



HAL
open science

Stabilité des carrières souterraines abandonnées en relation avec les fluctuations du niveau d'ennoyage

Philippe Gombert, Vincent Damart

► **To cite this version:**

Philippe Gombert, Vincent Damart. Stabilité des carrières souterraines abandonnées en relation avec les fluctuations du niveau d'ennoyage. 6. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2012) "Espaces Urbains, Ruraux, Souterrains et Littoraux", Jul 2012, Bordeaux, France. pp.723-730. ineris-00973675

HAL Id: ineris-00973675

<https://ineris.hal.science/ineris-00973675>

Submitted on 4 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.

STABILITÉ DES CARRIÈRES SOUTERRAINES ABANDONNÉES EN RELATION AVEC LES FLUCTUATIONS DU NIVEAU D'ENNOYAGE

STABILITY OF ABANDONNED UNDERGROUND QUARRIES IN CONNECTION WITH GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATIONS

Philippe GOMBERT¹, Vincent DAMART¹

¹INERIS, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

RÉSUMÉ — A Château-Landon (77) en 1910 ou sur le plateau picard (60) en 2001, l'invasion de cavités souterraines par la remontée de la nappe après de fortes pluies a engendré des effondrements en surface qui ont affecté des personnes et/ou des habitations. Afin de prévenir ces risques, l'INERIS étudie les mécanismes initiateurs de rupture dans deux carrières souterraines de craie partiellement ennoyées (Saint-Martin-le-Nœud et Estreux) où sont mesurés le niveau de l'eau et les paramètres géomécaniques d'un pilier (convergence, extension, teneur en eau). A Saint-Martin-le-Nœud (60), le pilier instrumenté baigne dans l'eau et l'on observe un gradient de teneur en eau de la roche qui pénètre jusqu'à au moins 0,20 m de profondeur et qui fluctue selon le niveau d'ennoyage. A Estreux, le pilier n'est qu'épisodiquement ennoyé par une nappe située quelques mètres plus bas mais sa teneur en eau varie par capillarité du fait du battement de la nappe : on observe alors des fluctuations conjointes de l'extension du pilier et de la convergence toit-mur.

ABSTRACT — At Château-Landon in 1910 or on the plateau Picard in 2001, the invasion of underground cavities by groundwater after heavy rain has caused surface subsidence and affected people and/or houses. To prevent these risks, INERIS studies the mechanisms of rupture in two underground chalk quarries partially flooded (Saint-Martin-le-Noeud and Estreux, northern France) where are measured the water level and the geomechanical parameters of a pillar (convergence, extension, saturation). At Saint-Martin-le-Noeud, the instrumented pillar is flooded and there is a gradient of water saturation of the rock which penetrates to at least 0.20 m deep and fluctuates depending on the level of flooding. At Estreux, the pillar is episodically flooded by groundwater whose level is situated a few meters down, but its water content increases by capillary with the water level: this causes both fluctuations of the pillar extension and roof-wall convergence.

1. Généralités sur les cavités souterraines

Le territoire métropolitain français renferme environ 500 000 cavités souterraines connues mais ce chiffre représenterait moins de 30% des cavités réellement existantes (www.bdcavites.fr). Parmi elles, se trouvent des carrières souterraines qui peuvent être modestes (cas des cent mille marnières des plateaux normando-picards) ou très étendues (300 km pour les catacombes de Paris).

C'est ainsi que le bassin de Paris compte, en France, parmi les zones à plus forte densité de cavités souterraines avec 500 à 1000 cavités par département, principalement dans la craie, le calcaire et le gypse.

La plupart d'entre elles ont été creusées à sec, au-dessus des nappes phréatiques, donc à faible profondeur (quelques dizaines de mètres). Toute variation significative du niveau de ces nappes, sous l'effet des précipitations, peut alors se traduire par l'ennoyage ou le dénoyage de tout ou partie de ces cavités souterraines.

2. Rôle de l'eau dans la résistance des roches

2.1. Battement des nappes phréatiques

Après l'abandon de leur exploitation, les cavités souterraines peuvent subir des effondrements internes susceptibles d'atteindre la surface avec la formation d'une cuvette d'affaissement ou l'apparition d'un orifice appelé « fontis ».

