

Observations sur la fracturation liée à l'incision d'une vallée Carrière souterraine des Brillants (Hauts-de-Seine)

Denis MOIRIAT

Bureau de recherches géologiques et minières – SAR Océan Indien

Pierre POTHÉRAT
Jean-Louis DURVILLE

Centre d'études techniques de l'Équipement de Lyon

Jean BÉBIEN

Université Paris XI
FRE 2566, UMR 8148
Faculté des sciences d'Orsay

RÉSUMÉ

L'étude d'une ancienne carrière souterraine de craie à Meudon (carrière des Brillants), au sud-ouest de Paris, a révélé la présence de deux principales familles de fractures. L'une d'elles est attribuée à l'influence du creusement d'une vallée située dans le voisinage immédiat de la carrière. La fréquence de ces fractures augmente à proximité du versant ; le pendage de leur partie médiane augmente avec la cote dans le massif rocheux. Les mouvements observés le long de ces fractures traduisent un déplacement centimétrique des compartiments supérieurs en direction de la vallée.

Des observations identiques sur la fracturation du versant dans des exploitations de calcaire en région parisienne montrent que les joints stratigraphiques, à une profondeur suffisante, ont facilité le développement de ce type de fractures.

Une tentative de modélisation numérique a établi qu'il est difficile de reproduire la formation de ces fractures avec le profil topographique actuel et les caractéristiques mécaniques du massif, même réduites, à la suite d'une période de fluage. Le rôle des joints stratigraphiques dans la genèse de ces discontinuités reste à élucider.

DOMAINE : Géotechnique et risques naturels.

ABSTRACT

OBSERVATIONS ON CRACKING RELATED TO CUTS INTO A VALLEY: THE "BRILLANTS" UNDERGROUND QUARRY (FRANCE'S HAUTS-DE-SEINE DEPARTMENT)

The study of a former underground chalk quarry at Meudon (the "Brillants" site), southwest of Paris, has indicated the presence of two main fracture families. One is attributed to the influence of a valley excavation located in the immediate vicinity of the quarry. The frequency of these fractures increases near the slope; the dip of their median part rises with the spot height in the rock block. The movements observed along these fractures reflect a centimeter-long displacement of the upper compartments in the direction of the valley.

Identical observations on the fracturing of the slope in areas of limestone quarrying in the Paris region show that stratigraphic joints, at sufficient depths, have served to facilitate development of this type of fracture.

A numerical modeling effort has revealed the difficulty involved in reproducing the formation of these fractures using both the current topographical profile and the mechanical characteristics of the block, even reduced, subsequent to a period of creep. The role of stratigraphic joints at the origin of these discontinuities still needs to be clarified.

FIELD: Geotechnical engineering and natural hazards.

INTRODUCTION

La modification de l'état des contraintes provoquée dans un massif rocheux par un changement de la topographie (incision d'une vallée par exemple) peut accentuer, voire provoquer une fracturation du sous-sol qui reste le plus souvent ignorée tant qu'elle n'a pas pour conséquence des déformations plus ou moins importantes et rapides de la surface. Les ouvrages souterrains creusés à partir de versants, et tout particulièrement les mines et les carrières souterraines, constituées d'un réseau dense de galeries parfois disposées sur plusieurs niveaux, présentent un grand intérêt, dans la mesure où ils permettent l'observation de cette fracturation dans les trois dimensions de l'espace.

