



Jubilé du CFMR

Ecole des Mines de Paris, 14 septembre 2017

L'après-mine et la Mécanique des Roches

M. GHOREYCHI, F. LAOUAFA, F. POULARD



Problèmes soulevés par l'après-mine

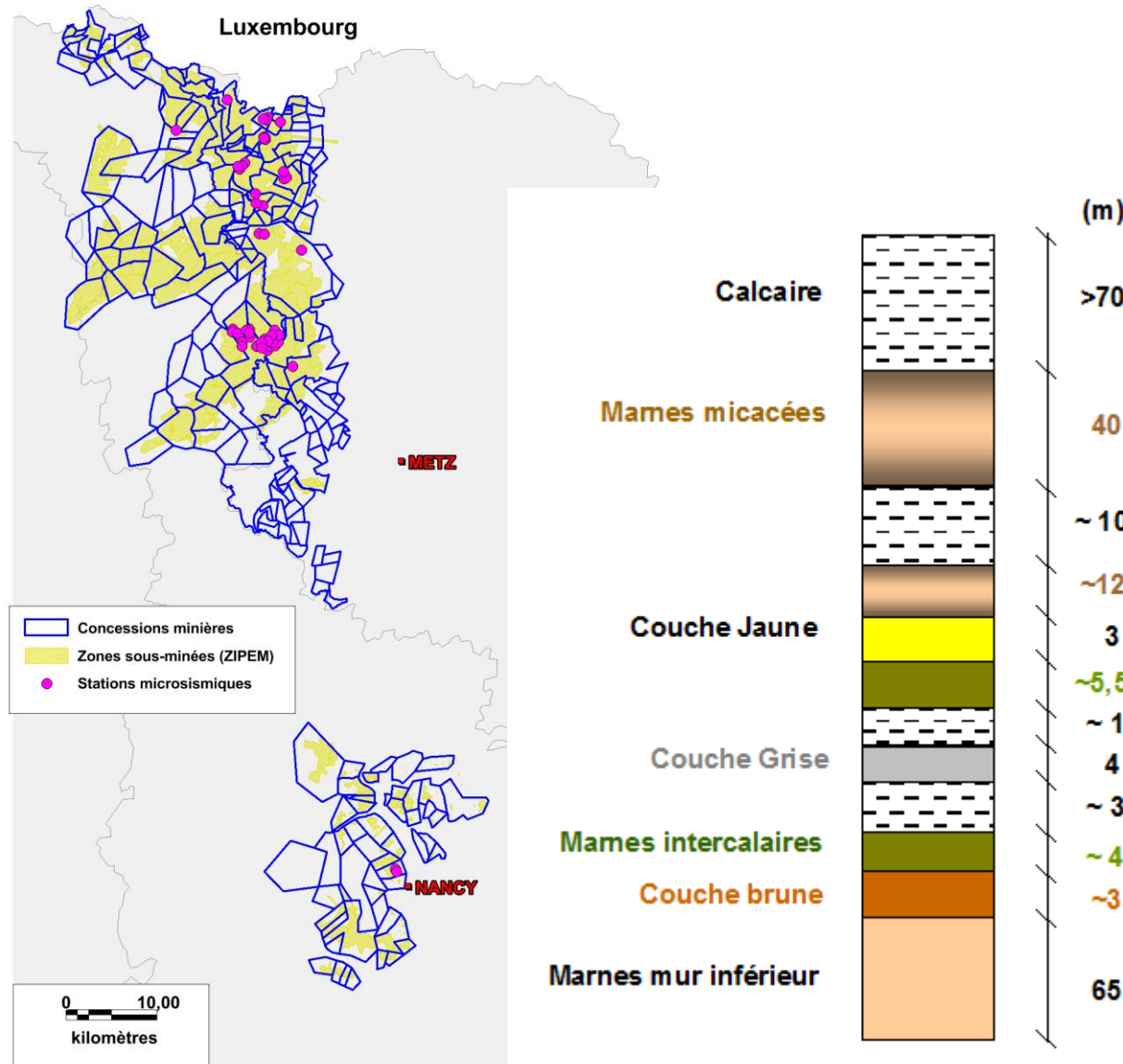
- Après une longue période d'exploitation intense des ressources minière, la France comme d'autres pays industriels est confrontée à la problématique de l'après-mine.
- Arrêt des grandes exploitations souterraines : houillères du Nord-Pas-de-Calais, en 1990. Bassin Ferrifère Lorrain, en 1997; Mines de Potasse d'Alsace, en 2002; Houillère de Provence, en 2003; Houillère du Bassin de Lorraine, en 2006. Il n'y a plus qu'une seule mine souterraine en activité en France : la mine de sel de Varangéville, près de Nancy.
- Si les mines génèrent de richesse et d'emploi, l'après-mine pose des problèmes de la sécurité publique, de la sécurité des biens, de la protection de l'environnement et de l'aménagement du territoire:
 - Effondrement et affaissement de la surface du sol.
 - Emanations de gaz communiquant avec des bâtiments: déficit d'oxygène, excès de CO₂, gaz de mine (CH₄, CO, H₂S...), radon), liées aux ouvrages ouverts ou mal fermés, aux fractures et au tirage naturel de l'air (écart de température).
 - Inondations liées à l'ennoyage.
 - Pollution des eaux de surface (résidus miniers) et souterraines (équilibre géochimique met longtemps à s'établir: exemple d'eaux sulfatées)
 - Impact sur les paysages.

