



**HAL**  
open science

# Contribution méthodologique et expérimentale à l'étude de la diminution de la résistance des massifs rocheux par vieillissement

Claudia Sorgi, Christophe Auvray

## ► To cite this version:

Claudia Sorgi, Christophe Auvray. Contribution méthodologique et expérimentale à l'étude de la diminution de la résistance des massifs rocheux par vieillissement. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées : séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France. pp.124-142. ineris-00976163

**HAL Id: ineris-00976163**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00976163>**

Submitted on 9 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# CONTRIBUTION MÉTHODOLOGIQUE ET EXPÉRIMENTALE À L'ÉTUDE DE LA DIMINUTION DE LA RÉSISTANCE DES MASSIFS ROCHEUX PAR VIEILLISSEMENT

Claudia SORGI<sup>(1)</sup>, Christophe AUVRAY<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> INERIS, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

<sup>(2)</sup> LAEGO-ENSG-INPL, 54501 Vandœuvre-les-Nancy, France

## Résumé

La littérature scientifique concernant le phénomène du vieillissement des massifs rocheux est largement documentée. Il est clairement mis en évidence que certains facteurs responsables de l'affaiblissement dans le temps des propriétés géomécaniques des massifs rocheux sont intrinsèques aux matériaux rocheux (facteurs dits internes) alors que d'autres, dits externes, dépendent de l'environnement caractérisant l'ouvrage rocheux (température, hygrométrie...).

Ainsi, pour que la recherche ne se limite pas à des considérations théoriques et générales, le parti a été pris de s'attacher à étudier et caractériser le comportement de quelques matériaux. Le choix a donc été fait de s'attarder sur des matériaux connus pour leur propension à évoluer dans le temps et donner naissance à de nombreuses instabilités : le gypse et la craie. Deux types de gypse issus de deux carrières souterraines et présentant des comportements sensiblement différents ont ainsi été étudiés : celui de Grozon (39) et de Livry Gargan (93). Une ambitieuse campagne de caractérisation en laboratoire a ainsi été entreprise. Des protocoles expérimentaux innovants, élaborés puis appliqués à de très nombreuses éprouvettes prélevées *in situ* au sein des carrières souterraines, ont eu pour principaux objectifs de caractériser des échantillons « d'âge différent » (prélèvements dans des secteurs exploités dans des temps récents ou, au contraire, très anciens) ou soumis à des conditions environnementales variables (teneurs hygrométriques principalement). Le dépouillement des données acquises lors de cette importante campagne de caractérisation a permis de dégager certaines tendances sur le comportement du gypse sous l'effet conjugué du temps et des conditions d'hygrométrie régnant en souterrain.

Malgré l'apport considérable de la caractérisation des massifs rocheux en laboratoire, il n'en demeure pas moins que les essais sont réalisés sur des échantillons rocheux de petite taille dont la variabilité et la représentativité à l'échelle de la carrière reste un problème très délicat à appréhender. Il nous est donc apparu essentiel, parallèlement à une caractérisation en laboratoire, d'initier la constitution d'une base de données sur le vieillissement réel d'une cavité en grandeur nature et conditions réelles. L'objectif est d'acquérir sur une longue durée (dix à quinze ans) de données essentielles sur l'évolution couplée du comportement mécanique d'une carrière souterraine (déplacements, pressions interstitielles...) ainsi que des conditions environnementales qui y règnent (température, hygrométrie, présence d'eau...). Ainsi une carrière souterraine de craie a été instrumentée.

## 1. Introduction

Les massifs rocheux sont des matériaux qui « vieillissent », dans le sens où leurs propriétés mécaniques ou physico-chimiques évoluent dans le temps et se dégradent progressivement sous l'influence directe des contraintes auxquelles ils sont soumis ainsi que de l'atmosphère et de l'hydrosphère qui caractérisent l'environnement dans lequel ils se trouvent.

Ce phénomène, souvent difficile à appréhender et, encore plus, à quantifier, explique que de nombreux ouvrages rocheux (carrières, mines, fronts de falaise, ...) donnent, durant de très longues périodes, une fausse impression de stabilité mécanique, alors que, dans les faits, ils continuent à évoluer parfois de manière quasi imperceptible jusqu'à subir une rupture soudaine, généralement très délicate à prévoir.

Pour progresser dans la compréhension des mécanismes physiques et physico-chimiques à l'origine du « vieillissement » des massifs rocheux, un programme de recherche financé sur le Budget Civil de Recherche et Développement (BCRD) est en cours depuis quelques années. L'INERIS a assuré l'animation de ce programme, s'investissant de manière très approfondie dans l'analyse de certains thèmes (choix des sites étudiés, participation à la définition des protocoles de caractérisation en laboratoire, choix et instrumentation du site expérimental en souterrain...) et assurant la coordination des travaux menés par le LAEGO (Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages), partenaire associé à la recherche pour la caractérisation des matériaux en laboratoire.

Pour que la recherche ne se limite pas à des considérations pas trop théoriques et générales, le parti a été pris de se concentrer sur l'étude et la caractérisation du comportement d'un nombre limité de matériaux. Les deux matériaux retenus ont été choisis du fait de leur propension à évoluer dans le temps en donnant naissance à de nombreuses instabilités. Il s'agit du gypse et de la craie.

Deux types de gypse exploités au sein de deux carrières souterraines et présentant des comportements sensiblement différents ont ainsi été étudiés : celui de Grozon (39) et de Livry-Gargan (93). Une ambitieuse campagne de caractérisation en laboratoire a été entreprise. Des protocoles expérimentaux innovants, élaborés puis appliqués à de très nombreuses éprouvettes prélevées *in situ* au sein des carrières souterraines, ont eu pour principaux objectifs de caractériser des échantillons « d'âge différent » (prélèvements dans des secteurs exploités dans des temps récents ou, au contraire, très anciens) ou soumis à des conditions environnementales variables (teneurs hygrométriques principalement). Le dépouillement des données acquises lors de cette importante campagne de caractérisation a permis de dégager certaines tendances sur le comportement du gypse sous l'effet conjugué du temps et des conditions d'hygrométrie régnant en souterrain.

Parallèlement, le programme a consisté à initier la constitution d'une base de données sur le vieillissement « *in situ* » d'une cavité existante en conditions réelles. L'objectif est d'acquérir sur une longue durée (dix à quinze ans), une quantité importante de données stratégiques permettant de mieux appréhender l'évolution du comportement mécanique d'une carrière souterraine (déplacements, pressions interstitielles...) ainsi que les variations dans le temps des conditions environnementales qui y règnent (température, hygrométrie, présence d'eau...). Pour

ce faire, une carrière souterraine de craie a été instrumentée sur la commune d'Estreux (59).

## **2. Les principales causes de vieillissement**

La littérature scientifique concernant le phénomène du vieillissement des massifs rocheux est assez abondante. Elle met clairement en évidence que certains facteurs responsables de l'affaiblissement dans le temps des propriétés géomécaniques des massifs rocheux sont intrinsèques aux matériaux rocheux (facteurs dits internes) alors que d'autres, dits externes, dépendent de l'environnement caractérisant l'ouvrage rocheux (température, hygrométrie...).

Ainsi, une même roche peut être altérée très fortement et rapidement dans un milieu tropical et ne pas l'être du tout en climat tempéré. Par ailleurs, à conditions environnementales équivalentes, les différentes natures de roches ne réagissent pas de manière identique. Leurs conséquences peuvent être observées, aussi bien à une échelle macroscopique (formation d'une surface rigide externe, épaisse de quelques centimètres, qui se détache progressivement de la masse de la roche) qu'à une échelle microscopique (modifications minéralogiques et structurales).

