

ANALYSE ET INTERROGATIONS LIEES A L'EFFONDREMENT DE LA CARRIERE SOUTERRAINE DE CRAIE DE LORROY EN 1910

ANALYSIS AND QUESTIONING ON 1910 COLLAPSE OF LORROY CHALK UNDERGROUND QUARRY

Jean-Marc WATELET¹, Charles KREZIAK², Marwan AL HEIB¹

¹ INERIS, Verneuil-en-Halatte, France

² Cerema – DTer Ile-de-France, Trappes-en-Yvelines, France

RÉSUMÉ – Lors de l'hiver 1910, la crue du Loing a provoqué l'ennoisement d'une carrière de craie située à Lorroy (commune de Château-Landon-France). L'effondrement brutal qui s'en est suivi a engendré un grand glissement détruisant le canal et le hameau voisins et a fait 7 victimes. Le caractère soudain de l'événement a conduit les auteurs à s'interroger sur le comportement mécanique de la craie sous l'effet de variations de teneur en eau.

ABSTRACT – During the winter of 1910, the river Loing overflowed and flooded a chalk quarry located at Lorroy, Château-Landon township (France). The collapse that occurred caused a big landslide, destroying nearby both the waterway and the hamlet and killed 7 persons. The suddenness of the event led the authors to study the chalk mechanical behaviour under water content variations.

1. Introduction

L'hiver 1910 est marqué dans la mémoire collective par la grande crue de la Seine et par les illustrations de Paris sous les eaux. Le glissement de terrain provoqué par l'effondrement d'une carrière souterraine à Lorroy (commune de Château-Landon - 77) le 21 janvier 1910 est un événement moins connu mais tout aussi désastreux à l'échelle locale. La catastrophe affecta le hameau de Lorroy en provoquant la mort de 7 personnes et des dégâts considérables au canal situé au pied du coteau (Figure 1).

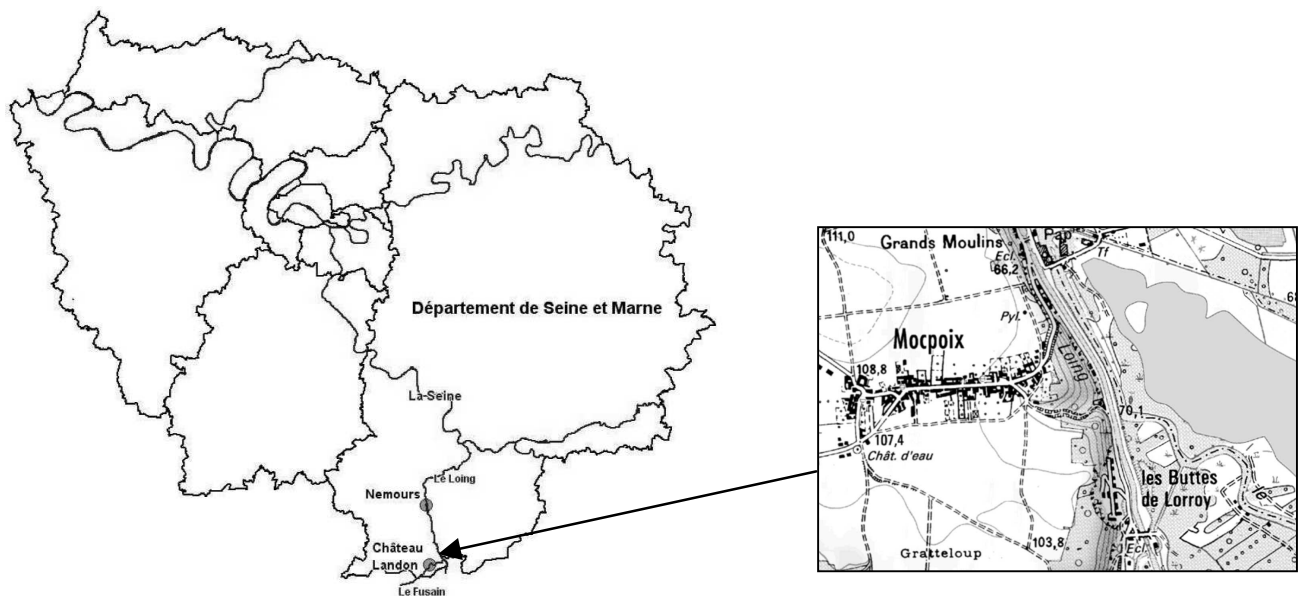
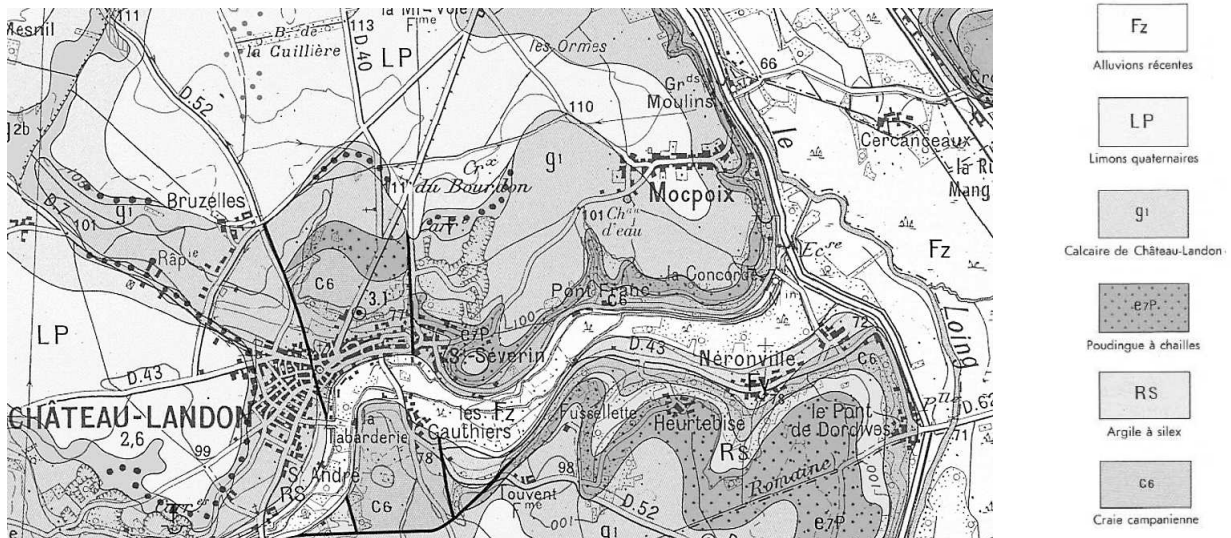