La France et la mine / l'après-mine

- La France a une forte **tradition minière**. Sa compétence était reconnue en **géotechnique minière**: Ecole des Mines de Paris, CERCHAR...
- La problématique de la stabilité des ouvrages souterrains du type minier était une **préoccupation constante du CFMR depuis sa création**: Mandel, 1959; Habib, 1968; Tincelin, 1962; Maury, 1979; Vouille, 1999; Piguët, 1983; Bérest, 2010; Ghoreychi, 2006.
- La France a pris conscience de la problématique de l'après-mine dès 1990-2000: **rapport CGM-IGF (Petit et Dumas, 2003)**, création des structure de recherche et d'expertise le **Groupement d'Intérêt Scientifique GISOS (INERIS, BRGM, INPL (Ecole des Mines et Ecole de Géologie de Nancy), Ecole des Mines de Paris) et le Groupement d'Intérêt Public GEODERIS (INERIS, BRGM). (Homand, 1997; Piguët et al, 1999; Grgic et al, 2002; Josien et al, 2013).**
- Des travaux de **recherche menés pendant l'exploitation des mines** ont été mis à profit pour l'après-mine: Ecole des Mines de Paris, CERCHAR/INERIS, thèse de J-L Pineau, 1978 (sur les mines de fer de Lorraine).
- La SIMR a mis à profit l'expérience française de l'après-mine en créant une **commission internationale sur l'après-mine**, confiant sa présidence à la France (**DIDIER, 2008**).

Bassin ferrifère lorrain: un exemple représentatif de l'après-mine

Travaux de l'INERIS (Poulard, 2007)



- 120 km de long (de la frontière luxembourgeoise jusqu'au Sud de Nancy) et 30 km de large, 220 communes, 250 concessions
- Un peu plus de 3 milliards de tonnes de minerai exploités, 60 000 km de galeries creusées
- 3 bassins miniers hydrogéologiquement indépendants: Sud, Centre et Nord
- Plusieurs couches de minerai de fer exploitées par la méthode de chambres et piliers torpillés ou abandonnés (lorsque des enjeux en surface de sol étaient à préserver)
- Profondeur : 0-250 m
- Dernière mine fermée en 1997

Ennoyage des vides souterrains lié à la fermeture de la mine

Ennoyage du bassin ferrifère lorrain:

