

Déplacements

Les piliers pénètrent dans les marnes sous-jacentes qui sont repoussées vers les surfaces libres, c'est-à-dire les murs des deux galeries voisines, qui se soulèvent. Comme le volume des marnes demeure constant, le rapport entre l'enfoncement des piliers – qui est à peu près égal à la descente du toit – et le soulèvement du mur est dans le rapport des aires horizontales des piliers et des chambres, $\tau/(1 - \tau) \approx 4$, sauf toutefois au voisinage du pilier central et des bords fermes, où ce rapport est localement plus important. Notamment le poinçonnement précoce du mur par le pilier central déplace un volume important de marnes, permettant le soulèvement du mur de la galerie qui lui est contiguë. La figure 7 donne une image plus détaillée des déplacements dans les deux premières galeries les plus proches du pilier central. La descente du toit (40 cm) est identique dans les deux galeries. Les piliers poinçonnent le mur, de 38 cm pour le pilier central, et le mur se soulève de 40 cm dans la galerie n° 1 (le taux de défrêtement local est proche de 50 %, et la descente du toit est presque égale à la montée du mur), moins dans les autres galeries, où le soulèvement est plus marqué au voisinage des piliers. La réduction de hauteur des galeries est la quantité que les mineurs pouvaient observer : le calcul la prédit un peu supérieure à 80 cm dans la galerie n° 1 : c'est l'ordre de grandeur de ce qui a été rapporté pour la galerie Sainte-Julie. Le modèle prédit aussi que le bord ferme poinçonne les marnes : cet effet n'est pas très réaliste, les marnes étant vraisemblablement restées sèches dans cette zone, mais le modèle ne rend pas compte de cette hétérogénéité probable de la cohésion.

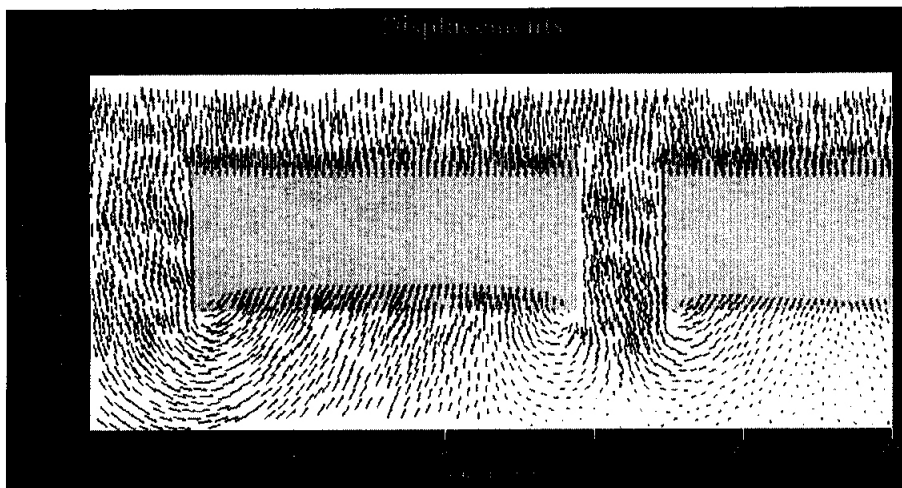
Sous le premier pilier, à 35 m environ de l'axe du puits, l'écoulement des marnes est à peu près symétrique, de sorte qu'à la base du pilier des cisaillements de signe opposé sont appliqués sur la moitié gauche et la moitié droite. Le pilier étant raide en comparaison des marnes, des tractions horizontales apparaissent dans sa partie inférieure. Dans la vraie mine, ce mécanisme explique l'ouverture de fractures verticales, qui suivent les surfaces de faiblesse mécanique constituées par les

fentes remplies de marnes qui traversent les piliers. Dans la chambre la plus extérieure (non représentée) des compressions sub-horizontales sont engendrées dans les coins supérieur et inférieur du côté du bord ferme, comme il est logique au voisinage de l'encastrement d'une plaque en flexion. Après l'effondrement, la flexion du toit est plus grande, et ces contraintes de compression ont dû atteindre des valeurs considérables qui expliquent les dégâts observés dans le toit. Toutes ces remarques sont qualitatives, le modèle numérique ne reflétant que grossièrement la géométrie réelle des piliers.