Fréquemment, l'altération est due à l'action simultanée de plusieurs facteurs défavorables dont un seul peut, parfois, conditionner l'existence de tous les autres.

### **2.1 Les facteurs internes**

Dans des conditions de milieux identiques, les roches offrent une résistance aux agents d'altération qui dépend de leurs caractéristiques intrinsèques (Ramana et Gogte 1982, Hasley et al., 1998, Gokceoglu et al 2000, Jeannette 2000, Canton et al. 2001, Inigo et Vicente-Tavera 2001). Une roche est en général constituée de macro-, micro- et nano-particules ainsi que d'un espace vide (porosité) accessible par les gaz et les liquides. Les roches se caractérisent par une « altérabilité spécifique », qui dépend de :

- la composition chimique et minéralogique des constituants : l'altérabilité d'une roche dépend de la susceptibilité de ses constituants à établir un mécanisme réactionnel, contrôlé par les conditions environnementales (température, pression, présence de certaines molécules ou ions) ;
- la structure pétrographique (texture, taille, forme et arrangement des minéraux, surfaces spécifiques) : d'une manière générale, les textures et structures homogènes sont plus stables que celles hétérogènes. En ce qui concerne la taille des constituants, il a été observé que les roches à granulométrie grossière subissent plus facilement la désagrégation par expansion thermique (c'est le cas de certaines roches éruptives ou métamorphiques), que celles à granulométrie plus fine ;
- la porosité et de sa « tortuosité » : plus la tortuosité est importante, moins facilement les fluides et les gaz pourront circuler au sein de la roche (faible perméabilité). La nature des surfaces des pores conditionne, elle aussi, la capacité d'un fluide doté d'une tension superficielle, mouillabilité et viscosité données, à traverser une roche et à déplacer les particules plus fines (Rautureau et al., 2000) ;

- la présence des discontinuités, telles que des fissures ou des fractures, augmentent la capacité d'un fluide ou d'un gaz à traverser la roche et à déclencher des réactions physiques et/ou chimiques.

Ainsi, Rautureau et al. (2000), considèrent que, pour examiner le comportement dans le temps d'une roche, plusieurs aspects doivent être pris en compte : l'analyse du comportement mécanique de la roche (cohésion, anisotropie des contraintes, rôle des éléments extérieurs), la réactivité chimique (accessibilité des zones et sites actifs, réactions interfaciales, réactions chimiques, évolution des minéraux par rééquilibrage) et la réponse aux différentes sollicitations.

## **2.2 Les facteurs externes**

Les facteurs externes à l'altération dans le temps des propriétés mécaniques des massifs rocheux résultent principalement de processus physiques, chimiques et biologiques.

Les premiers sont essentiellement liés aux variations de température et d'humidité (hygrométrie ambiante, teneur en eau du massif) mais aussi à l'intensité des contraintes qui s'appliquent sur le massif de contraintes. Ils sont susceptibles d'aboutir à la désagrégation mécanique plus ou moins intense des roches.

Les facteurs chimiques, pour leur part, interviennent au travers d'eaux plus ou moins agressives<sup>3</sup> qui entraînent des transformations chimiques au sein de la roche elle-même et ce avec d'autant plus de facilité que les processus physiques leur auront ouvert la voie (Farran et Thenoz 1965, Auger 1991, Furlan et Girardet 1991, Norbury et al. 1995, Chigira et Oyama 1999, Oyama et Chigira 1999, Chêne et al. 1999, Gupta et Seshagiri Rao 2000). En ce qui concerne les processus biologiques, il est connu que les algues vertes, les diatomées, les lichens, les champignons et les bactéries, agissent souvent de façon marquée sur l'altération des roches, soit directement par action mécanique (dilatation de racines) ou chimique (sécrétion d'acide oxalique produit par les végétaux), soit indirectement, en augmentant l'agressivité des fluides présents dans les roches (Fusey et Hyvert 1964, Winkler 1966, Pochan et Jaton 1967, Fassina 1995, Gomez-Alarcon et al. 1995, Chen et al. 2000, Grgic et al. 2002, Delatieux et al. 2001, Ascaso et al. 2002).

Cependant, il est souvent difficile de distinguer la désagrégation physique des effets dus à l'altération chimique ; c'est le cas, par exemple, de l'oxydation des minéraux du fer qui entraîne une fissuration de la roche, en particulier autour des minéraux oxydés.

## **2.3 Sensibilité des différents types de roches aux processus de vieillissement**

Les différentes natures de matériaux rocheux présentent une sensibilité variable face aux processus de vieillissement. Une hiérarchisation de cette sensibilité en fonction de différents types de roche est ainsi proposée dans le tableau 1. Ce tableau est fourni à titre indicatif et n'a pour autre objectif que de dégager des tendances assez globales.

---

<sup>3</sup> L'agressivité de l'eau est fonction de différents paramètres comme les concentrations en SiO<sub>2</sub> (notamment en acide silicique, H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) et en cations basiques (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>), le pH, la température et la vitesse de circulation.

Des cas particuliers peuvent en effet faire exception notamment en fonction de la minéralogie de la structure ou de la texture de la roche. Ainsi, une argile gonflante smectitique est nettement plus sensible aux processus hydriques qu'une illite ou une kaolinite.

	Processus Physiques			Processus Chimiques		Processus Biologiques
	Processus Thermiques	Processus Hydriques	Processus Mécaniques	Cristallisation/ Dissolution	Oxydation	
Gypse	++	+++	+++	+++	++	++
Craie	+	+++	+++	+++	++	+++
Calcaire	+	+++	++	+++	++	+++
Grès	+	+++	+++	++	++	++
Marne	+	+++	+++	+	+++	++
Argiles	+	+++	++	-	+++	++
Charbon	+++	++	+++	-	+	++
Gneiss	+++	+	++	-	+	-
Granite	+++	+	++	-	+	-
Basalte	+++	+	++	-	+	-
Marbre	++	+	++	-	+	-

*Tableau 1. Hiérarchisation de la sensibilité des roches aux processus de vieillissement. (+++) = très sensible ; (++) = moyennement sensible ; (+) = peu sensible ; (-) = non sensible*

Il ressort que les roches sédimentaires sont particulièrement sensibles aux processus hydriques (tant sur le plan physique que chimique) et biologiques et ce, d'autant plus que la roche présente un réseau interconnecté de vides. Dans ce cas, les agents du vieillissement (notamment l'eau) pourront plus facilement atteindre des parties profondes de la roche. Inversement, du fait d'une faible conductivité thermique, les roches sédimentaires sont nettement moins sensibles aux processus thermiques.

Les roches volcaniques et métamorphiques présentent une tendance opposée. Leur texture minéralogique est globalement stable et caractérisée par une infime microporosité. Ainsi, parmi les processus hydriques, seuls ceux impliquant un effet mécanique sur la macro-porosité (fissuration et fracturation de la roche) produisent des réelles conséquences sur leur vieillissement. En revanche, du fait de leur structure homogène, les roches volcaniques et métamorphiques sont sans doute plus sensibles que les roches sédimentaires aux processus thermiques. En effet, il a été constaté que la conductivité thermique d'une roche sèche décroît avec l'augmentation de la porosité.

### 3. Etude du phénomène de vieillissement du gypse

Le choix du gypse comme matériau « pilote » dans le cadre de ce programme s'explique en partie par le fait que :

- le territoire français recèle de très nombreuses carrières souterraines de gypse, pour la plupart désormais abandonnées. A l'inverse des quelques exploitations souterraines actuelles, la plupart de ces anciennes exploitations souterraines ont laissé des vides résiduels importants à des profondeurs n'excédant pas quelques dizaines de mètres ;

- le comportement mécanique à long terme du matériau est mal connu mais semble propice au développement d'instabilités si l'on s'en réfère à notre retour d'expérience sur l'évolution à long terme de ce type d'anciennes carrières.

