

L'EFFONDREMENT DE 1873 A LA MINE DE VARANGEVILLE

THE 1873 COLLAPSE AT THE VARANGEVILLE SALT MINE

P. BEREST¹, B. BROUARD², B. FEUGA³, M.KARIMI-JAFARI¹

¹Laboratoire de Mécanique des solides, Ecole Polytechnique

²Brouard Consulting

³Geoderis

RÉSUMÉ – On décrit l'effondrement d'un quartier de mine de sel dans lequel les piliers ont poinçonné le mur imbibé de saumure quand l'extension de la mine a diminué la raideur du toit. Le calcul numérique montre qu'au moment de l'effondrement une zone dilatante traversant toute la couche de sel s'était formée.

ABSTRACT – The 1873 collapse of a panel of the Varangéville Mine is described. Pillars punched the marly floor when mine extent made the roof soft enough. Numerical computations prove that a dilatant zone, crossing through the salt layers had formed upon the mine edge, leading to the catastrophic final evolution.

1. L'effondrement de 1873

Le 31 octobre 1873, le quartier Saint-Maximilien de la mine de sel de Varangéville s'effondrait brutalement. La secousse fut ressentie à Nancy, distante d'une dizaine de kilomètres. A la surface du sol, une cuvette de subsidence s'était formée (Figure 1). Plusieurs rangées de fissures verticales ouvertes peu profondes

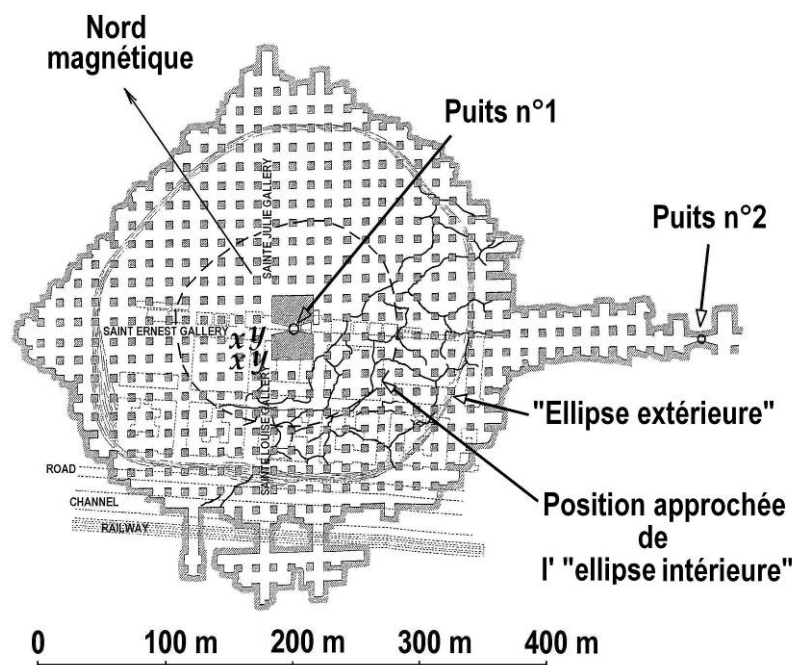


Figure 1. Plan du quartier Saint-Maximilien, avec les fissures apparues lors de l'effondrement. On a reporté le réseau polygonal des fentes verticales remplies de marnes, les bâtiments de surface sont en pointillés. D'après Braconnier, 1873a.

délimitaient une « ellipse extérieure », d'un rayon de 160 m environ, inscrite à l'intérieur du périmètre extérieur des travaux miniers. Des bourrelets s'étaient formés sur le pourtour d'une « ellipse intérieure » de rayon moitié, qui était descendue uniformément de 3,3 mètres. Le puits n°1, d'une profondeur de 160 m, était intact. Entre les deux ellipses la pente prise par la surface du sol était régulière.

