

Comité français de mécanique des roches, coordonné par P. Duffaut,), *Manuel de mécanique des roches. Tome 3*, Paris, Presses des Mines, Collection sciences de la terre et de l'environnement, 2013.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2013

60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France

presses@mines-paristech.fr

www.pressesdesmines.com

ISBN: 978-2-35671-035-2

© Photo de couverture: stockage souterrain, en cours de creusement en milieu sédimentaire à Singapour, galerie de tête large de 20 m, haute de 8 m (photo Géostock).



Dépôt légal: 2013

Achevé d'imprimer en 2013 (Paris)

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

Manuel
de Mécanique
des Roches

Tome 3

Collection sciences de la terre et de l'environnement

Dans la même collection

- Coordination I. Cojan, G. Friès, D. Grosheny, O. Parize, *Expression de l'innovation en géosciences - une journée avec Bernard Beaudoin*
- Roger Cojean, Martine Audiguier, *Géologie de l'ingénieur - Engineering geology*
- Michel Demange, *Les textures des roches cristallines*
- Collectif, 7TH *Conference on the mechanical behavior of Salt*
- Coordination : José Ragot, Mireille Batton-Hubert, Florent Breuil, *Les STIC pour l'environnement*
- Michel Chalhoub, *Massifs rocheux, Homogénéisation et classification numériques*
- Michel Demange, *Les minéraux des roches, Caractères optiques Composition chimique Gisement*
- Bruno Peuportier, *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*
- Philippe Jamet, *La quatrième feuille, Trois études naturelles sur le développement durable*
- Gabriele Rossetti, Alessandro Montanari, *Dances with the Earth, The creation of music based on the geology of the Earth*
- Sous la coordination de Franck Guarnieri et Emmanuel Garbolino, *Systèmes d'information et risques naturels*
- Comité français de mécanique des roches, Coordonné par P. Duffaut, *Manuel de mécanique des roches, Tome 2 : les applications*
- Bruno Peuportier, *Eco-conception des bâtiments, Bâtir en préservant l'environnement*
- Madeleine Akrich, Philippe Jamet, Cécile Méadel, Vololona Rabeharisoa, Frédérique Vincent, *La griffe de l'ours, Débats & controverses en environnement*
- Lucien Wald, *Data fusion, Definitions and Architectures - Fusion of Images of different spatial resolutions*
- Javier Garcia, Joëlle Colosio, *Air quality indices, Elaboration, Uses and International Comparisons*
- Javier Garcia, Joëlle Colosio, *Les indices de la qualité de l'air, Elaboration, usages et comparaisons internationales*
- Richard Maillot, *Mémento technique des granulats*
- Coordinateurs : K. Scharmer, J. Greif, *The European Solar Radiation Atlas, Vol. 2 : Database and Exploitation Software*
- Coordination : K. Scharmer, J. Greif, *The European Solar Radiation Atlas, Vol. 1 : Fundamentals and maps*
- Comité français de mécanique des roches, Coordonné par F. Homand et P. Duffaut, *Manuel de mécanique des roches, Tome 1 : fondements*
- Jacques Fine, *Le soutènement des galeries minières*

Comité Français de Mécanique des Roches

Manuel de Mécanique des Roches

Tome 3

Génie minier et pétrolier

Retours d'expériences, exploitation des mines,
du pétrole, du sel, stockage souterrain

Coordonné par **Pierre DUFFAUT**
Préface de **Frédéric PELLET** et **Thierry YOU**

Liste des auteurs

REX Tome III

Nom prénom	Animateur ou co-animateur	Auteur ou co-auteur	Adresse électronique
BÉREST Pierre	3	12, 31, 32, 33, 34, 35, 36	berest@lms.polytechnique.fr
BROUARD Benoît	3	12	contactl@brouardconsultin.com
CÔME Bernard		41, 43	comebernard@voila.fr
CONTRUCCI Isabelle		15	isabelle.contrucci@ineris.fr
DAUPLEY Xavier		15	xavier.daupley@ineris.fr
DIDIER Christophe	1	11, 13, 16	christophe.didier@ineris.fr
DUFFAUT Pierre	Avant-propos		pierre.duffaut@gmail.com
FEUGA Bernard		12	berfeuga@modulonet.fr
JOSIEN Jean-Paul		14	jeanpierre.josien@yahoo.fr
HADADOU Rafik		14	rafik.hadadou@geoderis.fr
KARIMI-JAFARI Mehdi		12	mkj@geostock.fr
LAOUAFA Farid		15	farid.laouafa@ineris.fr
MAURY Vincent	2	21, 22, 23, 24, 25	maury2@wanadoo.fr
PELLET Frédéric	Préface		frederic.pellet@cfmr-roches.org
PIAU Jean-Marie		24	jean-michel.piau@ifsttar.fr
VAN DER MERWE Nielen		13	
VUIDARD Isabelle		14	i.vuidart@brgm.fr
YOU Thierry	4, Préface	41, 42, 44	tyo@geostock.fr