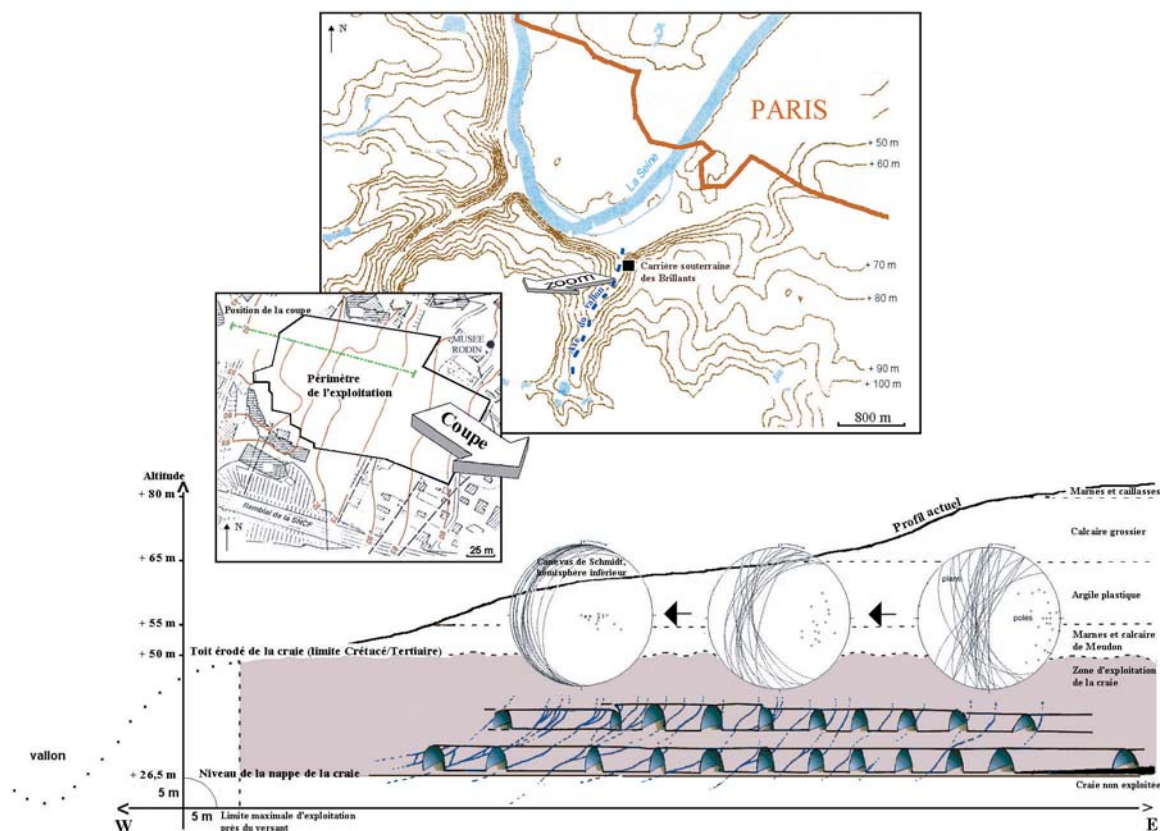
Les carrières souterraines abandonnées, abondantes à Paris et dans la région parisienne, sont le siège d'instabilités dont les conséquences peuvent être catastrophiques (par exemple, l'effondrement de

Clamart en 1961). Ces ouvrages livrent des informations précieuses sur la constitution du sous-sol d'une grande ville. Ainsi, l'examen d'une carrière creusée dans la craie à Meudon (carrière des Brillants), au sud-ouest de Paris, révèle la présence de deux systèmes principaux de fractures. La genèse de l'un de ces systèmes, dont les caractéristiques sont discutées ci-après, est attribuée à l'influence d'une vallée située dans le voisinage immédiat de la carrière.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La carrière des Brillants, ouverte à partir de 1880, est approximativement située sous le musée Rodin à Meudon (Fig. 1). Elle a été creusée dans le versant oriental d'un vallon d'axe nord-sud qui rejoint la vallée de la Seine quelques centaines de mètres plus au Nord. Ce versant, dont le profil a été profondément modifié par l'homme, se situe entre les altitudes + 22 m et + 90 m, et présente actuellement une pente moyenne de 20 %. La carrière se développe dans la craie, sur deux ou trois niveaux suivant les endroits, entre les altitudes + 27 m (juste au-dessus du sommet de la nappe de la craie) et + 50 m (toit de la craie), sur une distance de plus de 200 m suivant une direction équatoriale, et de 120 m dans le sens nord-sud. Chaque niveau est constitué d'un réseau de galeries perpendiculaires, hautes de 3 à 5 m, orientées approximativement N10E et N100E. Le taux d'exploitation, pourcentage de la surface des vides par rapport à la surface totale, reste inférieur à 50 %, ce qui explique en partie le très bon état de cette carrière (peu de fissures, que ce soit au toit ou dans les piliers, liées à l'existence de vides).

