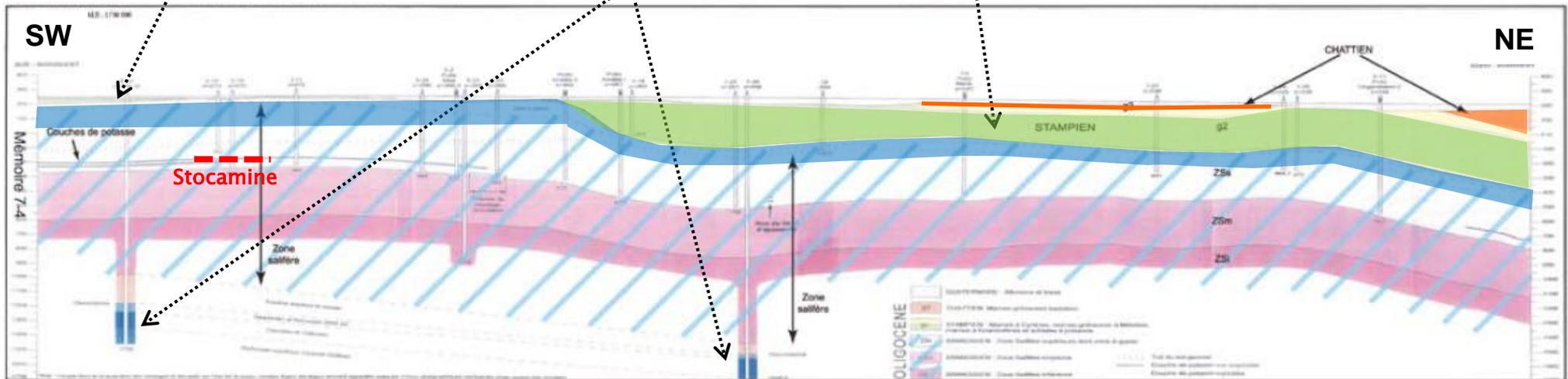
- au-dessus :
 - Quaternaire**
 - Chattien (300 m, Alex)**
 - Stampien**
 - zone à gypse.**

- 0 m (Joseph, Else, Amélie)
- 13 m (Alex)
- 228 m (Rodolphe)
- 411 m (Schoenensteinbach)
- 315 m (Ungersheim),

- au-dessous : aquifères secondaires
(en charge à 1000 m sous le site)

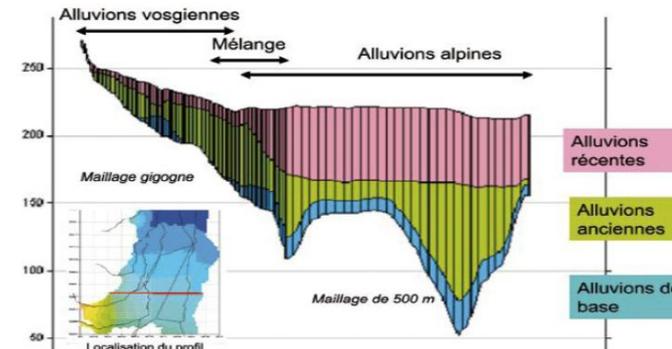
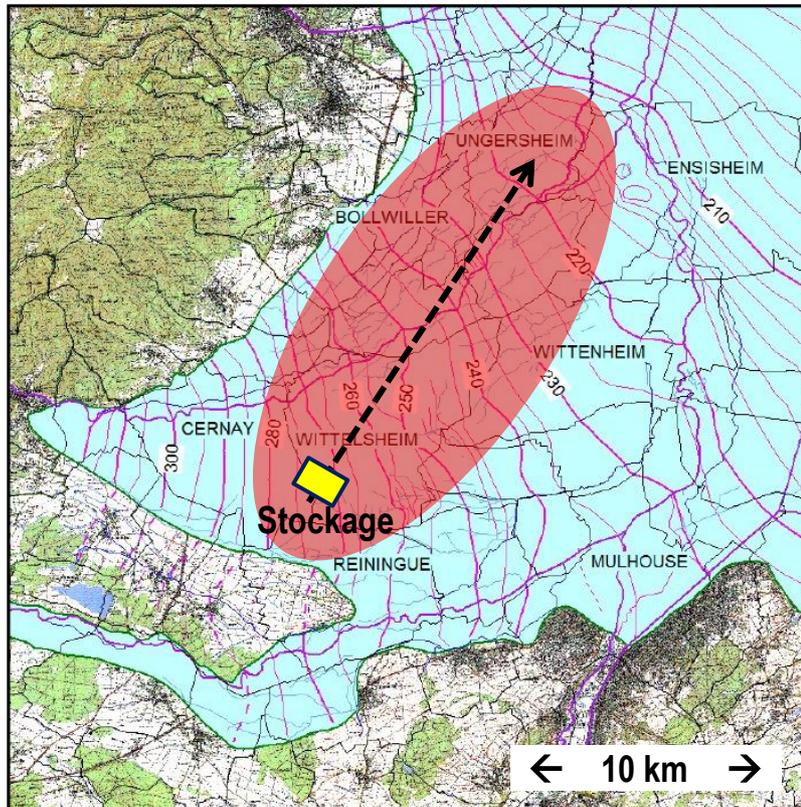


(Stocamine)

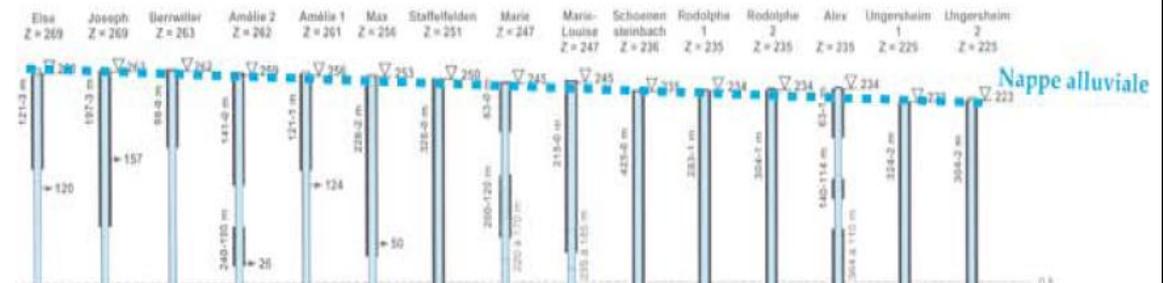


Nappe d'Alsace

- Aquifère d'intérêt régional (AEP, AEA, AEI)
- Milieu récepteur final des éventuels épandements de saumure en surface
- Sables et argiles structurés en 2 couches ± 3^e couche discontinue = paléo-chenaux profonds
- Puissance de 20-30 m (amont) à 40-50 m (aval), gradient de 3‰ du SW vers le NE



SW
270 m NGF ----- Gradient 3‰ -----> NE
225 m NGF



2 - Délimitation du « bloc-hôte » et **vecteurs potentiels de transfert**

Extension verticale

Bloc-hôte = ensemble imperméable de 1200 m d'épaisseur qui renferme le stockage :

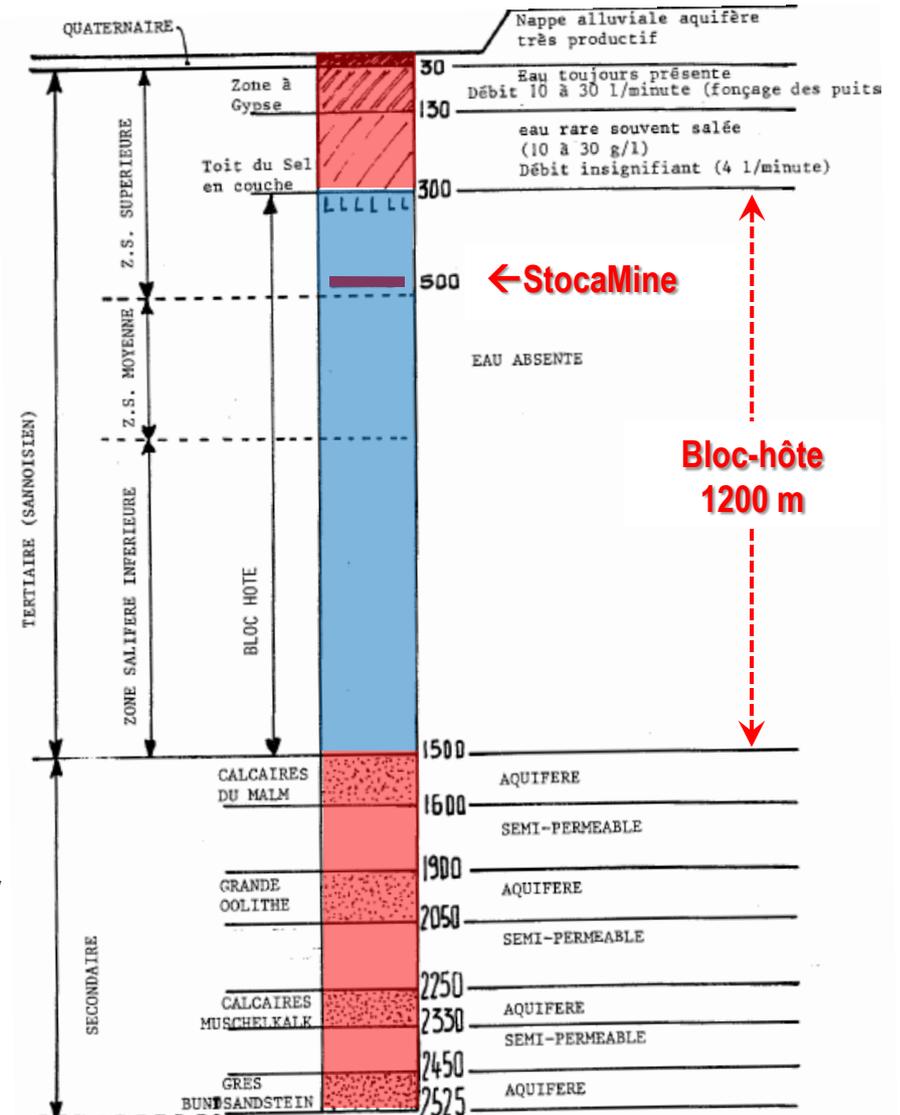
- zone salifère supérieure (marnes, anhydrite et sel)
- zone salifère moyenne (marnes et sel)
- zone salifère inférieure (marnes et sel)