La question se pose de savoir si ce phénomène peut être aggravé ou accéléré par les fluctuations du niveau d'ennoyage. En effet, les cycles annuels de recharge des nappes phréatiques se traduisent, sous nos latitudes, par des hautes eaux hivernales et des basses eaux estivales avec une amplitude d'ordre métrique. Cependant, des cycles de plus forte amplitude se développent à des échelles pluri-annuelles (voir figure 1).



Figure1 . Battement de la nappe des calcaires de Beauce au piézomètre de Toury (Eure-et-Loir) de 1874 à 1997 (source : Infoterre)

2.2. Mécanisme de fragilisation des piliers

Wiid (1967) et Watelet (1996) ont montré que l'absorption d'eau par une craie diminue sa résistance à la compression uniaxiale jusqu'à plus de 50% (Figure 2). Dans le détail, on observe une première chute de résistance dès que la saturation en eau de la roche atteint 10 à 30% puis un palier jusqu'à 80 à 90% où la résistance

chute de nouveau. Laouafa *et al.* (2009) ont réalisé des essais de résistance à la compression à divers degrés de saturation sur la craie d'Estreux. Ils montrent une diminution significative de la résistance du matériau lorsque la vitesse de sollicitation est très faible sous une hygrométrie élevée, ce qui est généralement le cas en carrières souterraines. Ces auteurs attribuent également la dégradation des caractéristiques mécaniques de la roche sur le long terme à des changements d'hydratation qui peuvent engendrer des actions physiques et chimiques.

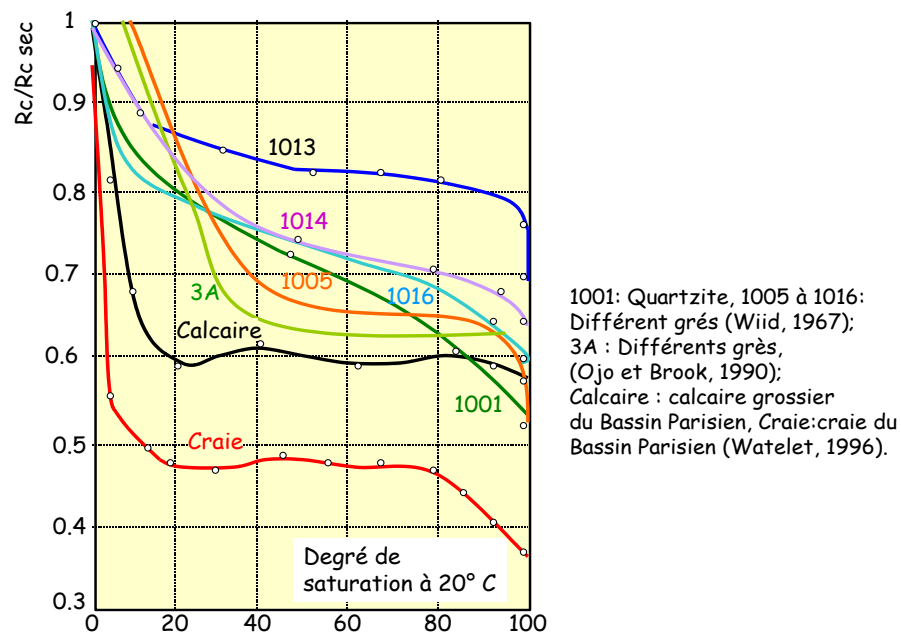


Figure 2 . Résistance à la compression uniaxiale (R_c) de plusieurs roches en fonction de leur degré de saturation en eau (Wiid, 1967 ; Watelet, 1996)

Etant une roche très poreuse (~40%), la craie est sensible à la variation de teneur en eau : en contact avec l'air, elle perd rapidement une partie de son eau interstitielle, d'où un changement de ses propriétés mécaniques. C'est ainsi que des cycles de saturation/désaturation en laboratoire ont créé des fissures (Laouafa *et al.*, 2009). Nguyen (2009) a montré que les variations d'humidité relative atmosphérique, entre 80 et 100%, mesurées dans la carrière souterraine de craie d'Estreux (Nord), peuvent saturer et/ou désaturer partiellement le massif rocheux. Ce comportement n'est pas spécifique à la craie puisque des travaux expérimentaux réalisés sur le minerai de fer de Lorraine montrent que sa résistance à la compression simple diminue de 50% lorsque l'humidité relative passe de 80 à 100% (GISOS, 2005). Ceci est à étudier en lien avec les effondrements qui ont eu lieu pendant et après l'ennoyage consécutif à la fin de l'exploitation de ces mines de fer.