La craie blanche est homogène dans toute la carrière, excepté à l'approche du contact Crétacé-Tertiaire, où elle devient moins poreuse sur une épaisseur de 6 m et prend une teinte jaunâtre sur les deux derniers mètres. La stratification est soulignée par des lits de rognons de silex. Le sommet de la nappe de la craie est visible au niveau inférieur de la carrière ; au moment de notre étude, il se trouvait à la cote + 26,5 m.



□ Figure 1

Position de la carrière des Brillants sous le versant et coupe équatoriale montrant l'évolution (fréquence et pendage) des discontinuités liées à l'incision de la vallée.

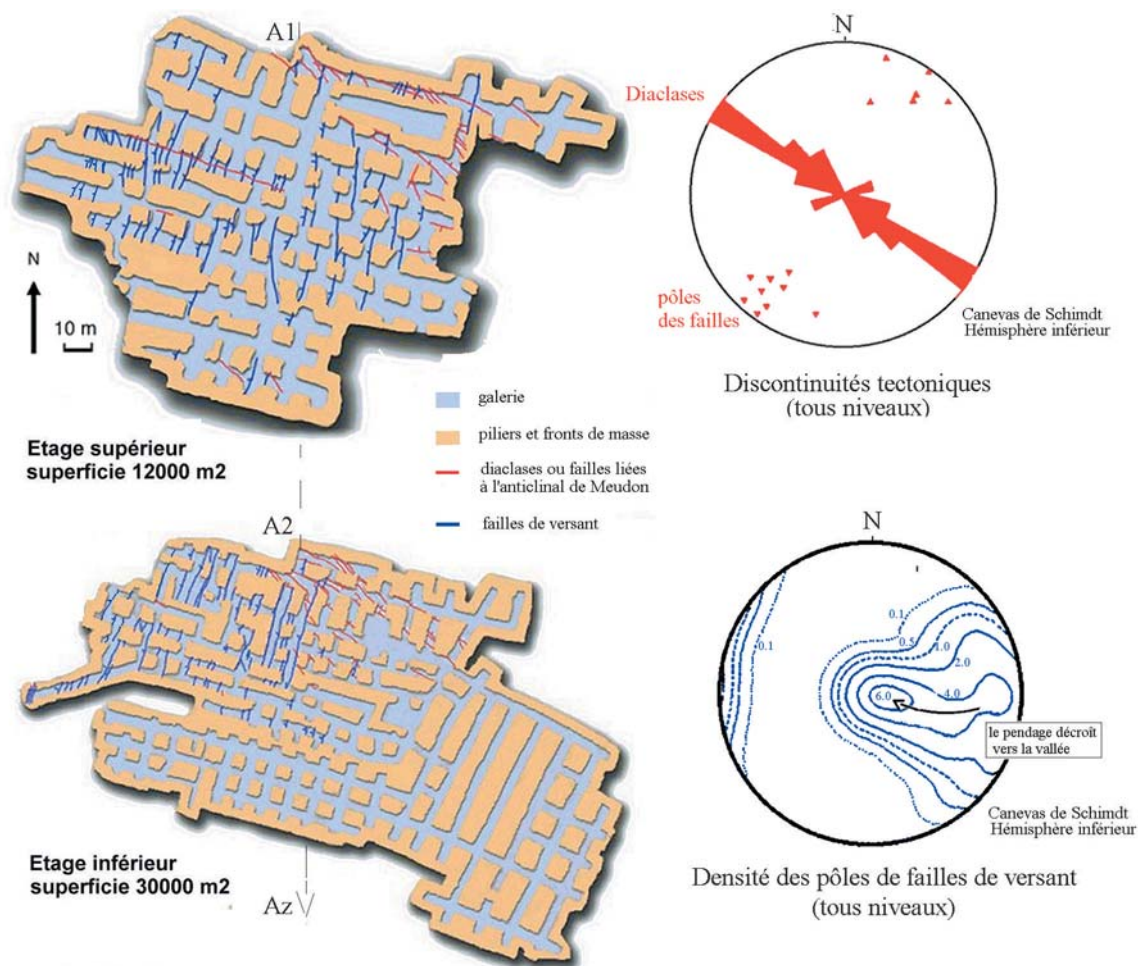
La craie est recouverte par les marnes et calcaires de Meudon, épais de 0,5 à 4,5 m, et séparés du calcaire grossier d'âge lutétien par l'argile plastique sparnacienne, imperméable, dont le toit se trouve à la cote + 65 m. Le calcaire grossier, épais de 12 à 16 m, très fracturé en bordure de versant, est aquifère à sa base. Un remblai d'une dizaine de mètres d'épaisseur coiffe le coteau. En pied de versant, des formations de pente plus ou moins glissées sont constituées d'un mélange hétérogène de sable calcaireux verdâtre contenant des fragments de calcaire lutétien et d'argile sparnacienne.

