



CoPil du 9 décembre 2010 à Strasbourg

Etude géomécanique

réalisée pour le compte de Stocamine



Objectifs

- 1- Evaluation de la stabilité mécanique du stockage et des ouvrages d'accès :
 - *Possibilité d'accès au site, à moyen terme ?*
 - *Possibilité d'un déstockage, à court ou à moyen terme ?*

- 2- Evaluation de la vitesse de fluage des différentes structures (stockage, galeries, terrains foudroyés) :
 - *Impact sur le transport de polluants vers l'extérieur ?*
 - *Possibilité d'accès aux travaux souterrains dans le temps ?*

- 3- Evaluation de l'endommagement du toit du stockage, induit par l'incendie du bloc 15 :
 - *Possibilité d'une communication hydraulique via le sel endommagé ?*



Démarche (1/2)

- 1- Analyse des études antérieures commandées par Stocamine
 - en particulier, les études conduites par l'Ecole des Mines de Paris (dossier d'autorisation, études plus récentes)
- 2- Analyse des mesures in situ et des données disponibles à Stocamine
 - mesures de déplacement dans la zone de stockage;
 - mesures d'affaissement de la surface résultant de l'exploitation et de la compaction des terrains foudroyés.



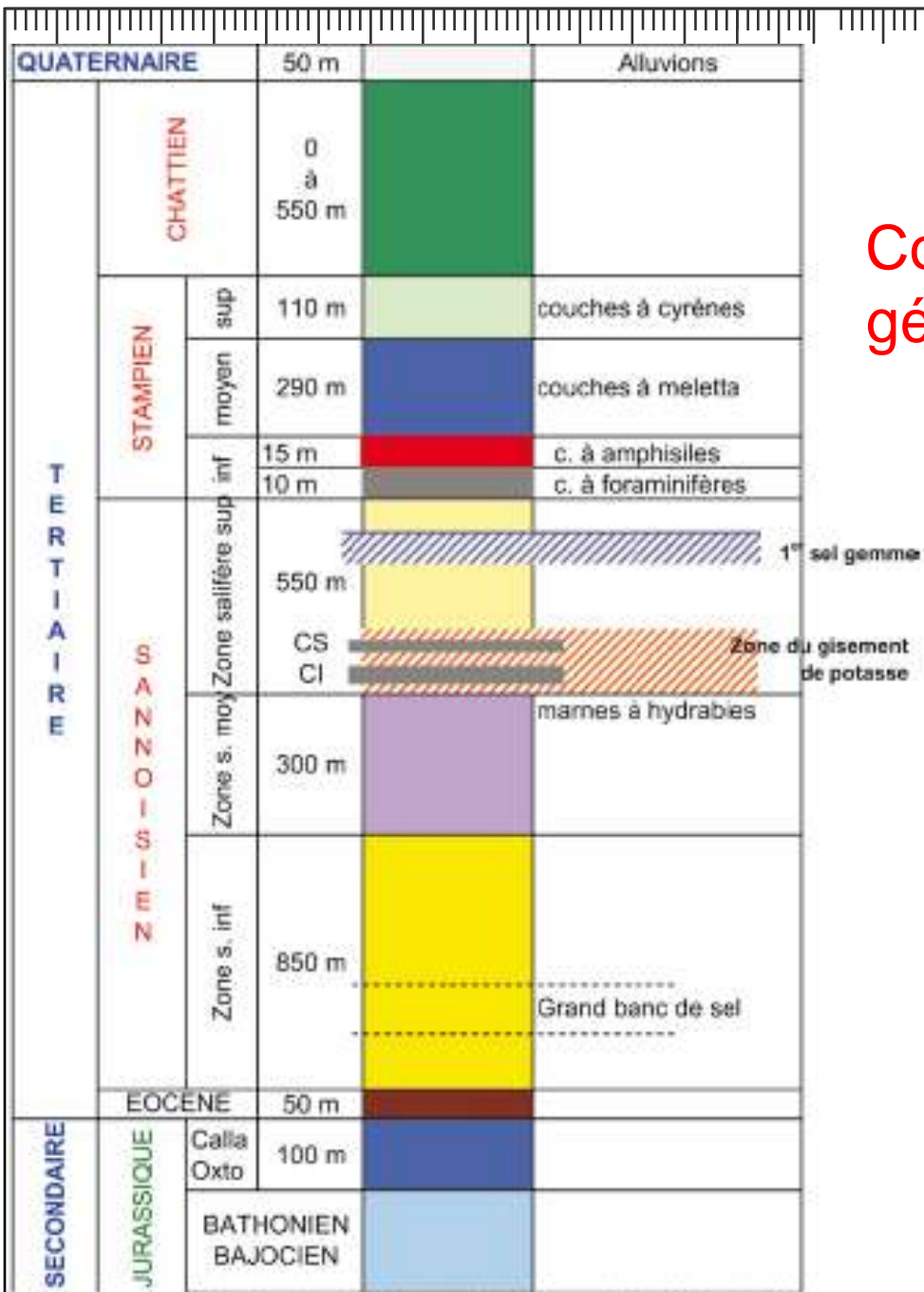
Démarche (2/2)

3- Mise à profit des résultats des recherches en France et à l'étranger :

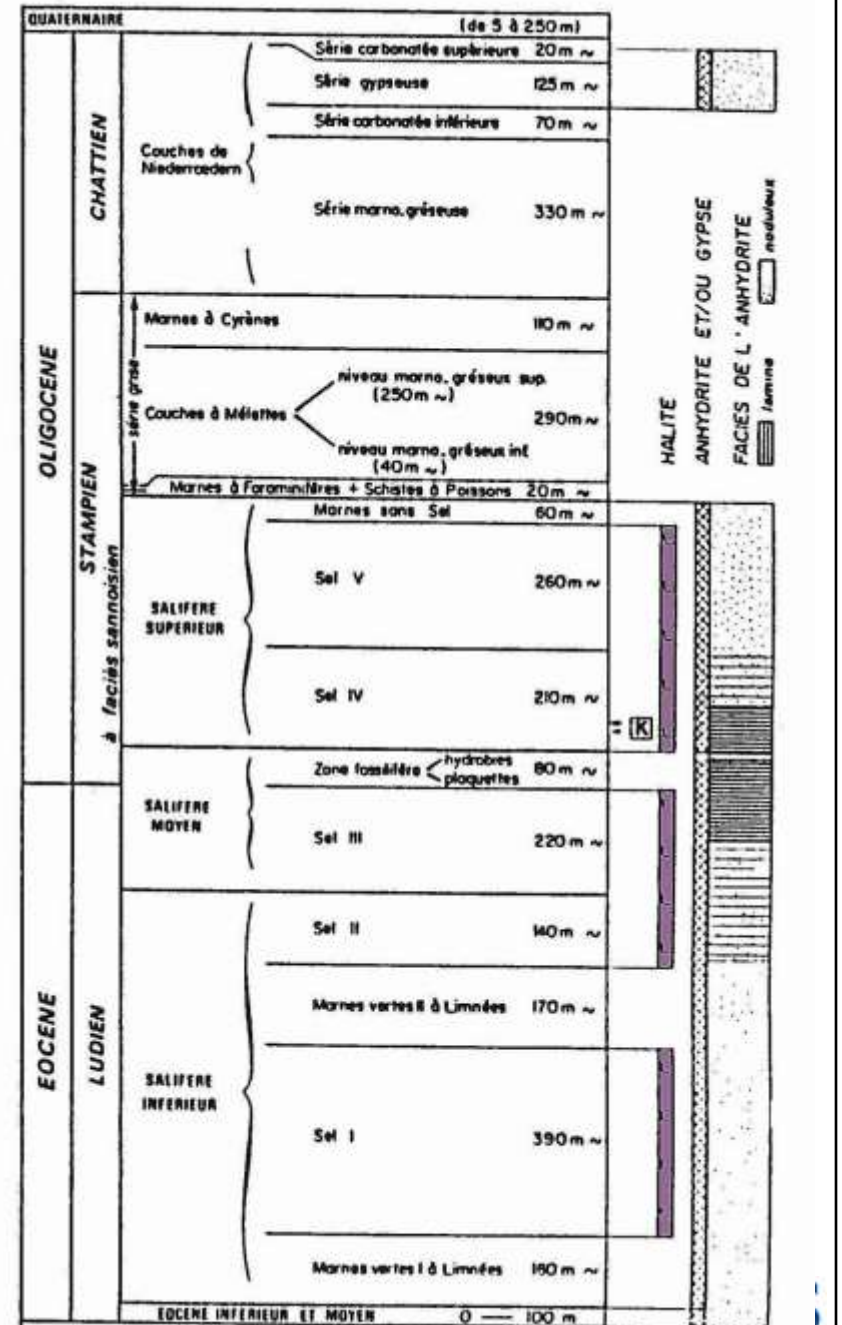
- en particulier, travaux de l'Ecole Polytechnique (1990s), dans le cadre de programmes UE-PCRD et ANDRA (essais in situ dans la mine d'Amélie aux MDPAs, essais de laboratoire sur le sel d'Amélie, modélisation: thèses de doctorat de Youssam KAZAN (thermomécanique, 1994), Luc THOREL (endommagement de sel, 1994) et Philippe COSENZA (perméabilité/transport, 1996)
- Autres thèses (Alsace / MDPAs): doctorat d'Etat de Marie-BLANC-VALLERON (géologie du fossé rhénan, 1990), Thèse de G. VIGIER (essais de fluage du sel des MDPAs, 1981)
- Travaux des recherches internationales sur le sel: stockage de déchets nucléaires, cavités salines de stockage d'hydrocarbures, exploitation de sel, diapirisme / dôme de sel

4- Modélisation numérique du stockage et des ouvrages d'accès :

- 3D/2D, mécanique, thermomécanique



Coupes géologiques



Plan de STOCAMINE



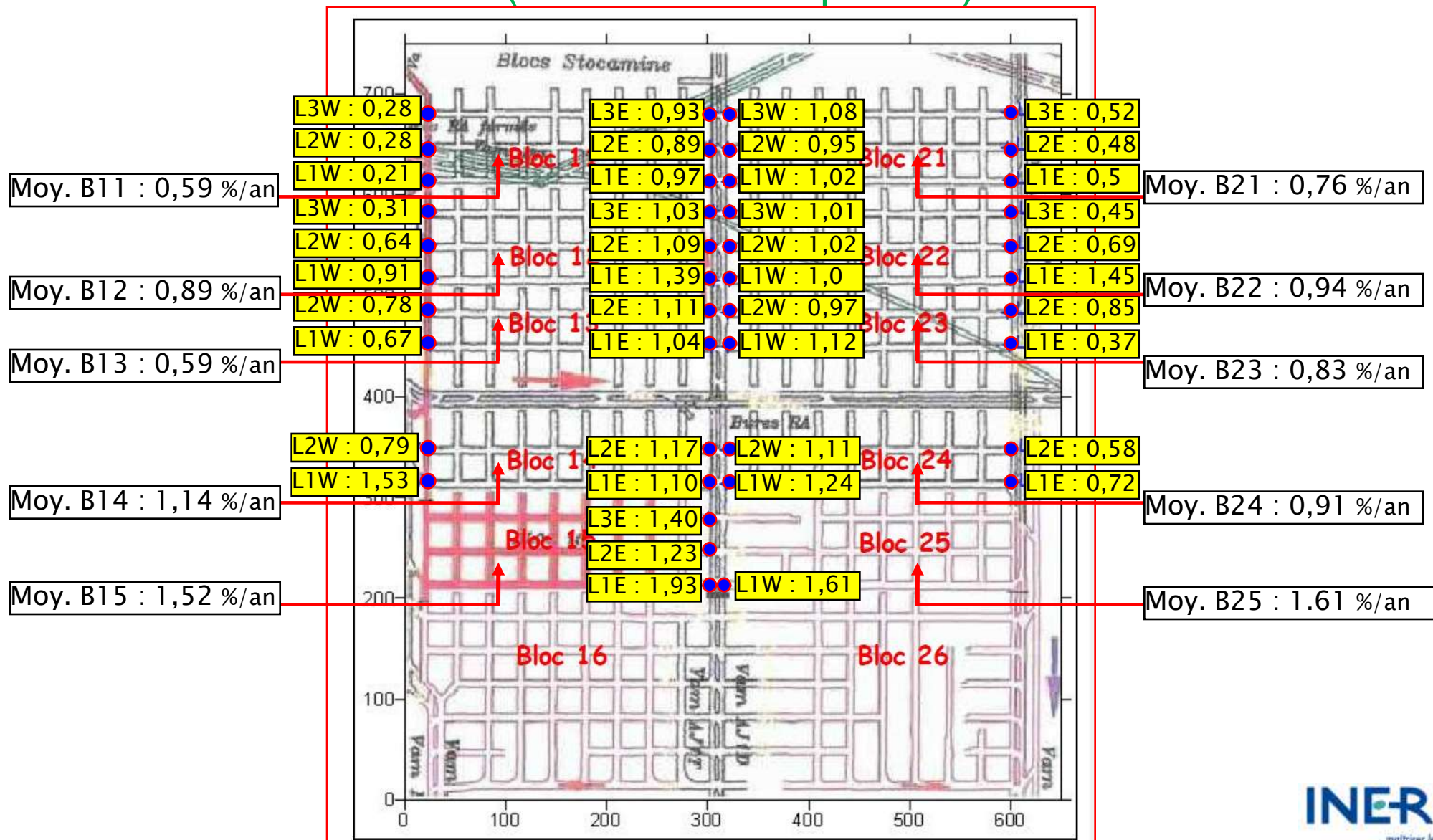
Profondeur : 550 m

Chambres et piliers
Taux de défrètement: 38%
Piliers carrés: 20 x 20 m
Largeur chambres : 5,5 m
Hauteur : 3 m