Avis d'expert sur le risque d'apparition de diapir ou de dôme de sel au sein du bloc-hôte ou à sa proximité immédiate (Bruno Vendeville, Professeur à Lille I)

→ Etude antérieure par Combes & Ledoux (1990) :
 - risque négligeable du fait de la faible épaisseur de sel (cf. régularité des couches)

→ Confirmation de l'absence de risque du fait :
 - d'une épaisseur trop faible de sel
 - d'une épaisseur trop forte de couverture.



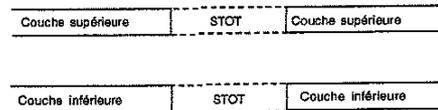
Extension latérale

1) Flexure isolant les secteurs Est et Ouest (Stocamine)

2) Stot de 20 à 50 m de largeur entre les mines Amélie et Marie-Louise

Hypothèse 1 :

le stot existe encore et joue un rôle étanche

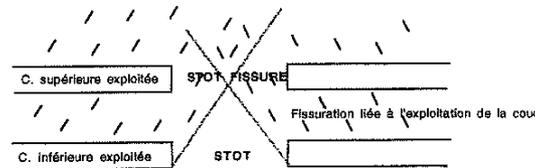


Epanchement confiné à la mine Amélie :

- 5 puits concernés
- 90 Mm³ de vides créés lors de l'exploitation

Hypothèse 2 :

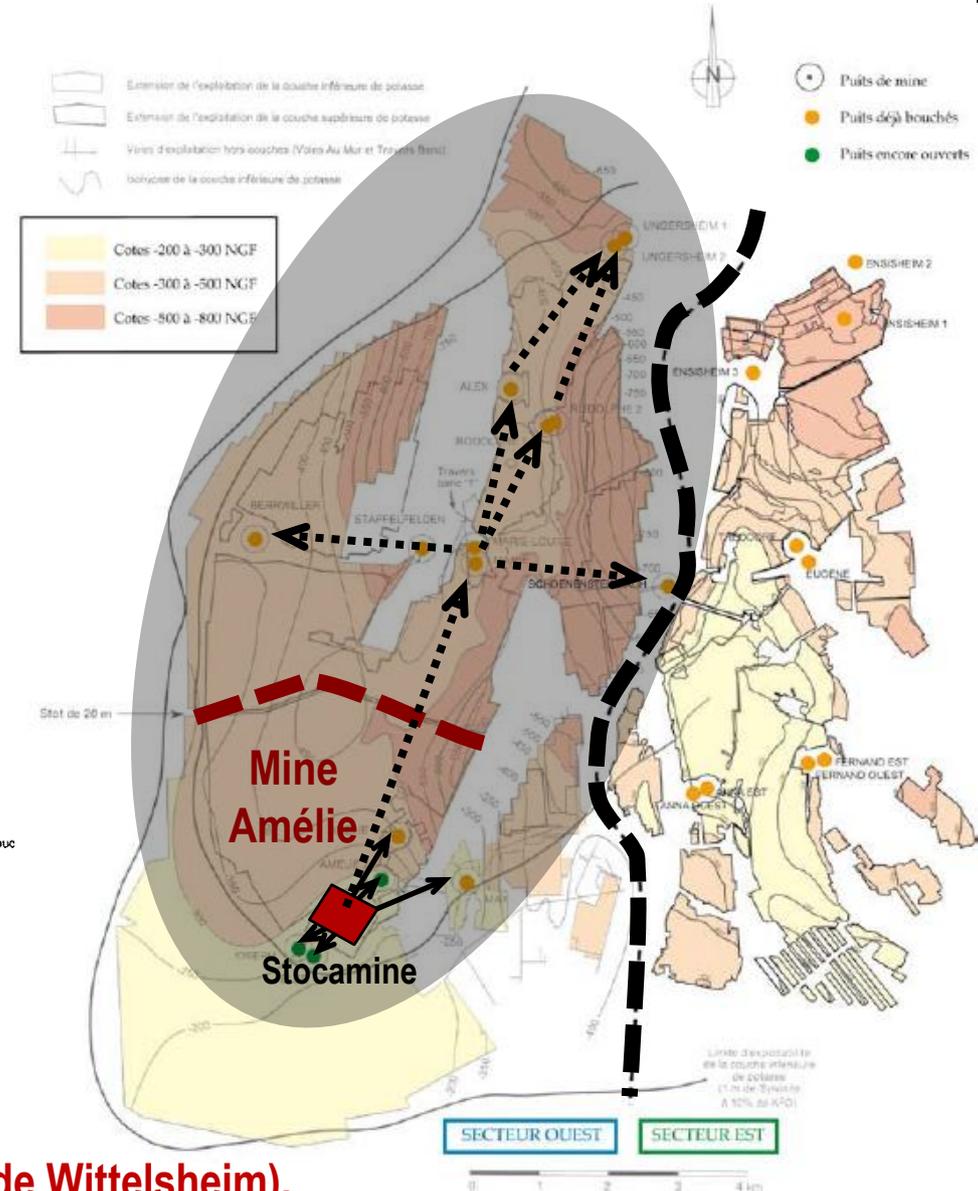
le stot n'existe plus ou ne joue de rôle d'étanchéité



Epanchement dans tout le secteur Ouest :

- 15 puits concernés
- 200 Mm³ de vides créés lors de l'exploitation

➔ Raisonnement présenté : secteur ouest seul (bassin de Wittelsheim).



Vecteurs potentiels de transfert vers l'extérieur

1) Vecteurs de transfert naturels :

- à travers le recouvrement sain (BMG, 2004) :

- ◆ *Perméabilité du sel : 10^{-21} à 10^{-19} m^2 ($< 10^{-12} \text{ m/s}$)*
- ◆ *Percolation ascendante en 100 000 000 ans*

- par le biais des failles :

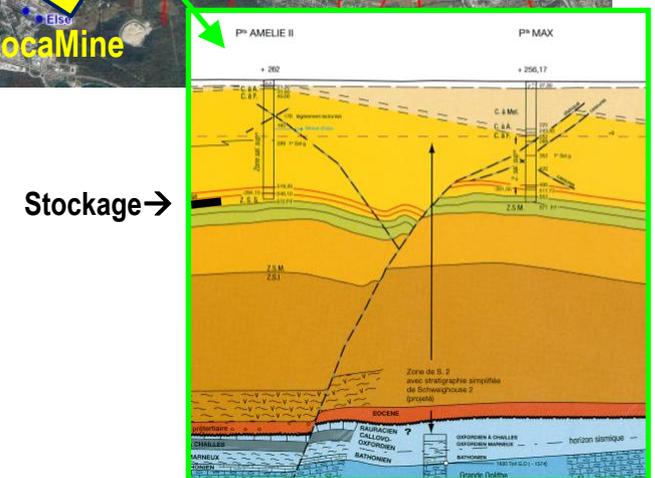
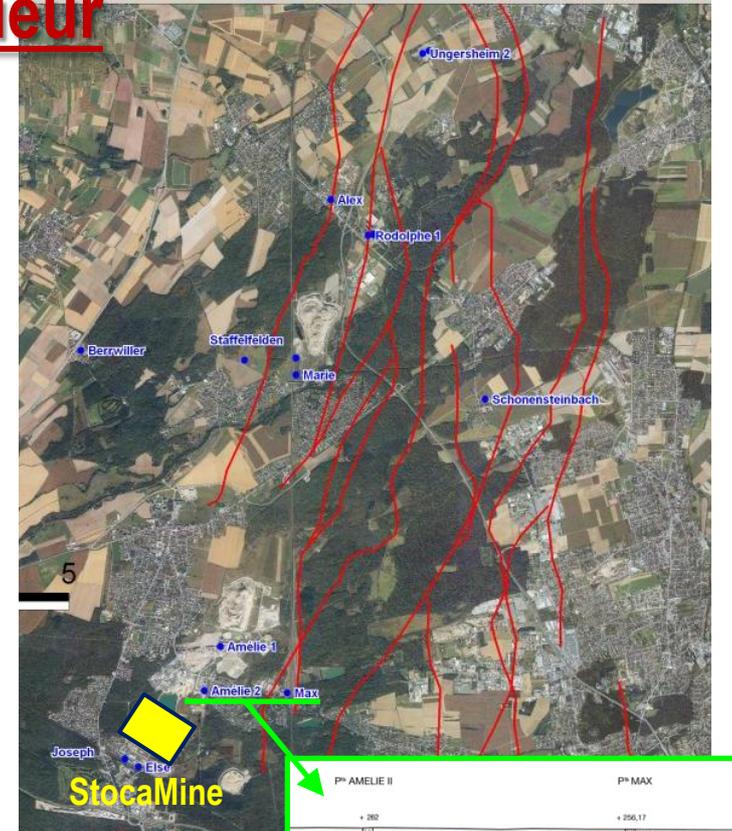
- ◆ *Pas d'écoulement d'eau dans les failles au sein du bloc-hôte (constatations MDP)*
- ◆ *Le bassin minier ∈ zone tectonique mais sans extension mesurable (IPGS, 1997)*