Variantes

Les mêmes calculs ont été conduits en conservant l'hypothèse du toit « mou » mais en augmentant la cohésion du mur. Pour des valeurs de $C = 1$ ou $1,25$ MPa (au lieu de $C = 0,75$ MPa dans le cas de référence) l'évolution des charges portées par les piliers est la même que dans le cas de référence : elles convergent lentement vers la capacité portante du mur, qui est proportionnelle à sa cohésion. La réduction de hauteur de la première galerie après 25 ans est de 74 et 25 cm, respectivement, au lieu de 105 cm dans le modèle de référence. Dans la réalité la convergence était certainement supérieure à 80 cm (après 15 ans) de sorte que $C = 0,75$ MPa apparaît comme le meilleur choix. Quand on retient $C = 2$ MPa, la charge moyenne sur les piliers est de l'ordre de 9 MPa, moins que la capacité portante du mur qui est de l'ordre de $\omega C = 12$ MPa, et les piliers ne poinçonnent pas le mur ; d'ailleurs le déplacement vertical du toit après 25 ans n'est que de 35 mm : cette configuration est sans doute proche de celle de la mine sèche, telle qu'elle a été exploitée (sans eau) après 1873. Il est vraisemblable toutefois que les caractéristiques réelles des marnes sèches sont encore plus élevées (aucun indice de poinçonnement du mur n'a été observé depuis 135 ans dans la mine sèche).

On a aussi envisagé le cas d'un toit « raide » en conservant la cohésion de $C = 0,75$ MPa. Les charges verticales à 25 ans sur les piliers sont à peu près



Champ des déplacements dans les deux premières galeries 15 ans après l'ouverture de la mine.

Displacement field in the first and second galleries 15 years after mine creation.

inchangées, un résultat logique puisque ces charges tendent à devenir proportionnelles à la cohésion des marnes du mur. Mais avant cette date elles sont plus élevées que dans le modèle de référence, le poinçonnement étant plus progressif : le déplacement vertical à la base du pilier central à 25 ans n'est que de 21 cm au lieu de 44 cm dans le modèle de référence, qui doit donc être préféré.

9

L'effondrement

9.1

A la recherche d'un mécanisme de ruine

Le modèle, tel que décrit jusqu'ici, ne contient pas de mécanisme pouvant conduire à la ruine brutale du quartier. Certes l'écoulement libre est rapidement atteint sous les piliers ; mais le toit conserve une certaine raideur à la flexion qui limite le déplacement vertical des piliers et empêche un poinçonnement complet. Une ruine brutale ne peut qu'être associée à une chute brutale de la valeur d'un des deux paramètres essentiels, la cohésion du mur ou la raideur du toit, qui déterminent chacun un mécanisme particulier de rupture.

Une condition nécessaire pour que le premier mécanisme soit efficace est que le toit soit encore beaucoup moins raide qu'on ne l'a supposé jusqu'ici. On peut imaginer alors que la cohésion du mur marnéux – qu'on a choisie jusqu'ici faible mais uniforme et constante dans le temps – chute brutalement dans une large zone au cours du processus de dégradation par l'eau. Ce n'est pas une hypothèse invraisemblable, mais elle n'est pas conforme à l'image progressive que l'on peut se faire de l'infiltration de l'eau dans le mur.

Dans le second mécanisme, c'est la raideur du toit qui chute brutalement. On a observé que dans la galerie la plus extérieure le toit s'est effondré sur une épaisseur de plus de 3 mètres, et on pourrait être tenté d'y voir l'origine au moins immédiate de l'effondrement ; mais le toit de sel fait 70 m d'épaisseur, et une réduction de $3/70 = 4\%$ de cette épaisseur ne suffit pas à réduire significativement la raideur à la flexion. La chute du toit dans les galeries extérieures est très vraisemblablement une conséquence plutôt qu'une cause de l'effondrement. D'ailleurs il est difficile de concevoir que cette chute du toit, si elle avait été l'élément déclencheur, n'eût pas été précédée de signes précurseurs : les mineurs n'en rapportent aucun. Il est plus logique de chercher un mécanisme plus global.