La carrière des Brillants est située immédiatement au nord de l'axe de l'anticlinal de Meudon, orienté N110E-120E : la cote du toit de la craie passe à la cote + 50 m à Meudon pour atteindre la cote - 80 m sous Montmartre, à une dizaine de kilomètres vers le nord-nord-est. La formation de cet anticlinal a débuté au Crétacé supérieur et s'est poursuivie pendant l'Éocène [1].

FRACTURATION DE LA CRAIE

Deux familles de fractures ont été observées dans la carrière des Brillants (Fig. 2) :

❶ Des failles et des diaclases karstifiées, de direction majeure N125E, sub-parallèles à l'axe de l'anticlinal, qui sont bien exprimées dans la partie nord de la carrière. Ces fractures sont fortement inclinées (70° à 80°) vers le nord-est ou le sud-ouest. Des stries sur des miroirs de failles, inclinées suivant la ligne de plus grande pente, indiquent un mouvement initial inverse à vergence nord, lié à la formation de l'anticlinal de Meudon, puis une reprise en jeu normal. À l'étage supérieur, le jeu normal affecte d'un ou deux centimètres un karst daté du Würm IV [2] et développé dans un accident



❑ **Figure 2**

Localisation et orientation des discontinuités antérieures au creusement de l'exploitation à l'étage inférieur et supérieur.

N125E. Ce mouvement récent, qui peut être attribué à la néotectonique post-pliocène, affecterait plus à l'est le collecteur de Charenton de direction nord-sud, régulièrement cassé au passage de la charnière du pli de l'anticlinal de Meudon (information du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien).

② Une seconde famille de fractures, non karstifiées, qui s'observe dans toute la carrière. Leur direction moyenne subméridienne est parallèle aux courbes de niveau. Sur les parois des galeries orientées N100E, les discontinuités présentent une allure sigmoïde (Fig. 3a) : elles comportent un segment médian incliné vers l'ouest (soit vers la vallée) et deux segments extrêmes se raccordant tangentiellement aux joints de stratification. De direction méridienne, elles montrent des ondulations de longueur d'onde centimétrique à plurimétrique. À l'échelle de la carrière, cet ensemble de fractures est caractérisé par (cf. Fig. 1) :

- une diminution de la fréquence des discontinuités vers l'intérieur du massif jusqu'à leur disparition à une centaine de mètres de l'entrée de la carrière ;
- le faible pendage de ces discontinuités à l'approche du versant, au voisinage de la surface de la nappe de la craie, soit à quelques mètres au-dessus du fond de la vallée située immédiatement à l'ouest ;
- l'augmentation du pendage des segments médians avec l'altitude ;
- une dichotomie des discontinuités à l'étage inférieur vers les étages supérieurs, l'ensemble formant des loupes imbriquées les unes dans les autres ;
- l'apparition de suintements à tous les étages, le long de certaines discontinuités, ce qui suggère qu'elles sont en relation avec la nappe du calcaire grossier.

Les observations suivantes permettent d'avancer que ces discontinuités ont eu un jeu normal de quelques centimètres (Fig. 3) :

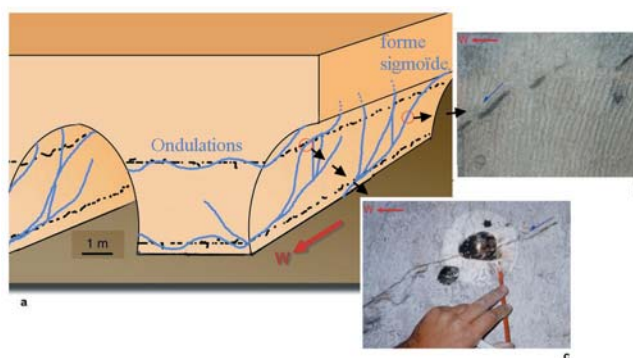
- les segments médians sont généralement ouverts, les ouvertures étant plus importantes à proximité du versant (Fig. 3b) ;
- le déplacement centimétrique d'un rognon de silex, placé sur le trajet d'une discontinuité et situé dans le compartiment supérieur, est attesté par un décollement entre le rognon et son empreinte, restée dans le compartiment inférieur (Fig. 3c) ;
- à l'étage inférieur de la carrière, près du versant, des stries suivant la ligne de plus grande pente ont été observées sur les compartiments supérieurs des discontinuités.