Avis d'expert (F. CORNET, IPGS, 2010) :

- *confirmation de l'étude antérieure*
- *séisme de 6,5 (Bâle, 1356) possible sur 1000 ans*
- *impact difficile à prévoir sur les failles (tectonique) et fissures (mine)*

→ *Estimation en cours du débit en surface en cas de rejeu tectonique d'une faille majeure NE-SW passant près de Stocamine.*



Vecteurs de transfert vers l'extérieur

2) Vecteurs de transfert anthropiques :

- à travers le recouvrement altéré (MICA):

Pas de rupture en surface mais affaissement souple

Perméabilité accrue $\sim 10^{-15} \text{ m}^2$ (10^{-8} m/s) sur 20 à 60 m

- par le biais des puits (INERIS, 2001) :

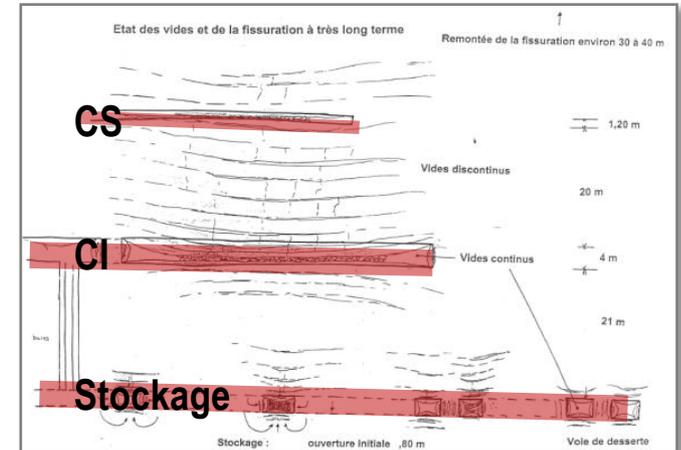
Perméabilité équivalente du bouchon : $6 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (voir plus loin)

- par le biais des sondages (MDPA) :

Parmi les 207 sondages réalisés (dont 113 avant 1913), les travaux miniers en ont recoupé 43 dont 5 ont présenté des suintements d'eau ou des coulées de boue



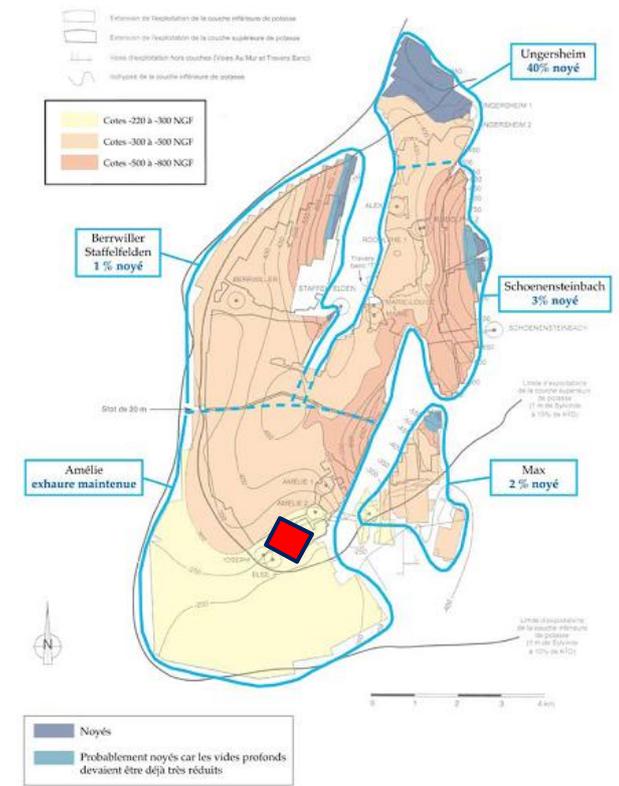
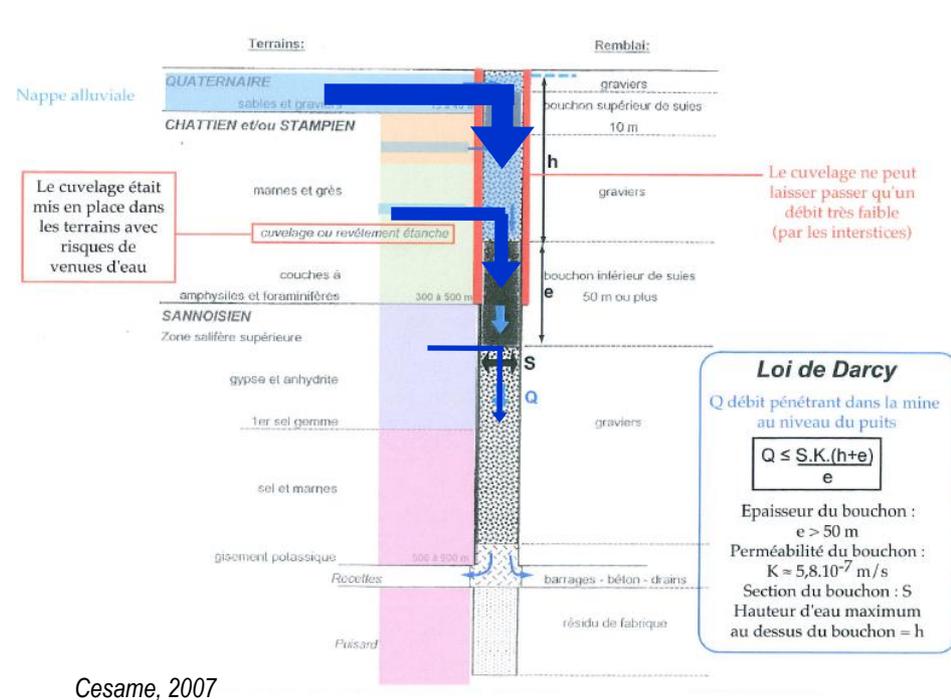
Risque jugé faible (âge et petit \varnothing) comparé aux fuites par les puits.



3 - Scénarios d'ennoyage de la mine **après fermeture**

Principe de l'ennoyage de la mine

Pénétration d'eau par les puits remblayés → ennoyage actuellement estimé à ~5% (MDPA, CESAME)
Teneur en tritium des eaux profondes en 1981-1985 : part significative d'eau de moins de 30 ans (MICA)



Salinité de l'eau d'ennoyage (MDPA, CESAME) :

- nappe alluviale : eau douce (< 1 g/l)
- formations sus-jacentes au bloc hôte : eau saumâtre (Chattien : 30 g/l, Stampien : 10 à 70 g/l)

Salinité de l'eau parvenant dans la formation salifère (MDPA) : 120-260 g/l

Estimation du débit d'envoyage par les puits

Comparaison des débits calculés et observés sur les derniers puits colmatés (données MDPA)

Débit (m ³ /mois)	Débit au cours du fonçage	Débit d'exhaure pendant l'exploitation	Débit actuel en base de puits	Débit calculé par la loi de Darcy
Amélie 1	302	90	126	31
Amélie 2	1 944	240	96	46
Max	8 640	300	24	28
Total	10 886	630	246	105

Débit de référence

« Débit Darcy » recalculé sur la base des mesures récentes sur les puits Max et Amélie