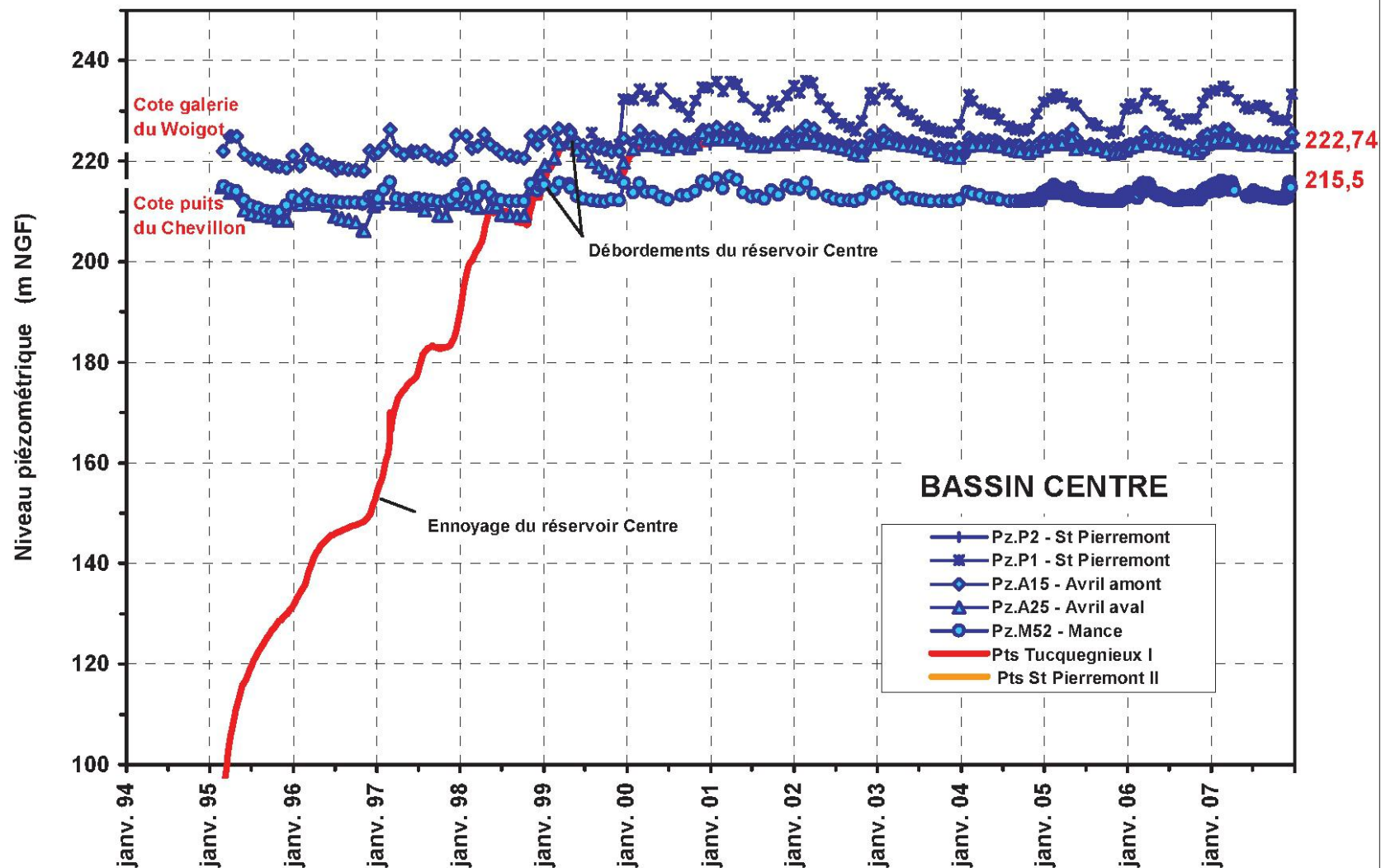
Centre 1994

Sud 1999

Nord 2005

$\frac{3}{4}$ du volume des vides ennoyés soit 450 milliards m^3

Durée de l'ennoyage: plusieurs années dans le cas présenté mais varie en général de quelques années à quelques siècles en fonction du volume des vides et du débit d'eau.