Les 1 et 2 novembre des mineurs et Marie-Alfred Braconnier, ingénieur des mines, descendirent par le puits n°2 pour visiter les travaux effondrés. La mine était exploitée par chambres et piliers, dans la 11^{ème} couche de sel, entre 150,5 et 156 m de profondeur. Les piliers carrés, de 6 m de côté, laissaient un taux de défrètement de 82%. Toutefois un pilier rectangulaire de 29 m x 40 m protégeait le puits n°1 (Figure 1). Le mur de la mine est constitué par une couche de marnes, d'au moins 25 m d'épaisseur, molles en profondeur, très résistantes dans le mur immédiat, mais qui s'étaient profondément quoique non uniformément dégradées sous l'effet de la saumure et de l'eau. Celles-ci étaient très présentes dans la mine, notamment parce que les tirs étaient précédés d'un découpage à l'eau douce. Les trois rapports qu'a laissés Braconnier (1873 a,b,c) suggèrent fortement le schéma d'effondrement suivant : autour du puits central, sous l'ellipse intérieure, un cylindre de hauteur 160 m et de rayon voisin de 80 m est descendu en bloc, de 3,3 mètres, sans pratiquement se déformer, en poinçonnant le mur de la mine (Figure 2).

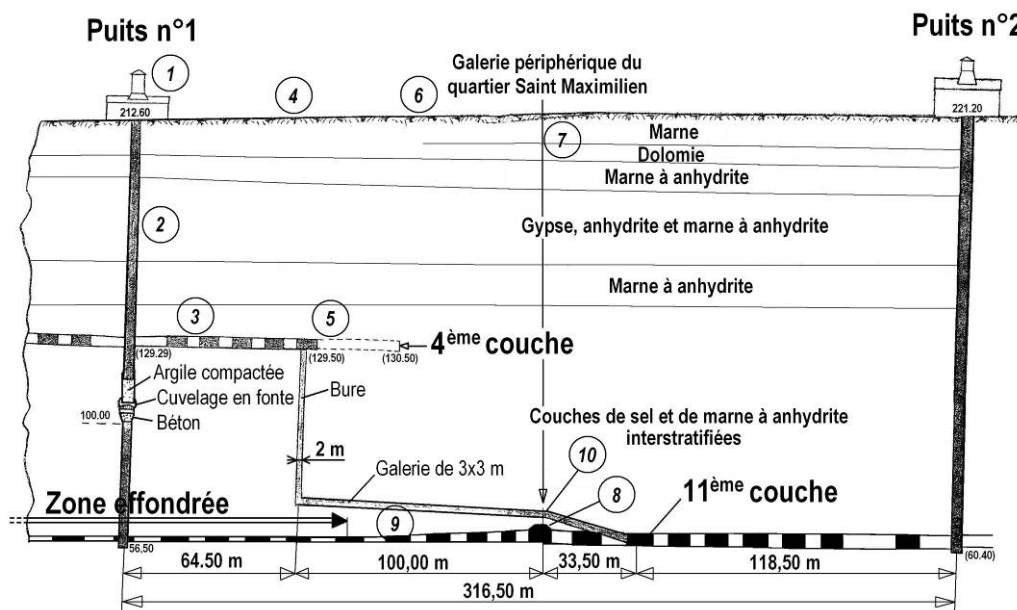


Figure 2. Coupe verticale des travaux. D'après Braconnier, 1873c.

En effet (1) à l'intérieur de cette ellipse, le sol est resté plat (2) le puits est resté intact (3) le petit quartier exploité dans la 4^{ème} couche en 1859, à 70 m au-dessus de l'exploitation de 11^{ème} couche, est resté intact, à l'exception de quelques fissures débitant un peu de saumure à l'extrémité d'une galerie, à 80 m de l'axe du puits. En revanche la couronne comprise entre ce cylindre central et le cylindre qui s'appuie sur le contour extérieur du quartier, entre 80 m et 160 m de distance à l'axe du puits, s'est déformée. Cette déformation doit être complexe dans le détail, les terrains étant stratifiés. Néanmoins on peut grossièrement la décrire, dans un plan méridien vertical, comme une flexion. En effet (4) des bourrelets indices d'une compression