Table des matières

PREMIÈRE PARTIE - GÉNIE MINIER, MINE ET APRÈS-MINE.....	13
<i>Animée par Christophe Didier.....</i>	<i>13</i>
1.1 Introduction - <i>Christophe Didier</i>	<i>15</i>
1.2 Un effondrement à la mine de sel de Varangeville en 1873 - <i>Quartier Saint-Maximilien.....</i>	<i>19</i>
<i>Pierre Bérest, Benoît Brouard, Bernard Feuga, Mehdi Karimi-Jafari.....</i>	<i>19</i>
1.3 La catastrophe de Coalbrook en 1960 - <i>Afrique du Sud.....</i>	<i>30</i>
<i>Christophe Didier, Jacob Nielen Van der Merwe</i>	<i>30</i>
1.4 Stratégie de gestion de l'après-mine du bassin ferrière lorrain.....	40
<i>Jean-Pierre Josien, Rafik Hadadou, Isabelle Vuidart</i>	<i>40</i>
1.5 L'effondrement de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt - <i>Analyse des mécanismes conduisant à l'effondrement.....</i>	<i>59</i>
<i>Xavier Daupley, Farid Laouafa, Isabelle Contrucci</i>	<i>59</i>
1.6 Conclusions et perspectives - <i>Christophe Didier</i>	<i>70</i>
1.7 Sigles et glossaire spécifique	80
 DEUXIÈME PARTIE - GÉNIE PÉTROLIER: APPLICATION À L'EXPLORATION ET LA PRODUCTION D'HYDROCARBURES.....	85
<i>Animée par Vincent Maury</i>	<i>85</i>
2.1 Introduction	87
2.2 La production pétrolière et la mécanique des roches.....	89
2.3 Application au forage et à la stabilité des puits	94
2.4 Application au comportement des réservoirs : le cas d'Ekofisk	134
<i>Vincent Maury avec la collaboration de Jean-Michel Piau.....</i>	<i>134</i>
2.5 Conclusions	149

TROISIÈME PARTIE - MINES ET CAVITÉS SALINES.....	155
<i>Animée par Pierre Bérest et Benoît Brouard</i>	<i>155</i>
3.1 Introduction	157
<i>Pierre Bérest et Benoît Brouard.....</i>	<i>157</i>
3.2 L'accident de Jefferson Island - <i>Quand un lac se vide dans une mine de sel</i>	161
3.3 Pluie de briques à Kanopolis	166
3.4 L'accident de Haoud Berkaoui - <i>Conséquences dramatiques d'une cimentation ratée</i>	169
3.5 Perte de volume dans une cavité de stockage de gaz.....	175
3.6 L'accident de Hutchinson - <i>Kansas Geological Survey.....</i>	184
 QUATRIÈME PARTIE - STOCKAGE SOUTERRAIN D'HYDROCARBURES.....	 191
<i>Thierry You</i>	<i>191</i>
4.1 Introduction - <i>Thierry You assisté de Bernard Côme</i>	193
4.2 Quarante cinq ans de retours d'expériences dans les cavernes de stockage d'hydrocarbures - <i>Thierry You.....</i>	194
4.3 La vie du stockage souterrain Géovexin - <i>« Du berceau à la tombe ».....</i>	210
<i>Bernard Côme</i>	210
Références	227
<i>Références de la première partie.....</i>	<i>227</i>
<i>Références de la deuxième partie.....</i>	<i>230</i>
<i>Références de la troisième partie</i>	<i>233</i>
<i>Références de la quatrième partie.....</i>	<i>237</i>

Préface

Frédéric Pellet et Thierry You

La transmission des connaissances, ou plus généralement les processus cognitifs, sont depuis toujours une activité humaine nécessaire et vitale, dont dépend le progrès des sciences et des techniques.

Notre discipline, la mécanique des roches, fait appel à plusieurs domaines scientifiques appartenant à la physique (thermomécanique) et à la géologie, dans plusieurs de ses composantes. Sur ce corpus de connaissances fondamentales, repose l'expérience acquise qui constitue la pierre angulaire du savoir faire de l'ingénieur.

Le présent ouvrage consacré aux retours d'expérience apporte la compréhension et la preuve par l'exemple de l'application des concepts théoriques, de leur intérêt, mais aussi dans certains cas de leurs limites. Il couvre un large champ d'activités industrielles par la présentation de cas vécus, largement inspirés de l'école française de Mécanique des Roches.

Par vocation, la Mécanique des Roches intéresse plusieurs secteurs industriels, allant du génie civil à l'exploitation des ressources naturelles (génie minier et pétrolier), sans oublier la gestion des risques et la préservation de notre environnement naturel y afférent.

Venant après un premier tome consacré aux fondements de la Mécanique des Roches et un second dédié à ses applications, ces deux tomes parachèvent la série du manuel de Mécanique des Roches coordonnée par notre ami Pierre Duffaut, sans lequel aucun de ces ouvrages n'aurait vu le jour.

Cette collection constitue donc un outil précieux pour les professionnels (ingénieurs, enseignants, chercheurs, étudiants) jeunes ou moins jeunes, expérimentés ou désireux d'appréhender notre discipline, la Mécanique des Roches.

