

METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN RESULTANT DE LA DISSOLUTION NATURELLE DE GYPSE. EXEMPLE DU BOIS DE LA TUSSION, SEINE-SAINT-DENIS, FRANCE

HAZARD EVALUATION METHODOLOGY RESULTING FROM NATURAL GYPSUM DISSOLUTION: EXAMPLE OF TUSSION PARK, NORTH-EAST PARIS, FRANCE

Amélie Lecomte, Arnaud Charmoille, Xavier Daupley, Philippe Gombert

INERIS – Parc Technologique Alata – BP 2 – F 60550 Verneuil-en-Halatte

RÉSUMÉ — Le sous-sol de la région parisienne est sujet à la formation de cavités par dissolution du gypse. Un certain nombre de vides y sont régulièrement décelés au sein des horizons gypseux du Bartonien et du Lutétien. L'effondrement de ces cavités induit de nombreux désordres en surface. Le bois de la Tussion, proche de Paris, est affecté par un certain nombre d'effondrements en surface de type fontis. Le manque de connaissances du phénomène de formation et d'évolution de ces fontis d'origine naturelle est un facteur empêchant la mise en œuvre de solutions de protections adaptées. Afin de développer cette connaissance, l'INERIS a engagé, en partenariat avec le département de Seine-Saint-Denis, une étude hydrogéologique et géotechnique de cette zone en juillet 2009. Cette étude a pour objectif d'évaluer l'aléa mouvement de terrain. S'agissant de phénomènes évolutifs, il est nécessaire de connaître de façon approfondie le fonctionnement hydrogéologique du site et de développer une méthodologie adaptée.

ABSTRACT — The Tussion park, close to Paris is affected by some sinkholes due to gypsum dissolution. The lack of knowledge on the phenomenon concerning development and evolution of these sinkholes is a factor which makes it difficult the application of suitable protective solutions. In order to develop this knowledge, INERIS, in July 2009, engaged into a hydrogeological and geotechnical study of the area. The study objective is the evaluation of the subsidence risk. As these are evolutive phenomena, it is necessary to have extensive knowledge on the hydrogeological local behavior, the underground water flows being at the origin of the dissolution.

1. Introduction

L'impact en surface du développement de cavités de dissolution dans des couches de gypse peut s'avérer très important pour les infrastructures humaines (Klimchouk *et al.* 1996 ; Klimchouk 1996 ; Gutiérrez et Cooper, 2007).

L'un des exemples les plus frappants concerne la ville de Puilatós, proche de Zaragoza (Espagne) qui a dû être abandonnée en 1985 à la suite d'effondrements

en surface qui affectaient ses bâtis et ses infrastructures. La couche de gypse miocène sous-jacente, fortement karstifiée, est responsable de ces désordres.

Les villes de Ripon et de Darlington (Cooper *et al.* 1999 ; Cooper, 2006), en Angleterre, constituent également des « cas d'école » de phénomènes karstiques à évolution rapide, engendrant en surface de très nombreux désordres (cônes d'effondrement profonds, zones d'affaissement) qui ont un impact fort sur les bâtiments et les ouvrages (ponts et routes).

En France, les principaux désordres de surface impactant des zones fortement urbanisées au NE de Paris, sont liés à la dissolution du gypse bartonien et lutétien. Le fonctionnement hydrogéologique y est très complexe, caractérisé par plusieurs aquifères superposés, intervenant dans le processus de dissolution. Les études de Toulemont (1987) et Thierry *et al.* (2008) ont, en particulier, démontré l'influence du pompage des eaux souterraines pendant plusieurs années sur l'accélération de la dissolution et de la création de vides souterrains, responsables par la suite des effondrements et des affaissements en surface. L'étude réalisée en collaboration avec le département de Seine-Saint-Denis se propose d'étudier dans le détail les mécanismes moteurs du processus de dissolution dans un contexte typique du Bassin parisien et de développer une méthodologie adaptée à l'évaluation de l'aléa mouvement de terrain dans ce type d'environnement.

2. Présentation du site :

2.1. Contexte géographique

Situé sur la commune de Villepinte à une quinzaine de kilomètres au nord-est de Paris, le bois de la Tussion s'étend sur une plaine morphologiquement peu accidentée. Ce bois de 18,6 ha est limité dans sa partie nord, par des zones urbanisées (ville de Villepinte) et dans sa partie sud par des voies SNCF puis par le Canal de l'Ourcq qui s'écoule d'est en ouest pour rejoindre Paris (figure 1). Cette zone forestière est située dans un secteur fortement urbanisé de la région parisienne.