Le gypse peut présenter des caractéristiques sensiblement différentes d'un bassin à un autre (du fait notamment des conditions de dépôt). Pour tenter d'appréhender cette variabilité, nous avons pris le parti de porter notre attention sur deux carrières souterraines de gypse dans le cadre de la présente étude :

- une carrière située à Livry-Gargan (93), en région parisienne (gisement stratiforme peu perturbé) ;
- une carrière située sur la commune de Grozon (39), dans le Jura (gisement fortement tectonisé).

### **3.1 Observation du vieillissement des gypses de Livry-Gargan et Grozon au Microscope Électronique à Balayage (MEB)**

Afin de mettre en évidence d'éventuelles différences entre un gypse sain et un gypse « altéré », des observations au MEB ont été réalisées sur des échantillons de gypse prélevés, pour les deux carrières, le long de sondages horizontaux carottés depuis le parement jusqu'au cœur de piliers (Auvray, 2003 ; Auvray et al. 2004b).

Dans chacune des deux carrières, deux quartiers d'âges d'exploitation différents ont été échantillonnés : un quartier actuellement en exploitation (« gypse jeune ») et un quartier exploité il y a plusieurs décennies (« gypse vieux », de 50 ans à Livry-Gargan et d'une centaine d'années à Grozon).

A Livry-Gargan, le gypse saccharoïde présente des cristaux supérieurs au millimètre, avec des passées plus fines. Des petits blocs centimétriques ont été prélevés le long des sondages horizontaux et observés (un exemple est reporté dans la figure 1).

L'observation au microscope a permis de constater que :

- en bord du pilier, les cristaux de gypse présentent une dissolution marquée qui s'estompe en profondeur ;
- pour le quartier d'âge d'exploitation récent, les traces de dissolution disparaissent au-delà de 1,5 mètres de profondeur vers le cœur du pilier et les cristaux sont automorphes au cœur du pilier ;
- pour le quartier d'âge d'exploitation ancien, les traces de dissolution sont observées jusqu'au cœur du pilier malgré la présence de quelques cristaux automorphes.

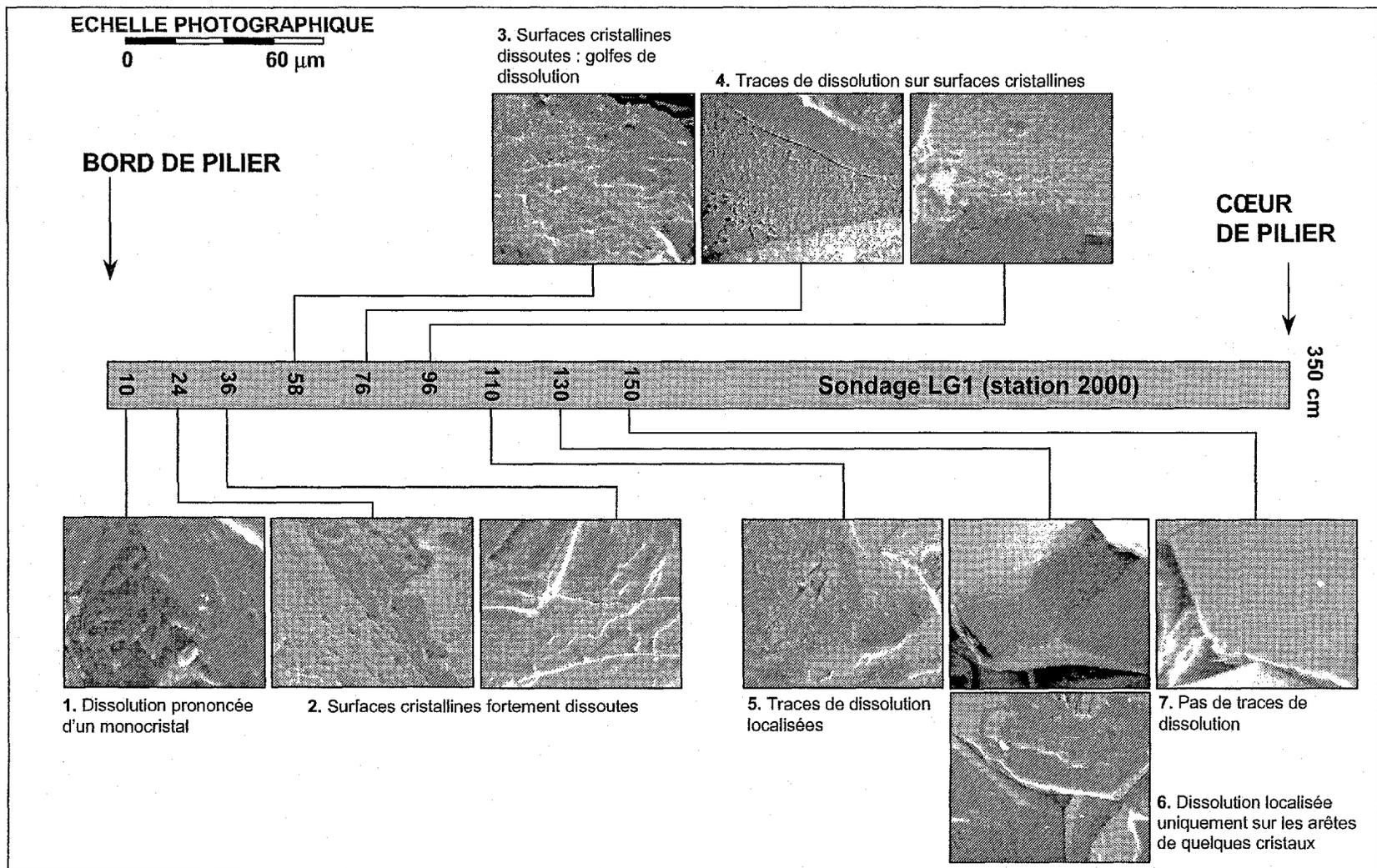


Figure 1. Livry-Gargan – Age d'exploitation récent – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier (Grossissement : X500 ; les traces de dissolution disparaissent au-delà de 1,5 mètre vers le cœur du pilier ; synthèse de 40 photos environ).

Le gypse provenant de Grozon, microcristallin, présente des cristaux d'une taille moyenne de 200  $\mu\text{m}$ . Comme pour Livry-Gargan, les observations au MEB ont permis de constater que :

- en bord du pilier, les cristaux de gypse présentent une dissolution marquée qui s'estompe en profondeur ;
- dans le quartier d'âge d'exploitation récent, de nombreux cristaux sont automorphes, quelques-uns présentent des traces de dissolution jusqu'aux premiers cinquante centimètres de profondeur. Au-delà de cette profondeur, elles disparaissent ;
- les cristaux des échantillons prélevés dans le quartier d'âge d'exploitation ancien présentent des traces de dissolution qui sont quantitativement plus importantes. Les cristaux sont corrodés et les traces de dissolution sont observables jusqu'à plus d'un mètre de profondeur.

Les observations au microscope électronique à balayage, synthétisés dans la figure 2, mettent donc en évidence, de manière assez spectaculaire, une augmentation significative des traces de dissolution au sein des échantillons provenant des quartiers anciens par rapport aux échantillons prélevés dans des quartiers très récemment exploités.