Frédéric Pellet

Président du Comité Français de Mécanique des Roches

Vice Président pour l'Europe de la Société Internationale de Mécanique des Roches

Lorsque nous avons encouragé notre ami Pierre Duffaut à poursuivre l'aventure des Manuels nous avons fait plusieurs constats :

- Notre IX^e Congrès international (à Paris en 1999) et les « Leçons du XX^e siècle » pour lequel le Manuel avait été initié, ayant connu un grand succès technique,

il était évident pour tous que d'autres leçons pouvaient et devaient encore être tirées? Ces ouvrages sont donc non seulement une suite logique des deux premiers Tomes mais également de la présentation que fit Marc Panet au Congrès de Paris.

- La demande des jeunes générations était réelle et demeure, l'accueil fait à cette journée d'octobre 2009 sur les grands accidents en témoigne, nos métiers demandent de l'humilité, de l'observation et l'essentiel de l'acquis en Mécanique des Roches ne se trouvera jamais sur une encyclopédie numérique universelle. Rien ne remplace intégralement l'expérience et la génération qui nous précède a eu l'opportunité d'en acquérir de fabuleuses, dont beaucoup sont citées ici.
- Il paraissait également nécessaire de montrer que l'on peut beaucoup apprendre et faire évoluer la Géotechnique et la Mécanique des Roches en dehors des grands accidents, la génération précédente nous l'a montré et beaucoup d'entre nous poursuivent heureusement cette voie.
- La normalisation est en marche, et se fera avec ou sans nous, la mise en avant de l'importance des aléas de nos métiers nous paraît fondamentale tout comme il était important de montrer que nous pouvons et devons tous travailler dans des milieux incertains sans être trop inhibés par des principes dits de précaution.

Ces constats n'ont pas été sans conséquence sur la forme des documents. L'objectif ne fut pas d'établir une suite de documents intégralement consensuels mais bien de laisser la responsabilité des articles à leurs auteurs. Ils avaient la possibilité soit de présenter et détailler un cas précis soit d'établir un panorama de leurs acquis expérimentaux mais il leur était demandé de fournir la bibliographie la plus précise possible, celle qui pourra aider au mieux nos successeurs à se forger cet indispensable esprit d'ingénieur.

En remerciant ici tous les auteurs, il nous faut aussi avouer que nous avons tous été sans doute un peu longs à apporter à notre ami Pierre toute l'aide nécessaire ; que Frédéric Pellet soit remercié pour avoir mis à temps tout son talent et toute son énergie au service de cette publication.

J'ai évoqué ci-dessus la difficulté qu'il y a à obtenir des avis unanimes sur la caractérisation et le comportement des ouvrages et des terrains, tout cela demande jugement expérience et parfois débats. Au Conseil du CFMR le consensus fut par contre immédiat sur le fait que Pierre Duffaut avait non seulement la compétence mais aussi l'ouverture, la gentillesse et surtout la persévérance pour mener à bien cette mission. Que son énorme EXPÉRIENCE soit ici remerciée en RETOUR.

Thierry You

Président 2007-2011 du Comité français de Mécanique des roches

Avant-propos

Pour avoir suivi le Manuel depuis l'origine, il y a quinze ans maintenant, à travers les deux premiers tomes, parus en 2000 et 2004, j'ai cru pouvoir venir à bout d'un troisième tome lorsque Silvia Dekorsy, la directrice des Presses de l'École des Mines, a suggéré de compléter les «Fondements» et les «Applications» par cette suite consacrée aux «Retours d'expérience». Le CFMR avait alors pris l'initiative d'une réunion commune aux deux comités, Géologie de l'ingénieur et Roches, consacrée à un ensemble de catastrophes (réunion tenue le 22 octobre 2009 et publiée l'année suivante par la RFG, numéro double 131-132), ce qui pouvait apparaître comme un tremplin. Le Conseil a approuvé le projet et confié à huit animateurs le choix des sujets et le souci de recruter des auteurs, avec la consigne de dépasser la notion de catastrophe : ainsi le Tunnel sous la Manche apparaît par une chambre d'aiguillage qui est un ouvrage sans équivalent dans le monde.

Contrairement aux tomes précédents, chaque partie et chaque chapitre sont signés de leurs auteurs, ce qui ne fait pas obstacle à la super signature du Comité Français de Mécanique des Roches, valant validation. J'ai essayé d'obtenir un minimum de cohérence dans le respect de la liberté des animateurs et des auteurs. Comme ils ont été plus prolixes que prévu, le Conseil a accepté de ne pas les brider et le volume a dû être scindé : l'Exploitation du sous-sol constitue le tome III, Génie minier, dont le cas particulier du Sel gemme, et Génie pétrolier, dont les Stockages souterrains ; le tome IV est consacré au Génie civil, au sens large, barrages, tunnels, grands ouvrages d'infrastructure, sans oublier la maîtrise de l'instabilité des versants.