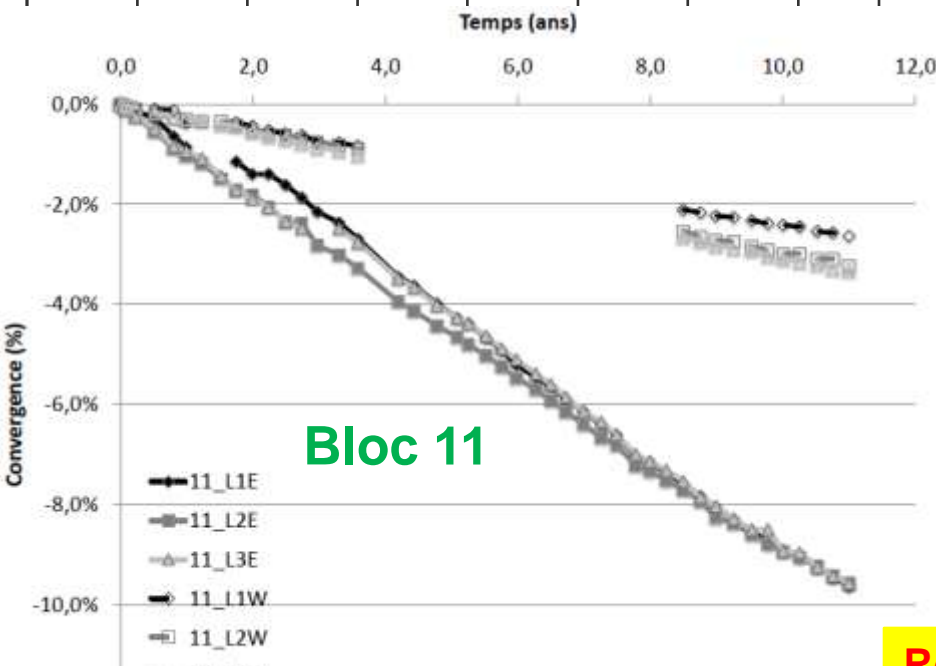
Voies doubles
Largeur galeries : 4 m
Largeur piliers : 3 m

Démarrage : 2/1999
Incendie bloc 15: 10/9/2002
Arrêt: 09/2003

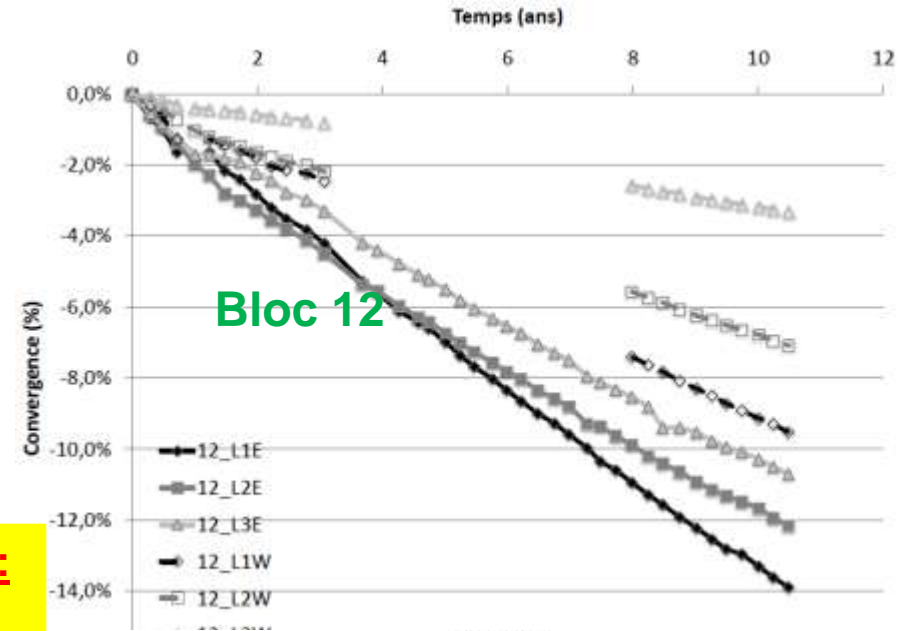
Vitesses de convergence des piliers, mesurées à Stocamine (valeurs en % par an)



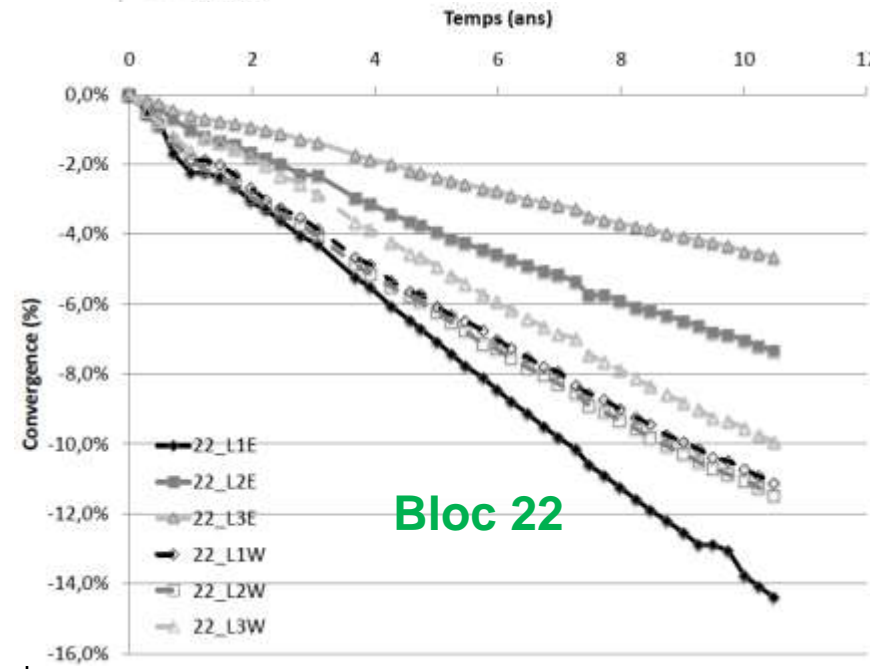
Mesures de convergence des blocs



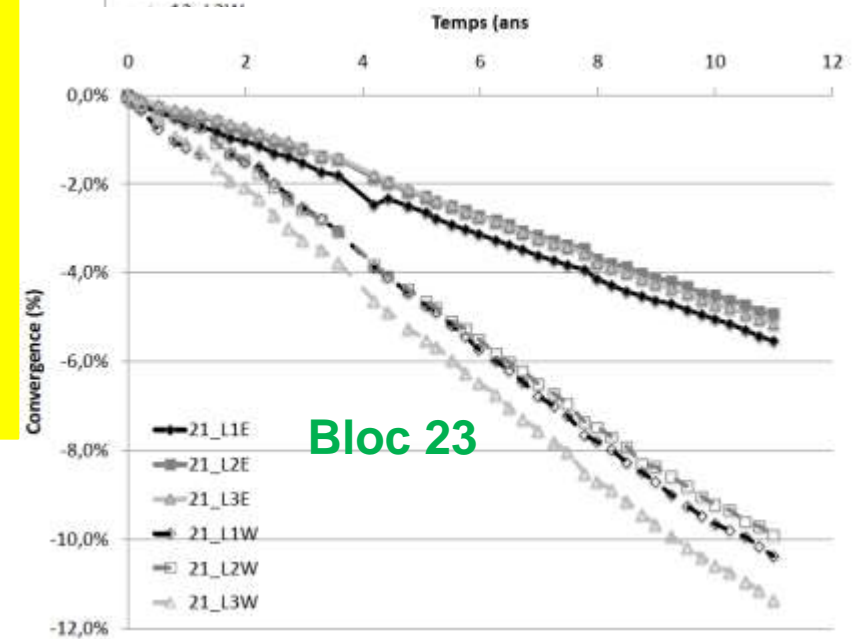
Bloc 11



Bloc 12



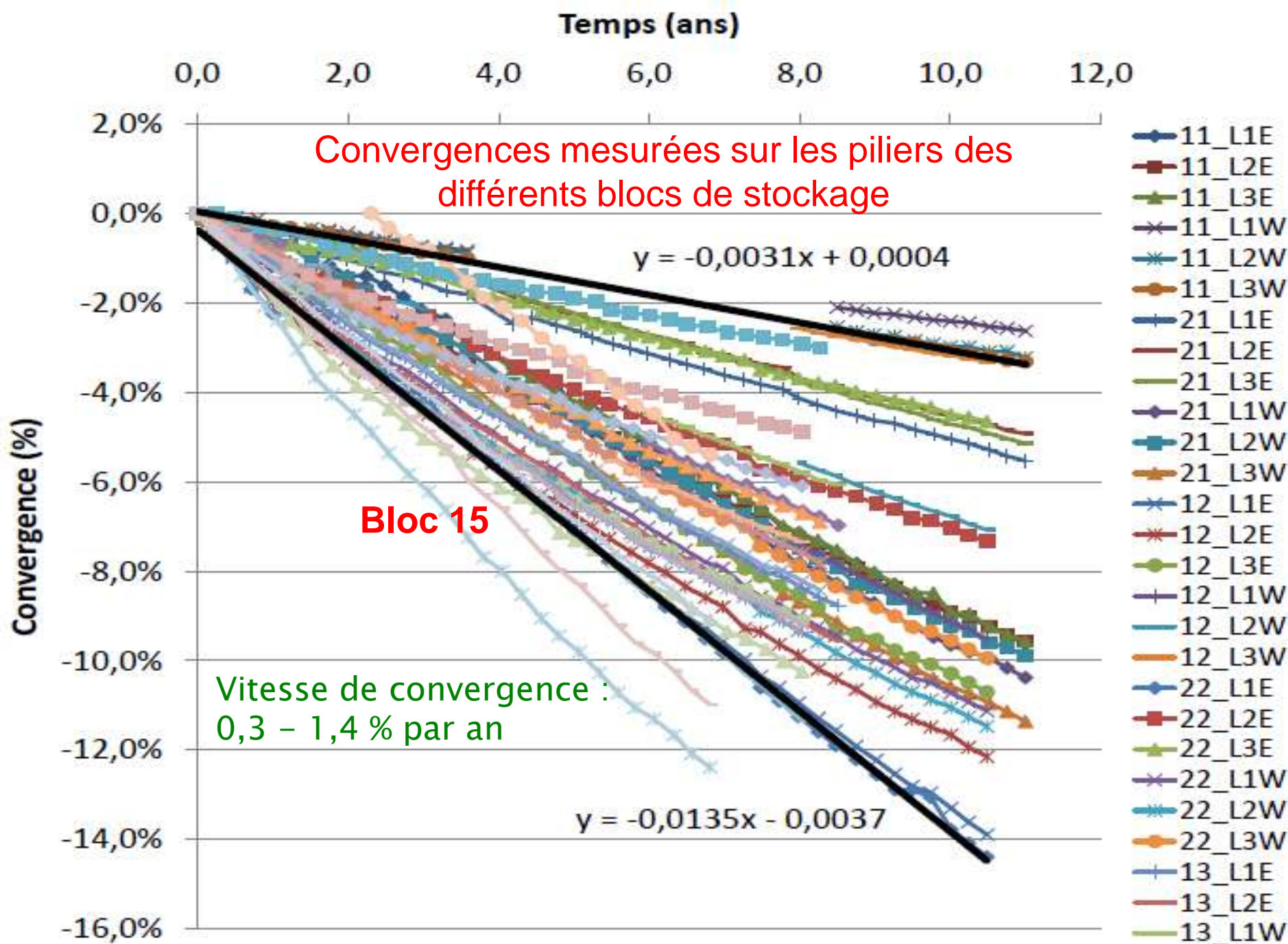
Bloc 22



Bloc 23

Remarques:

- 1- évolution linéaire
- 2- Amplitude importante : 3 à 14% , (10- 45 cm) sur 10 ans (1999-2009)

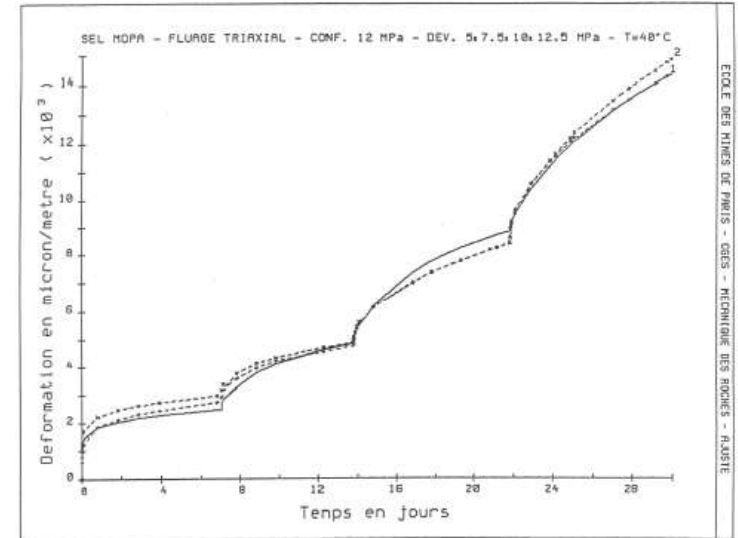


Études géomécaniques antérieures sur Stocamine

(réalisées par l'Ecole des Mines de Paris)

1- Essais de laboratoire et définition de la loi rhéologique de Lemaitre pour le fluage du sel de Stocamine (Vouille, 1990)

$$\epsilon_{VP} = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\beta} t^{\alpha}$$



Masse volumique (Kg/m³)	Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Résistance en compression simple (MPa)	α	β	K (*)	Indice de fluage (%)
2160	25 000	0.23	32.9	0.27	2.296	0.266	2

* le temps est en jour, les contraintes sont en MPa et les déformations sont en micron/mètre

2- Modélisation du fluage des cavités avant l'envoyage (Hadj Hassen & Tijani (2006) et après l'envoyage Hadj Hassen (2009)

Modèles retenus (1/2)

1- Loi de fluage du sel d'Amélie (A. Pouya, Ecole Polytechnique, 1992)

- **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)**

Valeurs des paramètres obtenues par des essais de laboratoire sur le sel d'Amélie + calage sur les convergences à Stocamine

$$A = 0,022 \text{ j}^{-1}$$

$$B = 4700 \text{ K}$$

$$n = 4$$

$$Q_0 = 1 \text{ MPa}$$

$$E = 25 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,25$$

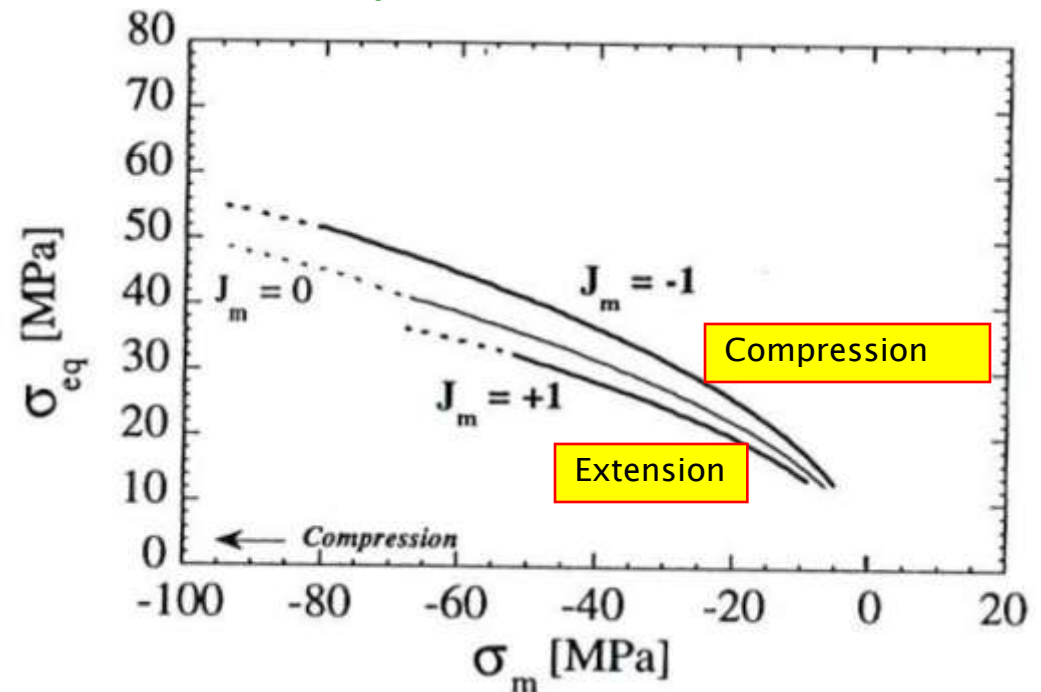
$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}^{vp}}} = A \exp(-B/T) (Q/Q_0)^n \frac{\partial Q}{\partial \underline{\underline{\sigma}}}$$

Modèles retenus (2/2)

2- Modèle d'endommagement du sel d'Amélie (L. Thorel, Ecole Polytechnique, 1994)

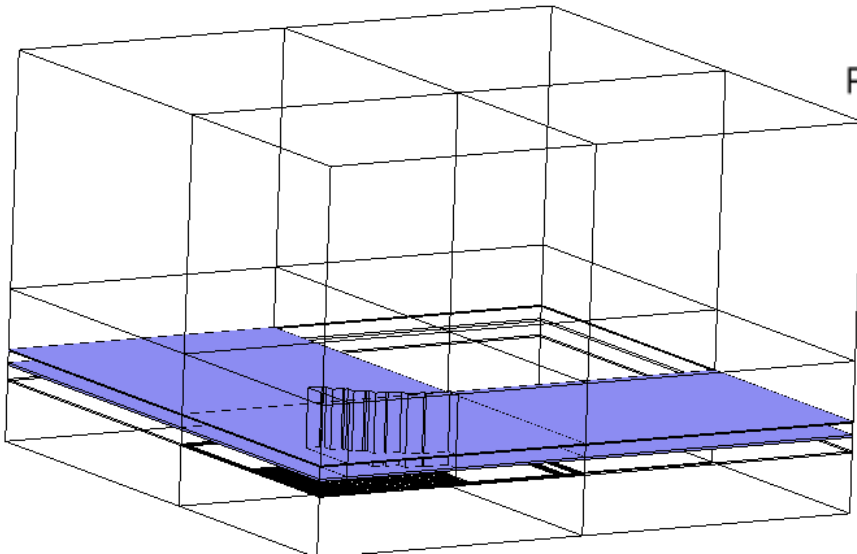
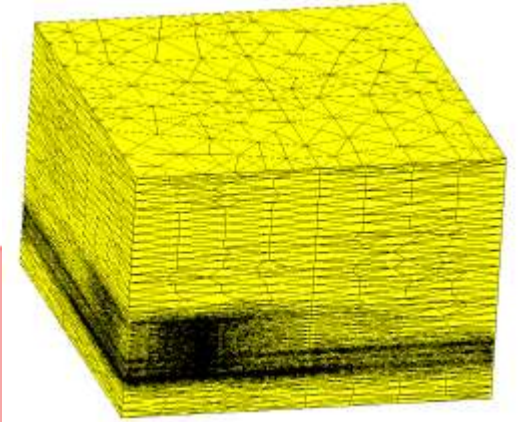
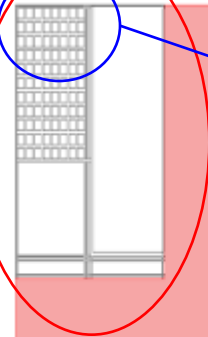
- **Modèle élastoplastique non associé avec critère d'endommagement lié à la dilatance, dépendant de 3 invariants du tenseur de contraintes**
- **Seuil d'endommagement en compression: 12 MPa ($R_c = 30$ MPa), en extension: 6,7 MPa, en traction nulle**

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^P = \dot{\lambda} \frac{\partial G(\underline{\underline{\sigma}}, \gamma)}{\partial \underline{\underline{\sigma}}}$$
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{-\sigma_m}{Z(J_m)} \right)} \quad \text{Critère d'endommagement}$$



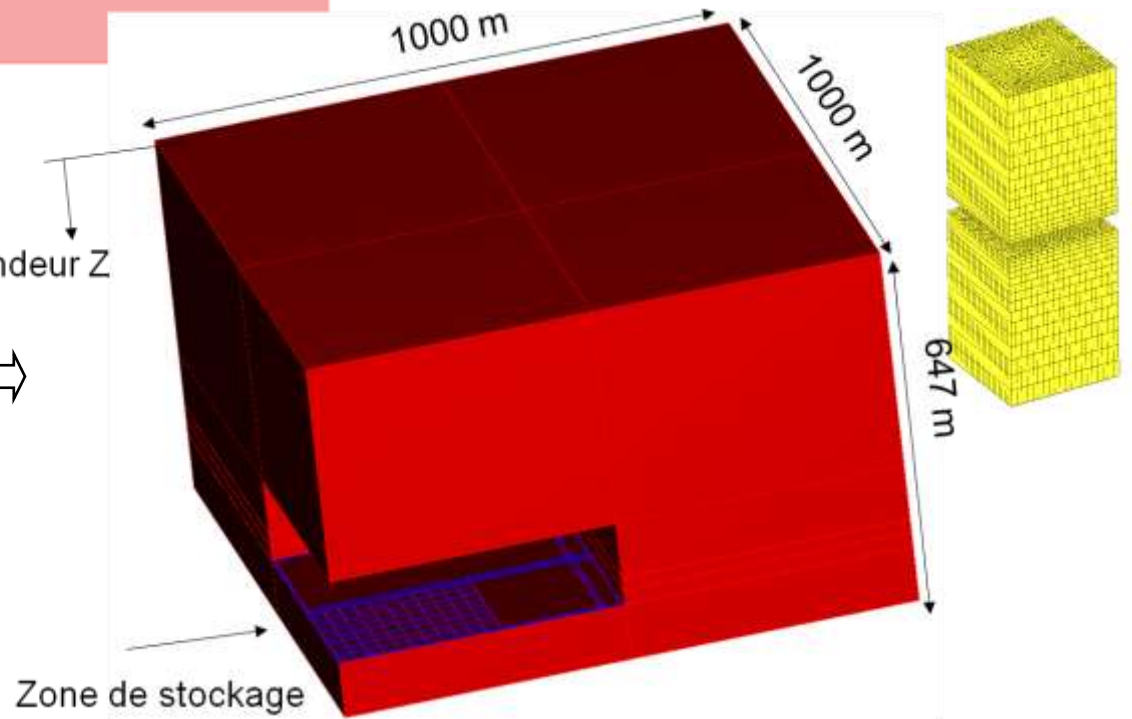
$$\underline{\underline{F}}(\underline{\underline{\sigma}}, \gamma) = Q^2 - A(J_m, \gamma) P - B(J_m, \gamma) \quad \text{Critère de rupture}$$