2.2. Contexte géologique et hydrogéologique

Le substratum géologique est constitué par des formations bartoniennes (marnes infra-gypseuses, calcaire de Saint-Ouen et sables de Beauchamp) et lutétiennes (marnes et caillasses et calcaire grossier). Ces couches sont masquées à l'affleurement par une couverture quaternaire de limons ou d'alluvions modernes. La colonne stratigraphique de la figure 1 représente l'ensemble des terrains reconnus jusqu'à une profondeur de 60 mètres.

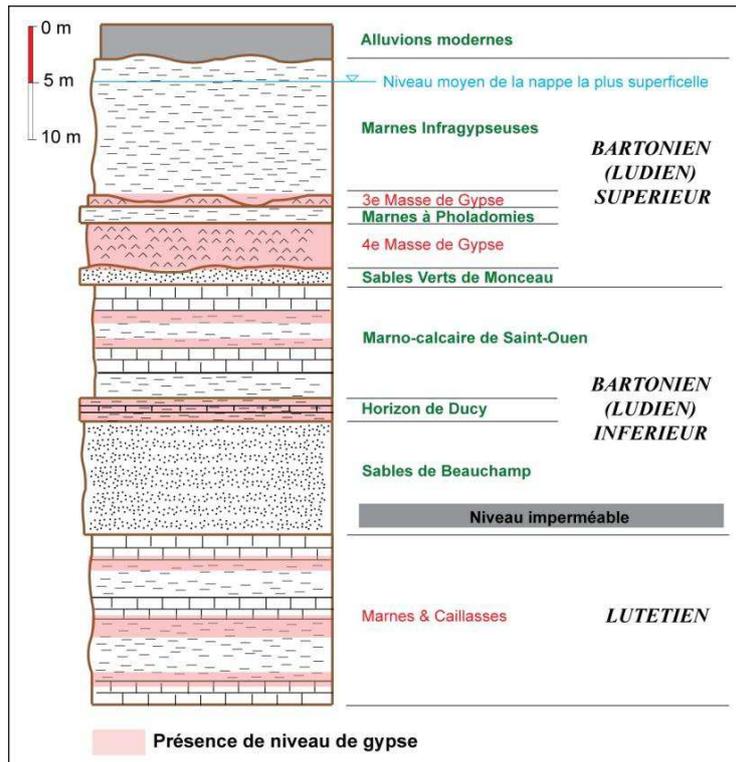


Figure 1 : Log stratigraphique synthétique du bois de la Tussion.

Plusieurs de ces horizons contiennent des niveaux gypseux figurés en rose sur la figure 1 et reconnus par sondage. Ces formations sensibles à la dissolution sont localisées principalement dans les niveaux du Bartonien supérieur et du Lutétien. D'un point de vue hydrogéologique, l'alternance de terrains perméables et imperméables rend difficile la délimitation des différents aquifères. Il est généralement admis que jusqu'à une profondeur de 60 m, trois nappes sont présentes dans le secteur :

- celle des marnes infra-gypseuses, la plus superficielle dans le Bartonien supérieur ;
- celle des calcaires de Saint-Ouen située sous les marnes infra-gypseuses dans le Bartonien inférieur ;
- celle des marnes et caillasses dans le Lutétien.

2.3. Contexte géotechnique et historique des désordres

Le contexte géotechnique local montre l'existence de deux types de désordres. Les fontis qui impliquent la présence d'une cavité en profondeur, et les affaissements, qui correspondent à un départ de matière sans création de vide franc. Les premiers effondrements de terrain observés dans le bois de la Tussion datent de 1991. Un effondrement majeur s'est produit en avril 2000, formant un fontis de 7 m de profondeur. Suite à cet événement, la fermeture du bois a été décidée le 23 mai 2000. En 2008, un fontis et un affaissement se sont produits le long du chemin bordant les voies SNCF.

3. Protocole expérimental

Afin de mieux comprendre les mécanismes hydrogéologiques qui influent sur la création de cavités de dissolution sous le bois de la Tussion et de disposer des éléments nécessaires aux développements méthodologiques d'évaluation de l'aléa, les investigations suivantes ont été réalisées.

- recherche informative dans les archives et auprès d'organismes concernés ;
- investigations hydrogéologiques (suivis piézométriques, physico-chimiques, tests de dissolution, suivi hydrochimique) ;
- investigations géotechniques (recensement des désordres, suivis topographiques).