Quant aux détails, on a laissé aux auteurs le choix de leurs notations, on a regroupé les références de leurs chapitres à la fin de chacune des huit parties, et sur l'exemple proposé par Vincent Maury, on a tenté de nourrir les légendes de figures afin qu'elles soient davantage «autoportantes» pour le lecteur qui feuillète. Pour respecter les pratiques de l'industrie pétrolière on a accepté pas mal d'anglais ou d'américanismes dans le vocabulaire (ex. pression de pore) et dans les unités et les mesures (ex. pieds et pouces, psi, barils).

Un gros effort a été porté sur les figures avec l'aide de Joëlle Duffaut, et la reproduction en couleurs a été limitée à quelques photos regroupées sur des pages dédiées. Je remercie enfin les Presses des Mines pour avoir parachevé ce travail et mené à bien l'édition. Le tome IV devrait suivre avant l'été 2013.

Pierre Duffaut

Ancien président du CFMR

Première partie

Génie minier, mine et après-mine

Animée par Christophe Didier
INERIS

1.1 Introduction

Christophe Didier

INERIS, DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

Le génie minier a, de tout temps, occupé une place à part dans le domaine de la mécanique des roches. Depuis la plus haute antiquité, les hommes se sont attachés à extraire du sous-sol les ressources minérales nécessaires au développement de leur société. Le dimensionnement et le creusement d'excavations souterraines ont ainsi constitué l'occupation principale de nombreux pionniers de la mécanique des roches. Leur expérience a progressivement contribué à l'élaboration de «l'art des mines» dont l'objectif principal a toujours été de combiner l'optimisation de la récupération du minerai avec la garantie d'une stabilité satisfaisante des ouvrages rocheux permettant d'assurer la sécurité des mineurs [Agricola, 1556].

Les développements technologiques ont progressivement transformé les pratiques. Les exploitations artisanales, de petite taille et peu profondes, ont ainsi, peu à peu, laissé la place à des chantiers très mécanisés, de grandes dimensions et dont la profondeur avoisine, aujourd'hui, les 4000 m pour certaines mines (mines TauTona et Savuka par exemple, toutes deux exploitant l'or en Afrique du Sud). A l'origine, les connaissances et «bonnes pratiques», purement empiriques et «de bon sens», principalement basées sur la connaissance du massif étaient transmises d'une génération à l'autre.

Progressivement, des connaissances théoriques poussées, notamment en mécanique des terrains, ont pris le relais : dans le domaine de la caractérisation et de l'approche analytique [Tincelin, Sinou, 1962 ; Salamon, Munro, 1967 ; Hoek, Brown, 1980 ; Brady, Brown, 1993], puis dans celle de la modélisation physique [Scavia *et al*, 1993 ; Chambon *et al*, 1994 ; Ren *et al*, 2010] et numérique [Crouch, Starfield, 1983 ; Starfield, Cundall, 1988 ; Salamon, 1993]. Elles ont également été accompagnées et complétées par le développement de puissants outils de simulation numérique et d'essais de laboratoire. Ces outils ont permis une meilleure compréhension des mécanismes gouvernant le comportement du massif rocheux caractérisé par de nombreuses hétérogénéités et discontinuités. Les progrès engendrés ont peu à peu contribué à un dimensionnement plus efficace des travaux, permettant de réduire les risques d'instabilité des ouvrages et améliorant, par là-même, la sécurité des hommes et des biens situés aussi bien au fond des travaux miniers qu'en surface, à l'aplomb de ceux-ci.

Parallèlement et quelle que soit l'époque, la recherche et le développement des connaissances dans le domaine de la compréhension et de la maîtrise du comportement des massifs rocheux se sont toujours appuyés, pour une large part, sur le retour d'expérience. À ce titre, le présent chapitre ambitionne de rassembler quelques contributions basées sur une même logique de partage des connaissances acquises suite à diverses instabilités d'origine minière, certaines d'entre elles ayant donné lieu à de graves accidents.

En termes de retour d'expérience, l'analyse et la compréhension des accidents majeurs qui ont fortement marqué les esprits et endeuillé l'histoire de l'activité minière jouent en effet un rôle fondamental. Elles ont permis aux experts scientifiques ou aux autorités administratives d'identifier les dysfonctionnements techniques ou organisationnels afin de prendre des mesures permettant d'éviter que de tels scénarios ne puissent se reproduire.

À ce titre, le retour d'expérience de la catastrophe de Coalbrook (mine de charbon sud-africaine) est exemplaire. Une fois le défaut de connaissance identifié (résistance à long terme des piliers), d'importants développements scientifiques ont été initiés par différentes équipes d'experts faisant autorité (Bieniawski, Salamon) pour aboutir à une formalisation du comportement des appuis encore largement utilisée aujourd'hui dans la profession minière.

En France, l'effondrement en 1873 d'un secteur entier au sein de la mine de Varangéville (mine de sel en Lorraine) avait aussi fortement marqué les esprits. L'analyse des causes de l'accident a, là-aussi, conduit à faire évoluer durablement les techniques et conditions d'exploitation du gisement afin d'éviter une autre semblable catastrophe.