Modèle 3D
Code Elements
Finis COMSOL
multiphysics)



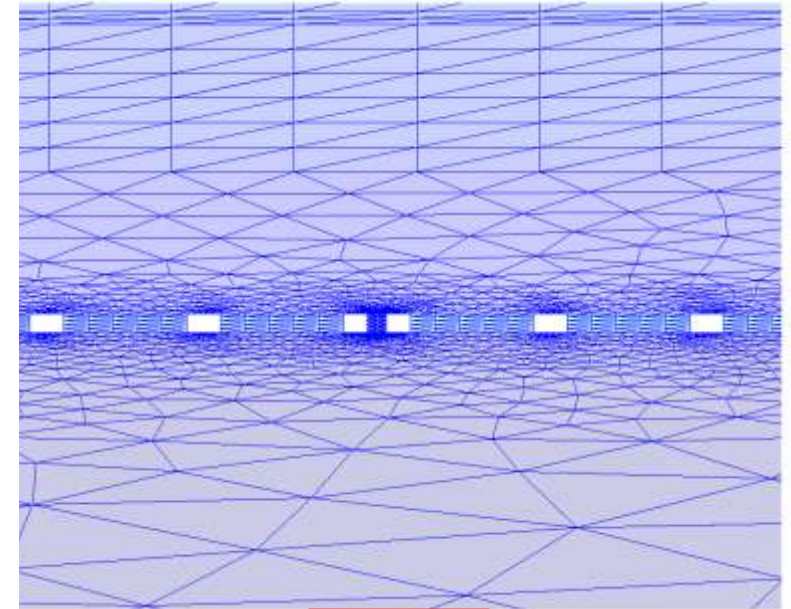
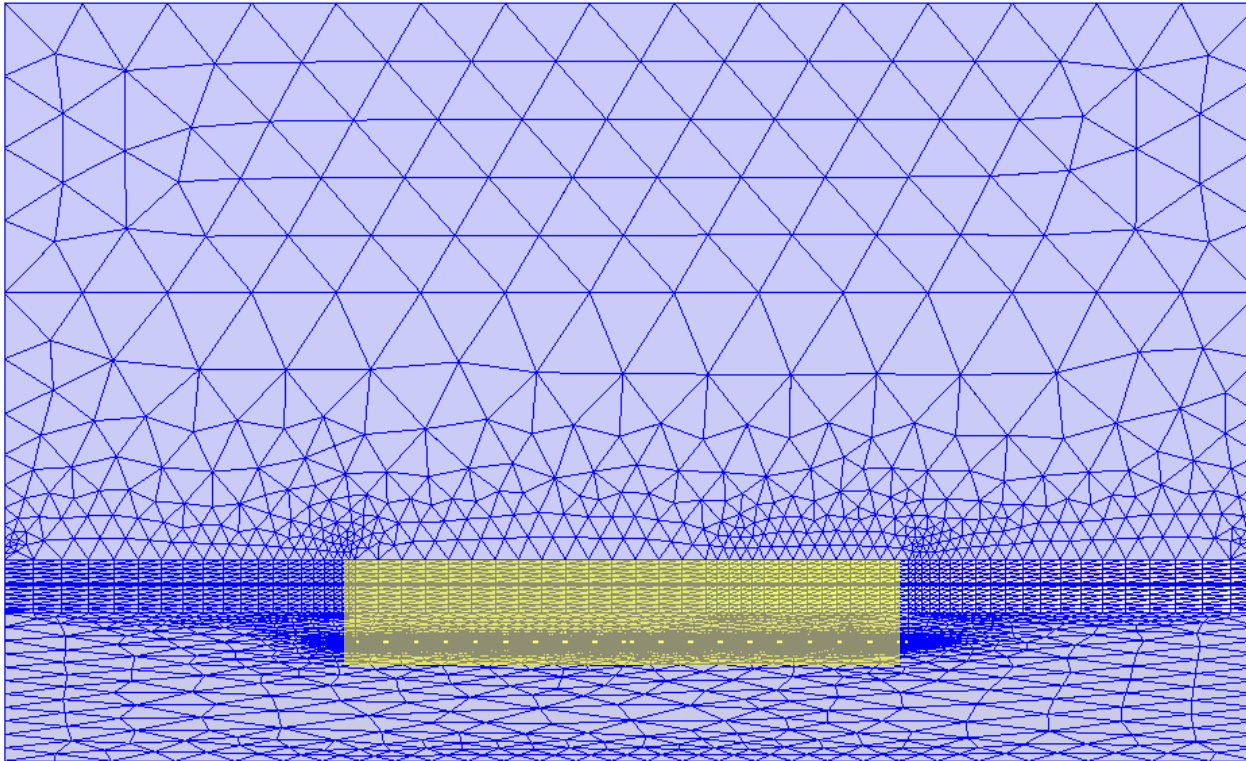
Modèle géométrique

Profondeur Z



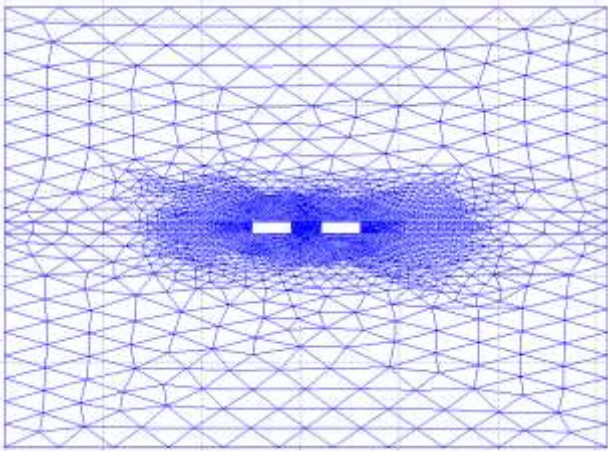
Maillages 3D

Modèles 2D : Codes COMSOL et VIPLEF (Ecole des Mines de Paris)



Zoom

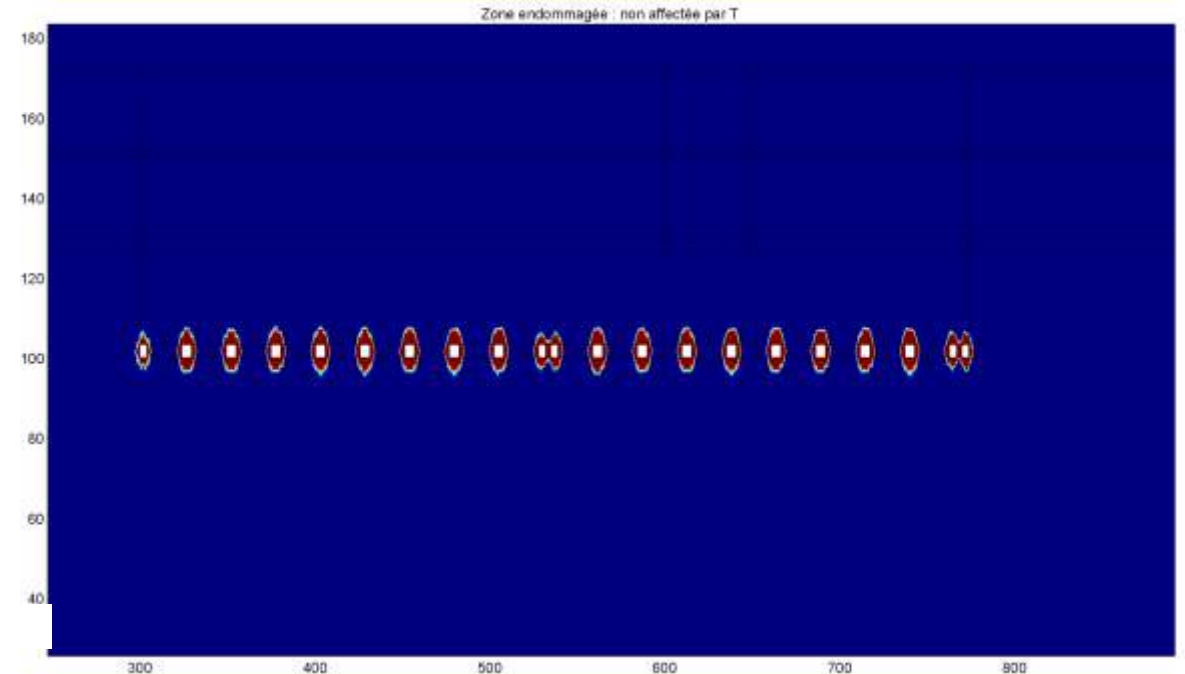
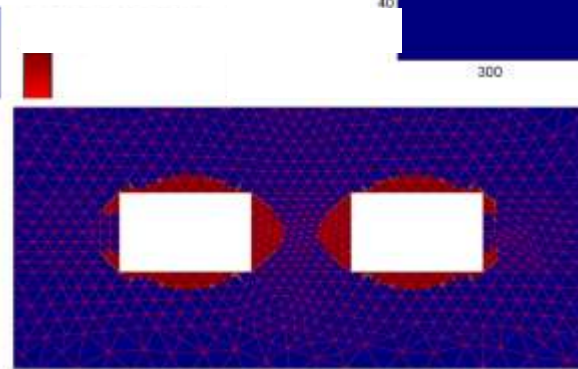
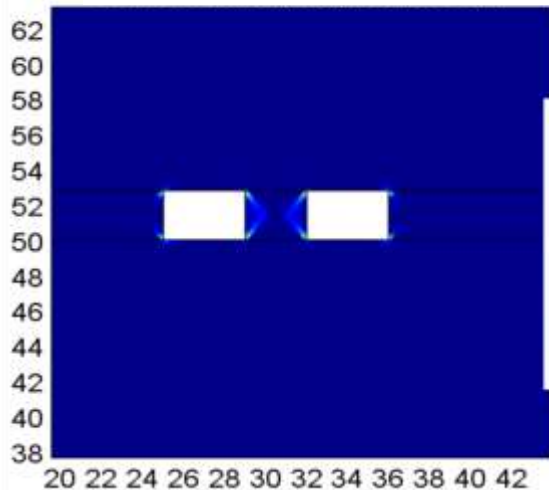
Maillage du stockage



Maillage des voies doubles

Extension de la zone endommagée liée au creusement :
(sans tenir compte de l'incendie)
calculs élastoplastiques (critère de Thorel)

L'endommagement des piliers
des voies doubles



Instabilités observées sur le site de stockage



Décollement du toit au niveau -25 m de foudroyage dans les blocs 16 et 26 (non occupés par le stockage)



