

bre de piliers carrés présentaient sur toute leur hauteur des fentes atteignant jusqu'à 5 cm. [...] La chambre de la machine à colonne d'eau [creusée dans le pilier central] n'était plus tenable. A la date précitée, elle s'élevait avec une vitesse de 6 mm par jour ».

De plus : « Dès l'année 1868, on avait remarqué que les piliers x et y s'étaient fissurés et que la marne formant le sol des galeries se gonflait et se désagrégeait sous l'action de l'air et de l'eau » (Anonyme, 1873, p. 620). Les quatre piliers x et y sont situés près du croisement des galeries Saint-Ernest et Sainte-Julie, proche du pilier central (voir figure 1).

La rupture des tuyaux en fonte indique une subsidence au moins décimétrique. La réduction de hauteur de 80 cm de la galerie Sainte-Julie, et dans d'autres galeries proches du pilier central (Anonyme, 1873) est très suggestive. Le taux de défrètement est 80 % ; en moyenne, les piliers doivent s'enfoncer de 64 cm pour faire monter le mur des galeries de 16 cm et produire finalement une réduction de hauteur des galeries de 80 cm, *sauf au voisinage du pilier central dont l'enfoncement est susceptible de fournir de grands volumes de marne aux galeries limitrophes*. On ne peut imaginer qu'une zone de petits piliers s'enfonce de 64 cm sans que les zones voisines ne fassent de même (le toit n'y résisterait pas) ; c'est donc que le pilier central avait commencé à poinçonner le mur avant l'effondrement. Autrement dit, ce ne sont pas les petits piliers qui s'enfoncent autour de la galerie Sainte-Julie, mais le mur qui remonte.

4.2

Le mur marneux

Le comportement des marnes du mur avait attiré l'attention depuis longtemps :

« Cette couche de marne a probablement une épaisseur de plus de 20 m. A la partie supérieure [...] elle s'est présentée d'une pureté extrême, nécessitant l'emploi de la poudre. Elle se compose de marne gris bleuâtre, très compacte, alternant avec de petites couches irrégulières de sel gemme rougeâtre, sillonnées obliquement par des filons très nombreux de sel gemme rouge fibreux, contenant des rognons irrégulièrement disséminés d'une substance très dure qu'on a toujours décrite comme de la marne solidifiée par du sel gemme et surtout par de l'anhydrite » (Braconnier, 1873c, p. 1).

Sous cette croûte de marnes anhydritiques on trouve des marnes moins résistantes dites « brun-chocolat » dont l'épaisseur est de quelques mètres. Les deux types de marnes se dégradent quand elles sont en contact avec l'eau. Or l'eau était largement utilisée dans le quartier, notamment pour prédécouper le front de taille avant les tirs. Ainsi de la saumure non complètement saturée (sa concentration était estimée à 20° Baumé, soit environ 250 g/l) s'infiltrait dans le mur :

« [...] au bout de 17 ans d'exploitation continue la quantité d'eau infiltrée dans la couche de marne a pu être finalement très considérable. Cette eau [...] a dû dissoudre partiellement les lits, filons et rognons de sel contenu dans les marnes. Elle a dû hydrater l'anhydrite qui en se transformant ainsi en gypse, développe un travail brisant extrêmement énergétique. Elle a dû débiter enfin la marne même par l'action de l'oxygène qu'elle tenait en dissolution et qui a dû agir sur les sulfures et matières organiques que contient cette marne

pure. Ces trois actions concouraient au même résultat qui a été l'amollissement général de la partie supérieure de la couche de marne et sa transformation en une masse spongieuse » (Braconnier, 1873c, p. 1).

5

Accidents de mines de sel

5.1

Ennoyage

La majorité des accidents de mines de sel ont été provoqués par un ennoyage de la mine, plutôt que par une instabilité mécanique, même si un ennoyage a souvent pour conséquence un effondrement. Les mines de sel sont très vulnérables aux venues d'eau : une entrée d'eau initialement minuscule peut dégénérer en invasion incontrôlable. Bien entendu ces accidents ont aussi une composante mécanique, à leur origine ou pendant leur déroulement ; mais c'est l'entrée de saumure claire dans la mine qui est l'élément déterminant. Quelques cas récents sont décrits par Bérest *et al.* (2004). Dans le cas de Saint-Maximilien, il est remarquable que l'effondrement ne se soit accompagné d'aucune venue d'eau dans le quartier, une circonstance qui reste vraie 135 ans plus tard, et établit qu'aucune fracture traversant le massif de sel n'a été créée.