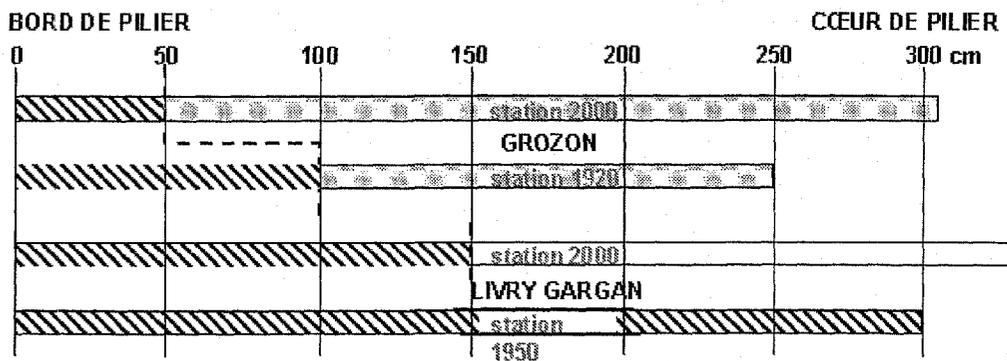


Figure 2. Profondeur par rapport à la surface des piliers du front de dissolution des cristaux de gypse (hachures).

Afin de pouvoir expliquer, d'une façon quantitative, les observations effectuées au MEB, un programme expérimental ambitieux, visant à caractériser les deux gypses du point de vue physique et mécanique a été développé.

### 3.2 Caractérisation physique des échantillons de gypse

Différents types d'essais ont été réalisés sur des échantillons prélevés en parement de pilier dans des quartiers d'âge différent et sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs sur les carottes des sondages horizontaux ayant servi pour les

observations au MEB. Tous les échantillons ont été séchés à l'étuve à 50 °C, pendant au moins 96 heures.

Afin de vérifier l'influence du temps sur l'intensité de la dégradation et la façon dont elle progresse au sein d'un pilier (vieillessement), les résultats obtenus ont été interprétés au vu de l'âge du quartier d'exploitation et de la profondeur des échantillons par rapport au parement de pilier.

Une dispersion importante des données, probablement due à des variations lithologiques au sein des couches de gypse ainsi qu'à la présence de discontinuités (fissures), a été constatée. Cependant, en ce qui concerne le gypse de Livry-Gargan (figure 3), la porosité et les vitesses des ondes P et S apparaissent clairement plus importants dans les piliers anciens alors que la densité y est moins importante.

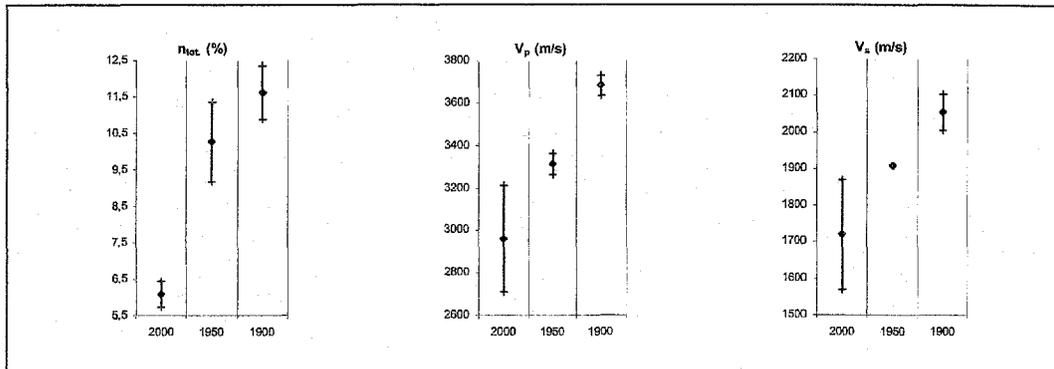


Figure 3. Livry-Gargan – Dispersion de différents paramètres physiques en fonction de l'âge d'exploitation (valeurs moyennes et écarts-types) (même légende que le tableau 2.3).

Quand on regarde l'évolution de la porosité et de la perméabilité en fonction de la profondeur dans le pilier on s'aperçoit que, à Livry-Gargan comme à Grozon, les valeurs de la porosité accessible à l'eau ( $n_w$ ) et de la perméabilité à l'azote ( $K_N$ ) sont plus importantes en parement qu'en cœur de pilier. Ceci semble aller dans le sens des observations réalisées au MEB, à savoir une dissolution plus importante des parties superficielles des piliers.

### 3.3 Caractérisation mécanique

#### 3.3.1 Comportement mécanique instantané

Les échantillons prélevés en blocs, comme ceux provenant des carottes, ont fait l'objet d'une série d'essais mécaniques en laboratoire (essais de traction directe et de compression uniaxiale, triaxiale et isotrope). On se contentera, dans ce qui suit, de présenter les résultats les plus marquants.

Comme pour les essais de caractérisation physique, les résultats des essais mécaniques ont été interprétés au vu de l'âge du quartier d'exploitation et de la profondeur des échantillons par rapport au parement du pilier.

En ce qui concerne les variations des paramètres en fonction de la profondeur par rapport au parement du pilier (notamment la résistance à la compression et le module d'Young), les résultats des essais sont concordants pour l'ensemble des échantillons des deux carrières étudiées. On constate ainsi une augmentation plus ou moins marquée de la résistance à la compression et du module d'Young vers le cœur du pilier. Cette augmentation est plus évidente dans les quartiers anciens que dans les quartiers récents.

En particulier, à Livry-Gargan, on constate que :

- dans les quartiers d'exploitation récente, la résistance à la compression uniaxiale augmente de 3,5 % et le module d'Young augmente de 15 % ;
- dans les quartiers d'exploitation ancienne, la résistance à compression uniaxiale augmente de 16 % et le module d'Young augmente de 17 %.

De la même manière, à Grozon on constate que :

- dans les quartiers d'exploitation récente, la résistance à compression uniaxiale augmente de 30 % et le module d'Young augmente de 2,5 % ;
- dans les quartiers d'exploitation ancienne, la résistance à compression uniaxiale augmente de 30 %.

Ainsi, en dépit des faibles variations de certaines valeurs, les résultats de la caractérisation mécanique instantanée des échantillons semblent confirmer que la résistance du gypse est plus faible en bordure de pilier où le matériau est plus endommagé, que vers le cœur.

### *3.3.2 Comportement mécanique différé*

Après avoir analysé le comportement instantané des deux gypses étudiés, une caractérisation en laboratoire a été réalisée afin de quantifier l'influence de l'hygrométrie sur le comportement à long terme du gypse (Auvray et al. 2004a). Des essais innovants et particulièrement délicats à mettre en œuvre ont été réalisés, à l'aide d'un appareillage spécialement conçu à cette finalité. Il s'agit d'un bâti de fluage sous l'embase duquel un récipient contenant une solution saline saturée est positionné afin d'imposer à l'éprouvette une hygrométrie donnée (figure 4).