Fissuration d'un pilier carré

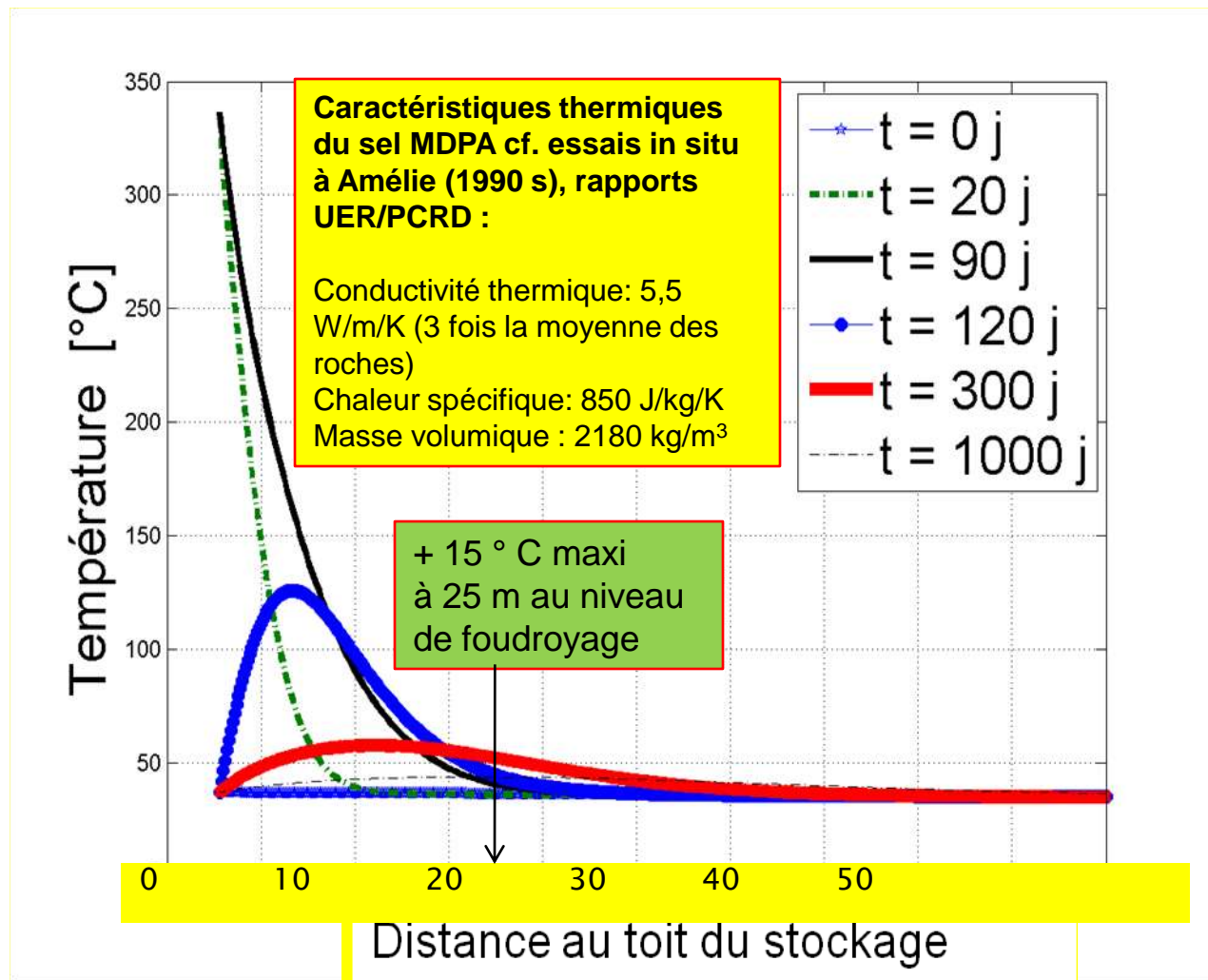
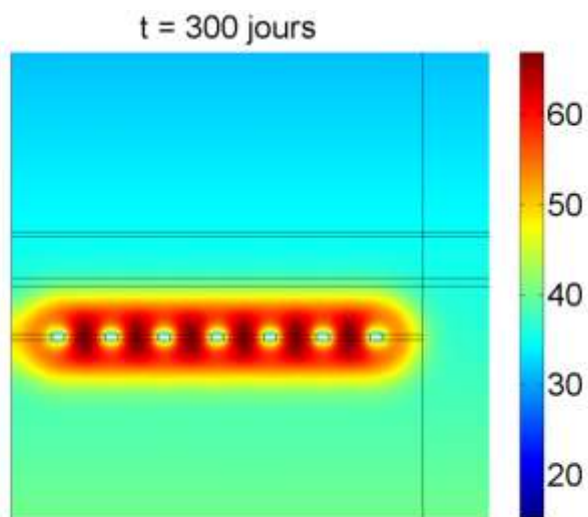
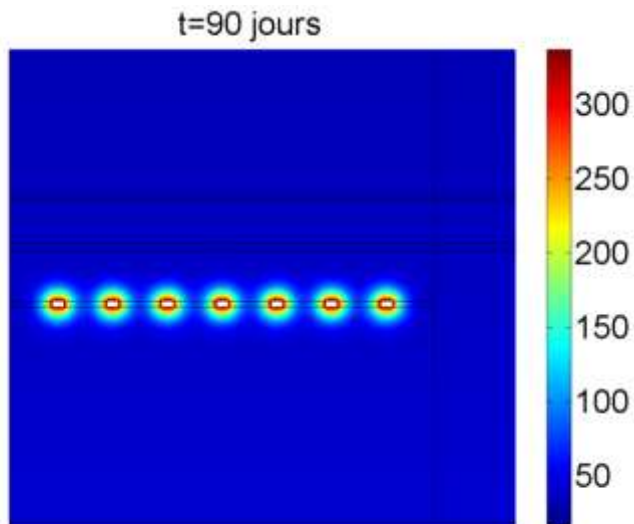


Rupture d'un pilier de voies doubles



Soufflage du mur d'une allée

Diffusion de la chaleur dans le massif liée à l'incendie du bloc 15 survenu le 19/2/2002 (300°C, pendant 3 mois, Rapport AVEC)

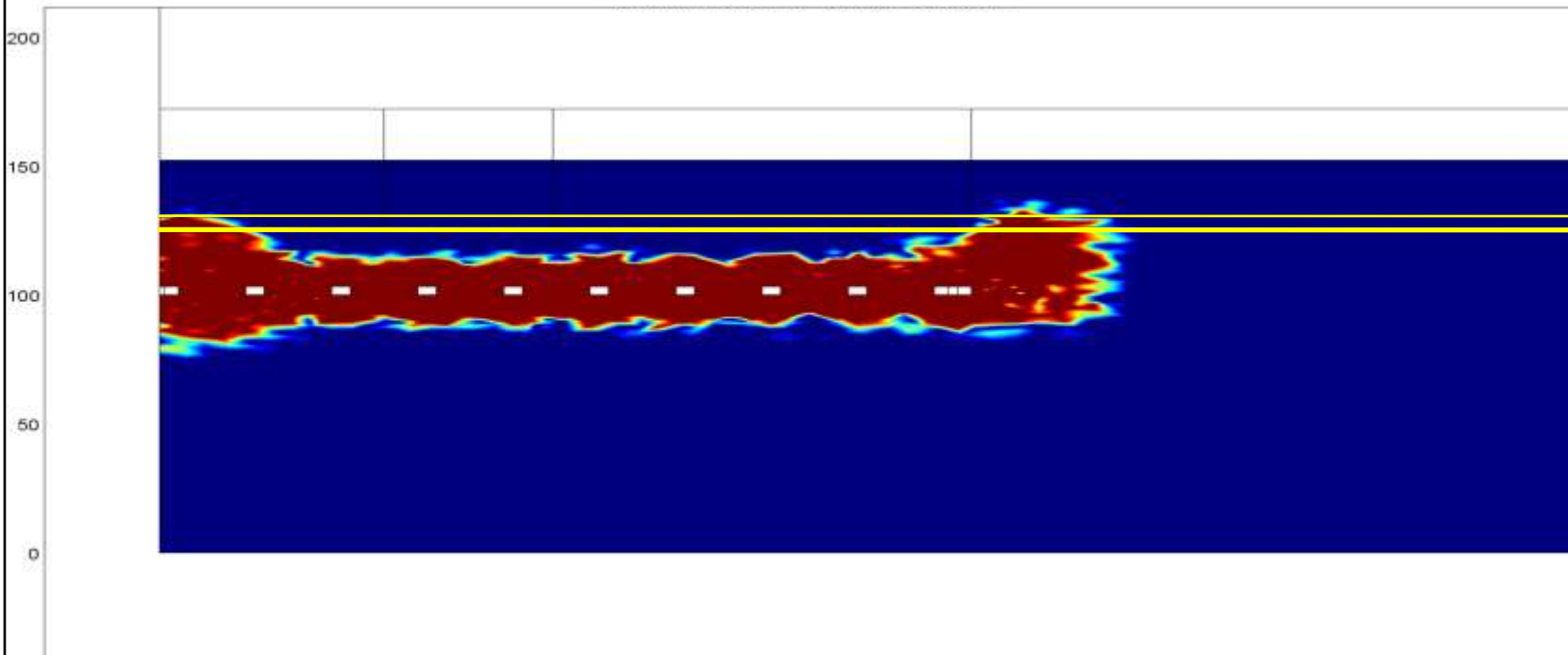


Estimation de l'extension d'endommagement lié à l'incendie du bloc 15 (1/2)

(calcul avec le modèle de Thorel, 2 ans après l'incendie)

*Incendie: 300° C
pendant 3 mois*

**Critère d'endommagement :
Fendo=0 (calcul élastoplastique non associé)**



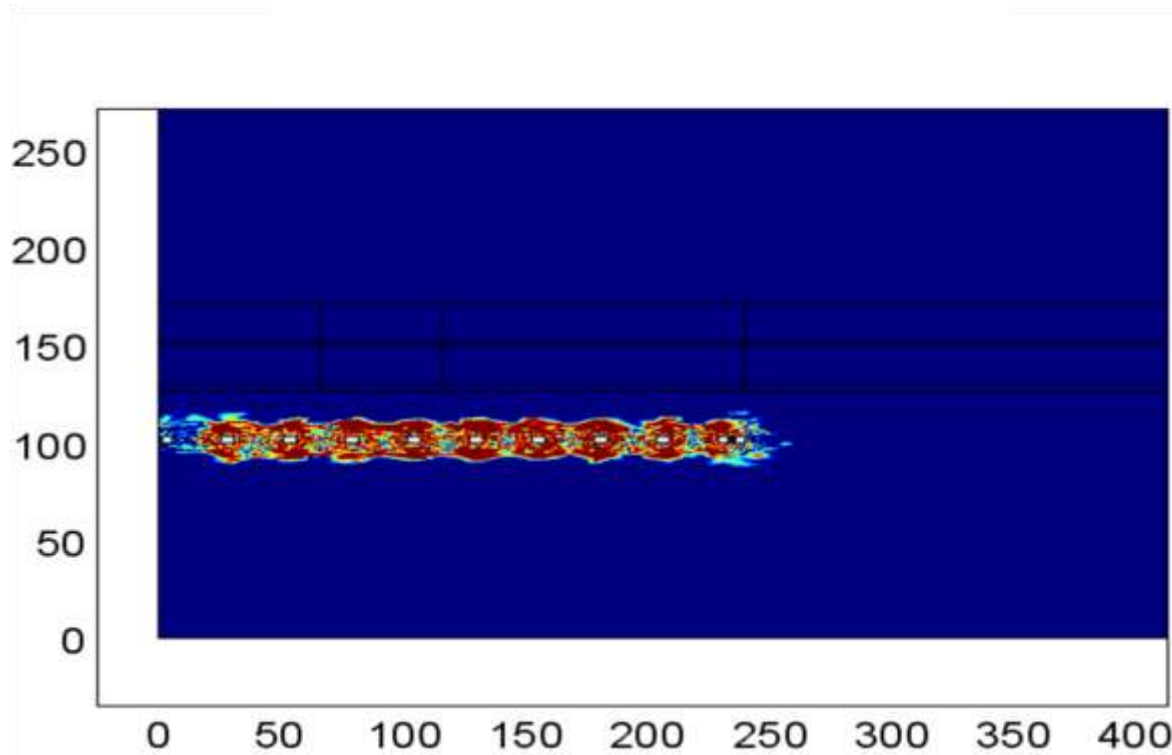
Coeff. de dilataion thermique: $4,2 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
(3fois la moyenne des roches)
Module de Young: 25000 MPa

Contrainte thermique: 1 MPa/°C soit 300 MPa à 300°C

Le modèle indique un fort endommagement des parements du bloc 15 lié à l'incendie mais cet endommagement est faible plus loin, au niveau du foudroyage

Estimation de l'extension d'endommagement lié à l'incendie du bloc 15 (2/2)

(calcul avec le modèle de Thorel, 2 ans après l'incendie)



