
Etude géologique et mécanique des formations calcaires de Poitiers

Application à la gestion des risques naturels

Anne Pantet¹, Dominique Proust¹, Damien Halm², Ouali Amiri³, Jean Hervier⁴

¹ Hydrasa, ESIP - CNRS/Université de Poitiers
40, avenue du Recteur Pineau 86022 cedex
anne.pantet@univ-poitiers.fr

² LMPM, ENSMA (UMR CNRS 6617)
1, avenue Clément Ader – BP 40109 – 86961 FUTUROSCOPE Cedex

³ LEPTAB Université de La Rochelle
avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle

⁴Service sécurité de la CAP
hotel de la Cap, 86000 Poitiers

RÉSUMÉ. La connaissance des phénomènes qui régissent le développement de la fissuration – fracturation est importante dans l'étude de la stabilité des falaises calcaires de Poitiers. Leur préservation et l'aménagement des espaces urbains et périurbains font l'objet d'études pluridisciplinaires, où collaborent, géologues, géomécaniciens et responsable de la sécurité de la CAP. Ce travail a pour objet de décrire les formations géologiques rencontrées et de les caractériser mécaniquement. L'origine de la fracturation est bien évidemment liée à l'origine tectonique de la région. Toutefois des développements d'écailles sont liés à des phénomènes d'endommagement locaux. A partir de ces descriptions et des mesures de grandeurs physiques et mécaniques, un modèle d'étude a été utilisé pour trouver les causes du développement de ces écailles fréquemment observées.

ABSTRACT. The knowledge of fractures distribution is an important data for the stability analysis of the Poitiers limestone cliffs, in particular in urban zones. To preserve the security, the cliffs stability is examined by many scientific partners and local managers. The paper describes the geological survey of the strata and their mechanical properties. The causes of the fractures are of course linked with the geological history. However, local damage induces the development of cracks. From "in situ" observations and the physical and mechanical measurements, a finite element model is used to detect the origine of the local cracks.

MOTS-CLÉS : massif rocheux, caractérisation, stabilité, fissuration, endommagement

KEYWORDS: .rock mass, characterisation, stability, crack, damage

1. Introduction

La Communauté d'Agglomération de Poitiers, qui regroupe 12 communes est soumise à différents risques naturels, notamment les mouvements de terrain et les inondations. Ces phénomènes et leur développement ont été répertoriés lors de l'élaboration du plan de prévention des risques. Bien qu'étant dans un contexte géologique simple, la CAP doit gérer la mise en sécurité de plus de 40 km de versants et coteaux et de falaises, creusés par le Clain et ses affluents. Ces falaises, hautes de 10 à 50 m, bien représentées dans le milieu urbain, posent quelques problèmes de stabilité, de la simple chute d'un bloc à l'écroulement généralisé de la paroi rocheuse.

Dans le cadre de sa politique sur la gestion des risques naturels, la Communauté d'Agglomération de Poitiers mène une étude globale qui consiste à faire un état des lieux à l'échelle du cadastre des falaises, puis à évaluer l'aléa en fonction de facteurs déterminants (topographie, discontinuités) et des facteurs minorants ou aggravants (végétation, protection, morphologie, occupation) et à l'intégrer dans un SIG pour assurer une gestion efficace des difficultés.

Pour compléter ce travail d'expertise linéaire des parcelles codifiées par aléa, une étude géomécanique des falaises calcaires de Poitiers a été initiée. L'examen des falaises de Poitiers montre le développement d'une fissuration, qui évolue au cours du temps et qui délimite des écailles dont les conditions de stabilité sont incertaines. Dans une première partie, on s'est intéressé aux différents calcaires en considérant trois sites d'étude, choisis pour leur représentativité et leurs conditions d'accès. Puis dans une seconde partie, nous nous sommes intéressés à l'effet de la décompression du massif sur le développement de cette fissuration en considérant l'incise de la vallée. Cet article fournit les premiers éléments de cette étude.