4. Résultats

4.1. Suivi hydrogéologique

Les données piézométriques acquises montrent que la morphologie globale de la surface piézométrique des marnes infra-gypseuses est restée la même dans l'enceinte du bois de la Tussion entre 1999 et 2009. En effet, l'amplitude de variation maximale au cours de l'année 2010 est comprise entre 45 et 81 cm, ce qui reste faible pour une nappe de surface. Ces suivis montrent également que les aquifères des marnes et caillasses et du calcaire de Saint-Ouen sont captifs et que leur charge dépasse celle de l'aquifère des marnes infra-gypseuses. Les quatre campagnes d'analyses chimiques et le suivi physico-chimique réalisés sur les piézomètres accessibles ont permis de mettre en évidence une grande variabilité des faciès chimiques en fonction de l'aquifère considéré (figure 2).

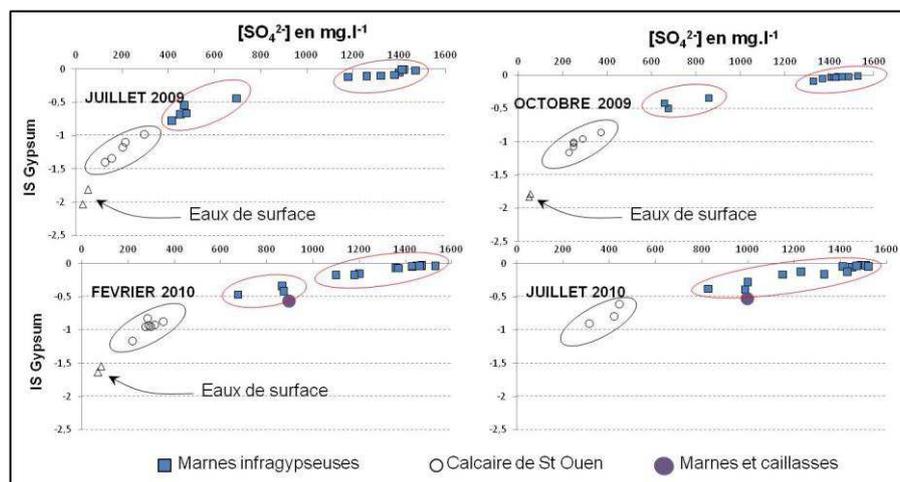


Figure 2 : Représentation des échantillons en provenance de l'aquifère des marnes infra-gypseuses, de l'aquifère de St-Ouen et de l'aquifère des marnes et caillasses en fonction de leur concentration en sulfates et de leur indice de saturation par rapport au gypse lors des quatre campagnes de prélèvements.

Ces investigations ont permis d'isoler :

- les eaux en provenance du calcaire de Saint-Ouen qui ont un potentiel de dissolution important, leur indice de saturation, suivant la campagne considérée, se situant entre -0,5 et -1,5. Des tests de dissolution réalisés *in situ* ont montré pour cette famille d'eau une vitesse de dissolution du gypse de 0,17 g.jour⁻¹.
- les eaux prélevées dans les marnes infragypseuses qui se divisent en deux groupes : un groupe en quasi-équilibre avec le gypse et un autre qui n'a pas encore atteint l'équilibre. D'après les tests de dissolution réalisés *in situ*, à cette famille d'eau sont associées des vitesses de dissolution comprises entre 0,01 g.jour⁻¹ à 0,12 g.jour⁻¹.

4.2. Investigations géotechniques

Au total, 116 fontis et 134 affaissements ont été répertoriés dans la zone du bois actuellement fermée au public. En parallèle à ce relevé de désordres, des données fournies par le département de Seine-Saint-Denis nous ont permis de comparer entre 1998 et 2008 la topographie du chemin qui borde les voies SNCF.

Ces mesures ont révélé la présence d'une zone active d'affaissement au centre du bois. Entre 1998 et 2008, l'amplitude maximale de l'affaissement a atteint 10 mm. La cinétique d'évolution rapide de cette zone d'affaissement a été confirmée par des observations visuelles lors des visites de terrain régulières.

5. Discussion et interprétation

5.1. Fonctionnement hydrogéotechnique du site

D'un point de vue géologique, les différentes informations obtenues montrent que les zones où l'épaisseur de gypse est la plus importante correspondent aux zones où la 3^{ème} masse est encore présente (figure 1). Dans ces secteurs, l'épaisseur de gypse cumulée dans la 3^{ème} et la 4^{ème} masse est en moyenne de 3,8 m. Ces informations permettent de postuler que l'on est en présence de la 3^{ème} masse de gypse dès lors que l'épaisseur de gypse cumulée dépasse 3,5 m. Dans les secteurs où seule la 4^{ème} masse est présente, l'épaisseur de gypse dépasse rarement 1,5 m.