Fortement marquée pendant plus d'un siècle par l'industrie minière qui a longtemps constitué l'un des fleurons de sa puissance industrielle, la France a vu son activité d'extraction fortement décroître à compter des années 1980, sous l'effet conjugué de l'épuisement progressif des ressources et de la mondialisation induisant une concurrence accrue des grands pays producteurs. Le retour d'expérience a rapidement mis en évidence que l'arrêt d'une exploitation minière n'induisait pas pour autant la disparition définitive des risques et impacts susceptibles de résulter des anciens travaux d'exploitation.

Les perturbations induites par l'extraction d'importants volumes de vides laissent en effet persister de manière durable des dangers concernant la stabilité des terrains avec la possible survenue de désordres dont la prévision de l'échéance est souvent impossible. Cette problématique qui a fortement mobilisé l'action publique durant la dernière décennie a, de fait, tout naturellement trouvé sa place dans le présent chapitre. À ce sujet, le retour d'expérience disponible concernant l'élaboration

d'une démarche intégrée de prévention des risques et d'aménagement du territoire à l'échelle d'une région (bassin ferrifère de Lorraine) occupe une place importante dans le présent chapitre.

Cette démarche de prévention privilégiant une anticipation des phénomènes redoutés nécessite de s'appuyer sur des techniques permettant une maîtrise des risques afin de protéger les enjeux (personnes et biens) potentiellement soumis aux phénomènes d'instabilités.

Parmi celles-ci, la technique de surveillance s'avère souvent pertinente lorsque les superficies concernées sont telles qu'un traitement systématique des vides n'est pas envisageable. Il convient alors d'anticiper le désordre pour prendre des mesures conservatoires avant son déclenchement (déplacement de population, traitement accéléré des cavités). Cette solution requiert la collecte et le traitement d'informations au travers de réseaux de surveillance convenablement dimensionnés. À ce titre, l'expérience acquise au travers du suivi de l'effondrement programmé d'une cavité saline (cavité de Cerville-Buissoncourt en Lorraine) met clairement en avant la possibilité d'anticiper le développement d'effondrements en surface au travers de l'analyse de signaux précurseurs.

Les analyses en retour d'expérience présentent un grand intérêt, tant pour ceux qui les établissent que pour ceux qui s'en imprègnent. Nous espérons que les quatre qui suivent ne dérogeront pas à la règle. Ce type de démarche, très exigeante, se confronte néanmoins à une difficulté qu'il convient de ne pas perdre de vue, même si elle déborde très largement du cadre minier. Il existe toujours un risque, surtout si les événements ont donné lieu à de graves conséquences, de chercher à plaquer sur la réalité une explication soit classique, soit permettant, même inconsciemment, la préservation de certains intérêts. La possibilité de «revisiter» certaines catastrophes, plusieurs décennies après et dans un contexte désormais dépassionné, prend dès lors tout son sens. Encore faut-il pouvoir bénéficier d'informations dont la précision n'a pas trop souffert de la subjectivité de ceux qui ont été chargés de les collecter. Ceci vaut également pour les données que nous collectons à notre tour lors d'événements méritant d'être tracés et qui pourront contribuer à la réflexion des futures générations d'experts.

Compte tenu du volume contraint de ce manuel, seul un nombre limité d'exemples a pu être retenu pour illustrer le chapitre «mine et après-mine». Le choix de ces exemples est forcément discutable et, en ce sens, immanquablement frustrant. D'innombrables autres références auraient en effet pu enrichir l'ouvrage. La sélection proposée a pour objectif principal de couvrir un panel de cas aussi large et représentatif que possible, les opportunités d'échanges avec les différents contributeurs et leur réactivité ont fait le reste.

Caractéristiques du contexte français, les principaux gisements ayant donné naissance aux vastes bassins miniers sont très largement représentés (charbon, fer et sel). De même, les contributions concernent aussi bien le contexte « d'exploitation » (Coalbrook, Varangéville) que celui « d'après-mine » (Bassin ferrifère lorrain). Enfin, elles abordent des sujets variés et complémentaires tels que l'identification des mécanismes de rupture, la caractérisation de la résistance des roches, la modélisation numérique du comportement des terrains, l'élaboration de démarches intégrées de prévention, l'apport des techniques de surveillance à la gestion du risque et la mise en œuvre de techniques de traitement de mise en sécurité pour prévenir le déclenchement d'accidents.

Si la lecture de ce recueil forcément partiel contribue à aiguïser le désir de certains lecteurs à formaliser leur propre retour d'expérience dans le domaine pour en faire profiter le plus grand nombre, nul doute que leur contribution pourrait permettre de placer une problématique aussi vaste et pluri-disciplinaire que le génie minier comme sujet central d'un ouvrage spécifiquement dédié.