horizontale se sont formés en surface sur le pourtour de l'ellipse intérieure (5) de petites fractures sont apparues à la périphérie de l'exploitation de 4^{ème} couche (6) le sol a pris une pente régulière entre les deux ellipses (7) des fractures indices d'une traction horizontale se sont formées sur le pourtour de l'ellipse extérieure (8) à 160 m sous ce pourtour, une montée de voûte sur 3 mètres de haut a été observée. Le reste du toit du quartier s'est incliné en direction du puits n°1, avec une pente de l'ordre de 4%, en restant intact hormis des petites fissures (9). Dans une petite galerie de section 3m x 3m, creusée postérieurement à l'accident au dessus du quartier effondré, le sel est intact sauf dans une zone d'une longueur de 10 mètres à l'aplomb des galeries du pourtour extérieur (10), où l'on observe des petites fractures par lesquelles de l'air est échangé avec le quartier effondré, une dizaine de mètres en dessous.

Avant l'accident, selon Braconnier, les piliers de sel de la mine donnaient une impression de grande solidité. Sous la couronne déformée, ils ont, d'autant plus profondément qu'on s'approche du pilier central, poinçonné le mur, qui s'est incliné vers le haut dans la direction du puits central. Ils sont globalement intacts, quoique leurs angles aient éclaté et que des fissures initialement fermées se soient ouvertes, certaines avant l'accident, en suivant des fentes verticales remplies de marnes, de sel et d'anhydrite, contemporaines du dépôt, et qui constituent des surfaces de faiblesse mécanique. L'effondrement n'a pas créé de fracture de grande échelle, et le quartier est resté sec depuis 135 ans. C'est une circonstance remarquable : des désordres dans le toit, même discrets, ont engendré l'ennoyage de nombreuses mines de sel (Bérest et al., 2004).

2. Remarques sur les accidents de mines de sel

Plusieurs effondrements brutaux de mines de sel sont connus (Minkley et al., 2007), mais on n'a pas trouvé d'exemple où les piliers d'une mine de sel aient poinçonné le mur, accident dont on connaît des cas dans les mines de charbon.

Les quartiers voisins de Saint-Maximilien n'apportent que des enseignements indirects. Après 1873, tirant les leçons de l'accident, on a laissé au mur une planche de sel de 20 cm, l'eau n'a plus été utilisée pour le pré-découpage et le taux de défruitement a été porté à 75% à la fin du 19^{ème} siècle puis 52% dans les quartiers actuels. Peu de désordres ont été observés depuis.

A quelques dizaines de km de Varangéville, à Dieuze, une mine de sel avait été exploitée avec un taux de défruitement analogue mais à une profondeur inférieure (120 m au lieu de 160 m). Les piliers reposaient sur la même couche marneuse qu'à Varangéville. La mine fut ennoyée par de la saumure saturée en 1864. Dans les années 1990, on a craint, par analogie avec l'accident du quartier Saint-Maximilien, que le mur ne se soit profondément dégradé du fait d'un contact plus que centenaire avec la saumure qui avait rempli la mine. Geoderis réalisa un forage et une mesure de forme par sonar qui prouvèrent que la mine avait conservé toute sa hauteur, que le mur était demeuré plat et que, de façon générale, la mine actuelle coïncidait avec le plan qu'en avaient laissé les mineurs il y a 140 ans (Feuga, 2002). Une raison est que, compte tenu de la profondeur, le poids de la couverture était les $\frac{3}{4}$ de celui de Varangéville avant l'ennoyage, réduits aux $\frac{3}{8}$ après déjaugage quand la mine et le puits d'accès furent remplis de saumure. De plus le toit était encore « raide », la largeur de la mine étant 160 m. Il est aussi possible que la saumure saturée ne soit pas capable de dégrader les marnes anhydritiques du mur immédiat (Boidin, 2007).