Figure 1. Schéma de localisation de l'événement.

1.1. Cadre géologique

Dans ce secteur, les mouvements tectoniques ont induit une remontée des terrains secondaires et un amincissement des formations tertiaires (phase d'érosion). Si le plateau est couronné par le calcaire tertiaire de Château-Landon, la craie campanienne (secondaire) affleure sur les pentes (Figure 2). A proximité du versant, la masse crayeuse est parcourue par des fractures tectoniques et des failles de décompression liées au creusement de la vallée.



1.2. Historique des exploitations

L'exploitation de la craie semble avoir commencé à ciel ouvert, puis être passée en souterrain au milieu du XIX^{ème} siècle. A partir d'entrées en cavage creusées dans le coteau (Figure 3), la craie était extraite au pic puis à la poudre noire. Débarrassée des silex, la craie était concassée, délayée en galeries, puis séchée et stockée à l'extérieur sous forme de « pains ». Le matériau était intégré dans des processus industriels. En 1910, une partie des carrières souterraines étaient reconverties en champignonnière.

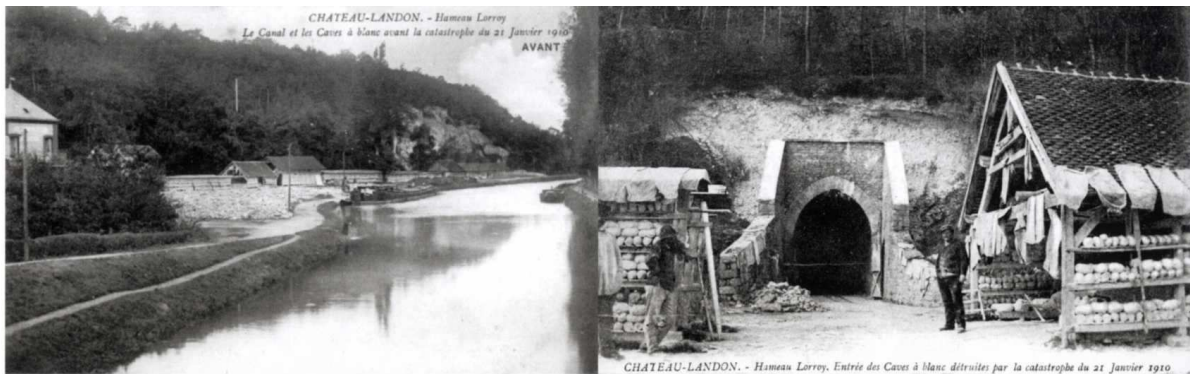


Figure 3. Vue générale du versant et entrée de la carrière avant son effondrement.