↑
Auteurs
antérieurs
↓

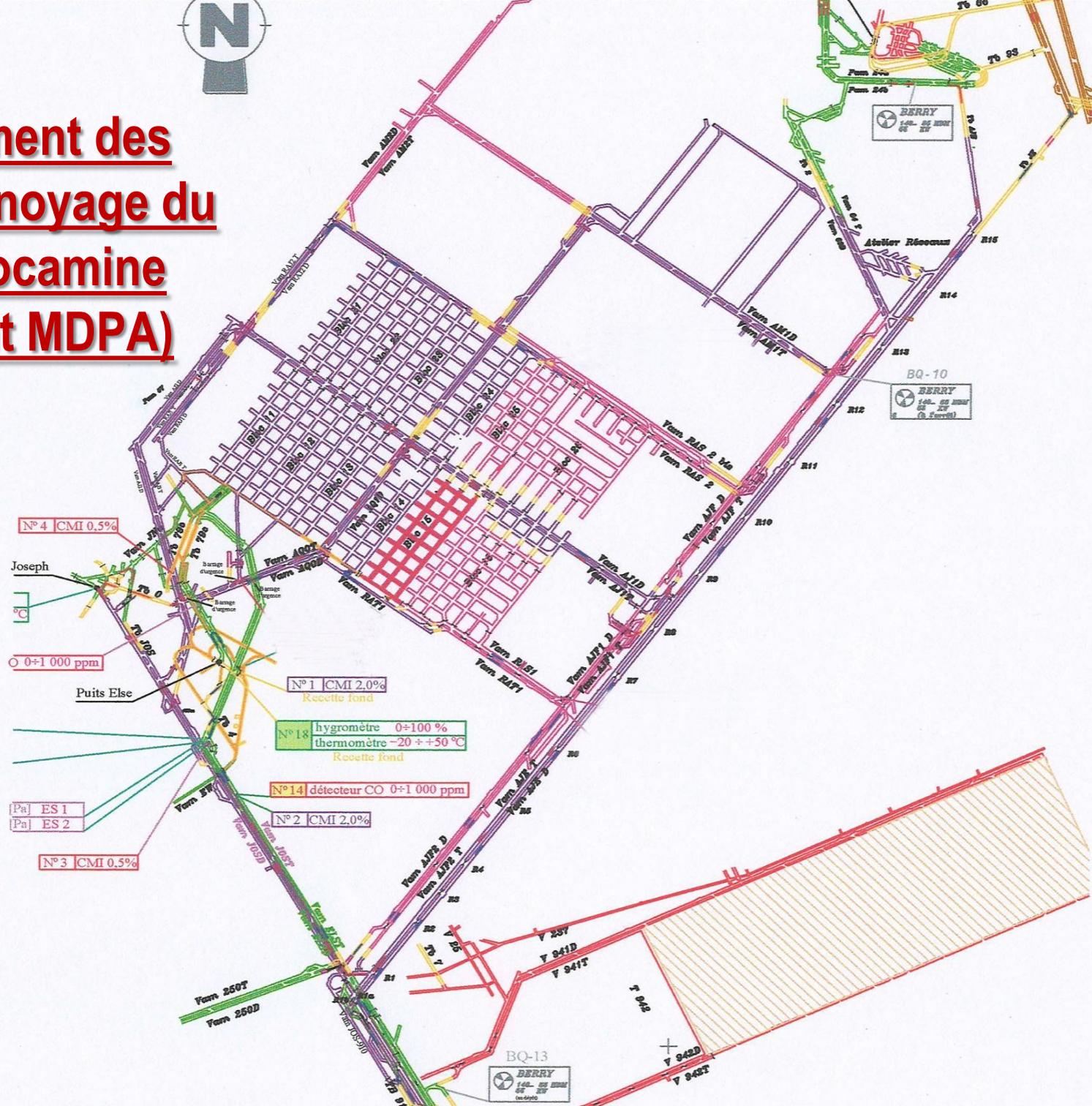
Estimation des débits potentiels d'envoyage (hypothèses INERIS)

Hypothèse	Haute	-	Moyenne	Basse
Débit (m ³ /an)	Débit maximum*	(Débit d'exhaure)	Débit de référence	Débit de Darcy
Secteur Ouest	105 000	(48 000 – 58 000**)	58 000	22 000
Mine Amélie	9 800	(7 700)	5 100	1 800

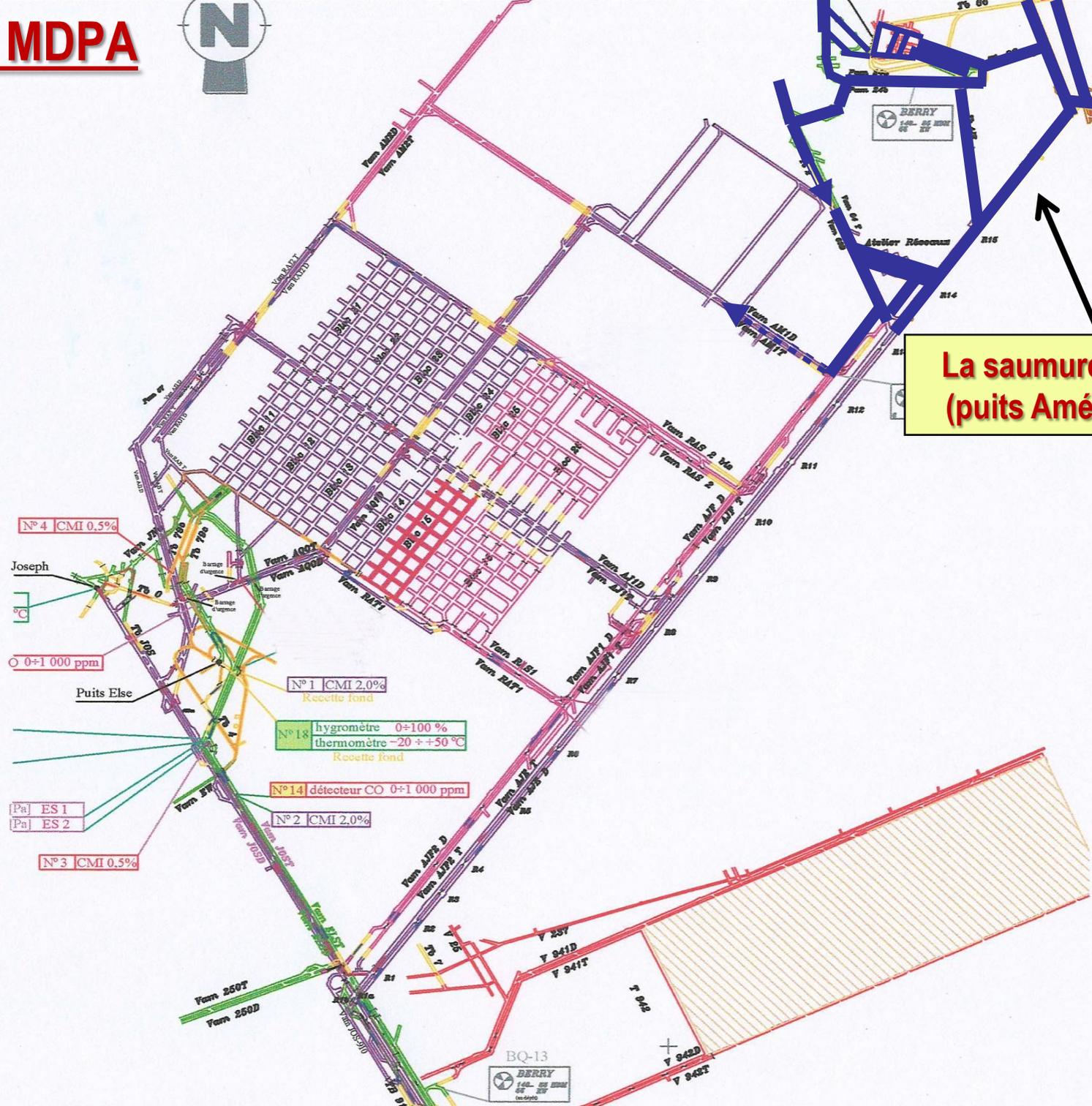
* somme, par puits, du maximum entre le débit d'exhaure, le débit de Darcy et le débit de référence

** si prise en compte d'une venue d'eau temporaire de 10 000 m³/an à Alex

Cheminement des eaux d'envoyage du site de Stocamine (document MDPA)



Document MDPA



La saumure arrive par l'aval
(puits Amélie 1 et Amélie 2)