1.2 Un effondrement à la mine de sel de Varangeville en 1873

Quartier Saint-Maximilien

Pierre Bérest, LMS, ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Benoît Brouard, BROUARD CONSULTANTS

Bernard Feuga, GÉODERIS

Mehdi Karimi-Jafari, GÉOSTOCK

12.1 INTRODUCTION

On décrit l'accident à plusieurs égards remarquable qui a affecté il y a plus d'un siècle le quartier Saint-Maximilien de la mine de Varangéville, la dernière encore en activité des sept mines ouvertes dans le bassin salifère lorrain [Feuga, 2009]. Cette description s'appuie sur les archives du Service des Mines. On rappelle ensuite la notion d'aire tributaire, qui illustre par différence les particularités de l'effondrement de Saint-Maximilien, dans lequel les piliers étaient suffisamment résistants mais ont poinçonné le mur marneux affaibli par l'eau et la saumure. On propose un calcul numérique qui permet de rendre compte des observations les plus saillantes faites avant et après l'accident.

12.2 L'EFFONDREMENT DE 1873

Le quartier Saint-Maximilien de la mine de sel de Varangéville était exploité depuis 1859 par chambres et piliers, dans la 11^e couche de sel, entre 150,5 et 156 m de profondeur. Les piliers carrés, de 6 m de côté et 5,5 m de haut, laissaient un taux de défrètement de 82 %. Toutefois un pilier central rectangulaire de 29 m x 40 m protégeait le puits n°1 (fig. 12-1). Avant l'accident, les piliers donnaient une impression de grande solidité, on avait même envisagé d'en réduire la section. En fait, cette circonstance apparemment favorable était sans doute due à ce que les piliers avaient commencé à poinçonner le mur et ne portaient plus qu'une faible part du recouvrement. Le mur de la mine (le sol, en termes miniers) était 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, abondantes dans la mine : on utilisait en effet des jets d'eau sous pression pour prédécouper (cf. glossaire) le front de taille. À 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 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, et même des marnes brun-chocolat sous-jacentes beaucoup plus molles et sensibles à l'action de la saumure. Une zone affaiblie se développait ainsi dans le mur à partir du pilier central. Sa cohésion était certainement réduite.

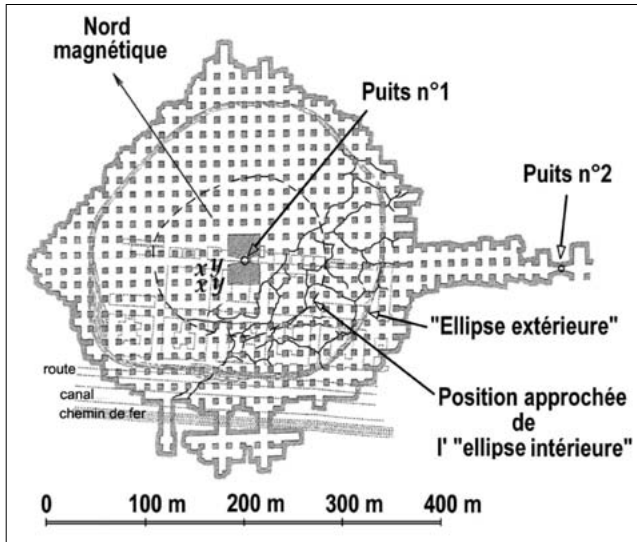


Figure 12-1 : Plan du quartier Saint-Maximilien exploité par chambres et piliers autour du puits n°1 (au sud-ouest un stot préserve le chemin de fer) ; fissures apparues en surface lors de l'effondrement et position approchée de l'ellipse intérieure (x et y cf. texte ci-dessous) (d'après Braconnier, 1873a)

Le 31 octobre 1873, le quartier s'effondrait brutalement. La secousse fut ressentie à Nancy, distante d'une dizaine de kilomètres. À la surface du sol, une cuvette d'affaissement s'était formée (fig. 12-1). Plusieurs rangées de fissures verticales ouvertes peu profondes 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 (60% de la hauteur initiale des piliers). Cette alternance de bourrelets et crevasses, qui marquent les effets de contraintes horizontales de compression et de traction, respectivement, est typique des effets en surface d'une cuvette d'affaissement (définie par l'absence de déplacement vertical relatif entre deux blocs). 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.