2. Contexte géologique général et présentation des sites d'étude

La carte géologique (Poitiers au 1/50000) et le guide géologique régional avec notamment les travaux de Gabilly (1978) indique l'existence d'un plateau calcaire formé des strates sub-horizontales constituant une série type, de la plate forme du Jurassique moyen, daté de l'Aalénien, du Bajocien, du Bathonien et du Callovien.

A la base de la série, il est observé un calcaire graveleux plus ou moins dolomitique en bancs de puissance de 0,40m, puis les calcaires à bioclastes avec des intercalations dolomitiques à géodes blanches. Puis une barre compacte de calcaire graveleux à suboolithique, de 17 m d'épaisseur, avec silex alignés en cordons parallèles aux joints de stratification est constitués en bancs de 1,50 à 2 m.

Ce plateau a été entaillé par le Clain avec plusieurs affluents, le MioSSION, la Boivre et l'Auxances. Ces vallées sont bordées de falaises, hautes de 30 à 50 m et qui posent quelques problèmes de stabilité

Les trois sites d'étude (Varenne, Pierre Levée et route de Paris) sont répartis le long de la série stratigraphique, présentée ci-dessus. Pour des raisons d'accessibilité, les échantillons testés sont prélevés sur blocs tombés.



Figure 1. Extrait de la carte géologique et localisation des 3 sites d'études.

3. Etude géologique et géomécanique des calcaires

3.1. Description des affleurements

Le site de la Varenne présente une falaise de 10 m de hauteur. Les strates sub-horizontales sont épaisses de 0,5 à 1, 50 m. Ponctuellement, les bancs montrent des basculements et des décollements interstrates importants indiquant la présence probable d'une cavité karstique à proximité. Les bancs calcaires, constitués d'un calcaire fin de couleur grise, présentent localement des faciès vacuolaires, scoriacés, avec quelques géodes grossièrement cristallisées. Ils sont également parsemés de conduits karstiques centimétriques à métriques (grotte à Calvin).

L'affleurement du site de la Pierre Levée, est constitué d'une falaise calcaire de 7 à 10 m de haut. La stratification sub-horizontale, est à peine perceptible à cet endroit. L'examen visuel indique une falaise intensément et finement fracturée, avec un calcaire altéré très friable, dans les zones fracturées. Le calcaire est grossier et de couleur beige.

Le long de la Route de Paris se développe une immense barre calcaire à patine blanche, constituée de bancs massifs, avec des surplombs profonds de 3 à 4 m. La fracturation intra-blocs est peu importante. Cette zone a été l'objet d'une exploitation du calcaire.

L'analyse de la fracturation observée sur la zone d'étude (Route de Paris) indique un axe de fracturation NW-SE et une autre direction N-S.

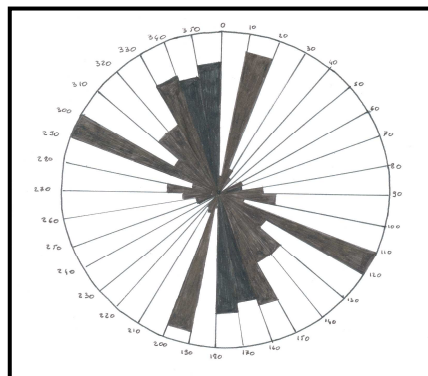


Figure 2. Rosace de la fracturation dans la zone d'étude**3.2. Etude pétrophysique des calcaires**

Les paramètres pondéraux et la teneur en carbonates, mesurée au calcimètre Bernard sont rassemblés dans le tableau 1. Les teneurs en carbonates de calcium précisent la nature chimique des calcaires et confirment le caractère dolomitique des calcaires de la Varenne (perceptible dès l'examen de l'affleurement, aspect scoriacé, caractéristique des formations dolomitiques de type cargneules)