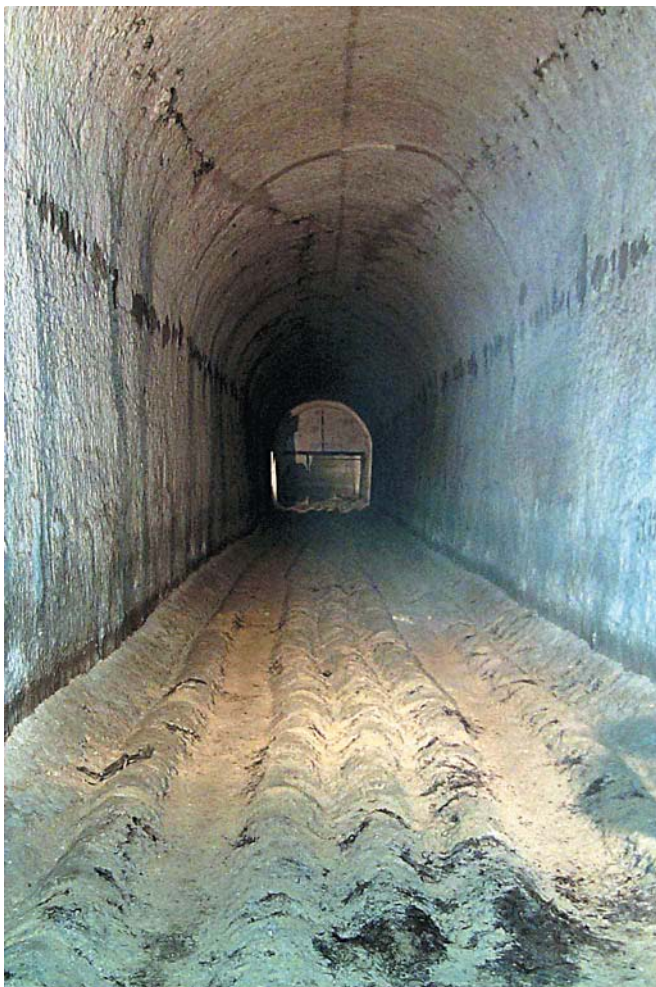
Par ailleurs, les discontinuités de cette famille se réfractent sur les fractures associées à l'anticlinal de Meudon, voire les décalent légèrement et leur sont donc postérieures. En revanche, elles n'ont pas rejoué depuis le creusement de la carrière et sont donc relativement récentes, mais très largement antérieures à la phase d'exploitation. Leur organisation, clairement contrôlée par la morphologie du versant dans lequel a été creusée la carrière, indique donc que leur formation est à mettre en relation avec l'incision de la vallée située immédiatement à l'ouest.

L'absence de fractures liées à l'exploitation (fractures mécaniques) s'explique par le fait que, globalement, le matériau est sain et les piliers suffisamment dimensionnés pour supporter les contraintes appliquées par le recouvrement. Il existe, dans la carrière, des méga-piliers ou étaux de masse, qui assurent une bonne stabilité d'ensemble (Fig. 4).

□ **Figure 3**

- Géométrie des discontinuités liées à l'incision de la vallée.
- a - Représentation en trois dimensions de ces discontinuités.
 - b - Ouverture des segments médians.
 - c - Déplacement centimétrique d'un rognon de silex.





□ **Figure 4**

Exemple de méga-piliers de chaque côté d'une galerie dans la carrière des Brillants (Hauts-de-Seine).

Remarque : dans certains quartiers, cette carrière a servi après 1925 de champignonnière, comme en témoignent les restes d'exploitation (lignes de bourrelets au sol).