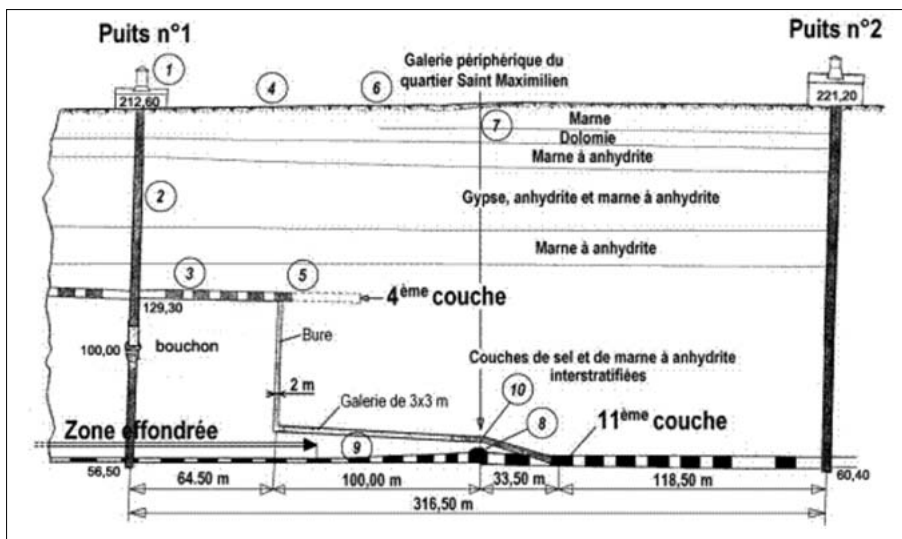


Figure 12-2 : Coupe verticale des travaux montrant les quartiers de 11^e et 4^e couches, les puits 1 et 2, et la galerie creusée après l'accident, dite 3x3; les nombres de 1 à 10 entourés d'un cercle renvoient à la description du paragraphe 12.2 (d'après Braconnier, 1873c)

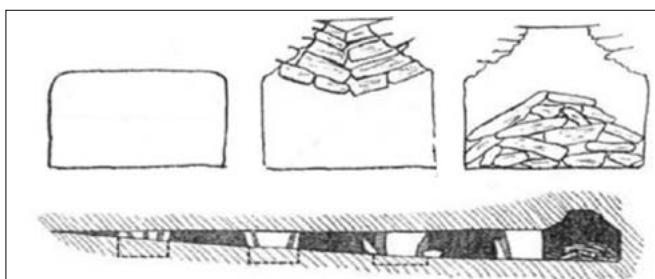


Figure 12-3 : Coupe verticale (en bas) des cinq galeries les plus extérieures, le puits n°1 étant vers la gauche montrant les piliers poinçonnant le mur; phases successives (en haut) de l'effondrement du toit dans la galerie la plus extérieure (d'après Braconnier, 1873c)

Les 1^{er} et 2 novembre, des mineurs et Marie-Alfred Braconnier, ingénieur du Service des mines, descendirent par le puits n°2 pour visiter les travaux effondrés. Les piliers avaient, d'autant plus profondément qu'on s'approchait du pilier central, poinçonné le mur, qui s'était incliné vers le haut dans la direction du puits central (fig. 12-3). Ils étaient globalement intacts, quoique leurs angles eussent éclaté et que des fissures initialement fermées se fussent ouvertes, en suivant des fentes verticales remplies de marnes, de sel et d'anhydrite, contemporaines du dépôt, et qui constituent des surfaces de faiblesse mécanique [Robelin et Bonijoly, 1990]; la trace de ces fentes est reportée sur la figure 12-1. Cette ouverture était d'ailleurs déjà visible, de façon plus discrète, avant l'accident, et notamment dès 1868 pour les quatre piliers marqués x et y sur la figure, près du croisement

des galeries Sainte Julie, Saint Ernest et Sainte Louise, signe que l'effondrement n'avait qu'amplifié une évolution déjà amorcée. L'effondrement n'avait pas créé de fracture de grande échelle au sein du toit, 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 autres mines de sel dans le monde [Bérest *et al*, 2004].

Cinématique de l'effondrement

Les trois rapports qu'a laissés Braconnier [1873abc] 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, les piliers qui le supportaient poinçonnant le mur de la mine. En effet (voir fig. 12-2) à l'intérieur de cette ellipse, le sol est resté plat ①, le puits est resté intact ②, le petit quartier exploité dans la 4^{ème} couche en 1859, à 70 m au-dessus de l'exploitation de 11^e couche, est resté intact ③, 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 des bourrelets indices d'une compression horizontale se sont formés en surface sur le pourtour de l'ellipse intérieure ④, de petites fissures déjà mentionnées sont apparues à la périphérie de l'exploitation de 4^e couche ⑤, le sol a pris une pente régulière entre les deux ellipses ⑥, des fractures indices d'une traction horizontale se sont formées sur le pourtour de l'ellipse extérieure ⑦, à 160 m sous ce pourtour ⑧ une montée de voûte sur 3 mètres de haut a été observée (croquis du haut de la fig. 12-3). 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 3 m x 3 m, 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.

L'accident ne résulte pas d'une rupture des piliers, mais de leur enfoncement dans le mur affaibli par l'eau. Celui-ci est intervenu quand, la mine s'élargissant, le toit ne pouvait plus transférer sur les bords fermes la fraction du poids du recouvrement que les piliers ne portaient plus.