Les exploitations étaient conduites par galeries filantes voûtées de 3 à 5 m de hauteur, présentant globalement une orientation perpendiculaire au versant pour les galeries principales et parallèles à l'axe de la vallée pour les recoups. Les sections des piliers et étaux de masse augmentaient vers l'intérieur du massif mais leur agencement et leur

géométrie restaient très aléatoires. Le recouvrement variait de quelques mètres à proximité des cavages à une trentaine de mètres dans les secteurs les plus profonds.

L'effondrement a concerné la carrière Beaulieu située à hauteur du hameau de Lorroy dont la partie sud était encore en exploitation partielle et la partie nord reconvertie en champignonnière. A l'époque, 6 carrières souterraines étaient répertoriées à proximité, dont certaines s'étaient déjà effondrées, mais sans occasionner de tels désordres.

2. Caractéristiques de la catastrophe

La catastrophe survient le vendredi 21 janvier. L'éroulement soudain du coteau et le glissement qui s'en suit entraînent 3 habitations implantées le long du chemin vicinal longeant le canal du Loing et provoquent la mort par ensevelissement de 7 personnes.

Il est difficile d'évaluer avec précision le volume de matériaux mis brusquement en mouvement (de l'ordre de 100 000 m³). L'éroulement s'étend sur un linéaire d'une centaine de mètres et la surface d'arrachement, haute d'une vingtaine de mètres, se situe à une quarantaine de mètres en retrait de la bordure d'origine du coteau (Figure 4). L'amoncellement de décombres (roches et remblais) comble le canal et brise l'écluse de Lorroy ainsi qu'une digue, provoquant la vidange du canal sur 6 km. Plusieurs mois seront nécessaires pour déblayer le site.