3. Résultats des sites expérimentaux dans la craie du Bassin parisien

3.1. Présentation des carrières souterraines de craie

Depuis 2004, l'INERIS suit la carrière souterraine d'Estreux (Nord), exploitée sur 10 ha par chambres et piliers, et abandonnée au 19^e siècle. Profonde de 21 m, elle

est inondée tous les 5 à 10 ans lorsque la nappe phréatique, située environ 3 m plus bas, remonte suite à de fortes pluies. Un pilier a été instrumenté avec deux extensomètres ancrés à 0,10 m et à 0,70 m de profondeur (figure 3a). Il est accompagné d'une canne de convergence toit-mur et de sondes de mesure du niveau d'eau dans la carrière et dans la nappe.

Depuis 2009, l'INERIS a également instrumenté la carrière souterraine de Saint-Martin-le-Nœud (Oise), exploitée sur 40 ha par la même méthode et abandonnée au 19^e siècle. Profonde de 17 m, elle renferme vingt-quatre lacs souterrains résultant de l'ennoyage des chambres les plus basses par la nappe phréatique. Ces lacs sont présents depuis plus d'un siècle et leur niveau fluctue de 1 à 2 m selon les années (Mary et Mary, 1907). Le pilier instrumenté baigne dans un de ces lacs (figure 3b) : il est équipé de sondes TDR¹ qui mesurent la teneur en eau de la roche à 0,20 m et 0,90 m de profondeur, et d'un extensomètre à double ancrage (0,50 m et 1 m de profondeur). On dispose également d'une sonde de mesure du niveau d'eau du lac.



Figure 3 . Vue du pilier instrumenté dans la cavité de Saint-Martin-Le-Nœud (Oise)

3.2. *Comportement hydrogéologique*

A Estreux, la nappe est suivie depuis 1976 : son niveau piézométrique fluctue de 28 à 37 m NGF alors que le mur de la carrière se trouve vers 33-34 m NGF. La carrière a été instrumentée suite au dernier ennoyage de 2001-2003 mais l'eau n'est jamais revenue depuis lors. Ce comportement est dû à la période de sécheresse que traverse le Nord de la France depuis plusieurs années.

A Saint-Martin-le-Nœud, on ne dispose que des données concernant les deux cycles hydrologiques 2009-2010 et 2010-2011 qui ont été très peu marqués : le battement de la nappe n'a en effet atteint que 0,25 m en moyenne, soit moins du quart du maximum mesuré.

¹ Les sondes TDR (Time Domain Reflectometry), qui mesurent la teneur en eau de la roche, sont fournies pré-calibrées sur un matériau standard et seront prochainement recalibrées sur de la craie.

3.3. Réponse hygrométrique du pilier

Ce suivi n'est effectué que dans le pilier de Saint-Martin-le-Nœud où les sondes TDR mesurent la saturation en eau de la roche en profondeur. La figure 4 montre que cette saturation est importante et quasiment constante au cœur du pilier (à 0,90 m de profondeur) où elle vaut 83% alors qu'elle varie autour d'une moyenne de 74% dans sa partie externe (à 0,20 m de profondeur). On observe donc un gradient de saturation horizontal, d'environ 10% en moyenne entre les parties profonde et périphérique du pilier, dont l'évolution est calquée sur celle du niveau du lac. En partie périphérique, la saturation en eau de la roche varie de 58% en basses eaux (du lac) à 91% en hautes eaux. Il semble donc que l'eau pénètre dans le pilier au fur et à mesure de la montée du niveau du lac, elle-même consécutive à sa recharge par percolation des précipitations efficaces. On notera que la saturation maximale atteinte est susceptible de dépasser le second seuil de perte de résistance à la compression uniaxiale défini en figure 2. Bien que les cycles hydrologiques étudiés n'aient eu que des battements de faible amplitude, on s'attend dans l'avenir à un impact encore plus significatif s'ils atteignent une amplitude métrique comme cela a déjà été observé par le passé (Mary et Mary, 1907).