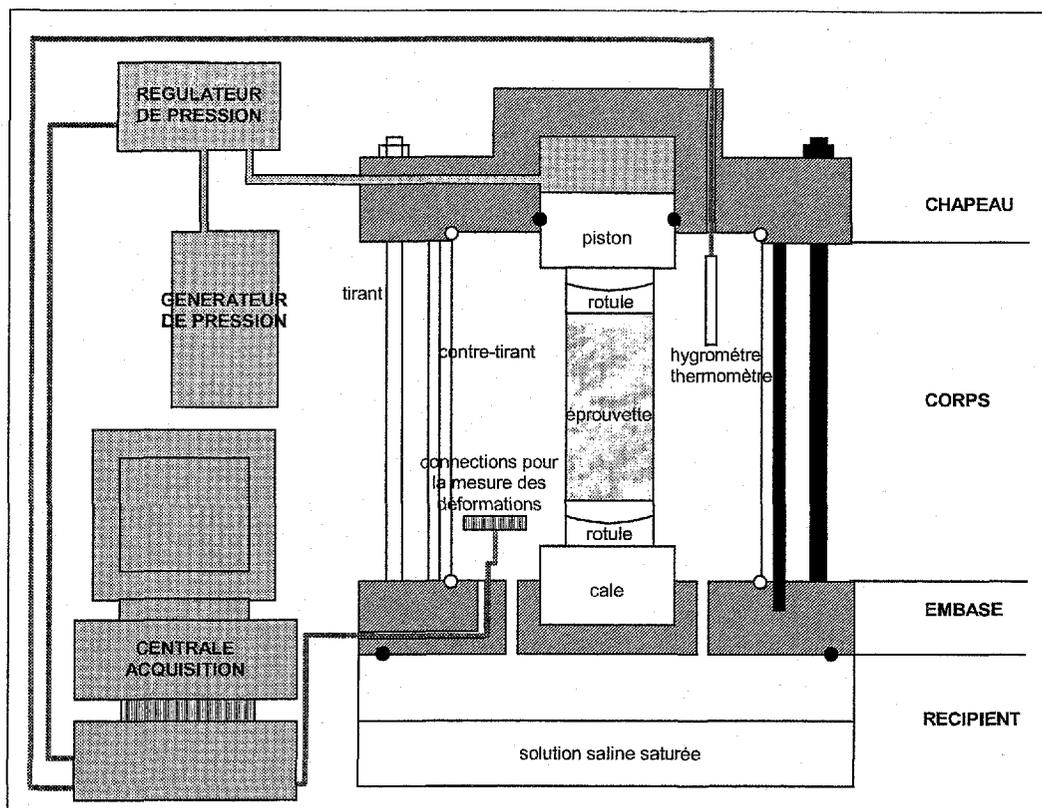


Figure 4. Schéma du bâti de fluage modifié pour imposer une valeur donnée d'hygrométrie.

Les éprouvettes ont été instrumentées de deux manières différentes : soit avec des jauges d'extensométrie, soit avec des capteurs de déplacements LVDT. Après des tests en laboratoire il a été constaté que les jauges avec la résine doivent être utilisées de préférence avec un matériau peu déformable et les capteurs LVDT avec un matériau plus déformable et, afin d'éviter les réactions d'oxydo-réduction, non ferreux. Des essais monopaliers (contrainte et hygrométrie constantes pendant toute la durée de l'essai) et multipaliers (la contrainte ou l'hygrométrie varient pendant l'essai) ont été réalisés sur divers échantillons.

Les essais de fluage monopaler conduits à différentes hygrométries sur des échantillons d'âge d'exploitation différent de la carrière de Grozon montrent une corrélation entre les déformations volumiques, l'hygrométrie et l'âge du quartier d'exploitation (dans la figure 5, on constate des déformations nettement plus importantes avec une hygrométrie de 90 % qu'avec une hygrométrie de 30 % et avec des échantillons de 1920 qu'avec des échantillons de 2000).

Les résultats des essais menés sur les échantillons de Livry-Gargan, confirment l'influence de l'hygrométrie et de l'âge de l'exploitation sur la déformation des échantillons.

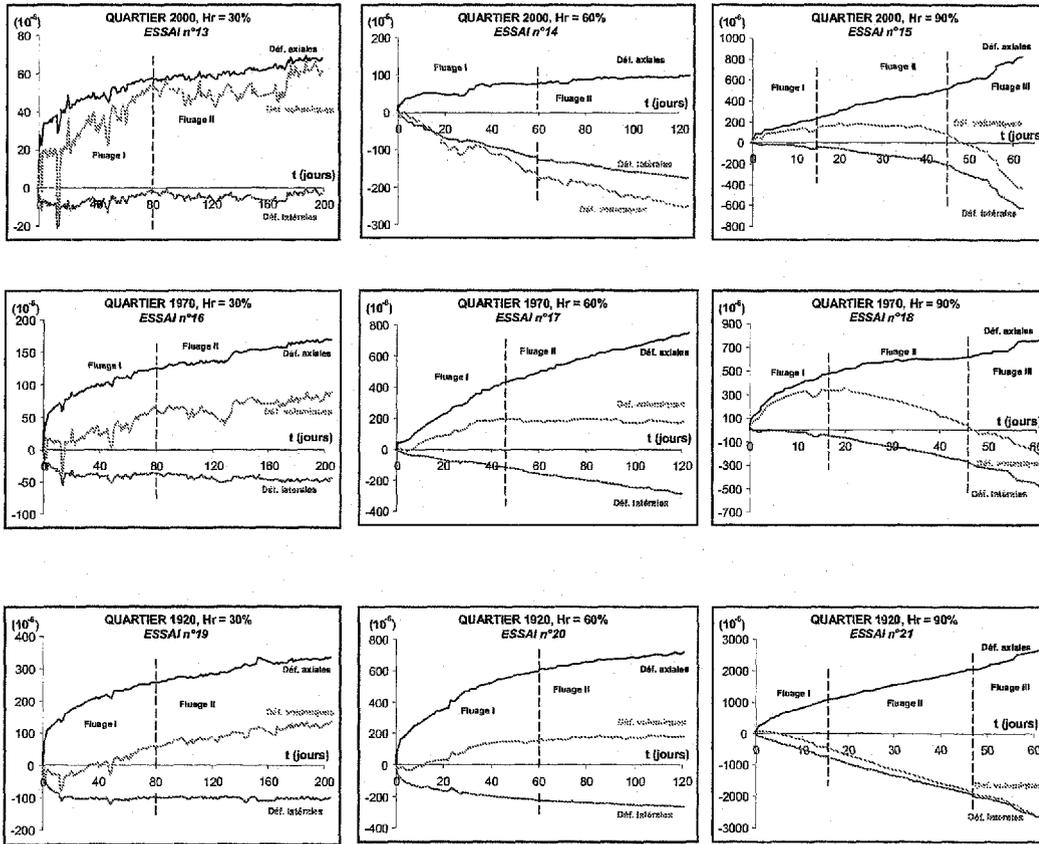


Figure 5. Grozon – Courbes déformation-temps des essais de fluage monophasier sous 3 hygrométries différentes (30 %, 60 % et 90 %) (les différentes phases de fluage sont identifiées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées sont différentes).

Après avoir mis en évidence le rôle important joué par l'hygrométrie dans la déformation des échantillons, l'impact des variations d'hygrométrie et de contrainte sur un même échantillon a été analysé. Des essais de fluage multiphasiers ont ainsi été réalisés sur les deux types de gypse.

La figure 6 présente les courbes déformation-temps issues d'essais de fluage sur des échantillons de Grozon, avec différents paliers d'hygrométrie et de contraintes. Il ressort de l'analyse de ces résultats que, lorsque l'hygrométrie passe de 90 % à 30 %, les déformations volumiques initialement dilatantes (déformations volumiques négatives), deviennent contractantes. Cela se produit même en parcourant le chemin inverse, à savoir en passant d'une faible à une forte hygrométrie. La manifestation de la dilatance traduit une fissuration et donc un endommagement de l'échantillon. Cet endommagement est d'autant plus marqué que l'exploitation est ancienne.