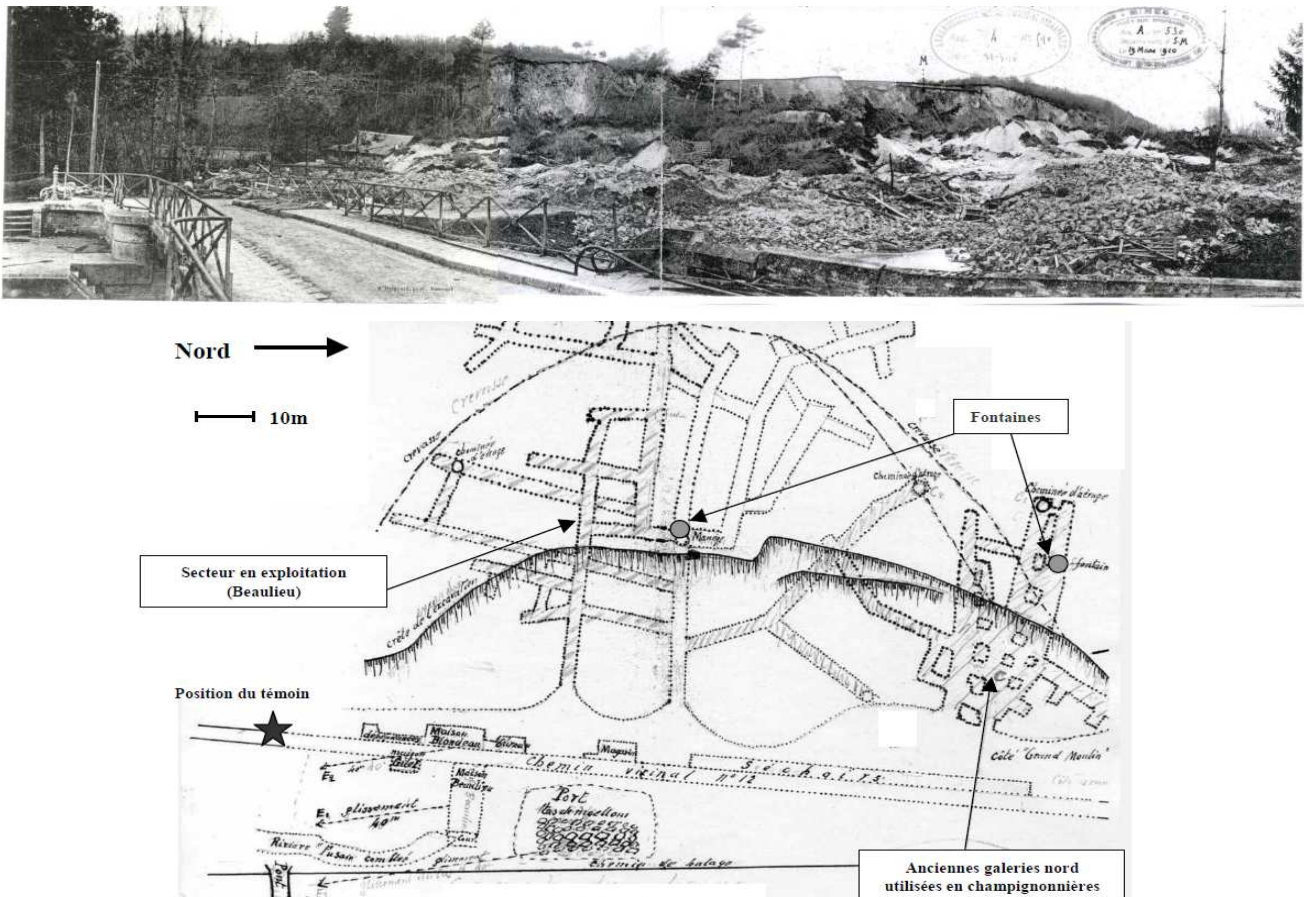


Figure 4. Photos et croquis en plan de la zone effondrée (source DRIRE IdF).

L'effondrement s'est produit le lendemain du pic de crue du Loing (Figure 5), après que le champignonniste, exploitant de la partie nord de la carrière, ait signalé que l'eau

envahissait les galeries en remontant par les fontaines (anciens puits creusés sur quelques mètres de profondeur dans le mur des exploitations pour délayer la craie).

Après la phase de constatations, des essais de caractérisation mécanique d'échantillons de craie, prélevés dans une carrière voisine, ont été diligentés par l'Ingénieur en chef des Mines.

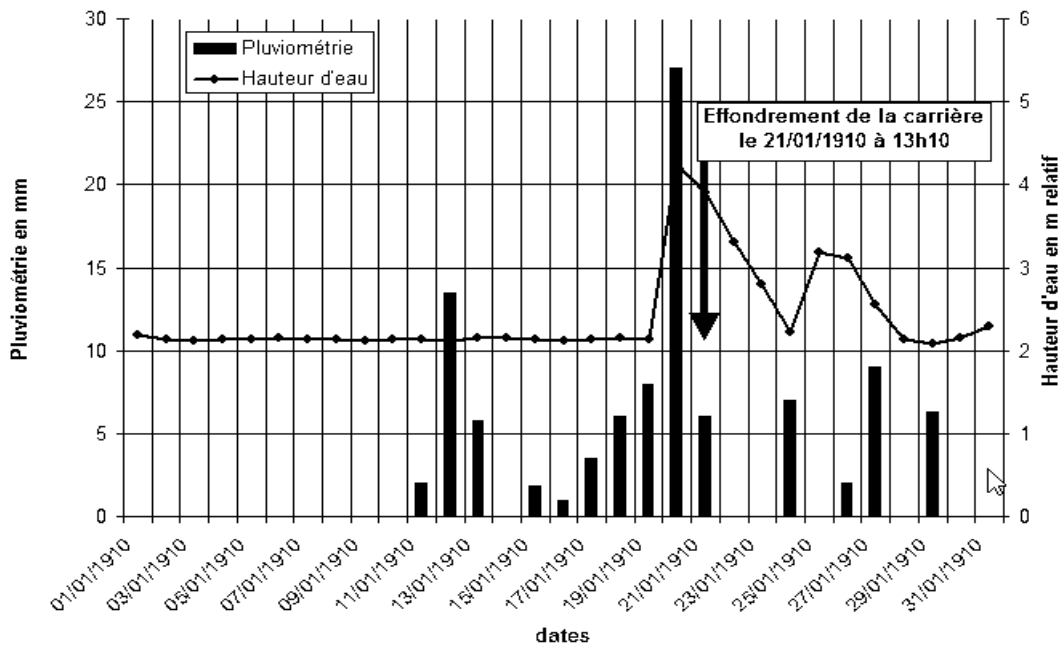


Figure 5. Relation pluviométrie-hauteur d'eau du Loing à Nemours lors de la crue de 1910 (source DIREN IdF-DTer IdF).

Les conclusions générales attribuèrent l'origine de la catastrophe à l'effondrement en masse de la partie nord de la carrière. L'inondation aurait provoqué la rupture de la zone au nord, à « petits piliers » puis du reste de la cavité. L'écroulement des terrains aurait alors déclenché un glissement de terrain concomitant (Gombert et Cherkaoui, 2011).