3 Aire tributaire, ou capacité portante des piliers ?

Le comportement d'une exploitation souterraine exploitée par chambres et piliers est généralement interprété suivant la théorie dite de « l'aire tributaire », qui résulte pour l'essentiel de considérations élémentaires d'équilibre. On suppose un quartier de forme générale circulaire, rayon R , profondeur H . Le poids du cylindre des terrains au dessus de la mine est $\pi R^2 H \gamma$, si γ est le poids volumique des terrains. Une fraction $\pi R^2 (1-\tau) \sigma$ de ce poids est portée par les piliers, si τ est le taux de défrusement et σ la contrainte verticale moyenne dans les piliers. L'autre fraction est portée par les cisaillements qui s'appliquent sur le pourtour du cylindre, soit $2\pi RT$ si T est l'effort tranchant, au sens de l'intégrale des cisaillements verticaux le long d'une génératrice du cylindre. Lorsque la mine est peu étendue ($R/H < 1$), le toit est encore raide (en comparaison de la déformabilité des piliers et du mur qui les porte) et l'essentiel du poids est reporté sur le pourtour. Quand la mine s'élargit le toit devient plus souple (pour fixer les idées, le toit est représenté par une plaque, de raideur à la flexion EI , portant une charge répartie p ; la déflexion maximale au centre de la plaque en l'absence de tout pilier est u_0 ; la raideur de la plaque est définie comme $p / u_0 = 64 EI/R^4$, elle diminue très vite quand R croît). Pour une mine très étendue, le poids des terrains surincombants est presque tout entier supporté par les piliers, dont chacun porte à peu près $\sigma_{trib} = \gamma H / (1 - \tau)$, c'est à dire la contrainte tributaire.

Le cas du quartier Saint-Maximilien est différent. Les marnes du mur (dégradées par l'eau) ont une cohésion limitée, C ; la capacité portante du mur (c'est-à-dire, la charge maximale qu'un pilier rigide peut appliquer sur le mur sans le poinçonner) a la forme ωC , où ω est un coefficient qui dépend de la forme du pilier. Les piliers ne peuvent porter durablement plus que $\pi R^2 (1-\tau) \omega C$. Toutefois, tant que la mine est peu étendue, le toit reste raide : dès qu'il prend une flèche, même modérée, il ne peut plus pousser aussi efficacement sur les piliers. La charge portée par les piliers est voisine de la capacité portante du mur, l'effort tranchant sur le pourtour de la mine est $T = R [H \gamma - (1-\tau) \omega C]/2$: l'intensité des cisaillements croît avec le rayon de sorte que le critère de dilatance est atteint dans une zone de plus en plus étendue du toit, où peuvent se localiser des déformations importantes ; la raideur du toit finit par chuter brutalement, supprimant ainsi tout frein au poinçonnement.

4. Caractéristiques mécaniques du mur et du toit

Les mineurs de Varangéville observent couramment depuis plus d'un siècle que les marnes du mur peuvent perdre une grande part de leur résistance mécanique quand elles sont mises en contact avec de l'eau ou de la saumure. La première étude géomécanique des marnes du mur a été réalisée par Vouille (1986). Il propose un critère (pessimiste) de Tresca, $C = 2 \text{ MPa}$, $\varphi = 0^\circ$, pour les marnes sèches du mur *immédiat*. Les essais montrent que le matériau est viscoplastique et très sensible à la présence de saumure. Or l'eau était abondante dans le quartier Saint-Maximilien. On utilisait des jets sous pression pour pré-découper le front de taille. A cause du pendage de la couche, des rigoles, profondes de 2,5 m par endroit, avaient été creusées pour collecter vers le puits central n°1 les saumures produites. Sous le pilier central, à côté de la machine à colonne qui fournissait l'eau sous pression, on avait ménagé un bassin de saumure. De l'eau ou de la saumure non saturée était donc au contact de la croûte dure des marnes anhydritiques du mur, ou même des marnes brun-chocolat sous-jacentes beaucoup plus molles et sensibles à la saumure

même saturée. Une zone affaiblie se développait ainsi à partir du pilier central. Sa cohésion était certainement réduite.