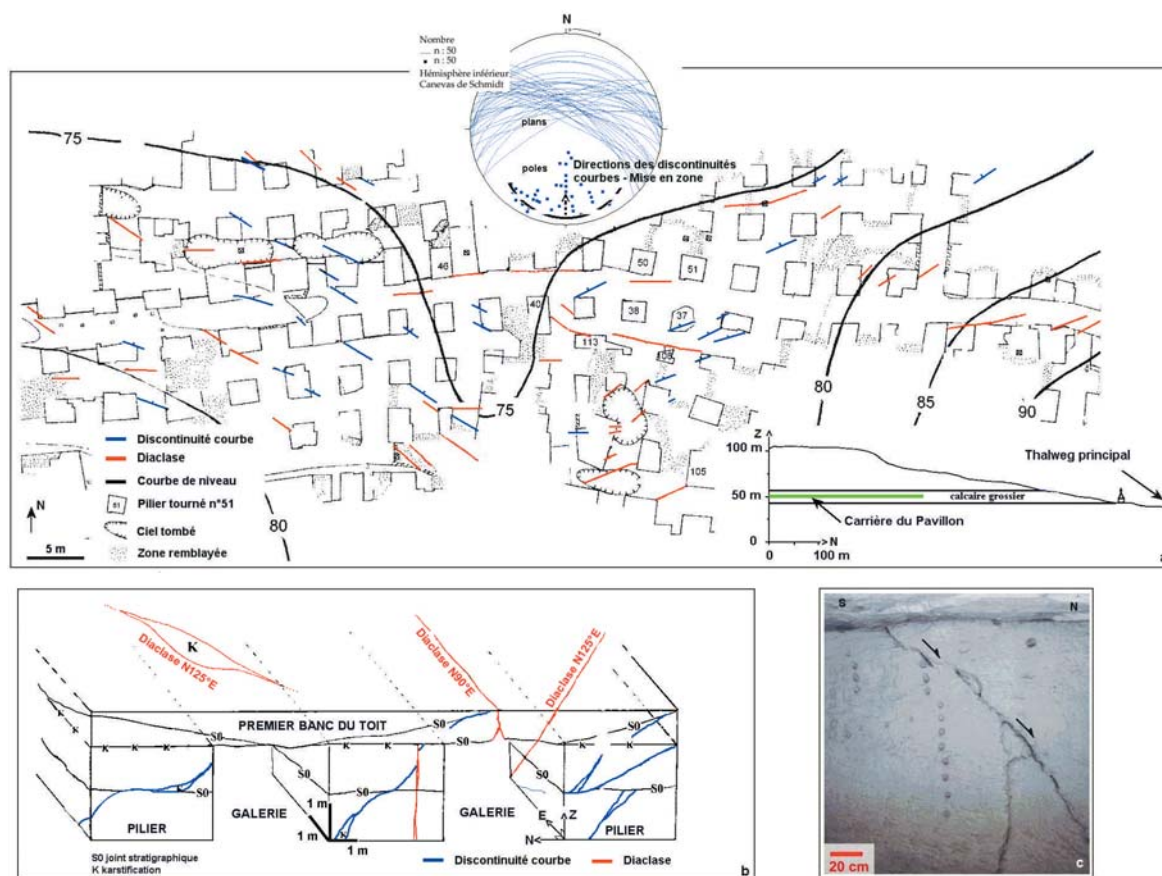
FAILLES DE VERSANT DANS DES EXPLOITATIONS DE CALCAIRE MASSIF

Les observations effectuées dans la craie de Meudon peuvent être comparées à celles effectuées dans des exploitations de calcaire massif (calcaire grossier lutétien), avec entrées à flanc de coteau, qui montrent la sollicitation des joints stratigraphiques dans la réponse du massif suite à l'incision de la vallée.

❶ Dans la carrière du Pavillon à Mériel (Val d'Oise), située à une cinquantaine de mètres sous un versant incliné vers le Nord (Fig. 5a), les masses non exploitées (piliers tournés, front de masse et toit) sont affectées par trois familles de diaclases d'ampleur décimétrique à pluri-décimétrique (Fig. 5b) et, à un degré moindre, par une famille de discontinuités à surfaces courbes, d'ampleur métrique à pluri-métrique, postérieures aux diaclases, et inclinées vers le thalweg principal situé plus au Nord (cf. Fig. 5b).