3.4. Comportement géomécanique du pilier

La canne de convergence mesure la déformation du toit de la carrière sous l'effet de la contrainte imposée par le poids des terrains sus-jacents. Les extensomètres mesurent quant à eux l'extension du pilier en réponse à cette contrainte.

A Saint-Martin-le-Nœud, la vitesse d'extension du pilier est très régulière au cours de l'année et elle varie en fonction de la profondeur : elle vaut en moyenne 20 $\mu\text{m}/\text{an}$ à 1 m de profondeur et 44 $\mu\text{m}/\text{an}$ à 0,50 m de profondeur. La déformation totale, mesurée depuis la mise en place des capteurs, est ainsi trois fois plus forte à 0,50 m de profondeur ($8,8 \cdot 10^{-5}$) qu'à 1 m de profondeur ($2,7 \cdot 10^{-5}$). On constate donc que l'extension du pilier est à la fois plus intense et plus rapide dans sa zone périphérique, là où a été observée la pénétration saisonnière d'un front de saturation. A Estreux, la convergence toit-mur est assez régulière et vaut en moyenne 105 $\mu\text{m}/\text{an}$ (figure 5). Pourtant, la vitesse d'extension du pilier est très irrégulière au cours de l'année avec des fluctuations saisonnières marquées, comparables à celle de la piézométrie : elle varie également en fonction de la profondeur de 9 $\mu\text{m}/\text{an}$ à 0,70 m à 26 $\mu\text{m}/\text{an}$ à 0,10 m. La figure 6 montre l'écart entre les valeurs de convergence mesurées et leur moyenne lissée : on constate là encore une corrélation presque parfaite avec les fluctuations piézométriques, ce qui confirme que les paramètres géomécaniques du pilier sont sensibles aux écarts de saturations de la roche induits par les variations de niveau de la nappe proche.