Pour un pilier infiniment long, le coefficient de proportionnalité entre capacité portante et cohésion est $\omega = 2 + \pi$. Salençon et Matar (1982) donnent $\omega = 6$ pour un pilier circulaire, auquel on peut assimiler le pilier central de Saint-Maximilien. Comme la mine sera représentée par un modèle axisymétrique, on a calculé numériquement la capacité portante de piliers toriques s'appuyant sur un mur viscoplastique ; le calcul a donné $\omega = 6,6$. La base de données pour la cohésion et la viscosité des marnes était très réduite. On disposait toutefois d'une indication : en 1873, peu avant l'accident, la galerie Sainte-Julie avait, près du pilier central (Figure 1), perdu 80 cm de hauteur (sur 5,5 m), valeur que l'on retrouve numériquement en retenant une cohésion $C = 0,75$ MPa. La viscosité du sel gemme (sous faible charge) est de l'ordre de $\mu = 10^{17}$ Pa.s et les observations témoignent que les déformations des piliers de sel étaient bien plus lentes que les déformations du mur marneux, pour lesquelles on a retenu, un peu heuristiquement, $\mu = 10^{15}$ Pa.s. Les essais de Boidin (2007) ont montré que ce choix n'était pas déraisonnable.

La capacité portante du mur est de l'ordre de $\omega C = 4,5$ MPa quand sa cohésion est $C = 0,75$ MPa. La contrainte géostatique à la profondeur de la mine est de l'ordre de $\sigma = 3,5$ MPa et le taux de défrusement τ est supérieur à 80%, de sorte que la contrainte tributaire est de l'ordre de $\sigma / (1-\tau) = 17,5$ MPa : la capacité portante est vite dépassée quand la mine s'étend ; en témoignent les fermetures partielles précoces de la galerie Sainte-Julie et de la chambre de la machine à colonne d'eau, que l'on envisageait de déplacer avant que ne survienne l'accident. Néanmoins deux facteurs ont longtemps retardé un poinçonnement généralisé. D'une part, l'amollissement des marnes a été progressif, quoiqu'on ne sache pas décrire comment il a évolué dans l'espace et dans le temps. D'autre part le toit reste raide tant que la mine est peu étendue : le poinçonnement peut s'amorcer ; il n'est guère ralenti par la viscosité des marnes, qui est faible ; mais il s'arrête quand le toit a pris une flèche suffisante pour ne plus appliquer sur le pilier qu'une contrainte voisine de la capacité portante. Celle-ci étant petite, une charge croissante se reporte sur les bords-fermes, au pourtour de la mine. L'évaluation de la raideur du toit est donc essentielle pour comprendre l'évolution du quartier.

Le module d'Young du sel de Varangéville est estimé à $E = 26$ GPa. L'épaisseur de sel au dessus de la mine est de l'ordre de $\eta = 70$ m. Un calcul numérique effectué en assimilant ce toit de sel à une plaque unique donne, en l'état de développement de la mine en 1873, une flèche au toit de 3 cm *en l'absence de tout pilier*. C'est évidemment une valeur peu réaliste : on sait que pour la mine réelle (avec ses piliers !) l'affaissement de la surface du sol était perceptible avant l'accident, puisque des bâtiments étaient lézardés et que des tuyaux de fonte s'étaient cassés. Le toit en sel ne peut donc être la plaque homogène idéale décrite plus haut. En fait, le toit a été subdivisé par les géologues en 11 couches, de teneur en sel variable, et séparées par des lits marneux de 0,5 à 3 m d'épaisseur. Toutefois, à l'intérieur de chaque couche, on peut encore distinguer un grand nombre de lits marneux ou salins. Les interlits sont manifestement des surfaces de faiblesse mécanique : dans les galeries les plus périphériques, où 3 mètres de toit se sont effondrés, on voit sur les parois des cloches formées que ces interlits se sont ouverts. De plus, et moins fréquentes dans une formation de sel en couche, on observe dans la mine en 11^{ème} couche (mais aussi dans l'exploitation de 4^{ème} couche) des fractures verticales naturelles de plusieurs cm ou dm d'ouverture, remplies de marnes, et qui suivent une organisation polygonale (Figure 1). Elles jouent aussi un rôle mécanique car

certaines de ces fractures étaient ouvertes dans les piliers avant l'accident – et un plus grand nombre encore après l'accident.