Cependant, plusieurs points restent sujets à réflexion. Si l'effondrement du quartier le plus défrUIT paraît logique, la propagation des désordres vers des piliers plus massifs est difficilement explicable avec les méthodes de calcul employées à l'époque. Il est également légitime de s'interroger sur l'enchaînement des faits pour essayer de comprendre l'ampleur du glissement et vérifier si les conditions de ce site ont pu constituer un facteur aggravant.

3. Rétro-analyse

3.1. Démarche

Afin d'essayer de justifier l'instabilité survenue, nous nous sommes successivement intéressés aux propriétés mécaniques de la craie sous variations de teneurs en eau, aux conditions de stabilité de la carrière souterraine et à la stabilité des pentes.

Des échantillons de craie prélevés dans la même carrière qu'en 1910 ont permis de conduire des essais propres au matériau du site et de comparer les valeurs obtenues à celles d'autres craies du bassin parisien (Josien et Tritsch, 1993). Les essais se sont concentrés sur les variations de résistance mécanique en fonction du degré de saturation de façon à apprécier l'influence de l'ennoiement de la cavité.

L'examen des plans d'archive de la carrière effondrée et la visite des ouvrages souterrains proches ont renseigné sur la géométrie et l'état de dégradation des cavités (Figure 6, état des toits et piliers ; orientations de la fracturation en particulier). A partir de ces données et des caractéristiques de la craie, des calculs de stabilité des piliers ont été menés.

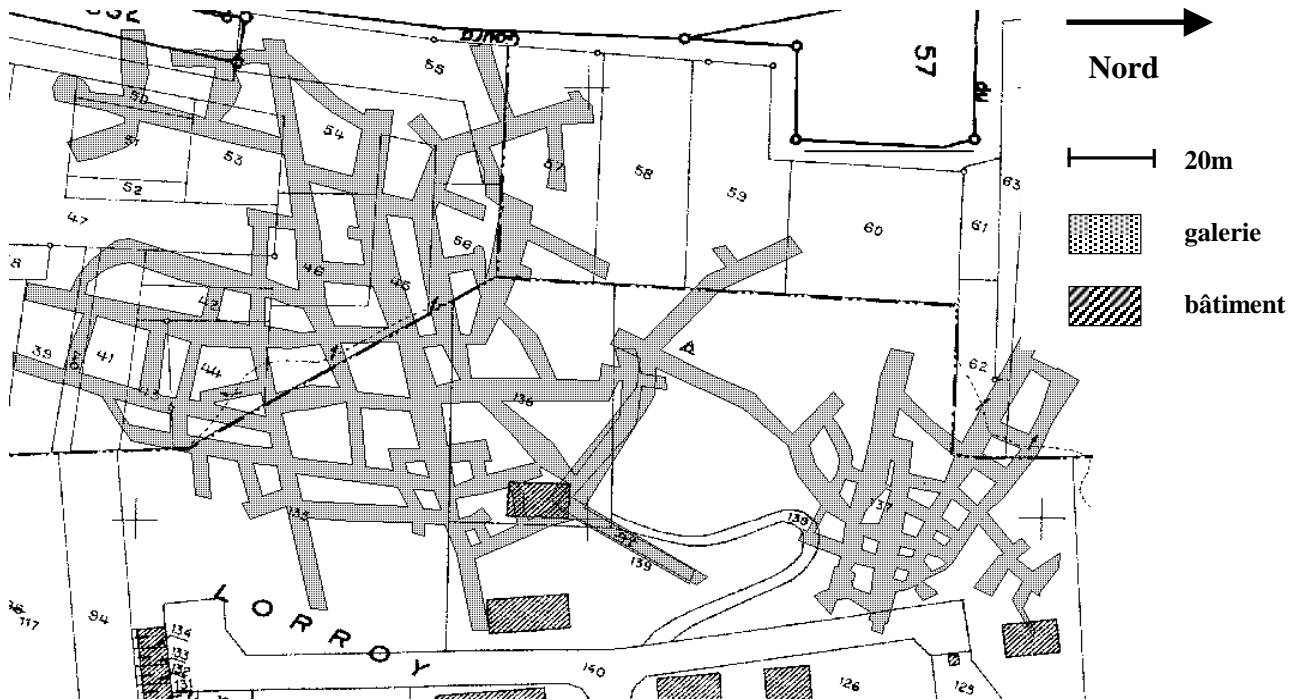


Figure 6. Plan d'origine de la carrière reporté sur le cadastre actuel (Cerema IdF).