Tableau 1. Caractéristiques physiques des calcaires

	Poids volumique sec	Poids volumique saturé	% carbonates
Varenne	24,3 kN/m ³	25,1 kN/m ³	87,5
Pierre levée	22,3 kN/m ³	23,4 kN/m ³	92,5
Route de Paris	22,6 kN/m ³	22,9 kN/m ³	93,5

Les porosités connectées de la matrice rocheuse ont été mesurées soit sur des disques d'un diamètre de 35 mm et d'une hauteur de 10 mm par simple immersion et par absorption (suivant la norme NFP 94-410-3), soit sur des échantillons de 1 cm³ grâce à un porosimètre de type Autopore III (Micromeritics). L'appareil permet également de donner la distribution des tailles de pores pouvant atteindre 3nm. Les rayons des pores sont calculés selon la loi de Washburn qui exprime la relation la pression exercée par l'appareil (P) et le diamètre des pores (D) :

$$P = - \frac{4\sigma_{hg} \cos \theta}{D}$$

Où θ et σ sont respectivement l'angle de contact et la tension superficielle

Les ordres de grandeur, indiqués dans le tableau 2, sont comparables d'une technique à l'autre. Seul le calcaire de la Varenne présente une porosité au mercure particulièrement faible, sa description pétrographique indiquait une matrice très fine affectée par de nombreux conduits de dissolution et de géodes.

Tableau 2. Mesures de la porosité des calcaires

%	Immersion Disque (D 35 - ép 10)	Absorption Disque (D 35 - ép 10)	Mercuré (parallélépipède 1cm ³)
Varenne	6,5	5,1	0,5
Pierre Levée	10,3	11	14,3- 15,2
Route de Paris	16,1	18	18,2 – 11,8

Les distributions porales obtenues pour les échantillons testés sont données par la figure 3. Elles sont voisines pour les deux échantillons de la Pierre levée, alors que la valeur maximale oscille entre 0,1 et 5 μm pour le calcaire de la route de Paris.

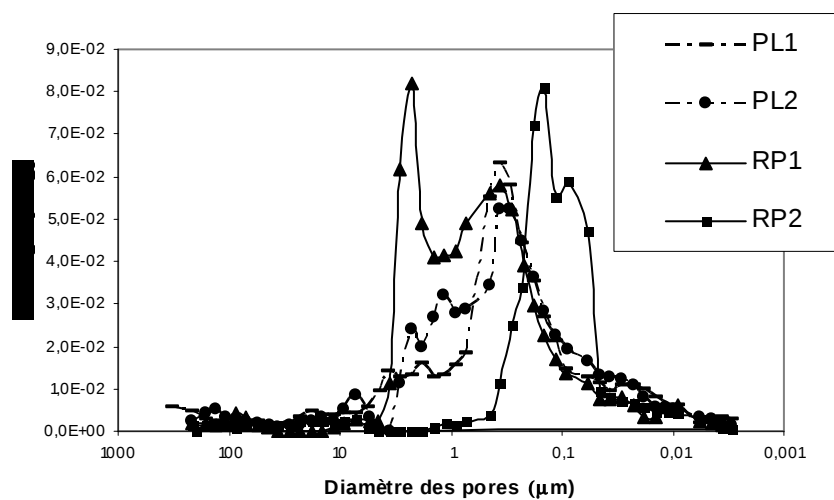


Figure 3. Distribution du diamètre des pores des calcaires poreux.