5.2

Rupture des piliers

L'instabilité mécanique d'une mine de sel peut être provoquée par la rupture des piliers ; mais en général le sel est trop ductile pour que l'effondrement soit brutal. Minkley et Menzel (1996) ont montré que, dans la région de la Werra, en Thuringe (Allemagne), la destruction en 1989 de milliers de piliers en quelques secondes dans la mine de Voelkershausen, déclenchée par un tir, s'expliquait par la fragilité extrême du minéral exploité (carnallite) et le taux très élevé de défrètement ; Minkley *et al.* (2006) ont donné une analyse très complète de cet accident. L'effondrement de 1873 à Varangéville n'est clairement pas associé à l'éclatement des piliers : le gros pilier central a un élanement beaucoup trop faible ; d'ailleurs les petits piliers carrés étaient fendus après l'accident mais avaient conservé leur hauteur initiale.

5.3

Rupture d'une couche raide du toit

Une troisième possibilité de rupture brutale est la flexion et la rupture d'une couche « compétente » dans le toit immédiat. Dans la région de Stassfurt (Saxe-Anhalt) c'est l'existence de la couche dite « anhydrite principale » qui explique le caractère dynamique des effondrements (Menzel et Minkley, 1996). On peut être tenté de trouver dans un tel mécanisme une explication de l'effondrement de 1873 du quartier Saint-Maximilien. En effet, des centaines de cavités ont été lessivées dans la partie supérieure de la formation du Keuper inférieur dans laquelle la mine de Varangéville est ouverte. La formation de cratères à la surface du sol

survient par effondrement de ces cavités quand elles sont agrandies jusqu'à ce que leur diamètre devienne égal aux deux tiers environ de leur profondeur (typiquement 130 m pour 200 m). Des descriptions très précises peuvent être trouvées dans Buffet (1998) et Jeanneau (2005). Dans chacun de ces deux cas, à la fin du lessivage de la caverne, le toit de la cavité avait atteint le sommet de la formation salifère, à un peu plus de 200 m de profondeur. La couche marneuse surmontant le sel est alors dégagée ; elle se dégrade progressivement pour tomber au fond de la caverne. Le processus se poursuit de proche en proche pendant plusieurs années, de manière irrégulière, par chute de couches de marnes et d'anhydrite. Boidin (2007) a analysé cette évolution : le toit de la caverne, lorsqu'il est remonté d'une cinquantaine de mètres, se trouve au contact d'une couche raide et rigide de 6 à 8 m d'épaisseur, la dolomie de Beaumont, à 145 m de profondeur. Cette couche finit par porter l'essentiel du poids du recouvrement et rompre (Klein *et al.*, 2008), sans doute en raison des tractions engendrées par sa mise en flexion. Un mécanisme analogue d'effondrement a été décrit par Rothenburg *et al.*, 2002, dans le cas de cavités de dissolution dans la région de Windsor-Detroit, à la frontière des USA et du Canada. Dans le cas de Saint-Maximilien, la dolomie de Beaumont paraît trop peu profonde pour que ce mécanisme ait pu jouer un rôle (une douzaine de mètres sous la surface du sol, donc 140 m au-dessus du toit de la mine). A cette profondeur, la dolomie est souvent altérée par l'action des eaux souterraines et ne peut être considérée comme une couche compétente. Significativement, la formation de discontinuités verticales (« marche d'escalier ») n'a pas été observée après l'effondrement, au contraire du cas de la formation d'un cratère.

5.4

Les quartiers exploités ultérieurement

La comparaison avec les quartiers voisins est plus instructive. Après l'accident de 1873, les méthodes d'exploitation de la mine de Varangéville furent profondément modifiées. Une plaque de sel de 20 cm d'épaisseur fut laissée au mur et on n'utilisa plus l'eau douce pour pré-découper le front, deux mesures qui contribuèrent à protéger les marnes du mur de l'action de l'air, de l'eau ou de la saumure. On conserva une hauteur de galerie de 5,5 m, mais le taux de défructement fut progressivement réduit ; $\tau = 75\%$ à la fin du XIX^e siècle, puis 60 % et finalement 52 % dans les quartiers actuels. On n'a observé dans ces quartiers, dont certains ont plus d'un siècle d'âge, que des désordres mineurs (chutes locales du toit, au croisement de galeries, écaillage local de piliers, soufflage du mur – sans doute d'ailleurs associé au flambage de la plaque de sel laissée au mur plutôt qu'à une montée des marnes du mur). Autrement dit, sans dégradation de la résistance mécanique des marnes du mur, il n'y a pas d'effondrement brutal.