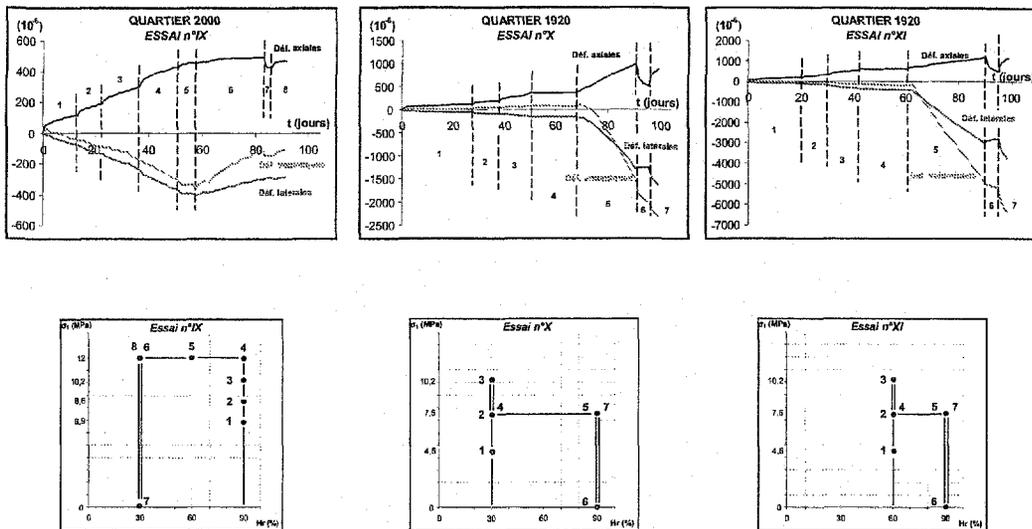


Figure 6. Grozon – Courbes déformation-temps d'un essai de fluage multipaliers (les différentes contraintes uniaxiales et hygrométries sont rappelées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes).

L'influence de l'hygrométrie et de l'âge d'exploitation sur l'endommagement des échantillons est confirmée par les essais de fluage multipaliers réalisés sur les échantillons de Livry-Gargan.

#### 4. Instrumentation d'une ancienne carrière souterraine de craie

Les travaux de caractérisation en laboratoire ont clairement mis en évidence la sensibilité du facteur « eau » sur le comportement à terme long terme du matériau rocheux. Ceci est particulièrement vrai dans le cas d'une roche évaporite comme le gypse, très sensible à ce paramètre du fait de son caractère soluble (Gratier 1984, Ballivy et al. 1992, Bosbach et Rammensee 1994, Morat et al. 1995, Badens 1998, Cooper et Waltham, 1999).

L'extrême sensibilité de ce type de roche induit d'ailleurs que, pour se développer et subsister, le gisement doit se trouver à l'abri de l'eau, dans une couche protégée des circulations par des horizons imperméables (marnes infra- et supra-gypseuses). Les deux carrières étudiées sont donc situées hors d'eau et seuls des écoulements très localisés, principalement au niveau des discontinuités majeures, peuvent induire des circulations occasionnelles dans la carrière. Ceci limite les plages de variations hygrométriques et interdit toute analyse chimique de l'eau ayant transité par les piliers puisqu'elle ne peut être prélevée sous forme liquide.

Pour remédier à cette carence, il nous a semblé stratégique de retenir, comme site destiné à accueillir le plot d'expérimentation *in situ*, une exploitation soumise à des battements de nappe francs, phénomènes très favorables à l'établissement de cycles

saturation/désaturation. Le matériau exploité devant, toutefois, demeurer sensible à l'effet de l'eau, notre choix s'est logiquement porté sur la craie.

#### **4.1 Choix du site**

La recherche du « site-test » ou « site-laboratoire » a nécessité des visites de terrain, et des prises de contact nombreuses avec les services spécialisés en charge de la gestion des cavités souterraines (IGC, SDICS, Services des carrières...).

Le choix du site a été guidé par un cahier des charges précis s'appuyant sur des critères objectifs. Il s'est opéré avec la volonté de respecter diverses contraintes d'ordre technique (site abandonné et non susceptible d'être remblayé à terme, présentant un accès suffisamment aisé pour permettre de descendre le matériel d'instrumentation, géographiquement pas trop éloigné de l'INERIS...) et scientifique (site affecté régulièrement par des remontées de nappe et susceptible de subir une évolution perceptible sur une échelle de temps voisine de la décennie...).

Au total, une dizaine de sites potentiels ont été recensés et la carrière souterraine d'Estreux s'est avérée être la meilleure candidate. Elle est située dans le département du Nord, à environ 10 km à l'est de Valenciennes, à proximité immédiate de l'autoroute A2 qu'elle sous-mine d'ailleurs dans sa partie ayant fait l'objet d'un remblayage. A l'heure actuelle, seul un puits de 20 m de profondeur, dont la tête est sécurisée par une dalle amovible, permet l'accès au fond.

La méthode d'exploitation utilisée à Estreux est celle des chambres et piliers abandonnés. Le taux de défruitement d'environ 78 % est assez régulier : certaines zones présentent de gros et des petits piliers (la section des piliers varie entre 1 m<sup>2</sup> et 5 m<sup>2</sup>), d'autres sont constituées exclusivement de petits piliers mais séparés entre eux par de très gros piliers formant un rideau.

#### **4.2 Schéma d'instrumentation**

La mesure de paramètres tels que la température ambiante, la température du massif, l'hygrométrie, la pression interstitielle ainsi que les déformations de l'ouvrage minier est indispensable pour une meilleure compréhension de l'interaction, dans le moyen et long terme, entre le massif et son environnement.

C'est dans cette optique qu'un schéma d'instrumentation a été développé et mis en place (figure 7). Un pilier à base carré de 1,40 m de côté et 1,80 m de hauteur, situé à environ 150 m du puits d'accès, a été instrumenté : trois capteurs de pression interstitielle associés à des capteurs de température ont été scellés à différentes profondeurs, respectivement à 0,15 m ; 0,35 m et 0,70 m ; au sein de sondages forés en petit diamètre ( $\varnothing = 30$  mm).

La mesure de la pression interstitielle du massif permettra d'appréhender les effets de la variation de l'humidité sur l'évolution du massif. Pour sa part, la mesure de la température du massif à différentes profondeurs pourra être comparée à la température enregistrée dans la galerie, à proximité du pilier, et ainsi fournir des renseignements sur les conséquences des cycles de température sur le comportement de la craie.

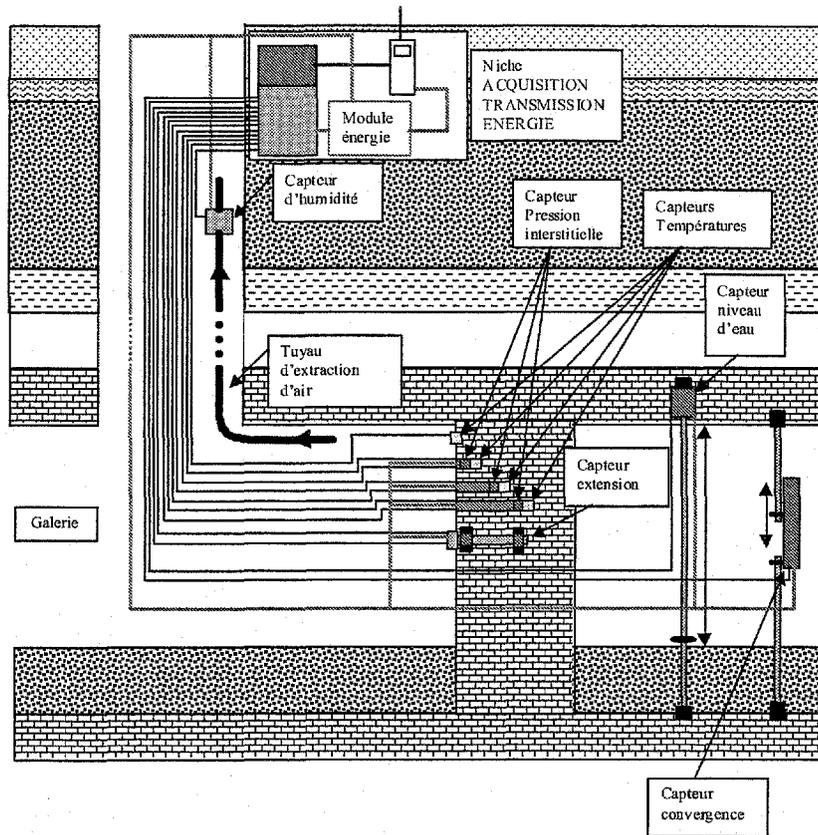


Figure 7. Schéma de l'instrumentation mis en place dans la carrière d'Estreux.