3.3. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques ont été mesurées sur des échantillons cylindriques secs (diamètre et élanement de 2) sous sollicitation de compression uniaxiale et triaxiale. Avant essai, des mesures soniques sur l'échantillon intact ont été réalisées systématiquement (Norme NF P94-411) pour déterminer l'indice de continuité. La charge est appliquée à vitesse constante grâce à une presse de type Versater, les éprouvettes sont équipées des jauges d'extensométrie pour suivre l'évolution des déformations au cours de l'application de la charge sous une pression de confinement obtenue grâce à une cellule de Hoeke et un vérin manuel. Les courbes contrainte déformation permettent de déterminer les modules d'élasticité et le coefficient de Poisson. La représentation dans le plan de Mohr permet de définir les paramètres classiques de la loi de Mohr Coulomb. Les valeurs mécaniques mesurées par compression simple et triaxiale sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques mécaniques des calcaires des trois sites

	Rc (MPa)	Cohésion (MPa)	Angle de frot ^t	IC (ech sec)
Varenne	5,9 – 25,8	0,6 – 6,3	55- 44	73,4 – 84,6
Pierre levée	16- 38	8,5 – 2	41 - 55	63,6 – 54,4
Route de Paris	13,9 – 19,9	2,9 – 3,3	45 - 50	49,2 – 68,4

Les quelques essais réalisés montrent à ce premier stade de l'étude, une variabilité des données mécaniques à rattacher (1) au type de porosité des matériaux, notamment pour le site de la Varenne où la présence ou l'absence de vacuoles peut influencer fortement la valeur de la résistance (2) à l'état d'altération et de dégradation.

L'étude des affleurements, couplée à celle des échantillons a permis finalement de classer les calcaires à l'aide la classification RMR. Pour le site de la Varenne, il s'agit d'une classe III, correspondant à des caractéristiques moyennes, à la Pierre Levée, l'indice RMR indique une classe V (caractéristiques faibles) et finalement pour la route de Paris, une classe II (caractéristiques bonnes). Les caractéristiques équivalentes du massif sont bien évidemment plus faibles que celles de la matrice rocheuse.

4. Modélisation de l'endommagement de la falaise par décompression due à l'incise de la vallée au niveau de la route de Paris

Nous nous sommes intéressé aux origines de la fracturation et du développement de la fissuration en intégrant des modifications du champ de contrainte dues à l'incise de la vallée. L'étude de l'endommagement diffus peut permettre d'expliquer la transition entre un massif « sain » (non fissuré) d'un point de vue macroscopique et l'apparition d'écailles. L'endommagement diffus correspond à la création et la croissance de micro-défauts, dont la présence peut dégrader les propriétés élastiques du matériau.

4.1 - Intégration de la loi de Marigo dans le code Abaqus

A l'instar du modèle de Prandtl-Reuss en plasticité, le modèle de Marigo (1981), malgré ses limites, est un modèle de référence en terme d'endommagement : sa formulation, bien qu'écrite dans le cadre thermodynamiquement rigoureux des modèles standard généralisés, reste suffisamment simple et sa robustesse numérique en fait un outil de simulation efficace.

L'endommagement décrit par ce modèle consiste en un ensemble de microfissures aléatoirement réparties décrit par une variable scalaire d , variant de 0 (matériau vierge) à 1 (matériau rompu). La donnée de l'énergie de déformation et de la fonction seuil d'endommagement ainsi que l'hypothèse d'évolution normale de la variable d permettent d'obtenir les lois d'état et d'évolution nécessaires à la

simulation par éléments finis. La version de base du modèle de Marigo est complétée dans le but de traduire une dissymétrie traction / compression.

Les résultats expérimentaux décrits dans la Section 3, en particulier les essais de compression triaxiale effectués sur le calcaire de la Pierre Levée et jugés les plus sûrs malgré certains dysfonctionnements des jauges, suffisent à identifier les quatre paramètres du modèle, à savoir, pour le matériau non endommagé, le module d'Young et le coefficient de Poisson, et pour le comportement non linéaire, le seuil d'apparition de l'endommagement et le degré de progressivité de l'endommagement.