N°4 CMI 0.5%

Joseph

°C

0+1 000 ppm

Puits Else

N°1 CMI 2.0%

Recette fond

N°18 hygromètre 0+100 %
thermomètre -20 + +50 °C

Recette fond

N°14 détecteur CO 0+1 000 ppm

N°2 CMI 2.0%

Pa ES 1

Pa ES 2

N°3 CMI 0.5%

BQ-13

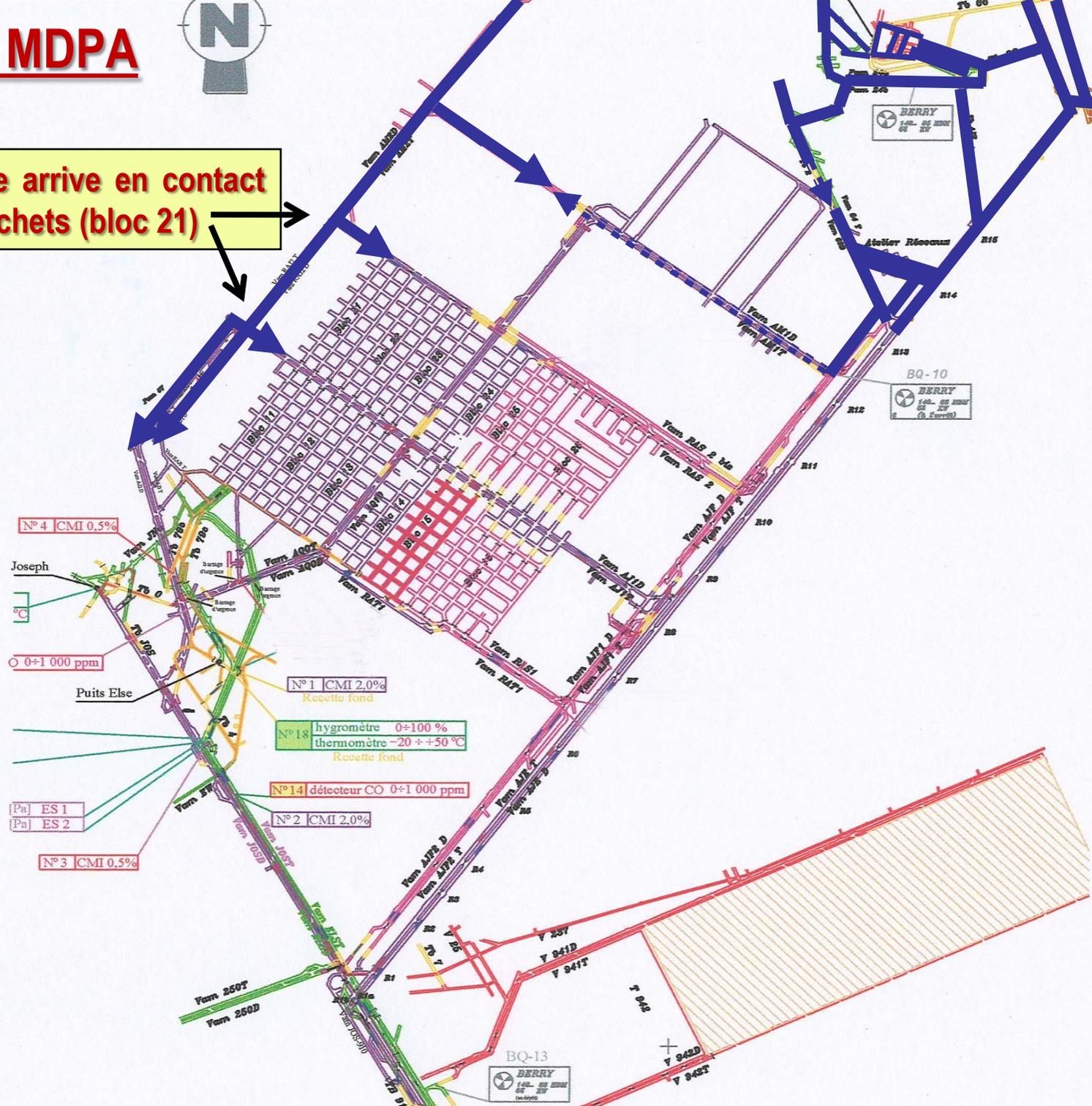
BERRY

140- 20 2000
100 2000
100 2000

Document MDPA



La saumure arrive en contact avec les déchets (bloc 21)



N°4 CMI 0.5%

Joseph

°C

0+1 000 ppm

Puits Else

N°1 CMI 2.0%
Réception fond

N°18 hygromètre 0+100 %
thermomètre -20 + +50 °C
Réception fond

N°14 détecteur CO 0+1 000 ppm

N°2 CMI 2.0%

Pa ES 1
Pa ES 2

N°3 CMI 0.5%

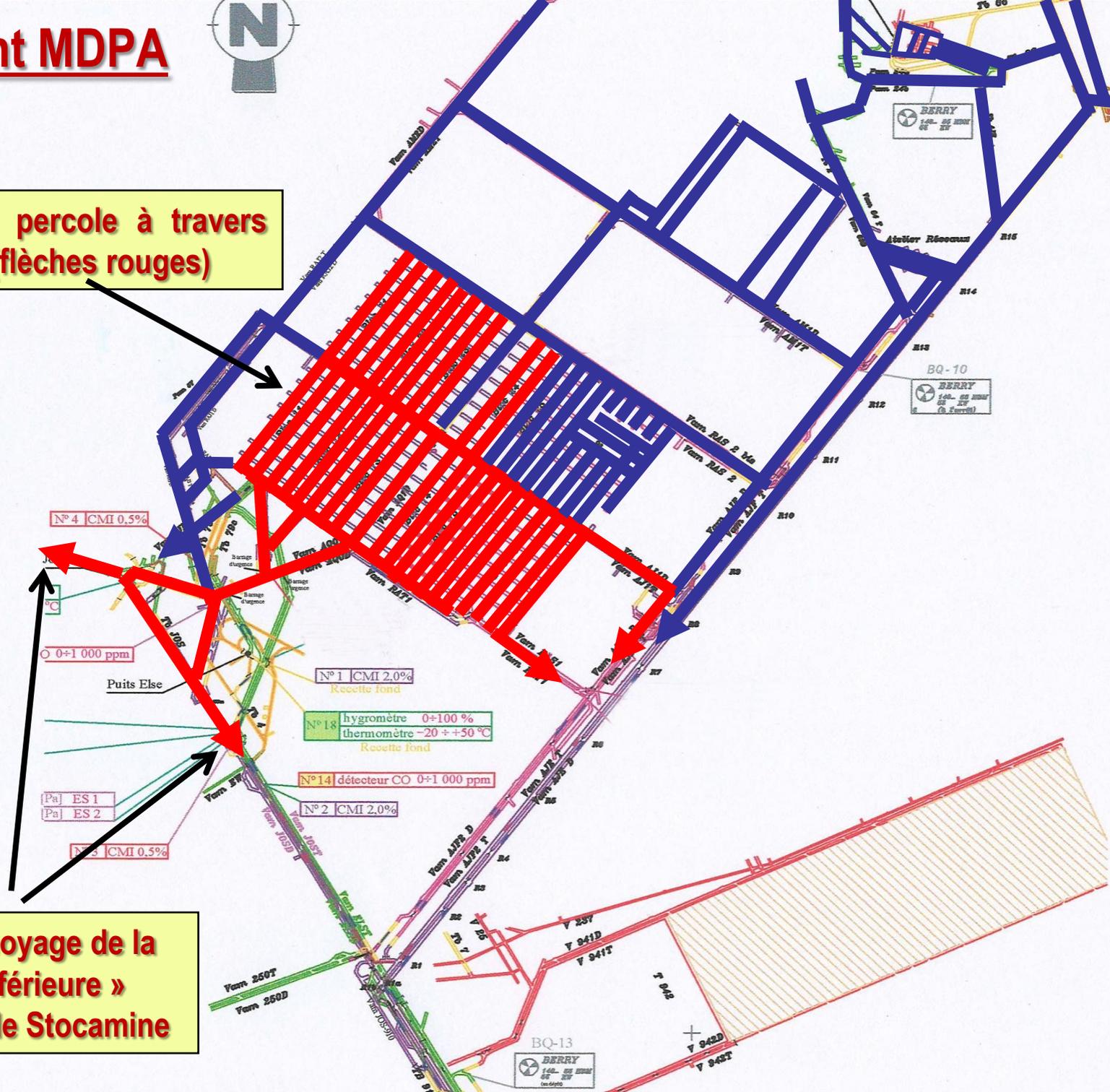
BQ-13
BERRY
140- 80 2000
80 2000
140 80 2000

BQ-10
BERRY
140- 80 2000
80 2000
140 80 2000

Document MDPA

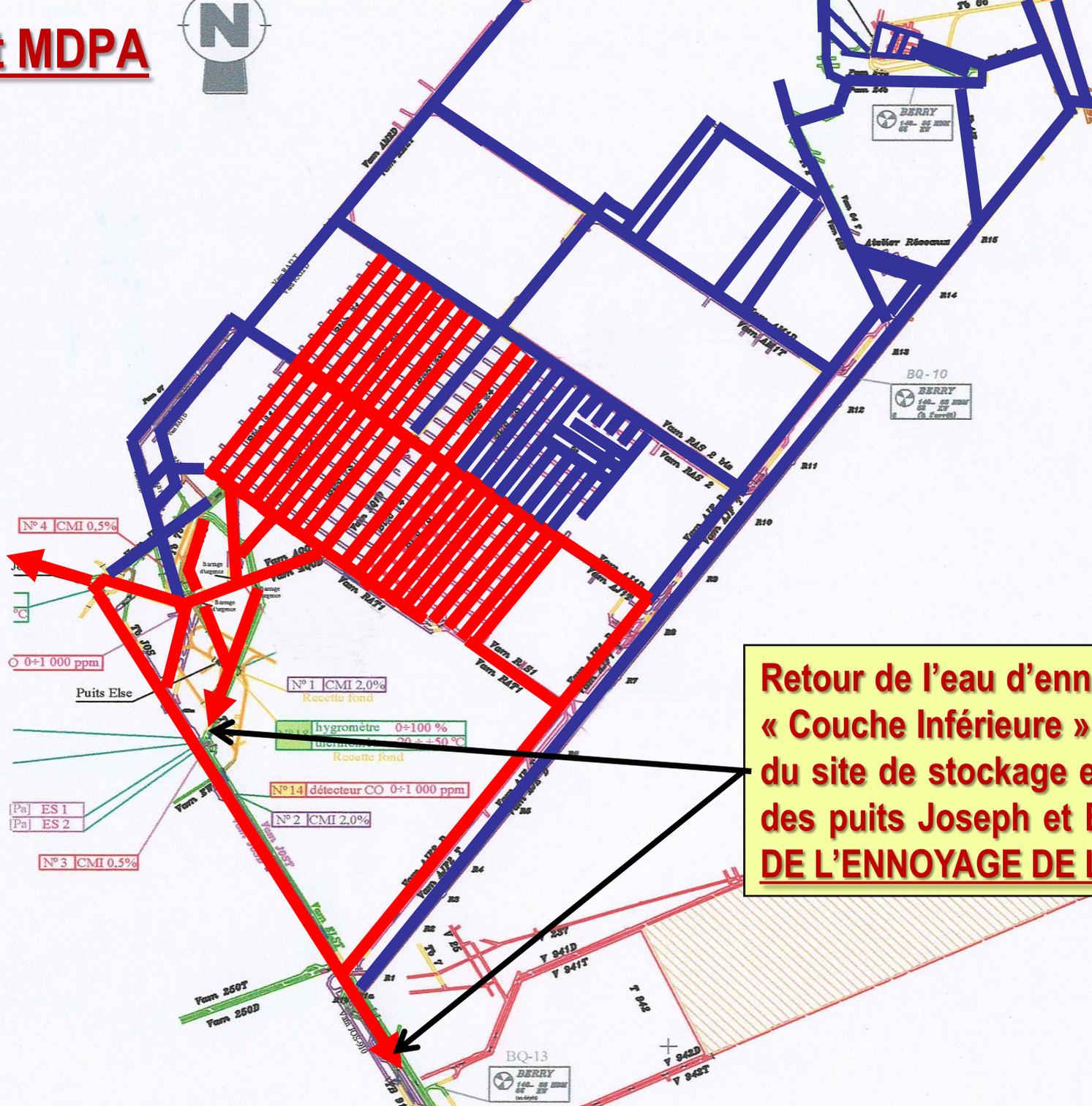


La saumure percole à travers les déchets (flèches rouges)