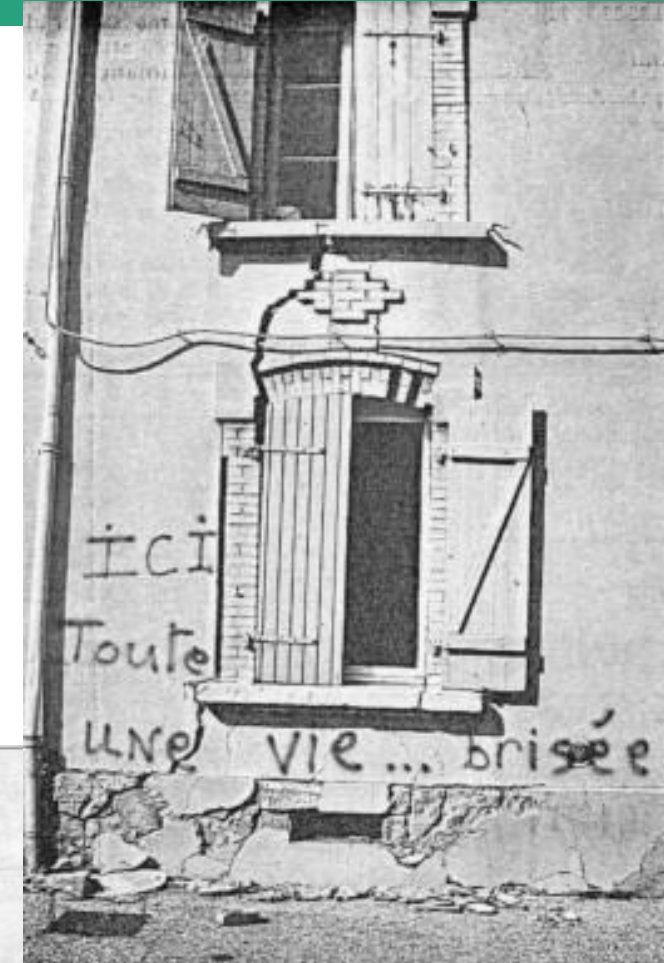
Remontée du niveau de la nappe d'eau dans le bassin ferrifère Centre (rapport BRGM, Thonnon et al, 2010).

Les dégâts liés aux accidents d'effondrements et d'affaissements : Auboué, 1996 (2 effondrements) ; Moutiers, 1997 ; Roncourt, 1999



Auboué, 1996 - bassin ferrifère lorrain

*(photo et extraits des
journaux locaux
provenant des rapports
GISOS).*



La Mécanique des Roches et l'après-mine: deux exemples d'effets géomécaniques en termes de risques d'effondrement et d'affaissement

1- Impact de l'envoyage sur l'état de stabilité d'une ancienne exploitation par chambres et piliers

Effet « paradoxal » de l'envoyage (remontée des eaux après l'arrêt de pompage à la fermeture de l'exploitation):

- Il existe des mines envoyées volontairement ou par accident **sans poser de problème de stabilité**: par exemple, la mine de sel de Dieuze en Lorraine, envoyée par accident en 1864. Les investigations de GEODERIS ont montré que la tenue des galeries envoyées ne posait aucun problème (Feuga, 2003).
- Il existe d'autres cas où l'envoyage de la mine a conduit à **des effondrements / affaissements**. C'est le cas du bassin ferrifère lorrain.

2- Impact d'une exploitation sur plusieurs niveaux (multi-couches)

- Effet spécifique à certaines mines telles que les mines de fer de Lorraine
- Là encore, les **mécanismes d'instabilité** pas encore suffisamment maîtrisés.