5.5

Le cas de la mine Dieuze

La mine de Dieuze (Feuga, 2002), creusée à quelques dizaines de kilomètres de Varangéville, mais un peu moins profonde que Saint-Maximilien, laissait

aussi le mur marneux à découvert, avec un taux de défructement analogue. Elle a été envahie par de la saumure saturée en 1864 mais est restée parfaitement stable depuis, comme l'a montré un relevé de forme par sonar réalisé par Geoderis en 2002. Trois explications de ce bon état, inattendu compte tenu de l'expérience de Saint-Maximilien, ont été avancées. Elles ne sont d'ailleurs pas contradictoires :

- les marnes du mur immédiat, qui contient du sel, ne seraient pas dégradées par la saumure saturée ;
- à Dieuze la première couche de marnes, plus dure, n'a pas été entaillée par des rigoles et elle aurait protégé la couche sous-jacente de marnes brun-chocolat ;
- enfin cette mine, moins large, moins profonde, soutenue par la pression de la saumure après l'ennoyage, serait mécaniquement plus stable que Saint-Maximilien (Feuga *et al.*, 2008). Cette dernière explication est la moins hypothétique, ce qui ne signifie pas que les deux précédentes soient inexactes.

5.6

Caractère unique de l'effondrement de Saint-Maximilien

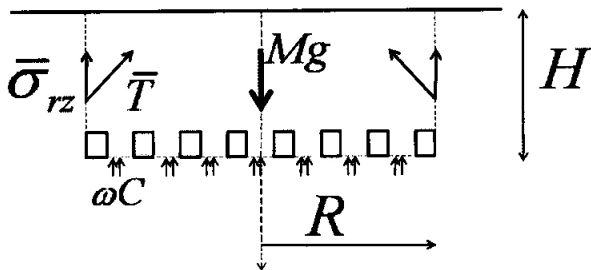
En conclusion, l'effondrement de Saint-Maximilien présente des caractéristiques uniques pour une mine de sel ; ce n'est pas la rupture des piliers de sel, ni la rupture d'une couche raide dans le toit de la mine, mais le poinçonnement des marnes du mur par les piliers de sel de la mine qui est à l'origine de l'effondrement.

Il faut toutefois un second ingrédient pour expliquer la brutalité de l'effondrement ; on a vu que les marnes humides sont viscoplastiques, et on pourrait imaginer une descente graduelle du toit qui suivrait doucement l'enfoncement progressif des piliers dans le mur. En fait c'est la raideur du toit de sel qui retarde longtemps une telle descente progressive du toit : le mur n'est rapidement capable que de porter une fraction du poids du recouvrement, mais le toit raide reporte sur les bords fermes l'excès de charge. Un modèle très simple montre que ce report ne peut être indéfini et qu'il existe une taille de la mine pour laquelle le report devient impossible sans rupture. La mine est à la profondeur H ; le poids par unité de surface de la colonne de terrains de recouvrement (contrainte géostatique) est $P_w = \gamma H$. Le contour de la mine est assimilé à un cercle de rayon R . Le mur possède une résistance limitée, par exemple une cohésion C et un angle de frottement nul. La capacité portante du mur poinçonné par un pilier, soit ωC , est alors proportionnelle à la cohésion C ; la constante ω dépend notamment de la forme du pilier. Les piliers ne peuvent alors apporter au recouvrement, en moyenne, un support supérieur à $(1 - \tau)\omega C$. L'équation d'équilibre des terrains, projetée sur la verticale, donne :

$$\gamma H \pi R^2 - (1 - \tau) \omega C \pi R^2 + 2 \pi R H \bar{\sigma}_v \quad (1)$$

(Fig. 5) où $\bar{\sigma}_v$ est la valeur moyenne du cisaillement vertical qui s'applique le long de la surface verticale tracée à l'aplomb du contour du quartier. Lorsque le quartier s'élargit, ce cisaillement moyen croît comme le rayon R . Or le cisaillement moyen supportable est borné : le sel du recouvrement vérifie un critère de dilatance, qualitativement comparable à un critère de Coulomb, ou de Hoek and Brown, au-delà duquel sa résistance diminue. Comme la contrainte moyenne ne peut prendre que des valeurs limitées, de l'ordre de grandeur

de $\Pi/3 = \gamma z$, il existe une valeur du rapport R/H pour laquelle l'équilibre du recouvrement est impossible ; des déformations localisées intenses apparaissent sur le pourtour de la mine ; elles confèrent brusquement au toit une grande souplesse, qui autorise l'achèvement brutal du processus de poinçonnement jusque-là retenu par la présence d'un toit raide.



Le poids du cylindre de terrains au-dessus de la mine ($Mg = \rho\gamma\pi R^2H$) est, au plus, équilibré par la somme de la capacité portante du mur sous les piliers ($\omega C \times (1 - \tau)\pi R^2$) et de la résultante des cisaillements verticaux sur le contour ($\bar{\sigma}_z \times 2\pi RH$).