Ces discontinuités courbes comportent des segments plans aux extrémités, qui viennent tangenter les joints de stratification, et des segments médians, inclinés à plus de 45°. Le jeu normal de ces derniers, caractérisé par une ouverture centimétrique (Fig. 5c) lorsqu'ils buttent ou se réfractent sur un joint stratigraphique, témoigne d'un ancien mouvement en direction de la vallée et d'une sollicitation en cisaillement le long des joints stratigraphiques.

Ces discontinuités ont une direction qui oscille entre N150E et N40E avec une forte composante à N90E. Leur faisceau adopte approximativement la forme d'une rupture non circulaire, analogue à celle observée dans les glissements de terrain : elles délimitent un arc à concavité tournée vers le



□ **Figure 5**

Les discontinuités courbes de la carrière de calcaire grossier du Pavillon (Val d'Oise).

a - Localisation et direction des discontinuités courbes dans un quartier de la carrière (laboratoire souterrain).

b - Expression des discontinuités antérieures au creusement de l'exploitation : diclases et discontinuités courbes.

c - Jeu normal sur une discontinuité courbe traversant un pilier.

Nord (mise en zone, cf. Fig. 5 a) et s'alignent sur les courbes de niveau, montrant ainsi une relation claire avec la topographie, pourtant peu accentuée, du versant.

② Dans la carrière de Chars (Val d'Oise) exploitée par piliers tournés, et située au flanc d'un coteau incisé par la Viosne, des indices de mouvement banc sur banc, associés à des fractures largement ouvertes, de direction N30°E, témoignent d'un jeu consécutif à l'incision de la vallée de la Viosne, de direction N10°E dans la traversée de Chars.

Les plans de stratification étant fréquemment ondulés, les indices sont constitués, d'une part de l'ouverture de segments inclinés de 10 à 20° vers la vallée et, d'autre part, de la fermeture de segments inclinés vers le cœur du massif (Fig. 6). Les segments en compression possèdent des stries de direction N120°E dont les tectoglyphes indiquent un jeu inverse, c'est-à-dire en direction de la vallée. À l'arrière de ces indices de glissement apparaissent des fractures verticales, largement ouvertes (5 à 10 cm), traduisant la décompression du massif.

Dans ces deux cas, les joints stratigraphiques ont donc accompagné la fracturation liée à la décompression du massif et qui s'initie, soit à la faveur d'un joint de stratification (carrière du Pavillon), soit à la suite de mouvements bancs sur bancs (exemple de la carrière de Chars).

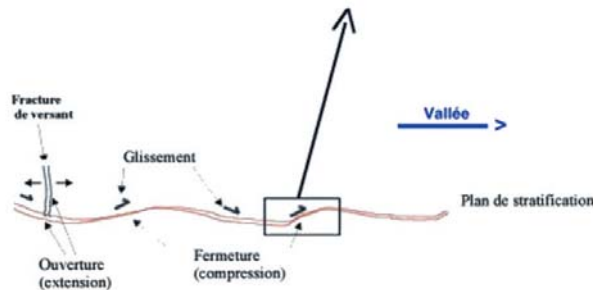
De même que pour la carrière de craie des Brillants, les déplacements observés vers la vallée restent d'importance limitée.

A contrario, à faible profondeur, il semble que les joints stratigraphiques soient peu sollicités dans la genèse de ces fractures, ainsi qu'en témoignent les observations faites dans la carrière Carrara à Poissy (Yvelines). Cette ancienne exploitation de calcaire grossier se situe à moins de 15 m de la surface sous un coteau faiblement incliné vers la Seine (3 m pour 100 m) et situé entre les cotes + 30 m



□ **Figure 6**

Observations le long d'un joint stratigraphique : fracturation de versant et mouvement banc sur banc (carrière de calcaire grossier de Chars (Val d'Oise)).



(niveau de la Seine) et + 62,5 m (crête du versant). Elle a été exploitée par galeries filantes puis par piliers tournés. Les masses non exploitées sont affectées par deux familles de discontinuités antérieures à l'exploitation :

- une famille de discontinuités tectoniques N125E, parallèles aux galeries filantes, à pendage subvertical, fermées et soulignées par des oxydes de fer ;
- une famille de discontinuités, postérieure à la fracturation tectonique, d'orientation N35E à N50E à pendage toujours redressé (80 à 70° NO) et d'ampleur pluri-décamétrique.