Considérons le cas d'une mine exploitée par la méthode des chambres et piliers abandonné dans 3 configurations distinctes et **comparons les coefficients de sécurité F** (résistance / contrainte verticale moyenne dans les piliers¹) des différentes configurations:

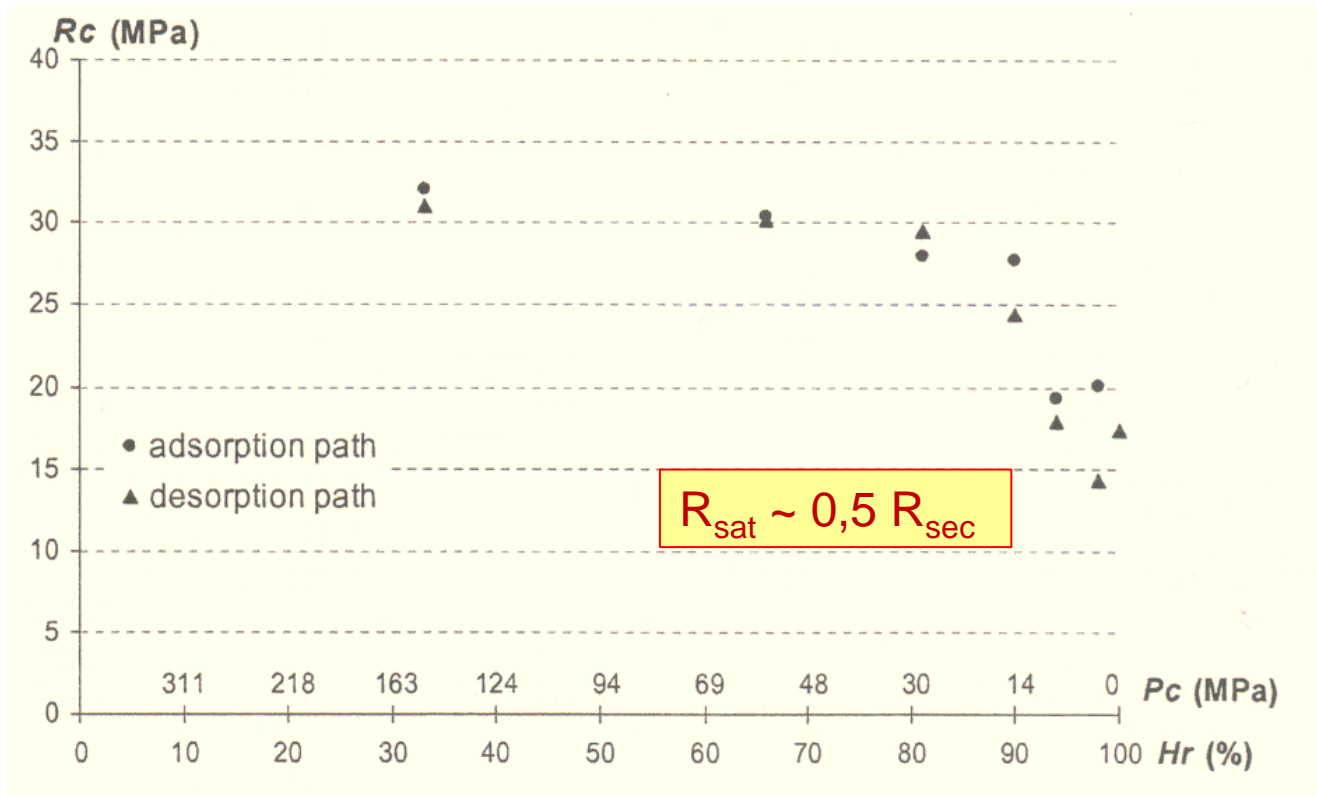
- a- le massif rocheux est entièrement sec : F_{sec}
- b- le massif est entièrement saturé mais les vides ne sont pas ennoyés: pas de présence d'eau (aucune pression d'eau n'est exercée sur la paroi des excavations) : F_{sat}
- c- le massif rocheux est entièrement saturé et les chambres ennoyées (pression hydrostatique à la paroi liée au niveau d'eau remontée dans le recouvrement):
 F'_{sat}

$$F'_{\text{sat}} / F_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} / (\rho_{\text{sat}} - \rho_{\text{eau}}) > 1 \quad (\rho : \text{poids volumique})$$