The weight of the cylinder above the mine ($Mg = \rho\gamma\pi R^2H$) is balanced by the sum of the bearing capacity of the marls layer beneath the pillars ($\omega C \times (1 - \tau)\pi R^2$) plus the vertical shear stresses which apply on the mine contour ($\bar{\sigma}_z \times 2\pi RH$).

6

Une reconstitution de l'évolution du quartier

On peut ainsi esquisser une histoire mécanique du quartier. Le mur marneux était un point faible – d'autant plus que l'eau utilisée pour le pré-découpage s'infiltrait et réduisait sa résistance. L'ouverture progressive des chambres reportait sur les piliers une proportion initialement croissante du poids du recouvrement et créait des surfaces libres pour l'écoulement des marnes, permettant un début de poinçonnement du mur. Tant que les dimensions horizontales du quartier restaient faibles, le toit conservait une raideur globale suffisante pour empêcher qu'une flèche importante ne soit prise : le poinçonnement restait insensible. Au fil des années, le quartier s'élargissant, le toit devenait beaucoup plus souple ; en même temps plus d'eau ou de saumure s'infiltraient dans le mur. Les deux phénomènes permettaient un poinçonnement accru, dont les effets devenaient perceptibles au voisinage du pilier central : la hauteur des galeries y diminuait. Paradoxalement, la charge sur les piliers tendait à décroître, puisqu'elle ne peut pas excéder de beaucoup la capacité portante du mur, et une large fraction du poids du recouvrement se reportait sur les bords fermes. A la verticale du pourtour extérieur de la mine, des contraintes de cisaillement intenses se développaient dans le toit de sel où le critère de dilatance était atteint dans une zone d'extension verticale croissante. Le sel s'y radoucissait et, à grande échelle, le toit de sel, dont la raideur et la résistance avaient limité jusque-là le poinçonnement du mur, s'assouplissait alors brutalement, permettant en quelques secondes le poinçonnement complet par le pilier central du mur affaibli par l'infiltration de l'eau.

Ce schéma, qui ne s'appuie que sur des considérations élémentaires d'équilibre, fournit le mécanisme de l'effondrement. Toutefois pour que ce schéma soit crédible, on doit vérifier qu'il est compatible avec ce qu'on sait du comportement rhéologique des marnes humides, du sel et du toit ; et qu'on peut rendre compte quantitativement des traits principaux du comportement du quartier pendant ses 17 années d'existence.

7

Comportement rhéologique des diverses parties de la mine

7.1

Comportement des piliers de sel

Paradoxalement, le comportement rhéologique du sel gemme, malgré son caractère très particulier, ne joue pas (hormis la dilatance) un rôle essentiel dans l'accident. Le sel gemme est un matériau viscoélastique non linéaire : il flue même sous charge très faible. A Saint-Maximilien la profondeur du quartier est $H = 156$ m, et la contrainte géostatique est donc modérée, de l'ordre de $P_\infty = \gamma H = 3,5$ MPa. Dans un quartier peu étendu on peut donc attendre des contraintes déviatoriques – donc des vitesses de déformation – modérées, sauf peut-être dans les piliers eux-mêmes. En effet le taux de défruitement τ étant supérieur à 80 %, la charge tributaire est au moins de $q = \gamma H / (1 - \tau) \approx 17,5$ MPa, une valeur susceptible d'engendrer un fluage rapide des piliers. En fait les valeurs réelles étaient sans doute bien plus faibles – les mineurs n'ont décrit aucune manifestation caractéristique d'une déformation intense des piliers, même dans les zones ouvertes depuis 17 ans. La raison en est que les piliers n'appliquent rapidement sur le mur guère plus que sa capacité portante, que l'on évalue plus loin. De ce fait le comportement viscoplastique du sel ne joue qu'un rôle relativement discret du point de vue du mécanisme d'effondrement ; les piliers sont presque rigides en comparaison des marnes sur lesquelles ils s'appuient. Pour les calculs, on a utilisé une description du sel de Varangéville comme un matériau de Lemaitre-Menzel-Schreiner proposée par Vouille (1986).

Le critère de dilatance (ou radoucissement) du sel joue pour sa part un rôle essentiel ; il est abordé par la suite.

7.2

Comportement des marnes

Les marnes dans les formations salifères

La mine de Varangéville est exploitée depuis plus d'un siècle et les mineurs ont observé depuis toujours que les marnes du mur se dégradent rapidement au contact de l'eau et/ou de la saumure. Ce phénomène est aussi observé dans les marnes des formations salifères en couches exploitées par dissolution. Par exemple l'étude des cavités de Hengelo aux Pays-Bas conduit Bekendam (2000) à détailler les mécanismes physico-chimiques qui conduisent à cette dégradation. Les