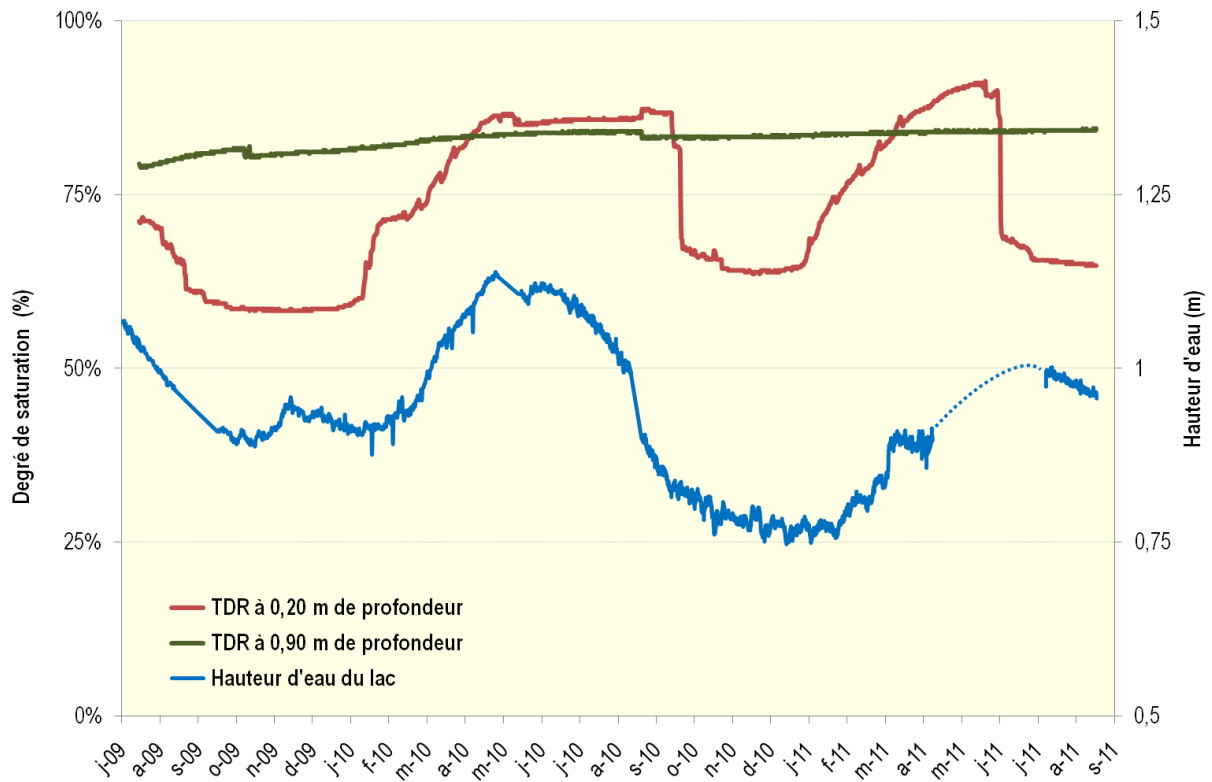


Figure 4 . Paramètres mesurés dans la carrière souterraine de Saint-Martin-le-noëud

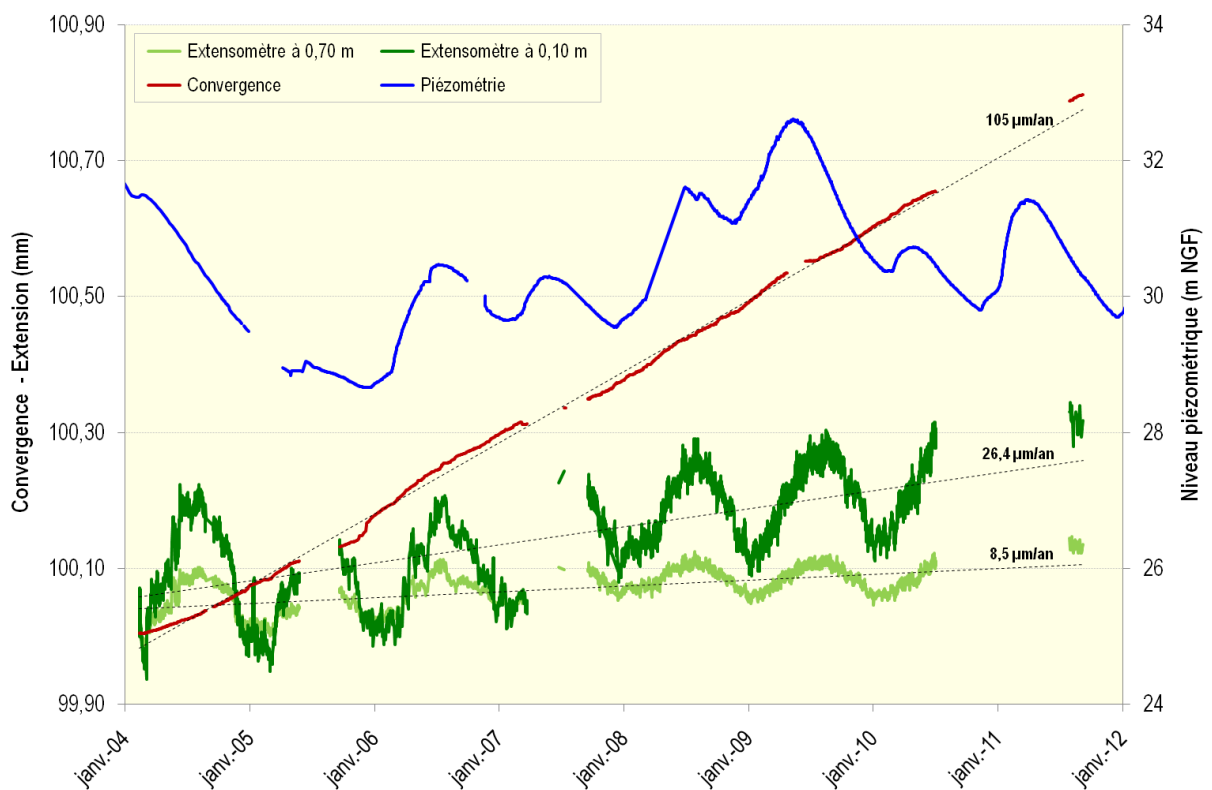


Figure 5 . Paramètres mesures sur le pilier de la carrière d'Estreux et dans la nappe