12.3 LA MÉTHODE DES CHAMBRES ET PILIERS

L'aire tributaire

La conception de la mine doit assurer la stabilité du recouvrement : les piliers doivent pouvoir supporter le poids du cylindre de terrains qui s'appuie sur le contour extérieur de la mine. Son poids s'écrit ρgSH , si S est l'aire de la mine et H sa profondeur. Ce poids du recouvrement est équilibré par la somme, d'une part, de la force verticale totale que les piliers appliquent sur la face inférieure du cylindre, soit $S(1-\tau)\bar{\sigma}_{zz}$ (si τ est le taux de défrètement) si $\bar{\sigma}_{zz}$ est la contrainte verticale moyenne exercée par les piliers sur le toit, et, d'autre part, des cisaillements verticaux qui s'appliquent sur la surface latérale du cylindre, soit $PH\bar{\sigma}_{nz}$ si $\bar{\sigma}_{nz}$ est la valeur moyenne de ces cisaillement verticaux et P le périmètre du contour de la mine :

$$\rho gHS = S(1-\tau)\bar{\sigma}_{zz} + PH\bar{\sigma}_{nz} \quad (12.1)$$

Il va dans le sens de la sécurité de négliger le dernier terme dont la contribution relative diminue d'ailleurs quand grandit la mine et avec elle le rapport S/P (soit $R/2$ dans le cas d'une mine de contour circulaire et de rayon R). Autrement dit on suppose que le poids du recouvrement est tout entier porté par les piliers :

$$\bar{\sigma}_{zz} = \rho gH / (1-\tau) \quad (12.2)$$

Cette formule est dite «de l'aire tributaire» : tout se passe comme si un pilier d'aire horizontale s supportait une colonne de terrains d'aire horizontale $s / (1-\tau)$. Cette formule est très «robuste» puisqu'elle n'utilise que des considérations élémentaires d'équilibre. Elle permet d'expliquer des effondrements affectant des mines étendues et très défrutées de minerai raide et fragile, comme celui du 13 mars 1989 à la mine de carnallite de Völkershausen (district de Werra en Allemagne) dont Minkley et Menzel [1996] ont fait une remarquable analyse dynamique. L'exploitant doit trouver un bon compromis entre l'exploitation maximale du gisement (qui pousse à augmenter le taux de défrètement) et la stabilité de la mine (qui pousse à le diminuer). Une méthode de dimensionnement consiste à faire au laboratoire des essais de compression simple sur des cylindres de minerai pour déterminer leur résistance à la compression uniaxiale R_c et à vérifier que la contrainte verticale moyenne dans le pilier est inférieure à cette résistance affectée d'un coefficient de sécurité f :

$$\bar{\sigma}_{zz} = \rho gH / (1-\tau) < R_c / f \quad (12.3)$$

Le choix de la valeur du coefficient de sécurité $f > 1$ doit prendre en compte la dispersion des valeurs de résistance, l'effet d'échelle qui fait qu'une petite

éprouvette est plus résistante qu'une grosse, le possible «vieillessement» du pilier, notamment sous l'effet de l'air de ventilation.

Limites de la théorie de l'aire tributaire

Hormis ces corrections «rhéologiques», des facteurs plus structuraux jouent un rôle, notamment l'élancement des piliers : encastré au toit et au mur, un pilier développe en son cœur un état de contrainte triaxial (c'est à dire, qui ne se réduit pas à la seule composante σ_x) d'autant plus marqué qu'il est peu élancé ; sa résistance et – dans le cas du sel – sa ductilité *globales* augmentent.

On doit donc préférer des piliers larges à des piliers étroits. Mais l'élargissement a évidemment une limite, puisque, à taux de défrètement égal, des piliers plus larges impliquent des chambres plus larges ; et donc des risques d'instabilité locale du toit des galeries lorsque celui-ci atteint une grande portée. L'instabilité peut même affecter le mur, si celui-ci est constitué d'une couche peu épaisse bien individualisée, séparée de la couche sous-jacente par un inter-lit marneux peu résistant : cette couche se comporte comme une dalle comprimée horizontalement par la dilatation de la base des piliers [Baar, 1977]. Si l est la largeur de la chambre, η l'épaisseur de la couche, E son module de Young, σ la contrainte horizontale moyenne dans la couche, le flambage survient quand le rapport $\sigma l^2 / E \eta^2$ excède une valeur limite qui dépend des conditions d'encastrement. La couche se soulève alors en se désolidarisant de la couche sous-jacente, comme on l'observe localement dans des galeries de la mine de Varangéville.

La théorie de l'aire tributaire suppose que la force appliquée par le toit sur le pilier soit verticale. Cette hypothèse est incorrecte si la hauteur de recouvrement est très variable. La carrière souterraine de Champagnole s'ouvrait à flanc d'une pente ; le recouvrement augmentait comme la carrière s'étendait. Des désordres dans les piliers étant apparus sous la zone de recouvrement maximal, on a pris des mesures vis-à-vis d'un risque d'effondrement *vertical* de cette seule zone. En fait, en 1964, les piliers se sont renversés et l'effondrement de tout le recouvrement s'est fait en bloc suivant une translation qui comportait une composante horizontale. Des piliers plus longs que larges dans la direction de plus grande pente auraient pu éviter l'effondrement [Goguel, 1967].

La théorie de l'aire tributaire se préoccupe de la seule résistance des piliers et ne s'applique qu'à une mine déjà étendue pour laquelle on peut négliger le dernier terme de (12.1). Dans la pratique, dans une mine réelle, on commence à exploiter avec un taux jugé raisonnable. Mais, tant que la mine n'est pas très étendue, le toit reporte sur les bords fermes une part du poids du recouvrement, risquant ainsi de masquer pour un temps une résistance éventuellement insuffisante des piliers,