Une description géométrique et mécanique détaillée de toutes ces discontinuités, est hors de portée. On a procédé de manière plus grossière : pour réduire la raideur du toit de sel, on peut diminuer son module élastique (E) ou son inertie à la flexion (I). En particulier, si à une plaque unique d'épaisseur η on substitue N plaques d'épaisseur η/N avec glissement parfait aux interfaces, on divise la raideur I par un facteur N^2 . On a donc, dans le modèle utilisé pour les calculs numériques, réduit considérablement le module élastique du sel du toit de 70 mètres d'épaisseur et intercalé trois couches de « marnes » très molles de trois mètres d'épaisseur. Un tel modèle ne peut prétendre à constituer une représentation géométrique et mécanique fidèle du toit réel ; son mérite est de donner une raideur équivalente plus faible par un facteur de 20 environ que celle du modèle homogène initial et de fournir donc des valeurs crédibles de la subsidence en surface et de la diminution de hauteur des galeries les plus proches du pilier central.

Le comportement du sel est celui d'un fluide visqueux et on observe d'ailleurs dans les quartiers défruités à 75% de la mine actuelle des diminutions de hauteur des piliers de l'ordre de 2 à 5 mm par an. Ce comportement viscoplastique est pris en compte dans le calcul numérique mais son influence, dans les faits, est assez discrète. En effet, d'une part, la viscosité des marnes est plus petite que celle du sel par un facteur 100, de sorte qu'en comparaison des marnes le sel des piliers paraît presque rigide ; d'autre part, la contrainte moyenne verticale dans les piliers ne peut guère dépasser la capacité portante des piliers (c'est à dire $\omega C = 4,5$ MPa, valeur pour laquelle le fluage des piliers de sel est très lent). Toutefois même si, à l'échelle de la mine tout entière, les piliers se comportent comme des poinçons rigides s'enfonçant dans le mur viscoplastique, dans le détail, le comportement des piliers est complexe. Le poinçonnement du mur engendre un écoulement des marnes sous-jacentes vers les surfaces libres autour du pilier, en créant dans le pilier de sel des tractions horizontales qui expliquent l'ouverture des fractures remplies de marne observées dès avant l'accident de 1873.

5. Calcul numérique

Le modèle de la mine est axisymétrique de révolution autour de l'axe du puits. Le pilier central est représenté par un pilier circulaire de 21 m de rayon. Les centaines de petits piliers de la mine sont remplacés par 8 « piliers » toriques délimitant 9 « chambres » toriques, suivant une description du quartier et de son creusement progressif proposée par Gérard Vouille. Cette description respecte autant que faire se peut l'uniformité dans l'espace du taux de défruitement et la constance dans le temps du tonnage de sel produit pendant les 14 années d'existence de la mine. Le mur est une couche de marne de 20 mètres d'épaisseur aux propriétés homogènes (c'est une faiblesse du modèle, car la distribution de la dégradation des propriétés des marnes est certainement une fonction à la fois du temps, de la profondeur et de la distance au puits. Mais on ne disposait guère d'information. De plus, l'hypothèse d'une zone plus dégradée sous le pilier central aurait pu paraître *ad hoc* ; il est intéressant de vérifier au contraire que le poinçonnement a lieu même lorsque la cohésion des marnes est supposée homogène). Le sel vérifie une loi de fluage de Lemaitre adaptée au cas de Varangéville. Le toit de la mine est, comme décrit plus haut, une succession de couches alternativement salines et marneuses. On a donné successivement plusieurs valeurs aux paramètres les plus importants, cohésion des