Enfin, la stabilité du versant a été étudiée en intégrant les différents facteurs défavorables représentés par la présence de la carrière souterraine, l'existence de fractures de versant ou le développement de pressions interstitielles.

3.2. Caractéristiques mécaniques de la craie

Les essais de résistance mécanique demandés en 1910 par l'Ingénieur en Chef des Mines avaient été réalisés selon des conditions d'essais pratiquées à l'époque (échantillons cubiques de 5 cm d'arête) par le laboratoire de l'École des Ponts à Paris en fonction de divers degrés de saturation. Ces résultats indiquaient des valeurs de résistance très faibles (variant de 0,5 à 0,8 MPa) en conditions saturées. Les commentaires soulignaient un comportement complexe de cette craie et la chute brutale des valeurs de résistance après « saturation par immersion » des échantillons, notamment en comparaison avec d'autres craies étudiées par ce laboratoire.

Tableau 1 : Résistance moyenne à l'écrasement (Procès verbal Liénard, 1910)

Carrières proches	A l'état naturel	Après dessiccation prolongée à l'étuve	Après dessiccation à l'étuve suivie d'une immersion pendant 4 jours	Après simple immersion de quelques minutes du bloc naturel
Royer	10,3	19,5	5,8	7,9
Prêteux	7,6	25,5	5,5	5,6

Essais sur cubes : résultats donnés en kg/cm² soit 10⁻¹ MPa

On peut aujourd'hui bénéficier d'autres analyses plus poussées sur les caractéristiques de ce matériau et sur sa sensibilité à l'eau. Des essais ont en effet été réalisés par le CERMES (Delage et al., 2011) et dans le cadre d'une thèse à l'Université de Lorraine – Laboratoire Géoressources (Lafrance et al., 2014).

Cette craie considérée comme une craie pure au sens minéralogique du terme, a une porosité (n) moyenne de 44 % et une densité sèche de 1,5.

Les courbes d'essais de résistance à la compression simple réalisés par le CERMES sont présentées sur la figure 7. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques d'élanement 2, initialement séchées par évaporation libre à partir de l'état in situ, puis portées à différents degrés de saturation. On constate la diminution progressive de la résistance avec l'augmentation du degré de saturation. La résistance diminue de 1,3 MPa (S_r 60%) à moins de 0,5 MPa (de l'ordre des valeurs trouvées en 1910) lorsqu'on se rapproche de la saturation totale, résultats confirmés par les essais de l'Université de Lorraine ($R_c > 4$ MPa pour des échantillons passés à l'étuve à moins de 0,8 MPa à saturation).

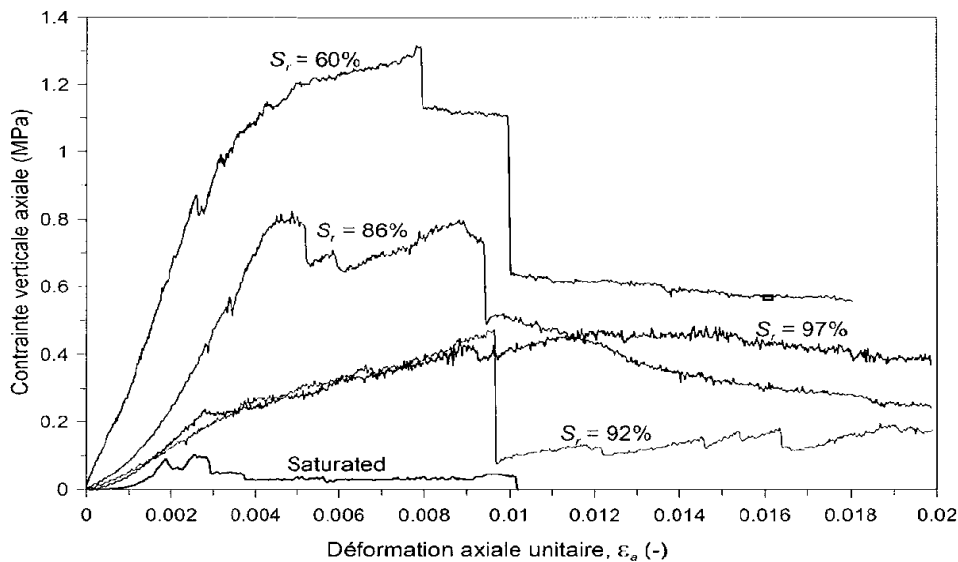


Figure 7. Résultats des essais de compression simple réalisés à différents degrés de saturation (source CERMES).