Début d'ennoyage de la « Couche Inférieure » au-dessus de Stocamine

Document MDPA



Retour de l'eau d'ennoyage de la « Couche Inférieure » au-dessus du site de stockage et ennoyage des puits Joseph et Else → FIN DE L'ENNOYAGE DE LA MINE

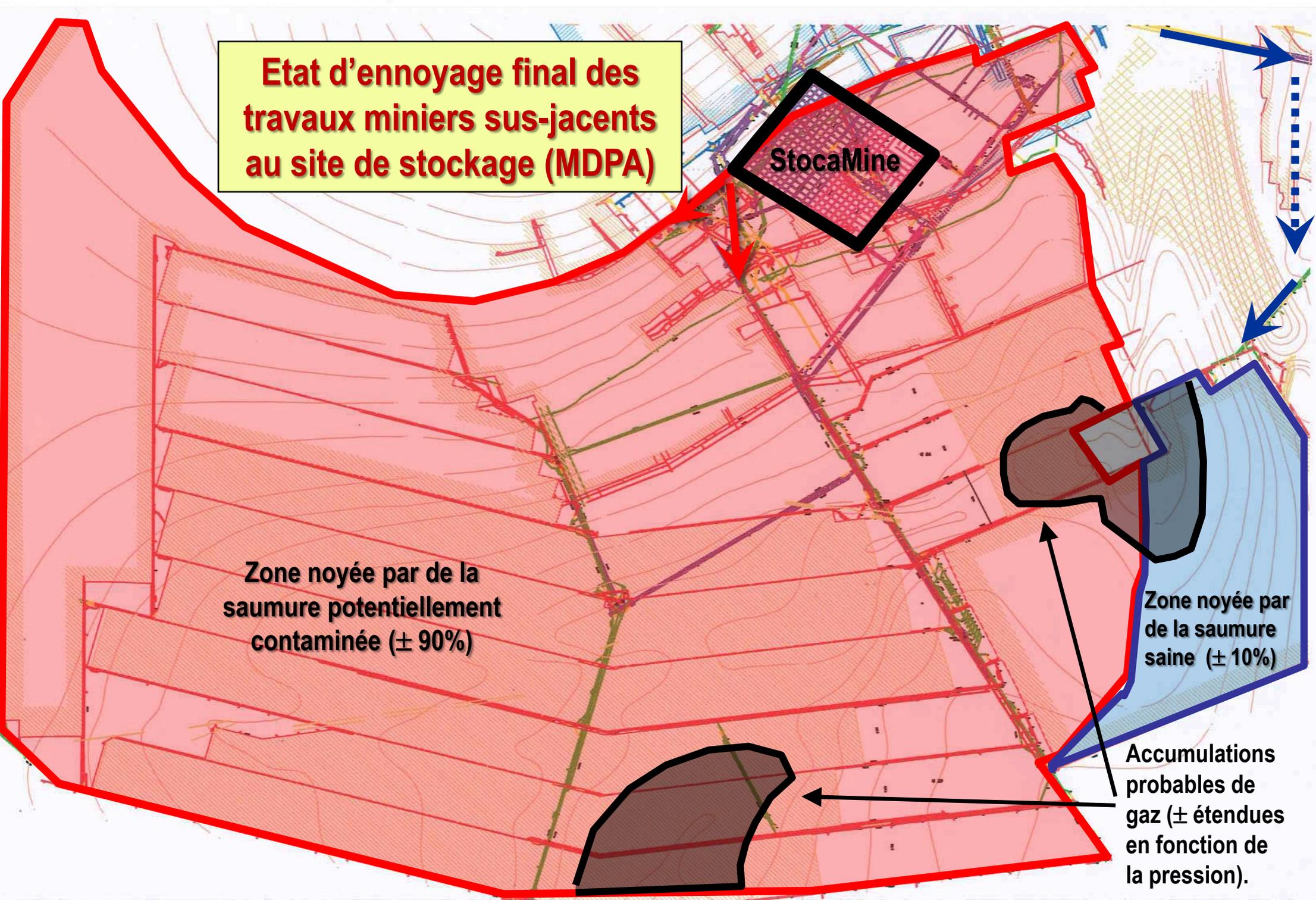
**Etat d'ennoyage final des
travaux miniers sus-jacents
au site de stockage (MDPA)**

StocaMine

**Zone noyée par de la
saumure potentiellement
contaminée ($\pm 90\%$)**

**Zone noyée par
de la saumure
saine ($\pm 10\%$)**

**Accumulations
probables de
gaz (\pm étendues
en fonction de
la pression).**



4- Devenir de la mine après ennoyage

Il s'agit de répondre aux 3 questions suivantes :

1) **A quelle date l'envoyage de la mine sera-t-il terminé?**

2) **A ce moment là, un épanchement de saumure contaminée en surface est-il possible?**

3) **Dans l'affirmative : Où? A quel débit?**

4) ***A quelle teneur en éléments traces? Avec quel impact sur l'homme et l'environnement?***



Terme source + Analyse de risques.

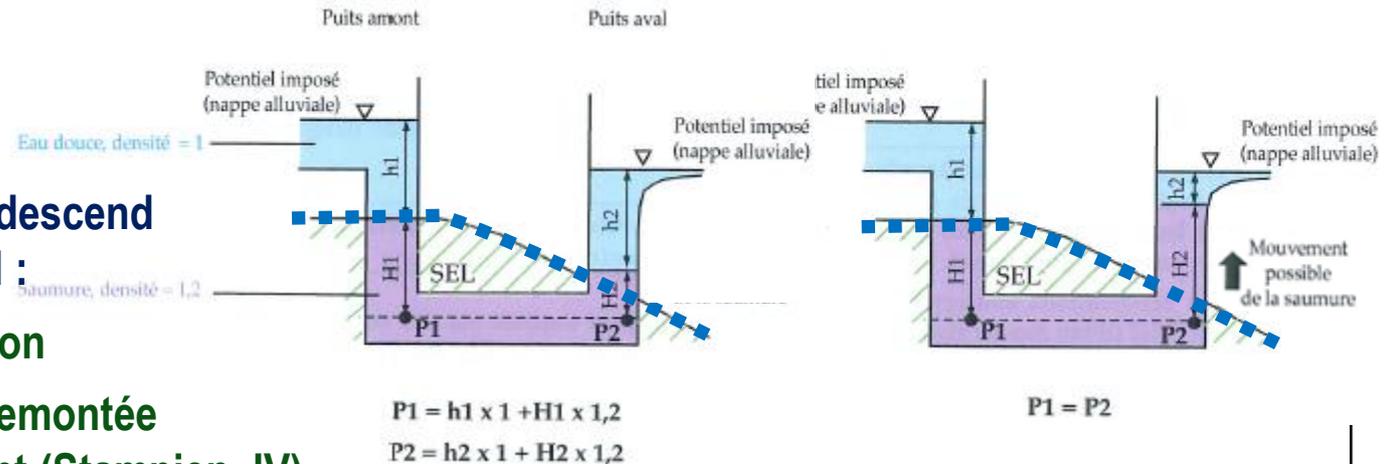
Mécanismes d'épanchement de saumure

1) Effet de densité (MICA) :

- l'eau douce (d=1) remplit la mine
- l'eau se charge en sel (d=1,2)
- vers le Nord (aval), le toit du sel descend
- la saumure doit remonter à l'aval :

➔ interface franche = stabilisation

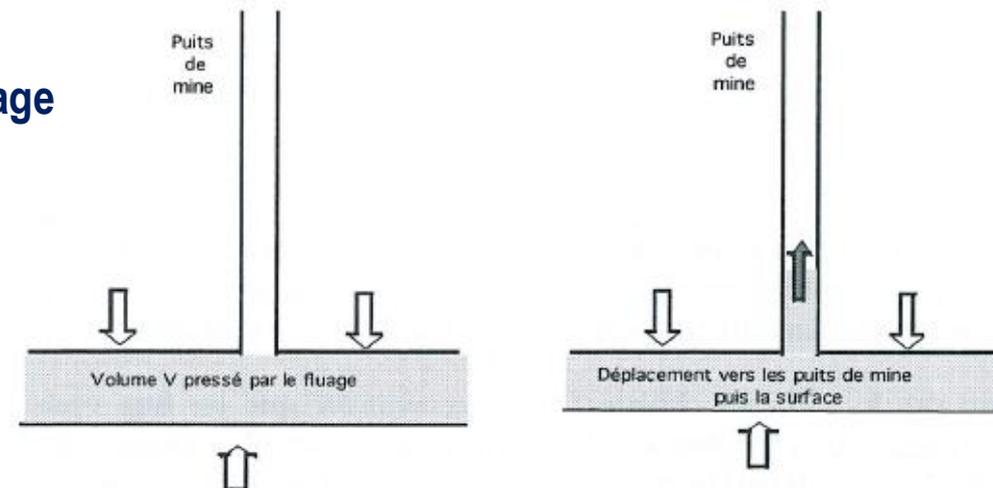
➔ interface diluée ⇒ nouvelle remontée
 ⇒ écoulement (Stampien, IV)



2) Effet du fluage (CESAME, MICA) :

- le fluage du sel ralentit mais il continue pendant l'ennoyage
- de la saumure peut être « expulsée » par les puits :

- ➔ les plus proches du stockage
(Joseph et Else ± Amélie 1, Amélie 2 et Max)
- ➔ les moins perméables (Amélie 1).