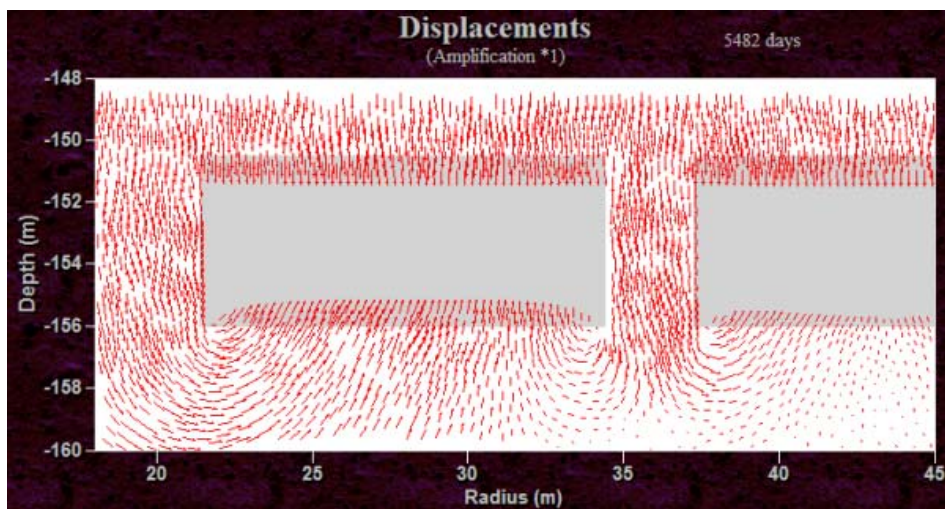


Figure 3. Déplacements au voisinage de la galerie la plus proche du pilier central.

marnes et raideur équivalente du toit. Ils ont conduit à retenir une valeur de la cohésion de $C = 0,75$ MPa et l'hypothèse d'un toit « mou » au sens du Paragraphe 4. Un résultat typique est donné à la Figure 3. On a représenté les déplacements (comptés depuis la création en 1859 jusqu'en 1873) autour de la galerie la plus proche du pilier central. Les rayons sont comptés depuis l'axe du puits. On observe que le toit au milieu de la galerie est descendu de 40 cm et que le mur est remonté de 50 cm ; ce dernier mouvement est alimenté par le poinçonnement du mur par le pilier central qui déplace un grand volume de matière vers les surfaces libres les plus proches. L'affaissement à la surface du sol (32 cm) et la réduction de hauteur de la galerie (90 cm) sont compatibles avec les observations. La montée du mur est plus modeste dans les autres galeries, et le toit de la dernière galerie est le siège de compressions importantes, qui peuvent expliquer les ruptures qu'on y a observées.

6. L'effondrement

Il faut encore expliquer pourquoi la mine s'est effondrée brutalement. La rupture de piliers n'est conforme ni avec le modèle – qui prédit que les piliers sont peu chargés – ni avec les observations. Une défaillance des marnes du mur par perte brutale de cohésion n'est compatible ni avec l'image assez progressive que l'on peut se faire de leur dégradation par l'eau, ni surtout avec le modèle qui prévoit que le poinçonnement du mur est limité tant que le toit reste raide. Un mécanisme brutal doit trouver son origine dans une perte de raideur du toit. Celle-ci diminue *progressivement*, quand la mine s'étend, mais on doit expliquer une réduction *brutale*. Il est tentant de l'attribuer à la rupture du toit sur 3 mètres de haut dans la galerie périphérique ; mais une telle rupture ne change pas radicalement la raideur du toit de sel de 70 m d'épaisseur : il s'agit d'une conséquence plutôt que d'une cause de l'effondrement. On doit chercher une cause moins locale. Dans le modèle retenu, une part importante du poids des terrains surincombants est reportée sur le pourtour de la mine dans le toit, qui est le siège de cisaillements qui croissent quand la mine s'étend. Soumis à des cisaillements importants le sel devient le siège de dilatance et d'endommagement. Sans tenter de décrire complètement cet endommagement, on a tracé, au fur et à mesure de l'agrandissement de la mine, la