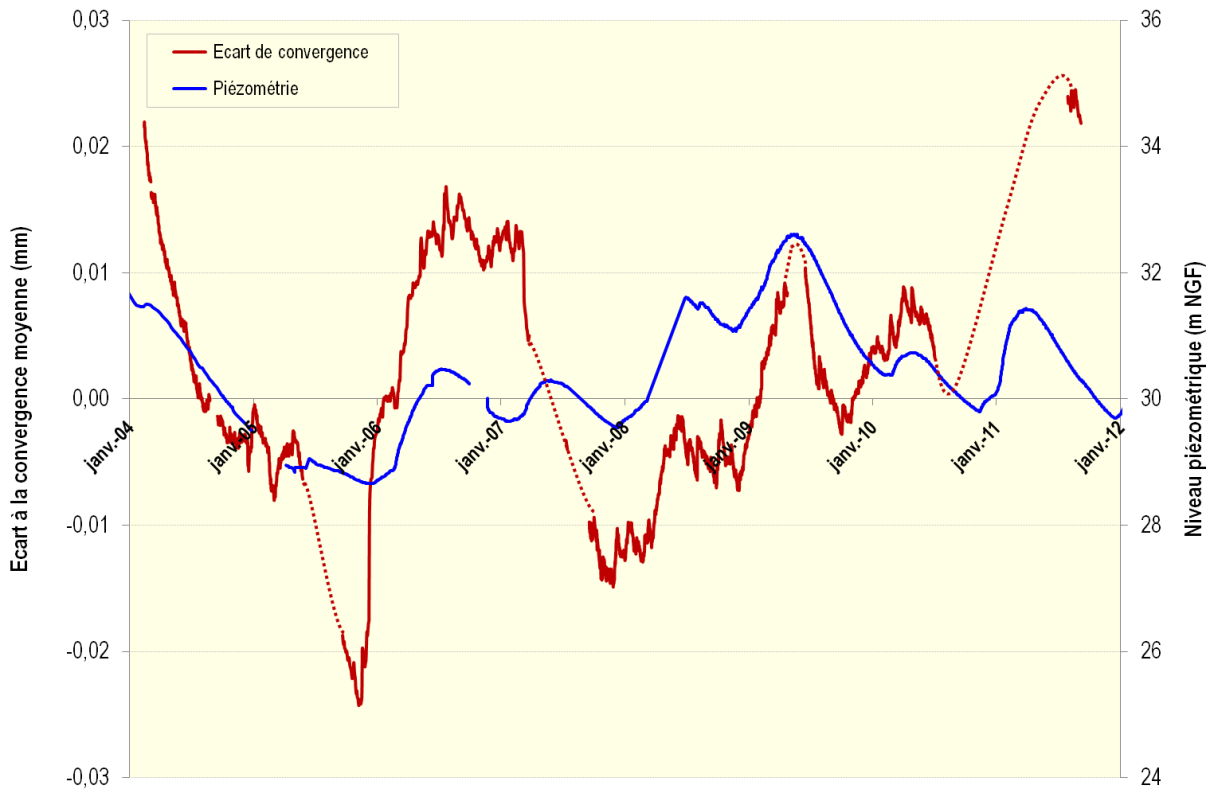


Figure 6 . Variations de convergence et niveau de la nappe à Estreux

4. Conclusion : impact attendu sur la stabilité des cavités souterraines

Certaines des nombreuses cavités souterraines qui sous-minent le territoire français sont partiellement ou temporairement ennoyées. C'est le cas des carrières souterraines de craie de Saint-Martin-le-Nœud et d'Estreux que l'INERIS suit depuis plusieurs années dans le Bassin parisien.