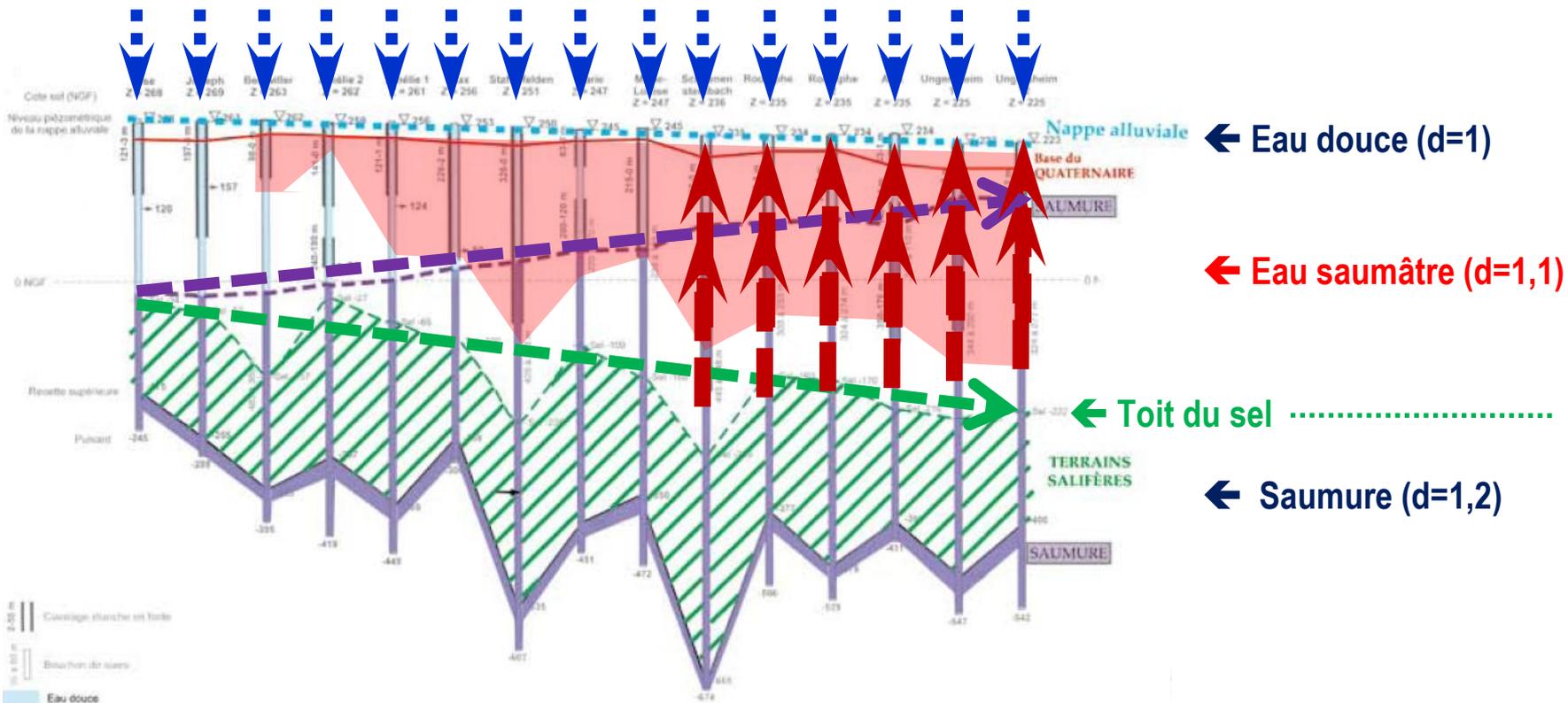


Scénario d'épanchement de saumure lié à l'écoulement hydrodynamique

(scénario MICA confirmé par INERIS)

- 1^e temps : équilibre hydrostatique eau douce/saumure
- 2^e temps : remontée de la saumure dans les puits aval ⇒ nouvel état d'équilibre
- 3^e temps : dilution de la zone d'interface par le Stampien/Chattien ($S \approx 10-70$ g/l)
- 4^e temps : déplacement de l'interface vers la nappe alluviale (?) via 6 puits aval

Scénario
modélisé
(140-200 m³/an).



← Eau douce (d=1)

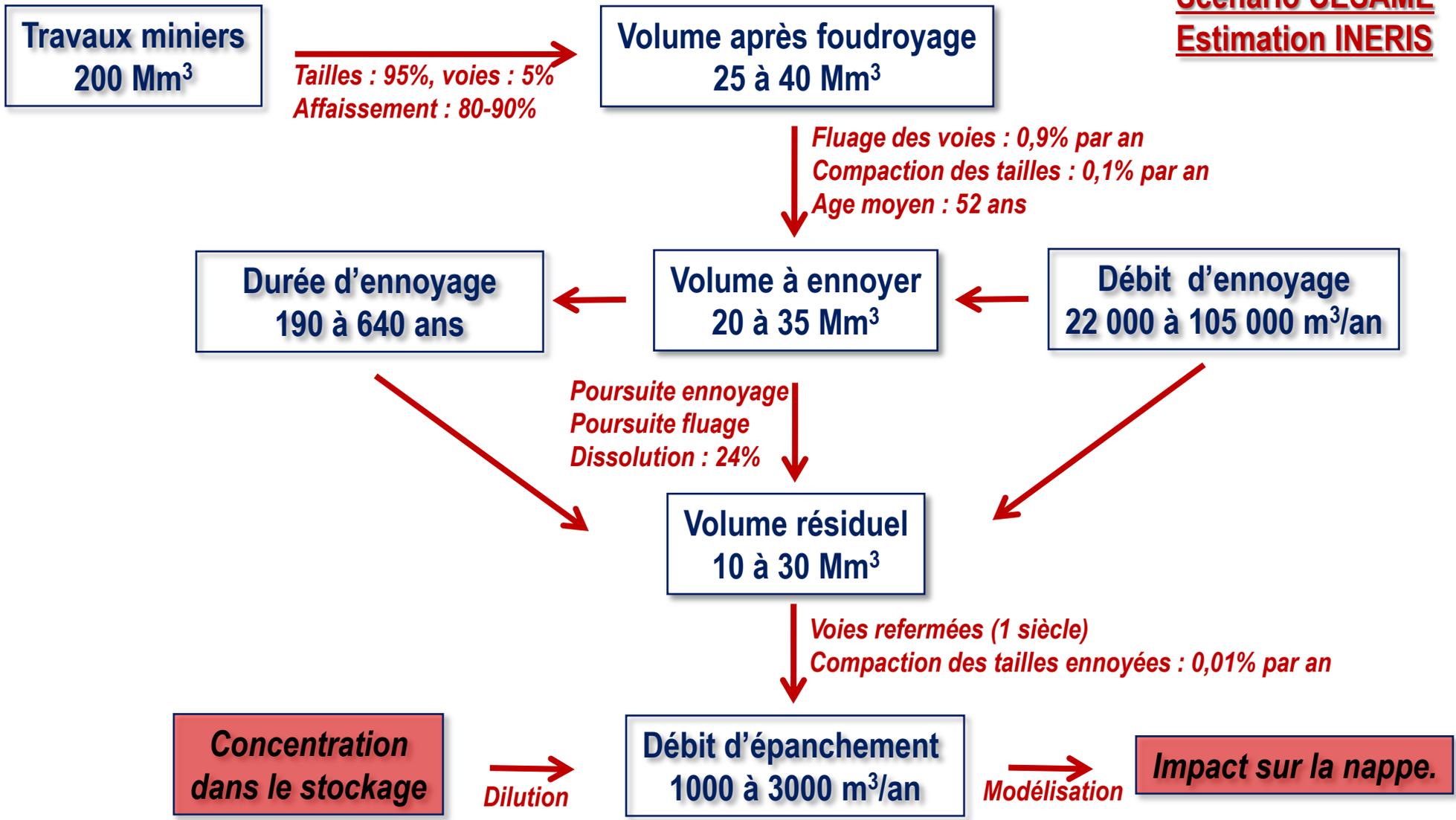
← Eau saumâtre (d=1,1)

← Toit du sel

← Saumure (d=1,2)