Déjaugage des terrains et soulagement des piliers : effet bénéfique d'ennoyage

En revanche:

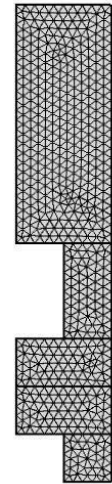
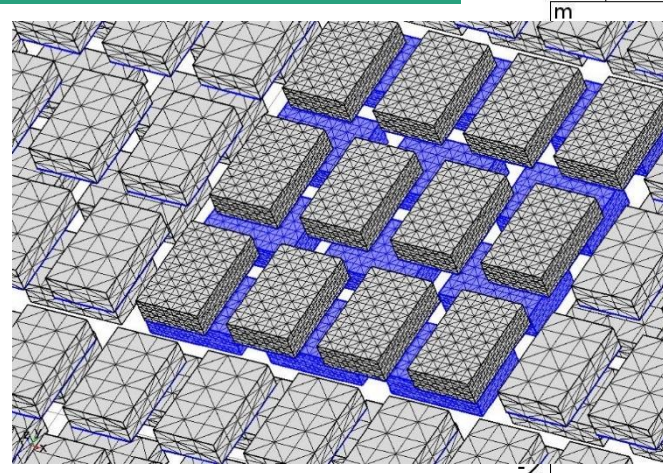
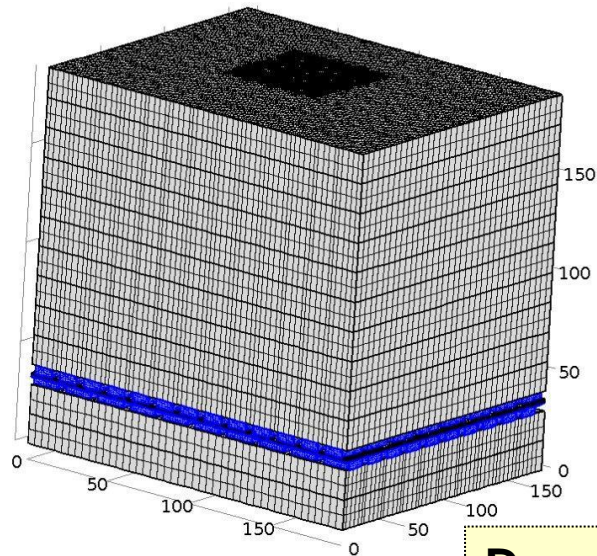
$$F_{\text{sat}} / F_{\text{sec}} = (R_{\text{sat}} / R_{\text{sec}}) \times (\rho_{\text{sec}} / \rho_{\text{sat}}) < 1 \quad (\text{R: résistance à la compression uniaxiale})$$



Dans la phase transitoire d'ennoyage (remontée du niveau d'eau), il existe une **période critique** (hauteur d'eau critique) où la stabilité d'une ancienne exploitation minière peut être menacée: cela est conforme aux REX de l'après-mine où plusieurs effondrements et affaissements se sont produits au début d'ennoyage.

Diminution de la résistance du minerai de fer de Lorraine en fonction de l'hygrométrie
(Travaux de GISOS, Grgic et al, 2006)