Ces mesures, comparées aux oscillations du niveau d'eau dans la galerie et aux variations de l'hygrométrie de l'atmosphère, permettront d'analyser le temps de réponse et le comportement du massif à ces sollicitations dynamiques.

Les mesures d'extension du pilier et de convergence de la galerie, réalisées à proximité du pilier instrumenté, pourront être corrélées aux variations de l'environnement (température, pression capillaire, humidité relative, niveau d'eau dans la galerie).

Depuis la mise en service (13 février 2004), nous assistons à une baisse continue du niveau d'eau dans la galerie, ce qui contribue à induire une diminution de la pression d'eau dans l'espace poreux du massif (pression interstitielle). Actuellement, on mesure des pressions interstitielles négatives, ce qui indique que des contraintes de succion se développent au sein du massif (figure 8). Lorsque le niveau d'eau recommencera à monter, il sera possible de vérifier les conséquences en termes d'hygrométrie de l'atmosphère dans les galeries et de pressions interstitielles et déplacements au cœur du pilier.

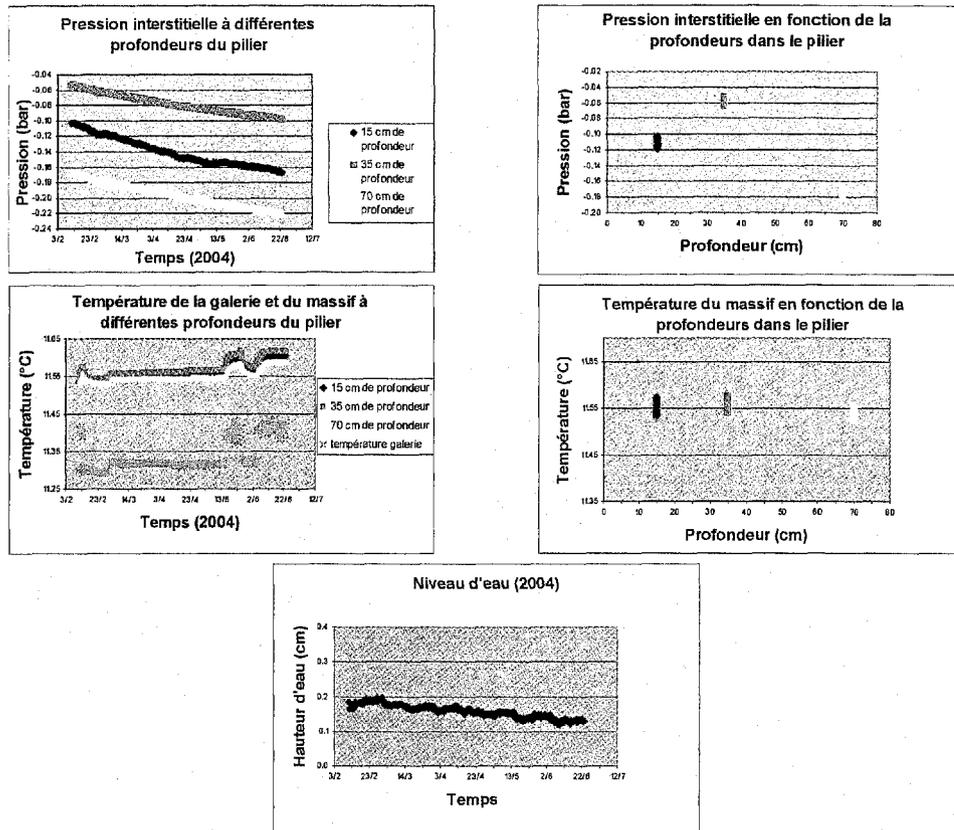


Figure 8. Carrière d'Estreux. Premiers résultats de l'acquisition de données.

Il est d'ores et déjà possible de constater que la pression interstitielle et la température diminuent vers le cœur du pilier. Cela indique que, lors de cycle d'imbibition et drainage, le front de saturation migre au sein du pilier perpendiculairement à son axe.

Cette constatation confirme ce qui a été observé pour les carrières de gypse de Livry-Gargan et Grozon, à savoir un front de dissolution (lui-même lié au front de saturation) qui progresse de la surface vers le cœur du pilier.

A ces phénomènes physico-chimiques s'associent les phénomènes mécaniques liés au développement de contraintes de succion au sein du pilier. A l'heure actuelle, nous ne disposons que de mesures relatives à une phase de désaturation. Il faudra attendre de pouvoir observer plusieurs cycles de saturation/désaturation pour progresser dans la compréhension de l'évolution physico-chimico-mécanique du pilier.

Les premières mesures sur le site d'Estreux ne font que confirmer la nécessité de suivre, sur une longue période, la réponse du comportement de la carrière aux variations des conditions environnementales.

## 5. Conclusions

L'importante campagne de caractérisation en laboratoire du comportement rhéologique des gypses de Grozon et de Livry-Gargan a permis de mieux comprendre les paramètres qui tendent à altérer, dans le temps, les propriétés mécaniques du gypse. Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont ainsi mis en évidence une augmentation significative des traces de dissolution au sein des échantillons provenant des quartiers anciens par rapport aux échantillons prélevés dans des quartiers très récemment exploités. De plus, il a été montré que, dans les piliers récents, les traces de dissolution disparaissent à quelques centimètres de la surface, alors que, dans les piliers plus anciens, ces traces sont évidentes jusqu'au cœur.

Dans le même ordre d'idée, la caractérisation physique d'échantillons provenant de secteurs d'âge différent tend à mettre en évidence une augmentation de la porosité (notamment porosité de fissure) et de la perméabilité ainsi qu'une diminution des vitesses de propagation d'onde en périphérie des piliers comparativement aux zones les plus centrales, *a priori* moins affectées. Ces tendances pourraient résulter d'une altération et d'un endommagement des bordures de piliers, sous l'effet notamment de microphénomènes de dissolution-recristallisation, sous l'effet de l'hygrométrie présente dans l'atmosphère de la carrière.

Des essais de fluage avec mesure des déformations différées longitudinales, transversales et volumiques et contrôle de l'hygrométrie ont mis en évidence que, toutes choses égales par ailleurs, les déformations volumiques des échantillons augmentaient avec le degré d'hygrométrie régnant dans le corps de la presse et/ou avec l'âge du secteur où avait été prélevé l'échantillon étudié (sachant que ces deux paramètres se combinent, à savoir que les déformations les plus importantes correspondent à une forte hygrométrie appliquée à un échantillon ancien).