Scénario d'épanchement de saumure en surface lié au fluage du sel

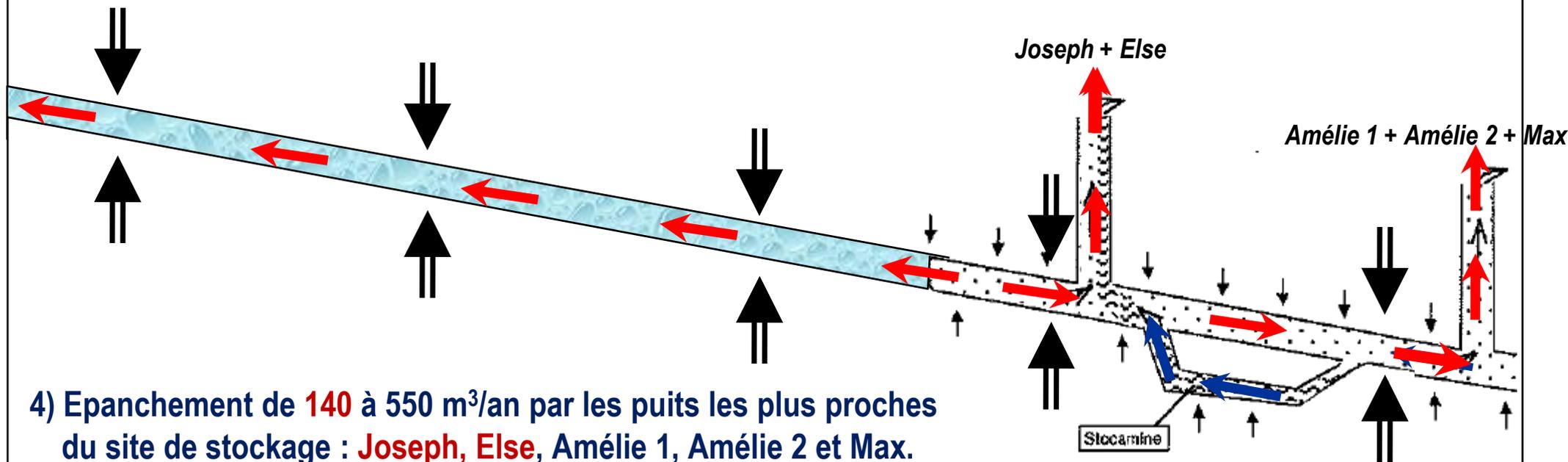
Scénario CESAME
Estimation INERIS



Dilution dans la mine de la saumure issue du stockage

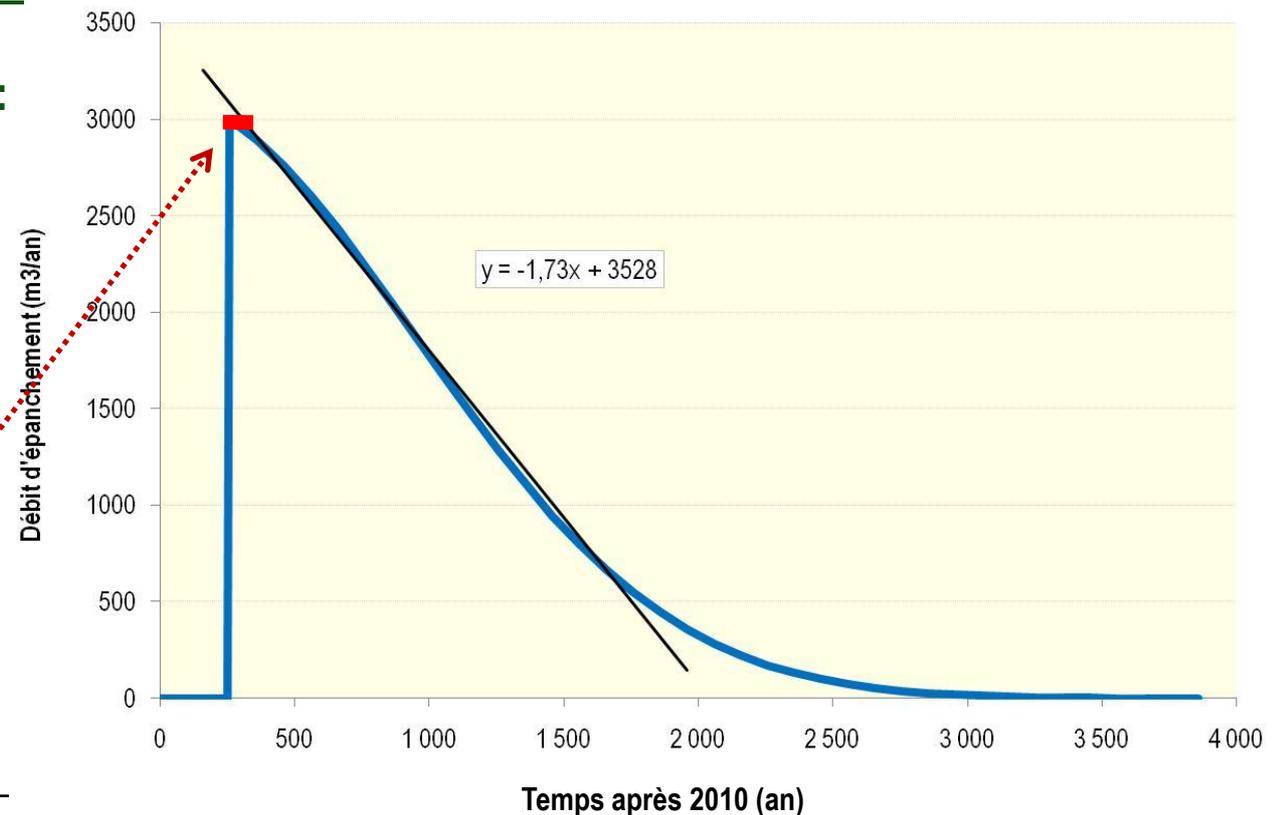
(estimation INERIS)

- 1) Durée d'envoyage des vides situés sous la cote du stockage (soit 155 Mm³ initiaux) = 2 à 6 siècles
(estimation CESAME : 150 ans, estimation BMG: 400 ans, estimation MICA : 500 ans)
- 2) Au moment de son envoi, le site de stockage est mécaniquement refermé sauf vides inter-colis :
→ estimation : $\sim 30\% * 22\ 000\ m^3 \approx 7000\ m^3$ (scénario CESAME : $Q = 1,7\ m^3/an$ à Joseph et Else)
- 3) Envoi des vides situés au-dessus de la cote du stockage : 46 Mm³ initiaux (2 à 6 Mm³ finaux)
→ durée ~ 40 à 70 ans + dilution intégrale dans $\sim 90\%$ soit 1-5 Mm³ (calculs en cours)



Estimation du débit d'épanchement final sur le secteur ouest

- Base de calcul = scénario majorant :
 - débit d'ennoyage maximal (105 000 m³/an)
 - 20% de vides résiduels après foudroyage
- Durée d'ennoyage de ~300 ans
- Débit d'épanchement de saumure de ~3000 m³/an réparti sur 15 puits
- Epanchement de saumure contaminée au débit de ~550 m³/an sur les puits les plus proches du site de stockage : Joseph, Else, Amélie 1-2 et Max
- Diminution probable de ce débit au cours du temps de ~2 m³/an sur les 15 puits du secteur ouest
- **Scénario majorant = prise en compte du débit maximum (~100 ans).**



5- Conclusions

1) Sur l'intégrité du bloc-hôte :

- Site de stockage à 550 m de profondeur
- Présence d'eau au-dessus (min. 300 m) dans les alluvions, le Chattien, le Stampien et la zone à gypse
- Présence d'eau au-dessous (1000 m) dans les aquifères du Secondaire
- Stockage situé dans une série salifère réputée imperméable de 1200 m d'épaisseur

2) Sur les vecteurs potentiels de transfert :

- 200 Mm³ de vides miniers créés sans migration possible à travers le sel sain (100 Ma)
- Pas de risque d'apparition de diapir ou de dôme de sel
- Présence de failles pluri-kilométriques : pas ou peu d'eau et jamais dans le bloc-hôte
- Risque en cours d'évaluation du rejeu d'une faille proche du site de stockage (séisme 6,5)
- Présence de 15 puits (dont 2 encore ouverts) avec débit de percolation intrados/extrados
- Présence de 43 sondages recoupés par les travaux miniers dont qq. suintements dans 5

3) Sur le devenir de la mine après sa fermeture (secteur ouest) :

- Débit d'exhaure pendant l'exploitation : ~50 000 m³/an
- Ennoyage par les 15 puits d'exploitation, malgré leur colmatage, à 20 000 à 100 000 m³/an
- Fermeture des vides par affaissement (~80-90%), fluage des voies (~0,9% par an) et compaction des tailles foudroyées (~0,1% par an, voire moins?)
- Durée d'ennoyage prévisible de 2 à 6 siècles

4) Sur le devenir de la mine après son ennoyage (secteur ouest) :

- En fin d'ennoyage, les vides résiduels seront de 10 à 30 Mm³
- Risque d'épanchement en surface par mise en écoulement hydrodynamique (effet de densité) : débit maximal prévisible de 140 m³/an réparti sur les 6 puits aval → **négligeable**
- Risque retenu = d'épanchement par expulsion de saumure (potentiellement contaminée) due à la poursuite du fluage après ennoyage au taux de 0,01% par an :
- Débit d'épanchement de 1000 à 3000 m³/an sur 15 puits avec décroissance de ~2 m³/an
 - ➔ **principal facteur de risque actuellement identifié**
 - ➔ **modélisation de l'impact sur la nappe d'un débit de 550 m³/an réparti sur 5 puits amont..**

**Merci de votre
attention**