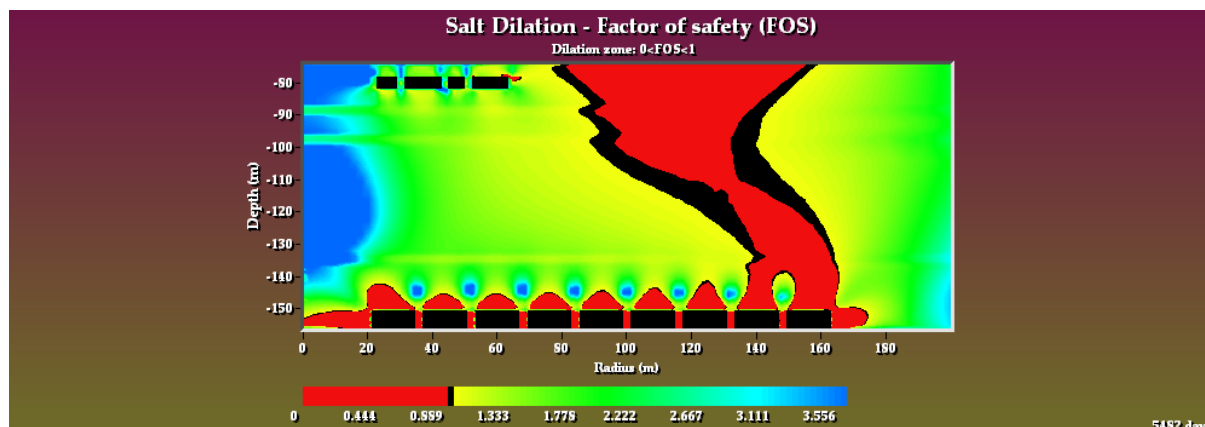


Figure 4. Isovaleurs du critère de dilatance. La zone dilatante est en gris foncé.

zone dans laquelle était dépassé le critère de dilatance, qui est, en un peu plus sévère, celui proposé par De Vries et al. (2005). On observe (Figure 4) que la zone « dilatante » s'étend de manière très rapide au-dessus du pourtour du quartier lors du creusement de la 9^{ème} galerie. Cette tendance est conforme au schéma proposé au Paragraphe 3, dans lequel cette zone est le siège de déformations intenses localisées qui permettent à la couronne de terrains comprise entre le cylindre central resté rigide et les bords fermes de s'incliner vers le centre du quartier sans casser.

7. Conclusion

En affectant des valeurs crédibles aux paramètres mécaniques on rend compte des traits principaux de l'effondrement : phénomènes précurseurs dans les galeries et à la surface, enfoncement des piliers dans le mur, dimensions de la mine qui rendent l'effondrement possible. Les auteurs remercient Emmanuel Hertz (CSME), qui a fait part d'observations précieuses ; et Gérard Vouille, qui a proposé le modèle géométrique retenu pour les calculs numériques et corrigé les erreurs d'une première version. L'étude aurait été impossible sans le soutien de Geoderis.

8. Références bibliographiques

- Bérest P., Brouard B., Feuga B. (2004) Abandon des mines de sel : faut-il envoyer ? Revue Française de Géotechnique, n°106-107, 53-71.
- Boidin E. Interactions roches/saumures en contexte d'abandon d'exploitations souterraines de sel. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, février 2007.
- Braconnier M.A. (1873 a.b.c.) 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} rapports de l'ingénieur des mines sur l'effondrement de la mine de sel gemme de Varangéville-Saint Nicolas, non publiés.
- DeVries K.L. (2005) Geomechanical Analyses to Determine the Onset of Dilation around Natural Gas storage Caverns in Bedded Salt. Proc. SMRI meeting, Brussels, 132-148.
- Feuga B. (2002) Old salt mine at Dieuze (France) revisited 150 years after being abandoned. Proc. SMRI meeting, Chester, 114-128.
- Minkley W., Mühlbauer J., Storch G. (2007) Dynamic processes in salt rocks – a general approach for softening processes within the rock matrix and along the bedding planes. Proc. 6th conf. on the mech. beh. of salt. Taylor & Francis, London UK, 295-304.
- Salençon J., Matar M. (1982) Capacité portante des fondations circulaires. Journal de Mécanique Théorique et Appliquée, Vol. I, n°2, 237-267.
- Vouille G. (1986) Mine de Varangéville, comportement mécanique des marnes du mur en présence de saumure). Rapport R 86/3 de l'Ecole des Mines de Paris pour la CSMSE.