Critère d'endommagement :
Dilatance > 0,1 %

(Schulze et al., 2001)

$$10^{-3} < \text{Porosité} < 10^{-2}$$

$$10^{-20} \text{ m}^2 < K < 10^{-13} \text{ m}^2$$

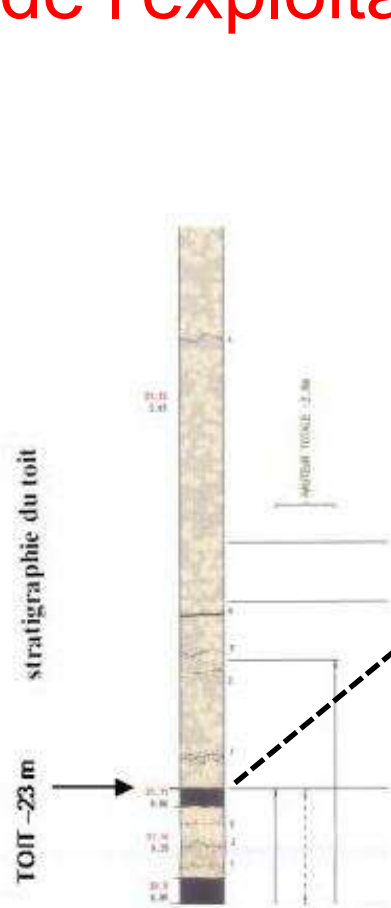
Perméabilité du sel proportionnelle
à une puissance de la porosité

D'après le calcul, la zone devenue perméable par l'endommagement ne s'étend pas jusqu'au niveau du foudroyage

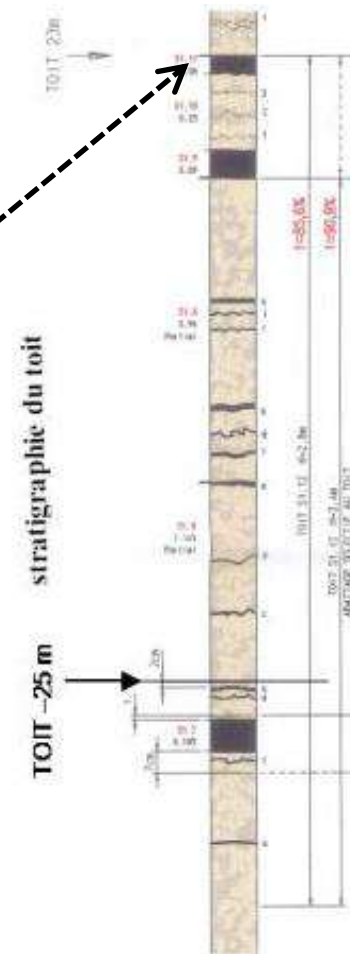
Bloc 15 affecté par l'incendie du 10/09/2002 (bloc non visité par l'INERIS, photos du rapport Mica, 2004)



Stratigraphie de toit à 2 niveaux du stockage : -23 m et -25 m de l'exploitation-foudroyage

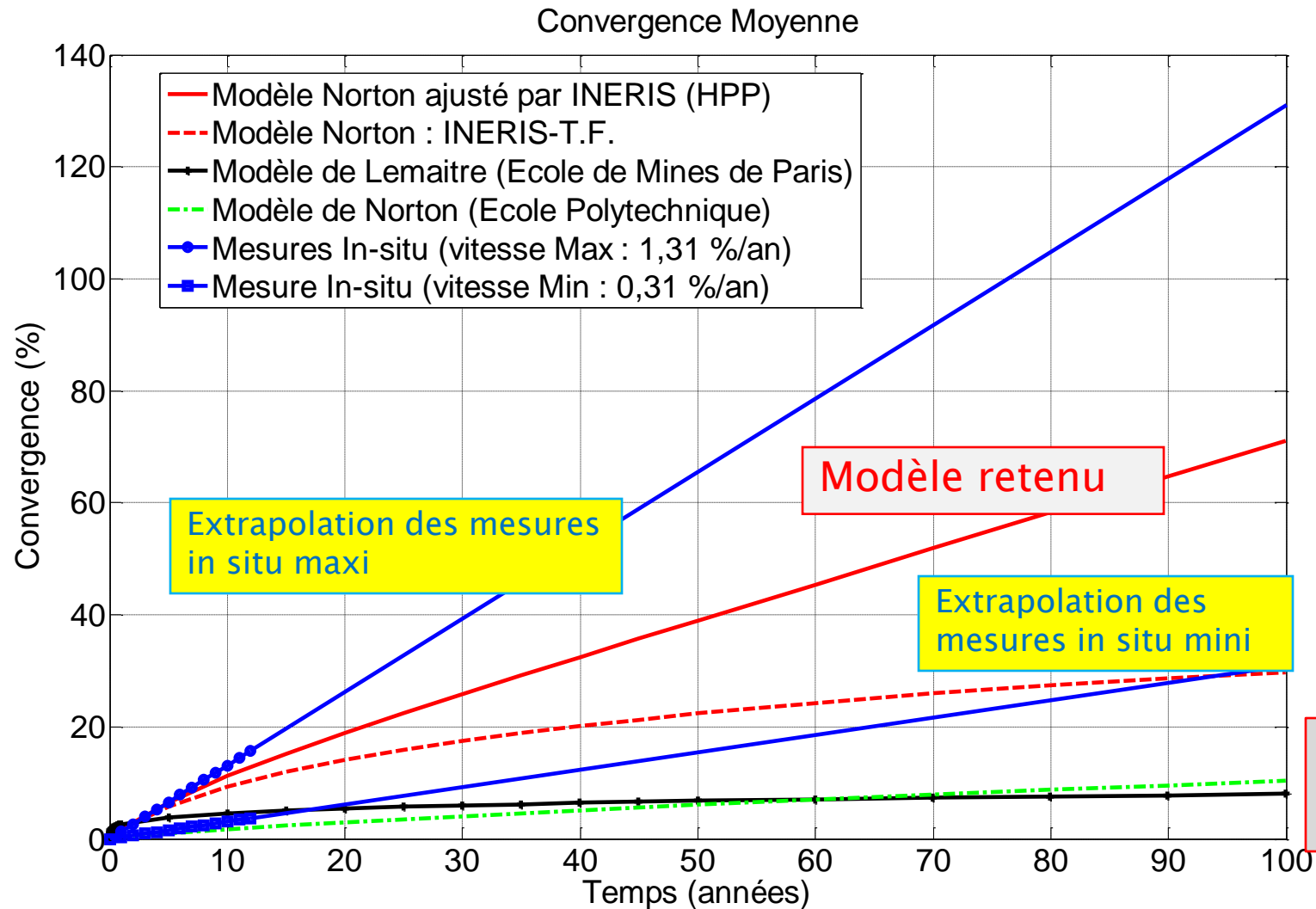


Toit à -23 m
(sel massif)



Toit à -25 m
(litage)

Fluage: comparaison des résultats des différents modèles avec les mesures in situ

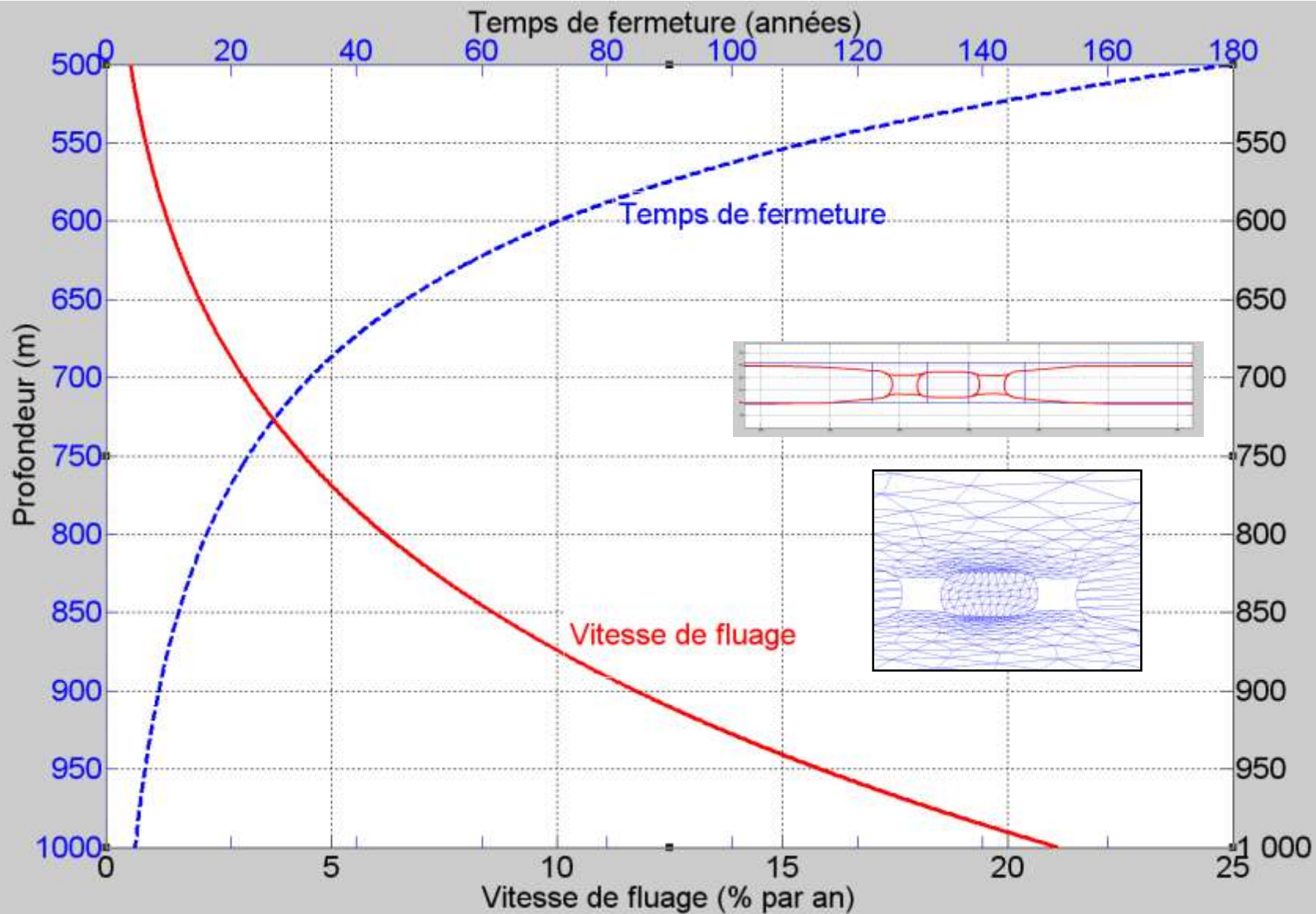


Stockage de déchets



Hauteur initiale du vide = 1 m au-dessus des déchets (hauteur de la chambre : 3 m)

Estimation de la vitesse de fluage et du temps de fermeture des voies doubles 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

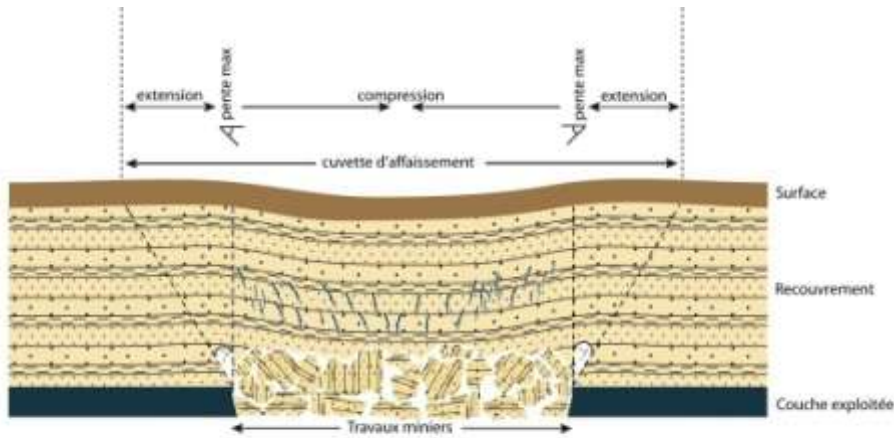
Photographies d'anciennes galeries, voies doubles et tailles recoupées par une excavation

(Rapport de B. Feuga, 2010)