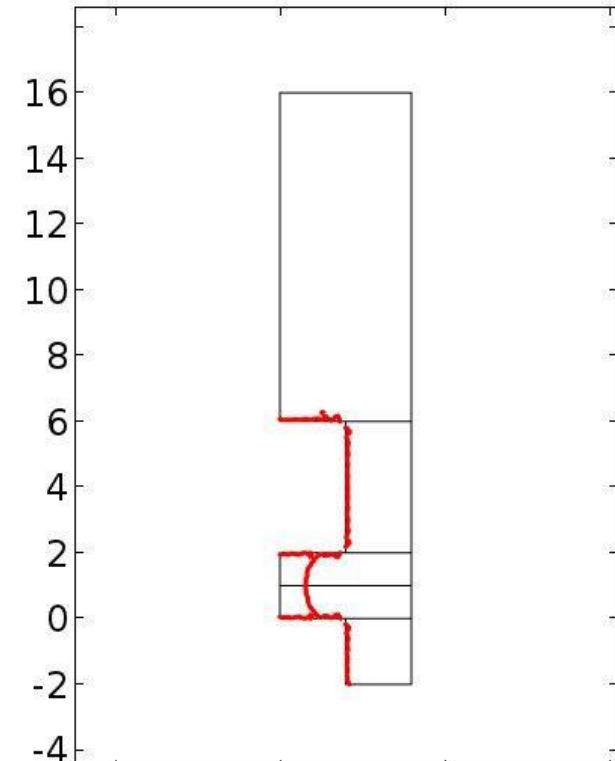
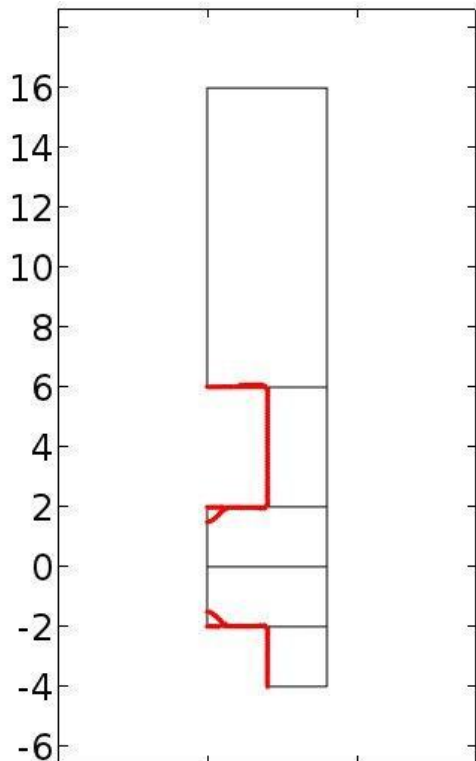
Impact de plusieurs niveaux de vides souterrains (exploitation multi-couches) 1/2