Jusqu'à 92 % de saturation, le comportement des échantillons testés est fragile avec une rupture brutale. A 97 % de saturation, on note un comportement ductile et à l'état saturé, une résistance quasi nulle avec des éprouvettes totalement déformées de texture pâteuse.

Cette diminution de la résistance avec l'augmentation du degré de saturation s'explique dans la mécanique des sols non saturés du fait de «l'apparition d'une contrainte négative» dans les pores existants entre les particules : la succion. Dans la craie, celle-ci augmenterait lorsque que le degré de saturation diminue (Delage et al.).

Ces essais de laboratoire ont été couplés avec des mesures de saturation du massif in situ faites par le CERMES à l'aide d'une sonde de résistivité ThétaProbe. Elles montrent que la craie est moins saturée à la surface des parements, notamment dans les secteurs fissurés (S_r 81%), qu'en profondeur (S_r 96 % à 30 cm du bord).

Ainsi, les bordures des piliers bénéficieraient de meilleures caractéristiques mécaniques correspondant à l'effet de succion de cette craie alors que le cœur du pilier, plus saturé, aurait une résistance plus faible. Ce confinement reste alors conditionné par

l'état hydrique de l'ouvrage, lui-même dépendant des apports d'eau capillaire depuis le bas et des conditions hygrométriques dans les galeries (évaporation, mouillage...).

La perte de résistance des piliers serait alors liée à la réduction de la succion dans leur zone périphérique, induite par le changement de régime hydrique dans les galeries brusquement ennoyées en 1910.

3.3. Mécanisme de rupture probable

Sur la base des témoignages recueillis en 1910, le sinistre serait la conséquence de l'effondrement de la partie nord de la carrière souterraine suite à l'ennoisement brutal des galeries, le milieu encaissant étant déjà saturé. L'effondrement se serait ensuite propagé à la partie sud de la carrière et aurait déstabilisé le pied du coteau.

Bien que d'application limite, un calcul analytique simple (aire tributaire) tenant compte de l'épaisseur du recouvrement et de l'abaissement des caractéristiques mécaniques de la craie, suite à la saturation, montre une dégradation importante de la stabilité des piliers de la partie nord et permettrait d'expliquer le premier effondrement (Figure 8). Cette approche permet également d'envisager la rupture du fond de la partie sud de la carrière.

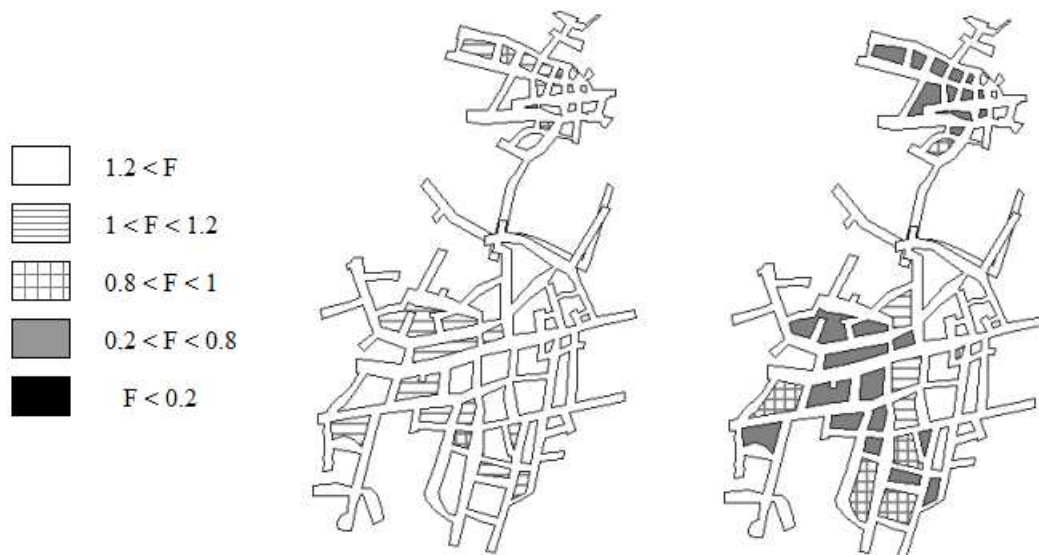
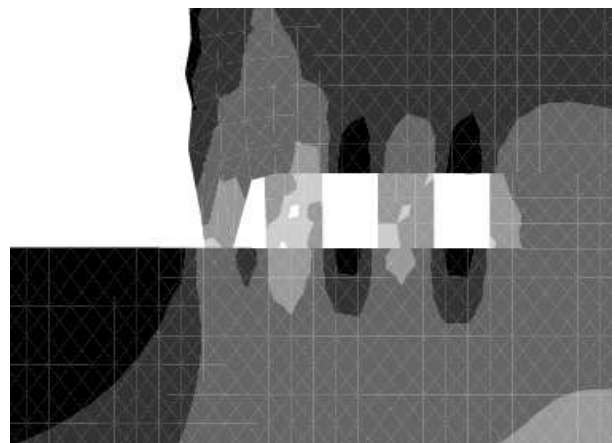