9.2

Dilatance au-dessus du pourtour

On a vu que l'équilibre mécanique d'ensemble du quartier exige que des cisaillements verticaux croisés se développent sur le pourtour du cylindre constitué par les terrains au-dessus du quartier. Or on sait que le sel s'endommage (sans rompre franchement) quand l'état de contrainte sort d'un domaine dit « dilatant » (la formulation la plus simple du critère dilatant est $\sqrt{J_2} = C|I_1|$; $I_1 = \sigma_{kk}$ désigne le premier invariant du tenseur des contraintes et $J_2 = s_{ij}s_{ji}/2$ où $s_{ij} =$

$\sigma_{ij} - \sigma_{kk} \delta_{ij}/3$ est le second invariant du tenseur déviateur des contraintes) à l'extérieur duquel une microfissuration se développe, accompagnée de l'augmentation de la perméabilité, de la chute de la vitesse du son, de l'accroissement de l'émission acoustique et de celui de la vitesse de déformation, décrit par Chan *et al.* (1996) sous la forme d'un endommagement au sens de Katchanov ou Lemaitre. La description du comportement post-dilatant d'une structure complexe est délicate – une localisation des déformations est probable – mais on peut en première approche utiliser une analogie : si une large zone « dilatante » (c'est-à-dire où le critère dilatant est excédé) s'étend et notamment traverse la masse de sel, l'équivalent d'un écoulement libre devient possible. On a donc tracé l'évolution au cours du temps de la zone où le critère dilatant est dépassé. On a utilisé le critère dilatant assez élaboré proposé par De Vries (2003) pour le sel en couches de Cayuta (état de New York) ; on a utilisé toutefois des valeurs des paramètres de ce modèle qui rendent le sel de Varangéville un peu moins résistant que celui de Cayuta. On désigne par FOS (Factor of Safety) la valeur du critère pour l'état de contraintes calculé (ce rapport est supérieur à 1 quand

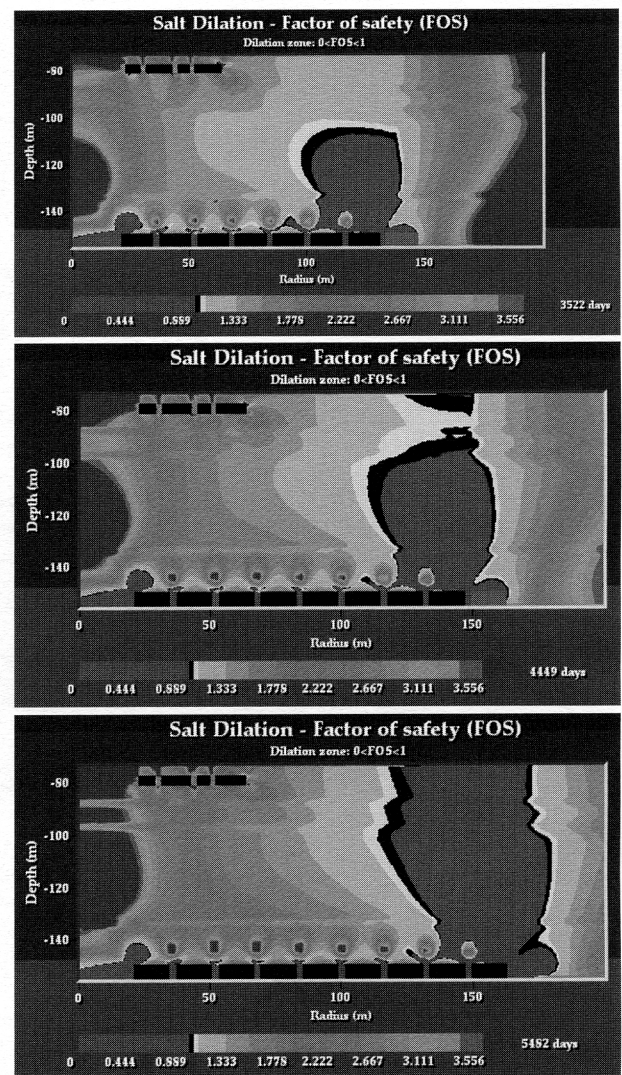


FIG. 8 Progression de la zone dans laquelle le critère dilatant est dépassé pendant l'excavation des galeries n°s 7, 8 et 9. Progression of the zone in which the dilation criterion is met during excavation of galleries n°s 7, 8 and 9.