En l'état actuel des connaissances il nous est apparu essentiel d'initier la constitution d'une base de données sur le vieillissement « *in situ* » d'une cavité existante en conditions réelles. L'objectif est d'acquérir sur une longue durée (dix à quinze ans), une quantité importante de données stratégiques permettant de mieux appréhender l'évolution du comportement mécanique d'une carrière souterraine (déplacements, pressions interstitielles...) ainsi que les variations dans le temps des conditions environnementales qui y règnent (température, hygrométrie, présence d'eau...).

Pour ce faire, le choix du site s'est porté sur une carrière souterraine de craie présente sur la commune d'Estreux (59). Le dispositif expérimental qui assure l'acquisition de mesures d'extension, de convergence, de température, de pressions interstitielles, d'humidité et de teneur en radon est aujourd'hui opérationnel et les données télétransmises à l'INERIS confirment le bon fonctionnement de la chaîne et la cohérence des mesures entre les différents capteurs.

Le suivi d'une succession de cycles d'ennoyages puis de dénoyages de la carrière contribuera à acquérir une meilleure compréhension de l'interaction eau-roche de ce type de matériau.

## 7. Références bibliographiques

- ASCASO C., WIERZCHOS J., SOUZA-EGIPSY V., DE LOS RIOS A. ET DELGADO RODRIGES J. 2002. In situ evaluation of the biodeteriorating action of microorganisms and the effects of biocides on carbonate rock of the Jeronimos Monestary (Lisbon), *International Biodeterioration & biodegradation*, vol. 49, pp. 1-12.
- AUGER F. 1991. Vieillissement par altération atmosphérique des matériaux de construction - Etude comparative in situ et en simulation. *Colloque Int. Détérioration des matériaux de construction*, La Rochelle, pp. 115-129.
- AUVRAY C. 2003. Vieillissement et comportement rhéologique du gypse. *Mémoire de Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*, soutenue le 18 décembre 2003, 265 pp.
- AUVRAY C., HOMAND F., HOXHA D. ET DIDIER C. 2004a. Influence du temps et de l'hygrométrie sur le comportement du gypse. *Revue Française de Géotechnique*, n°106/107, p. 41-51.
- AUVRAY C., HOMAND F., HOXHA D. ET SORGI C. 2004b. The aging of gypsum in underground mines. *Engineering Geology*, vol. 74, n° 3/4, pp. 183-196.
- BADENS E. 1998. Etude de l'adsorption de l'eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques du plâtre pris pur et additive, *Mémoire de Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III*, 124 p.
- BALLIVY G., DAOUD M ET SALEH K. 1992. Comportement physico-mécanique des roches sous l'effet de l'humidité relative ambiante. *Structure et Comportement des Géomatériaux, Colloque René Houpert*, Nancy, 10-11 sept 1992.
- BOSBACH D. ET RAMMENSEE W. 1994. In situ investigation of growth and dissolution on the (001) surface of gypsum by scanning force microscopy, *Geoch. et Cosmoch.*, vol. 58, n° 2, pp. 843-849.
- CANTON Y., SOLE-BENET A., QUERALT I. ET PINI R. 2001. Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain : laboratory and field-based experimental approaches, *Catena*, vol. 44, pp. 111-132.
- CHEN J., BLUME H.-P. ET BEYER L. 2000. Weathering of rocks induced by lichen colonization - A review, *Catena*, vol. 39, pp. 121-146.
- CHENE G., BASTIAN G., BRUNJAIL C. ET LAURENT J. P. 1999. Vieillissement accéléré de bloc de tuffeau en laboratoire sous l'effet de cycles d'imbibition-séchage. *Matériaux et constructions*, vol. 32, pp. 525-532.
- CHIGIRA M. ET OYAMA T. 1999. Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks, *Engineering Geology*, vol. 55, pp. 3-14.
- COOPER A. H. ET WALTHAM A. C. 1999. Subsidence caused by gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire, *Q. J. of Eng. Geology*, vol. 32, pp. 305-310.
- DELATIEUX F., CARDELL C., TODOROV V., DEKOV V ET GRIEKEN R. V. 2001. Environmental conditions controlling the chemical weathering of the Madara Horseman monument, NE Bulgaria, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 2, pp. 43-54.
- FARRAN J. ET THENOZ B. 1965. L'altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. *Suppl. Ann., Inst. Tech. Bâtim. Trav. Publics*, France, n°. 215, pp. 2729-2736.
- FASSIMA V. 1995. New findings on past treatments carried out on stone and marble monument's surfaces, *The Science of the Total Environment*, vol. 167, pp. 185-203.

- FUSEY P. ET HYVERT G. 1964. Les altérations physico-chimiques et biologiques des grès des monuments khmers, *C. R. Acad. Sci. France*, vol. 258, pp. 6573-6575.
- FURLAN V. ET GIRARDET F. 1991. Pollution atmosphérique et durabilité des pierres de construction. *Colloque Int. Sur la détérioration des matériaux de construction*, La Rochelle, pp. 79-91.
- GOKCEAGLU C., ULUSAY R. ET SONNEZ H. 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles, *Engineering Geology*, vol. 57, pp. 215-237.
- GOMEZ-ALARCON G., CILLEROS B., FLORES M. ET LORENZO J. 1995. Microbial communities and alteration processes in monuments at Alcalá de Henares, Spain, *The Science of the Total Environment*, vol. 167, pp. 231-239.
- GRATIER J.-P. 1984. La déformation des roches par dissolution-cristallisation : aspects naturels et expérimentaux de ce fluage de la croûte terrestre, *Mémoire de Thèse d'Etat de l'Université Joseph Fourier à Grenoble*, 315 p.
- GRGIC D., HOMAND F. ET DAGALLIER G. 2002. Altération du minerai de fer dans les mines abandonnées de Lorraine. *Revue Française de Géotechnique*, n° 99, pp. 49-60.
- GUPTA A. S. ET SESHAGIRI RAO K. 2000. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, vol. 56, pp. 257-274.
- HALSEY D. P., MITCHELL D. J. ET DEWS S. J. 1998. Influence of climatically-induced cycles in physical weathering, *Quaternary Journal of Engineering Geology*, vol. 31, pp. 359-367.
- INIGO A. C. ET VICENTE-TAVERA S. 2001. Different degrees of stone decay on the inner and outer walls of cloister, *Building and Environment*, vol. 36, pp. 911-917.
- JEANNETTE D. 2000. Originalité des mécanismes d'altération sur les vestiges archéologiques de Délos (Cyclades, Grèce), *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 330, pp. 683-688.
- MORAT P., LE MOUËL J.L., PRIDE S. ET JAUPART C. 1995. Sur de remarquables oscillations de température, d'humidité, de potentiel électrique observées dans une carrière souterraine. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 320, série IIa, p.173 à 180, 1995.
- NORBURY D., HENCHER S., CRIPPS J. ET LUMSDEN A. 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes-Geological Society Engineering Group Working Party Report, *Quaternary Journal of Engineering Geology*, vol. 28, pp. 207-242.
- OYAMA T. ET CHIGIRA M. 1999. Weathering rate of mudstone and tuff on old unlined tunnel walls, *Engineering Geology*, vol. 55, pp. 15-27.
- POCHAN J. ET JATON C. 1967. The role of microbiological agencies in the deterioration of stone, *Chem. Ind.*, pp. 1587-1589.
- RAMANA Y. V. ET GOGTE B. S. 1982. Quantitative studies of weathering in saprolized charnockites associated with a landslide zone at the Porthimund dam, India, *Engineering Geology*, vol. 19, pp. 29-46.
- WINKLER E. M. 1966. Important agents of weathering for building and monumental stone, *Engineering Geology*, vol. 1, pp. 381-400.