D'un point de vue hydraulique, il apparaît que la charge la plus importante est imposée par l'aquifère le plus profond, c'est-à-dire celui des marnes et caillasses. Le gradient imposé influence l'aquifère des calcaires de Saint-Ouen également en charge sous les sables verts de Monceau. L'eau de l'aquifère de Saint-Ouen a un fort potentiel de dissolution vis-à-vis du gypse. Le gradient hydraulique mis en évidence ci-avant conduit à amener les eaux de cet aquifère au contact de la base de la 4^{ème} masse de gypse et d'y induire des dissolutions significatives. Nous pensons que ce mécanisme de dissolution est prépondérant. Il est probablement complété par une action des eaux d'infiltration en provenance de la surface. A partir de ce double mécanisme de dissolution, deux contextes géotechniques peuvent exister :

- dans les zones où la 3^{ème} masse de gypse est absente, la dissolution de la 4^{ème} masse (peu épaisse), crée une perte de matière compensée, par le mouvement

des terrains surincombants. La propagation de ce mécanisme vers le haut induit préférentiellement l'apparition d'un affaissement en surface.

- dans le cas où la 3^{ème} masse est présente en plus de la 4^{ème}, l'épaisseur cumulée de gypse autorise la création d'une cavité de dissolution. La partie supérieure de la 4^{ème} masse de gypse non dissoute, les marnes à pholadomies sus-jacentes et la 3^{ème} masse de gypse forment un ensemble doté d'une résistance mécanique suffisante pour maintenir ouverte une cavité de dissolution. Une fois que la taille de la cavité devient critique et que l'épaisseur de gypse à son toit n'est plus suffisante pour contenir le poids des terrains sus-jacents, la cavité s'effondre et induit la remontée d'une cloche de fontis jusqu'en surface.

5.2. Évaluation de l'aléa

5.2.1. Méthodologie développée

La méthodologie d'évaluation de l'aléa « fontis et affaissement » sur le secteur du bois de la Tussion est définie en fonction de la prédisposition à la dissolution, de la prédisposition à l'occurrence de chacun de ces types de désordre (affaissement ou fontis) et de leur intensité. L'évaluation de l'aléa se déroule selon les étapes suivantes :

a. évaluation de la prédisposition à la dissolution ;

La prédisposition à la dissolution s'appuie sur le croisement de trois critères indispensables à la mise en place d'un mécanisme de dissolution (existence du gypse, potentiel de dissolution de l'eau, écoulement). Ces critères et leurs différentes classes de niveaux sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Critères d'évaluation de la prédisposition à la dissolution

Critère	Niveau	Définition
<u>minéralogique</u> : épaisseur de gypse cumulée (m)	peu sensible $h < 1$	- résidus de 4 ^{ème} masse et/ou présence de lentilles dans les Marnes infra-gypseuses - absence de la 3 ^{ème} masse
	sensible $1 < h < 3,5$	- 4 ^{ème} masse de gypse présente avec localement une épaisseur importante. - absence de la 3 ^{ème} masse de gypse.
	très sensible $H > 3,5$	3 ^{ème} et 4 ^{ème} masse de gypse présentes, épaisseurs cumulées de gypse importantes
<u>hydrochimique</u> : concentration en sulfates de la nappe des Marnes infragypseuses (mg/l)	peu sensible $1200 < SO_4^{2-} < 1600$	Quasi saturation avec le gypse. Eaux peu agressives vis-à-vis du gypse
	sensible $800 < SO_4^{2-} < 1200$	Concentrations intermédiaires représentatives de secteurs en cours de dissolution
	très sensible $350 < SO_4^{2-} < 800$	Potentiel de dissolution important vis-à-vis du gypse
<u>hydraulique</u> :	non affecté	Piézométrie de la nappe conforme à la

cote NGF de la nappe des Marnes infra-gypseuse (m)	NGF > 55	piézométrie régionale
	peu sensible 54 < NGF < 55	Zone où le gradient hydraulique augmente du fait de la présence du talweg piézométrique
	très sensible 53 < NGF < 54	Zone où le gradient hydraulique est maximal

b. évaluation de la prédisposition à l'occurrence d'un type de désordre (fontis ou affaissement) ;

Afin de déterminer la prédisposition à l'apparition d'un type de désordre (fontis ou affaissement), la prédisposition à la dissolution a été croisée avec un facteur aggravant représenté par la fréquence du nombre de désordres par unité de surface considéré, calculée à partir des observations faites *in situ*. Sa valeur n'est prise en compte que lorsque que sa classe est supérieure en gravité à la prédisposition à la dissolution déjà établie. Cette règle a pour objectif de retranscrire le fait que dans le cas d'une prédisposition à la dissolution forte, celle-ci ne doit pas être diminuée si aucun désordre ne s'est encore manifesté en surface. Notons qu'une forte densité de désordres ne permet pas de discriminer une activité de dissolution en cours d'une activité de dissolution passée.

c. évaluation de l'intensité pour chaque type de désordres ;

Le critère habituellement retenu pour qualifier l'intensité d'un fontis est son diamètre. Si l'on se réfère aux données acquises lors des campagnes d'investigations géotechniques, des visites de terrain et des études réalisées sur le bois et en considérant les mécanismes de talutage et d'érosion, la gamme de dimensions de fontis (environ 4 m de diamètre) représente une intensité de classe modérée (Didier, 2006).