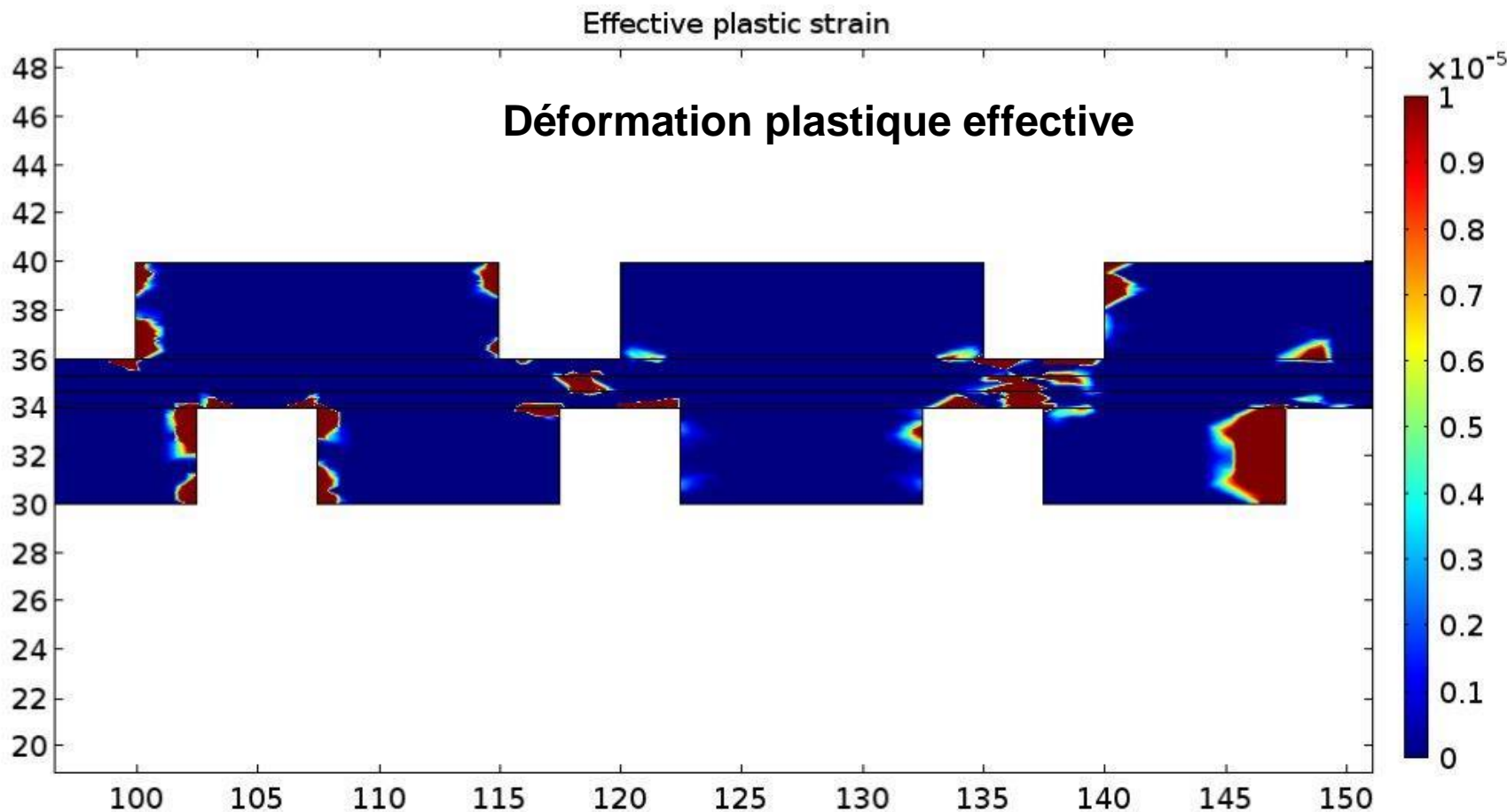
Dans une exploitation multi-niveaux:

- le niveau de la contrainte verticale moyenne dans les piliers des différents niveaux est **pratiquement le même**;
- Mais l'élément critique est le risque élevé de rupture **des bancs d'intercalaires**, lié aux **contraintes de traction**. Ce risque est d'autant plus élevé que l'épaisseur de l'intercalaire est faible.

Voir les lieux géométriques des points où la contrainte principale mineure est nulle. L'intercalaire est 2 fois moins épais à droite qu'à gauche



Un autre facteur aggravant est la mauvaise superposition des piliers des différents niveaux: **risque de rupture induit par le poinçonnement / cisaillement**



Conclusion

- Progrès récents en géomécanique (mécanismes d'instabilité / rupture, modélisation, auscultation / surveillance, confortement / traitement) : meilleure maîtrise des risques de l'après-mine.
- Savoir-faire français, apport du CFMR : atouts reconnus sur le plan international.
- Importants efforts techniques, administratifs et réglementaires pour une meilleure gestion des risques environnementaux, sanitaires et liés à la sécurité publique.
- Nécessite des travaux de recherche mobilisant des compétences aux niveaux national et international.
- REX de l'après-mine: nécessite d'une réflexion approfondie sur l'après-mine dans tout nouveau projet d'exploitation du sous-sol (minière ou pétrolière, voire stockage souterrain), dès le stade de projet en prenant en compte également les dimensions socio-économiques et environnementales (Développement Durable), approche indispensable désormais pour tout développement industriel.