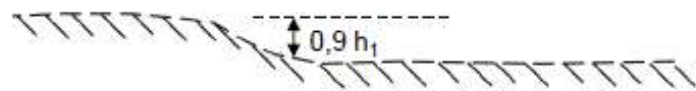


Fermeture progressive des ouvrages

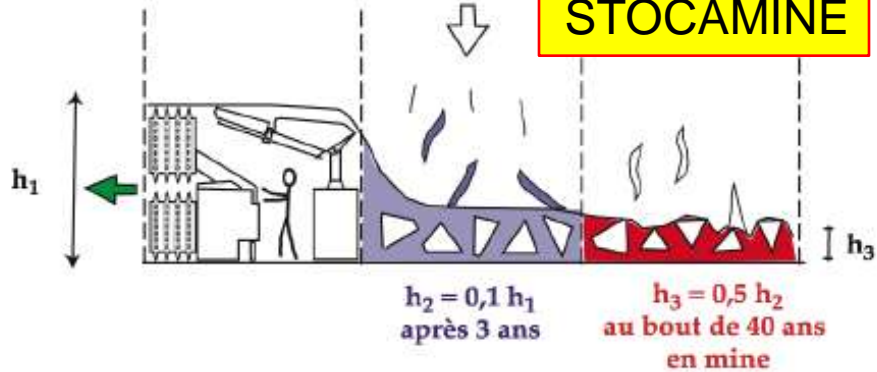
Evolution de l'affaissement lié au foudroyage



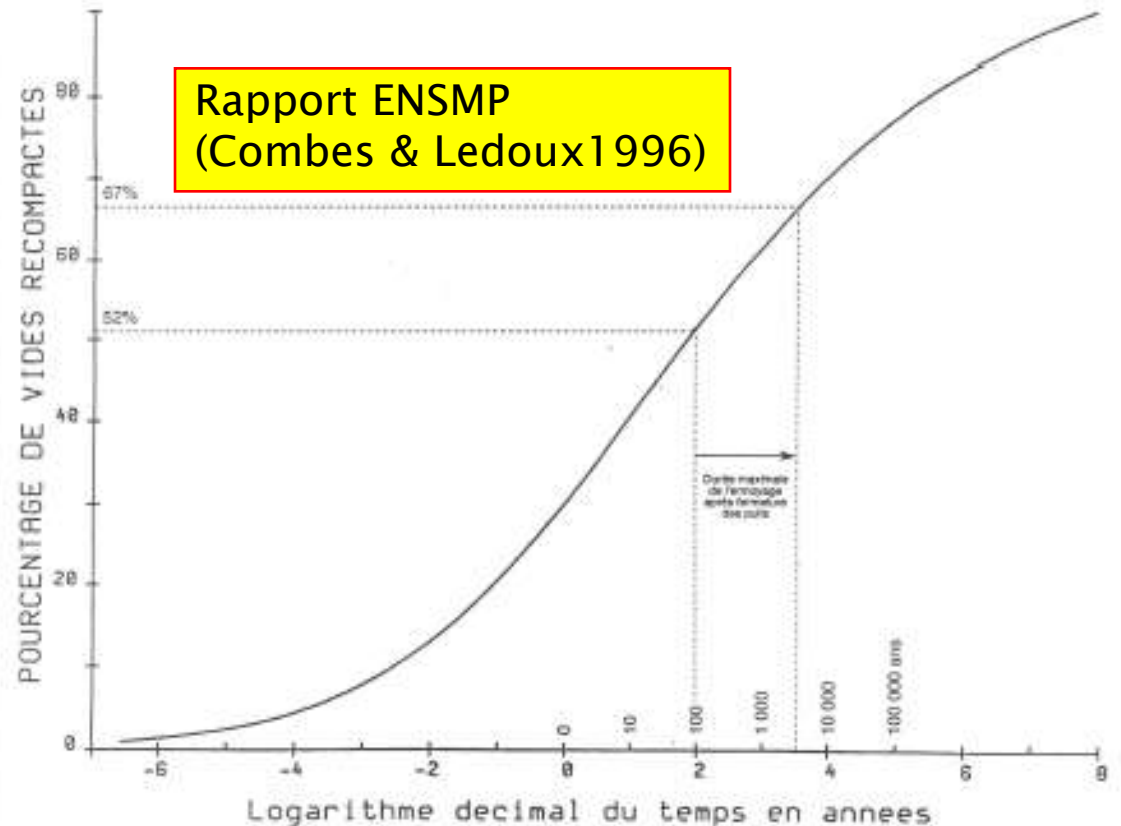
$V =$ 200 Millions de m^3	$0,1 V =$ 20 Millions de m^3	$0,1,0,5.V =$ 10 Millions de m^3 (40 ans)
-----------------------------------	--------------------------------------	---



Document
STOCAMINE



COMPACTION DU FOUDROYAGE AUX M.D.P.A.

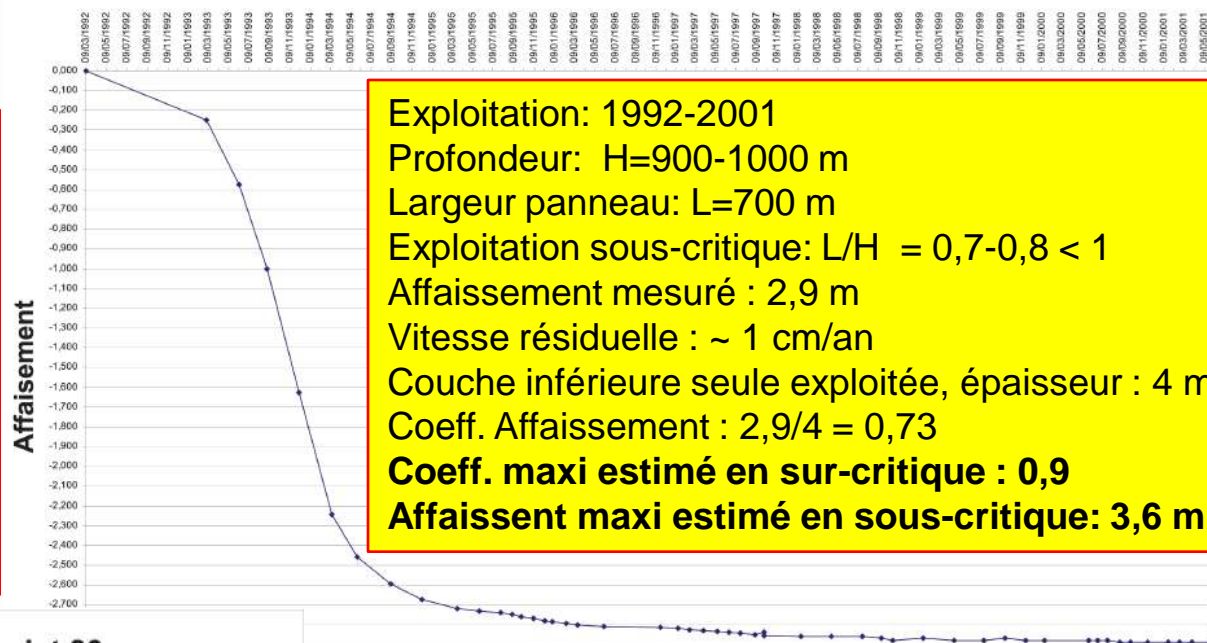


Affaissements de la surface (mesures MDPA)

1- Affaissements mesurés en bordure des panneaux sous-critiques = 50-70% de la hauteur du vide

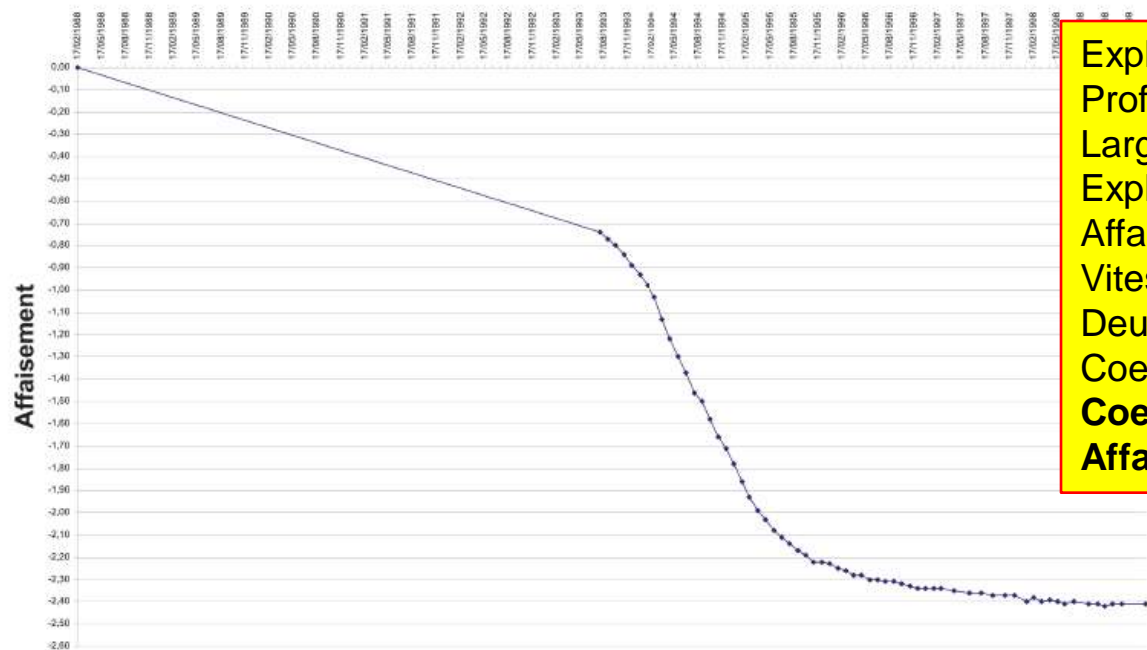
2- Affaissement estimé au centre d'un panneau sur-critique proche de 90% étant donné la grande profondeur

Commune de Bollwiller : affaissement du point 193



Exploitation: 1992-2001
Profondeur: H=900-1000 m
Largeur panneau: L=700 m
Exploitation sous-critique: L/H = 0,7-0,8 < 1
Affaissement mesuré : 2,9 m
Vitesse résiduelle : ~ 1 cm/an
Couche inférieure seule exploitée, épaisseur : 4 m
Coeff. Affaissement : $2,9/4 = 0,73$
Coeff. maxi estimé en sur-critique : 0,9
Affaissement maxi estimé en sous-critique: 3,6 m

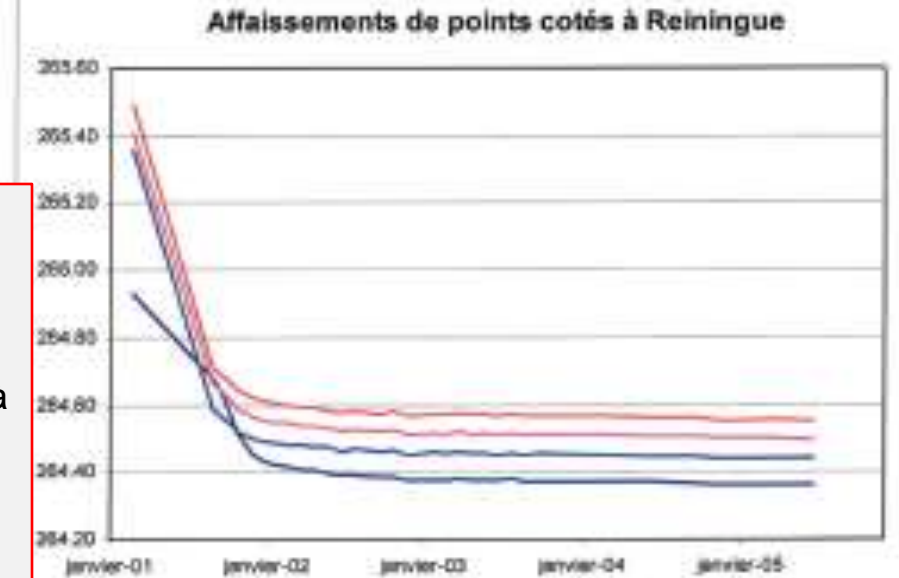
Commune de Pulversheim : affaissement du point 30