L'intensité des affaissements a été évaluée à partir des dimensions de chaque désordre relevé lors de la campagne d'investigations géotechnique. La mise en pente moyenne des affaissements relevés à la surface du bois de la Tussion est supérieure à 6%. L'intensité résultante est de classe élevée (Didier, 2006).

d. évaluation de l'aléa pour chaque type de désordres.

La détermination des différents niveaux d'aléa (figure 4) à la surface du bois consiste à croiser la prédisposition déterminée pour chaque type de désordre avec son intensité associée.

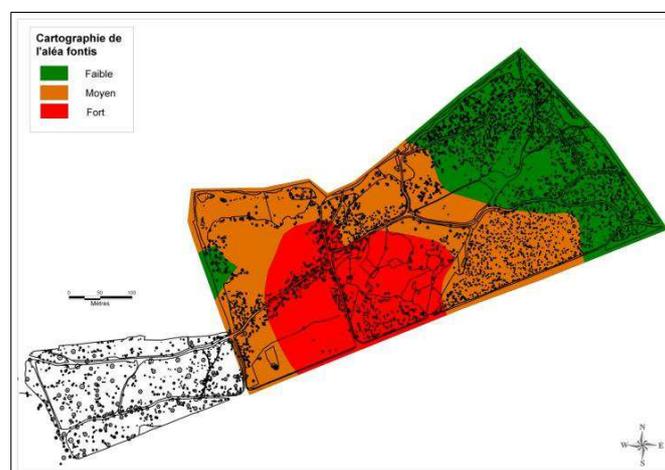


Figure 3 : Carte des niveaux de l'aléa « fontis »

La carte d'aléa obtenue (figure 3) permet la mise en place d'une stratégie d'aménagement destinée à rendre accessible, au moins localement, cet espace vert au public.

6. Conclusion

Le modèle de fonctionnement hydro-géotechnique mis en évidence dans le sous-sol du bois de la Tussion a été établi à partir d'une approche couplée intégrant des données hydrogéologiques, hydrochimiques et géotechniques acquises *in situ*.

L'expérience de l'INERIS dans l'évaluation de l'aléa a permis le développement d'une méthodologie spécifique d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain lié à la dissolution tout en intégrant les données quantitatives du site.

Au-delà de son application au site du bois de la Tussion, le travail méthodologique réalisé au cours de cette étude ouvre des perspectives à l'échelle d'un département ou d'une région, quant à l'évaluation des aléas liés aux processus de dissolution naturelle.

Références bibliographiques

- Cooper A H (2006) Gypsum dissolution geohazards at Ripon, North Yorkshire, UK, IAEG2006 Field Trip Guide Ripon. British Geological Survey, 1- 13.
- Cooper A H, Waltham A C (1999) Subsidence caused by gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire. Quarterly Journal of Engineering Geology, 32, 302- 310.
- Gutiérrez F, Cooper A H (2007) Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. Environ. Geol, 53, doi 10.1007/s00254-007-0728-4, 1007-1022.
- Klimchouk A, Forti P, Cooper A H (1996) Gypsum karst of the World : a brief overview. Int. Journal of Speleology. 25 (3-4), Chapter II.1, p.159-181.
- Klimchouk A (1996) Hydrogeology of gypsum formations. Int. Journal of Speleology. 25, 3-4, Chapter I.6, 83- 89.
- Thierry P., Prunier-Leparmentier A M, Lembezat C, Vanoudheusden E, Vernoux J F (2009) 3D geological modelling a turban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution : The Paris example (France). Engineering Geology 105, 51-64.
- Toulemont M (1987) Les risques d'instabilité liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne – Prévision en cartographie. Bull. de liaison P et Ch, n0150/151, 3192, 109-116.
- Didier C. (2006), Elaboration des plans de préventions des risques miniers, guide méthodologique, volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa, les risques mouvements de terrain, d'inondations et d'émission de gaz de mine, INERIS DRS-06-51198/R01.