En laboratoire, on observe que les caractéristiques mécaniques des roches poreuses (notamment la craie) sont sensibles à leur degré de saturation en eau : une diminution notable de la résistance à la compression uniaxiale apparaît ainsi à partir de seuils situés vers 20% et 80% : si le premier de ces seuils est généralement dépassé en conditions naturelles, le second peut être atteint si la roche est noyée suite à la remontée du niveau des nappes phréatiques.

A Estreux, la nappe se trouve vers 3 m sous la carrière et le pilier instrumenté n'est noyé que tous les 5 à 10 ans. Dénoyé depuis son instrumentation en 2004, il montre pourtant des fluctuations de sa vitesse d'extension horizontale en lien apparent avec le battement de la nappe : cela signifierait que le comportement mécanique de la roche est impacté par les variations de sa teneur en eau dans la zone de capillarité.

A Saint-Martin-le-Nœud, un pilier baignant dans l'eau d'ennoyage a été instrumenté en 2009 et l'on dispose surtout ici de mesures du degré de saturation en eau de la roche à deux profondeurs. Les résultats montrent la pénétration d'un front de saturation dans la zone périphérique du pilier avec des valeurs qui varient de 58% en basses eaux à 91% en hautes eaux. Le maximum de saturation en eau mesuré s'approche ainsi du seuil de fragilisation de la roche (dégradation de la résistance)

mis en évidence en laboratoire et pourrait expliquer que l'on observe une augmentation conjointe d'un facteur 2 à 3 de la déformation horizontale du pilier dans cette même zone périphérique.

Ces deux sites mettent en évidence une interaction entre le battement des nappes phréatiques, la pénétration d'un front de saturation dans la roche et la réaction mécanique des piliers de carrières souterraines peu profondes. Toutefois, la période actuelle de mesures est défavorable à l'étude car le Nord de la France subit un épisode de sécheresse pluri-annuel qui fait baisser le niveau de ces nappes et qui réduit leur battement. La question se pose maintenant de savoir comment vont réagir les piliers lorsque le niveau de l'eau d'ennoyage se remettra à augmenter.

Si cette interaction eau-roche se confirme lors des prochains cycles hydrologiques, elle pourrait se traduire à terme par une accélération du vieillissement des piliers et donc par un risque accru de déstabilisation de ces vides souterrains. De ce fait, des carrières souterraines peu profondes pourraient être affectées de plus en plus fréquemment et/ou fortement par les fluctuations du battement des nappes phréatiques, qu'elles soient déjà ennoyées ou situées dans la frange de capillarité.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conservatoire des Espaces Naturels de Picardie qui autorise l'accès à la carrière souterraine de Saint-Martin-le-Noeud, important site d'hivernage de chauves-souris.

Références bibliographiques

- Didier C., Al Heib M., Gombert P., Charmoille A. (2010). Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines : Etat des connaissances. INERIS DRS-10-103862-00411A.
- GISOS (2005). Synthèse des travaux de recherches « après-mines fer ». Rapport INPL-LAEGO.
- Gombert P. (1997). Quantification du rôle des paramètres climatiques dans la dissolution karstique. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 324, série IIA, 17-23.
- Laouafa F., Degas M., Kazmierczak J.-B. (2009). Influence d'interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie. INERIS DRS-09-76873-02216A.
- Marry A., Mary A. (1907). Les souterrains de Saint-Martin (Oise). Spelunca, 7/48, 31-66.
- Nguyen H. D. (2009). Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie. Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ParisTech.
- Thoraval A. (2005). Analyse du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés à partir d'essais in-situ et de modélisation. Rapport INERIS, DRS-05-66388/RN01.
- Watelet J.-M. (1996). Méthode d'analyse et diagnostic des conditions de stabilité des carrières souterraines. Mém. de diplôme d'ing. ISAM.CNAM, Paris.
- Wiid B.L. (1967). The influence of moisture upon the strength behavior of rock. Ph.D. Thesis, Univ. of Witwatersrand, RSA.