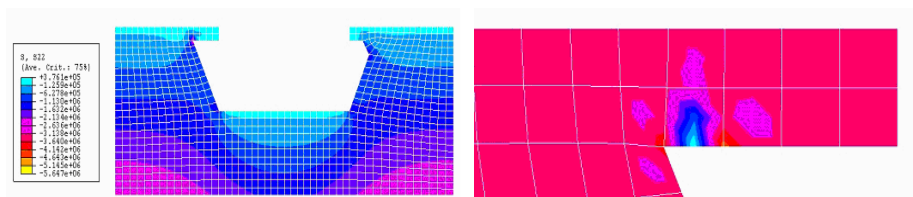
L'introduction d'un modèle dans un code de calculs comme Abaqus, via une sous-routine UMAT, permet une évaluation de l'état de contraintes, de déformations et d'endommagement au sein du massif modélisé.

4.2. Résultats

L'enjeu est de modéliser un certain nombre de massifs, afin de pouvoir déterminer quelle singularité présente un risque d'apparition d'endommagement, et dans quelles conditions. Les massifs modélisés constituent une déclinaison de configurations représentant l'incise de la vallée du Clain, notamment en faisant varier la profondeur de la vallée, la pente des talus, la présence et la taille de surplombs, la fragilisation par des failles... Le travail étant qualitatif, il s'attachera principalement à donner une tendance de comportement sur des modélisations bidimensionnelles en hypothèse de déformations planes. Les premiers résultats indiquent que l'incise de la vallée n'a qu'une action limitée sur le développement de l'endommagement d'un milieu continu homogène, dans un état initial de contraintes géostatiques anisotropes.

Seule l'introduction de conditions géométriques particulières amène au développement de zones d'endommagement. Par exemple, une très forte pente (falaise quasi-verticale et très haute) peut être à l'origine d'un endommagement du calcaire au pied de la falaise, en fond de vallée.

Un autre facteur d'apparition de l'endommagement, très présent dans la vallée du Clain est la présence de surplombs. La figure 4 (a) présente la configuration modélisée et l'agrandissement 4 (b) indique un niveau d'endommagement important en face inférieure du surplomb, pouvant conduire à une rupture et un éboulement. Cet effet est amplifié par la présence de faille sur la face supérieure du surplomb, résultant, par exemple, de la poussée de racines.



a : Niveau des contraintes verticales dans le massif

b : Fort niveau d'endommagement dans le surplomb (zoom Fig.4a)

Figure 4. Exemple de développement de l'endommagement

4. Conclusion

Cette première étude a permis de mettre en évidence les différents calcaires de Poitiers. A l'échelle du massif, l'existence d'un système karstique est bien connu et affecte toutes les formations Jurassiques, des cavités sont répertoriées à faible profondeur sur le plateau. Au droit des falaises, ce système est particulièrement visible sur le site de la Varenne. Cette observation indiquerait un caractère ponctuel de la karstification dans les formations supérieures et beaucoup plus régulier et étendu à la base de la série. A l'échelle des échantillons, les paramètres physiques et mécaniques doivent être précisés en fonction de leur position dans la série, dû fait des variations mesurées. Dans un contexte géologique simple, le développement de la fracturation conduisant à la formation d'écaille de géométrie variable (pierres aux blocs) est complexe. Les premières simulations ont montré que le développement de l'endommagement est lié à la morphologie de la falaise et à l'existence de la fracturation initiale.

6. Bibliographie

- Calixte C., (2006) Etude pétrophysique et mécanique des calcaires de Poitiers. Mémoire de Master 2– Université de Poitiers.
- Dovergne F., (2006) Modélisation de l'endommagement progressif – Application aux falaises de Poitiers. Mémoire de Master 2 – Université de Poitiers et ENSMA
- Homand F., Duffaut P., (2000), Manuel de mécanique des roches. Presses de l'ENPC.
- Gabilly J., Cariou E. *et alii*, (1997), Guide géologique régional : Poitou, Vendée, Charentes. Ed Masson
- Goodman R., (1989) Introduction to rock mechanics , second edition ; John Wiley et Sons
- Marigo, J.J., Formulation d'une loi d'endommagement d'un matériau élastique, C.R. Acad.Sci. (Paris), série II, 292(19), pp. 1309-1312, 1981.