Figure 8. Coefficient de sécurité (rupture par compression) dans le cas d'une chute de la résistance mécanique de la craie (R_c de 1,4 MPa à gauche et de 0,9 MPa à droite).

Cette approche n'indique cependant pas la rupture des larges piliers situés en bordure du versant. Pour expliquer leur ruine, il est nécessaire de prendre en compte la proximité du versant qui induit une concentration et une inclinaison des contraintes principales ainsi que des cisaillements sur les piliers (Figure 9).

Figure 9. Distribution des contraintes verticales selon un calcul élastique (code UDEC) cas de trois chambres creusées à flanc de coteau (gris clair = 2,5 MPa, noir = 0 MPa).



La compréhension du déclenchement du glissement de terrain est plus problématique. Une hypothèse de rupture généralisée du coteau initiée sur une surface de glissement préférentielle représentée par la carrière a été examinée. Au regard de la géométrie du versant et de l'absence de pendage aval des galeries souterraines, les méthodes de calcul classiques ne permettent pas de justifier un glissement plan ou circulaire. De même la prise en compte de valeurs résiduelles pour l'angle de frottement et la cohésion de la craie, potentiellement justifiées par l'effondrement de la cavité et la présence de failles de versant (Moiriat et al., 2005), ne suffisent pas à diminuer dans une forte proportion le coefficient de sécurité du coteau.

D'autres phénomènes seraient sans doute à intégrer pour modéliser les mouvements constatés, probablement les fortes surpressions interstitielles engendrées par le brutal comblement des cavités ennoyées et principalement l'effet dynamique de l'effondrement.

4. Conclusions

En 1910, l'inondation de la vallée du Loing s'est accompagnée de la saturation du massif de craie qui est à l'origine de l'effondrement d'une carrière souterraine de craie et d'un glissement de grande ampleur ayant détruit le hameau de Lorroy (commune de Château-Landon 77).

Les résultats des essais géomécaniques réalisés après l'effondrement ont été confirmés par des études récentes. Cette craie campanienne exploitée présente des caractéristiques de résistance très faibles et un comportement après saturation pouvant expliquer la ruine des zones où les piliers étaient les plus petits.

Si l'ennoiement brutal des galeries au sein d'un massif crayeux déjà saturé peut être considéré comme le facteur déclenchant de cet effondrement, cet article a cherché à comprendre comment la ruine d'une partie de la carrière nord a pu se propager à l'ensemble de l'ouvrage souterrain et engendrer un glissement dans le coteau.

Les approches menées sur facteurs de site que sont la modification du champ de contraintes en bordure de coteau et l'effet de la sur-contrainte liée à l'effondrement de la zone nord restent incomplètes. La prise en compte des phénomènes dynamiques (vibration induite, variation des surpressions interstitielles) est sans doute nécessaire pour retracer le scénario de l'événement.

L'examen de ce cas montre l'importance des configurations de site sur le développement de tels phénomènes.

5. Références bibliographiques

- Delage P., Munoz-Castelblanco J., Pereira J.M., Tang A. M. (2011). Comportement de la craie du site de Lorroy. *Rapport ENPC/CERMES 1264, 15 pages.*
- Gombert Ph., Cherkaoui A. (2011). Analyse climatologique, hydrologique et hydrogéologique des effondrements survenus à Château-Landon (77) aux XIX^e et XX^e siècles. *Rapport INERIS DRS-11-117680-00812A, 61 pages.*
- Josien J.P., Tritsch J.J. (1993). Étude de stabilité des carrières classées de Meudon. *Rapport INERIS 71-6258/R01. 53 pages.*
- Lafrance N., Souley M., Auvray C., Labiouse V. (2014). Influence de l'eau sur le comportement de la craie. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014, 10 pages.*
- Moiriat D., Pothérat P., Durville J.L., Bébien J. (2005). Observations sur la fracturation liée à l'incision d'une vallée-Carrière souterraine des Brillants (Hauts-de-Seine). *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 258-259, pp. 3-14.*