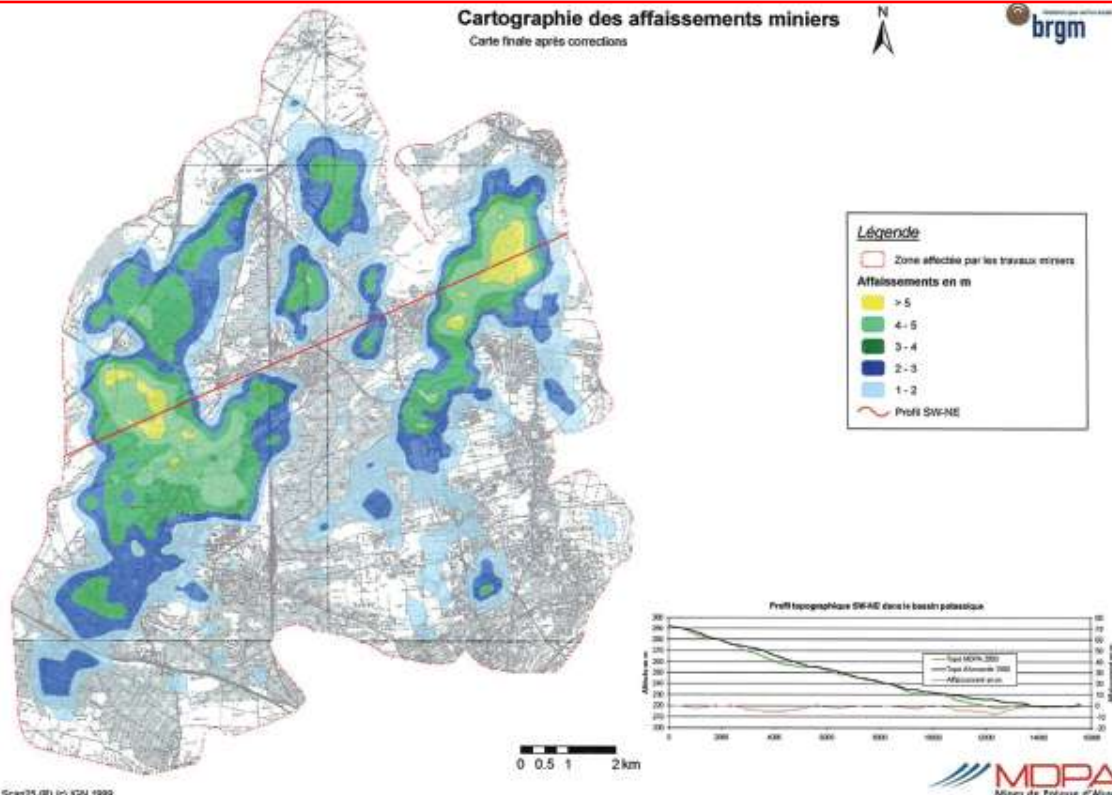
Exploitation: 1988-1999
Profondeur: H=1000 m
Largeur panneau: L=460 m
Exploitation sous-critique: L/H = 0,46 < 1
Affaissement mesuré : 2,4 m
Vitesse résiduelle : ~ 1 cm/an
Deux couches exploitées, épaisseur : 5,5 m
Coeff. Affaissement : $2,4/5,5 = 0,53$
Coeff. maxi estimé en sur-critique : 0,87
Affaissement maxi estimé en sur-critique: 4,8 m

Affaissements mesurés par les MDPA (Rapport BRGM, 2007)

- 1- Exploitation très étendue dans le secteur ouest (sur-critique)
- 2- Amplitude maxi > 5 m : ~90% de l'ouverture des 2 couches exploitées
- 3- Coeff. d'affaissement élevé à grande profondeur mais vraisemblablement plus faible à 500 m: la valeur moyenne de 90% est à confirmer
- 4- Deux hypothèse retenues aujourd'hui : cas de référence: 90% et hypothèse de 80%



Cartographie des affaissements miniers
Carte finale après corrections



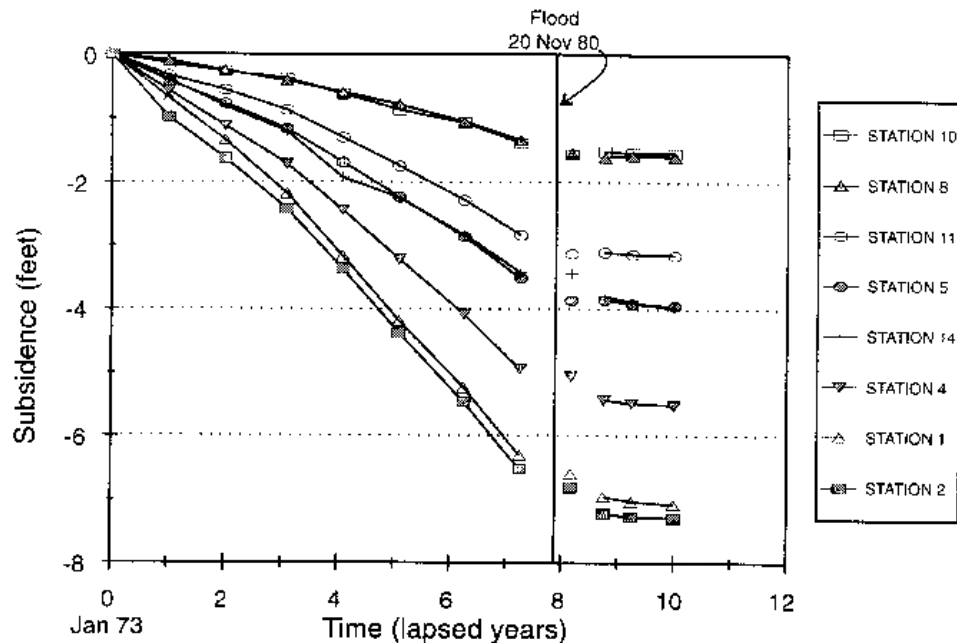
D'après quelques données disponibles (qui ne correspondent pas à la zone Stocamine (à compléter/vérifier):

Vitesse d'affaissement 10 ans après l'exploitation: environ 1 cm/an soit 0,1 - 0,2 % par an

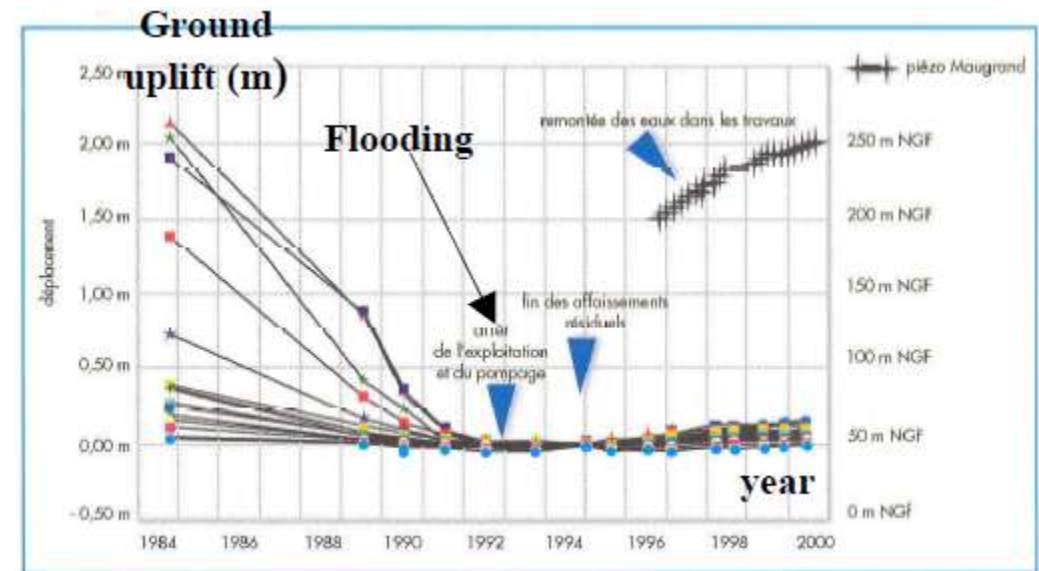
Figure 5 : Carte des affaissements miniers après correction sur fond topographique

Impact de l'ennoyage sur les mouvements des terrains

- 1- Pendant l'ennoyage:** faible soulèvement des terrains (*centimétrique*)
- 2- Après l'ennoyage:** diminution d'un ordre de grandeur des vitesses de déformation (convergence et affaissement), sous l'effet de la pression de saumure (**déviateur divisé par 2**): vitesse d'affaissement résiduel de **quelques mm/an au maximum** (vitesse de convergence voisine de **0,01% par an**)



Mesures de subsidence dans la mine de sel de Jefferson Island (USA) avant et après l'invasion de l'eau (d'après Thoms et Gehle 1994 in Brouard, 2002)



Soulèvement des terrains lié à l'ennoyage des houillères de Blanzay, Carnec et al (2001)

Conclusions (1/3)

A- Stabilité mécanique :

- Les piliers des voies desservant le stockage sont endommagés (accord entre le modèle et les observations)
 - ⇒ Problème de tenue à moyen terme et d'accès au stockage
- Le contact « toit-déchets » est inévitable (fluage + décollement des bancs) à court ou à moyen terme (quelques années à quelques dizaines d'années, selon le bloc)
 - ⇒ Impact sur le déstockage
- Les piliers et le toit immédiat de la zone affectée par l'incendie sont endommagés (cf. modélisation et photos, l'accès au bloc 15 étant condamné, il n'a pas pu être visité par l'INERIS). Cet endommagement (fissuration et décollement des bancs) n'a probablement pas atteint le niveau du foudroyage, 25 m plus haut (la perméabilité devrait rester encore très faible)



Conclusions (2/3)

B- Fluage :

- Un modèle rhéologique (Norton, largement employé à travers le monde) a été utilisé après calage des paramètres sur les mesures in situ. Il reproduit bien les déplacements mesurés pendant 10 ans.
- La vitesse de convergence est voisine de 1% par an pour les voies doubles (à 550 m de profondeur) et le site de stockage
- La vitesse de convergence est fortement influencée par la profondeur sous l'effet conjugué de deux facteurs :
 - Le déviateur de contrainte (2 fois plus fort à 1000 m qu'à 500 m, ce rapport est élevé à la puissance 3-4, soit 8 à 16 fois)
 - La température (~35 °C à 550 m, ~50°C à 1000 m, effet exponentiel (loi d'Arrhenius), soit doublement de la vitesse)
- ⇒ Fermeture des galeries au bout de quelques années à 1000 m de profondeur
- La vitesse d'affaissement résiduel des terrains foudroyés est voisine de 1 cm/an (d'après quelques mesures réalisées 10 ans après l'exploitation; l'affaissement doit être plus lent aujourd'hui) ce qui correspond à une vitesse de compaction des terrains foudroyés de l'ordre de 0,1- 0,2 % par an (à confirmer)

Conclusions (3/3)

C- Interaction « fluage-ennoyage » :

- La durée d'ennoyage dépend du volume des vides accessibles par de l'eau (**terrains foudroyés + porosité de pores / fissures des terrains perméables**). L'hypothèse de 5 à 10% de vides résiduels retenue jusqu'à présent, s'appuyant sur une amplitude d'affaissement de 90% d'ouverture des tailles est à confirmer. L'ennoyage n'interviendra qu'à long terme (**à quelques siècles**), lorsque les ouvrages d'infrastructure seront fermés (**mécaniquement, même s'ils ne seront pas étanches d'un point de vue hydraulique**).
- La pression hydrostatique d'ennoyage (**saumure + eau douce**) fera diminuer considérablement le déviateur de contraintes dans les vides (**effet de soutènement**) et conduira à une **diminution de la vitesse de fluage d'environ 1 ordre de grandeur** (inférieure à 0,01 % par an, dans les terrains foudroyés, soit inférieur à 1 mm/an (non mesurable)
 - ⇒ **Même si la compaction résiduelle sera très lente à long terme, le fluage constituera un moteur important de transport vers l'extérieur.**



Merci de votre attention !