Ces dernières discontinuités montrent de forts indices de contrôle par la morphologie du versant :

- leur direction est parallèle aux courbes de niveau ;
- leur forme arquée près du versant (ondulation métrique) devient rectiligne du versant vers l'intérieur du massif ;
- comme dans la carrière de craie des Brillants, leur densité du versant vers l'intérieur du massif : une discontinuité tous les 30 cm à une discontinuité tous les 30 m en moins de 170 mètres ;
- près du versant, leur jeu normal vers la vallée de la Seine décale les joints stratigraphiques subhorizontaux d'au plus une dizaine de centimètres. L'amplitude de ce jeu normal diminue en direction de l'intérieur du massif.

GENÈSE DES FAILLES DE VERSANT

Creusement des vallées et fracturation de versants

L'abaissement du niveau de la mer consécutif aux glaciations a eu pour conséquence l'enfoncement des vallées au Quaternaire récent dans la plate-forme structurale du Bassin parisien [3]. Le travail intense de l'érosion s'est effectué au cours des cycles glaciaire/interglaciaire et combine deux types d'érosion distincts non synchrones, verticale et latérale. Lorsque le creusement a abouti à une pente suffisante de la vallée, la décompression lithostatique du massif a pu entraîner la fracturation des zones décomprimées proches du versant [4].

La fracturation d'un versant et son mouvement constituent donc une réponse mécanique à l'évolution dans le temps de la géométrie du massif et des contraintes qui s'y exercent. Elle peut cependant traduire une modification des caractéristiques des matériaux. Ainsi, plusieurs auteurs [5, 6] identifient une étape préliminaire où les déformations sont principalement dues au fluage et à la fatigue des matériaux, précédant l'étape critique de la rupture (rupture différée).

Caractéristiques de la craie blanche

Si l'on ne tient pas compte de la présence d'une stratification soulignée par des lits de silex, la craie de Meudon apparaît comme homogène d'un étage à l'autre de la carrière. Il s'agit d'une craie blanche mi-dure (biomicrite) dans la classification de Masson [7] dont les principales caractéristiques sont reportées dans le tableau I. Ce matériau possède une porosité importante (> 40 %) et une faible résistance à la traction en condition saturée (voisine de 0,2 MPa) qui s'explique par la faible cimentation des grains : le comportement de la craie blanche résulte de sa faible cohésion texturale et de ses modifications sous l'effet de la contrainte appliquée, de la vitesse de sollicitation et de l'eau [8]. L'expérience montre que la rupture de la craie est d'autant moins fragile que la roche est saturée et qu'elle est soumise à confinement [9]. À long terme, ses caractéristiques mécaniques sont approximativement diminuées de moitié [10] et l'existence d'une étape préliminaire de fluage, avant la rupture, entraîne une augmentation importante du coefficient de Poisson [11].

TABLEAU I
Caractéristiques mécaniques estimées pour la craie de Meudon

	E (GPa)	ν	R_c (MPa)	R_{c_w} (MPa)	R_t (MPa)	R_{t_w} (MPa)	C (MPa)	φ (°)
À court terme	2,8	0,15	8	2,5	0,9	0,2	1	30
À long terme	1,4	0,2 0,4 à 0,5*	4	1,25	0,4	0,1	< 0,5	30

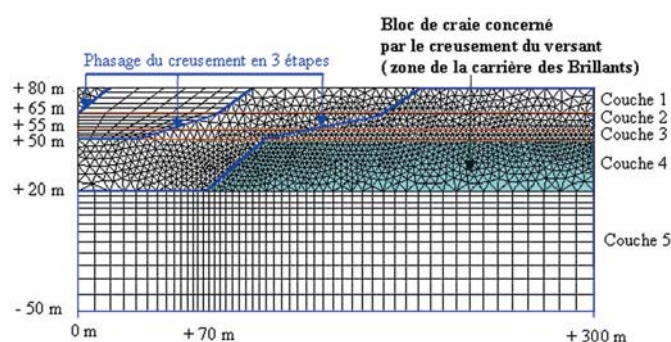
E : module d'élasticité (roche saturée) ; ν : coefficient de Poisson (roche saturée ; * valeur de ν après fluage) ; R_c : résistance à la compression (roche sèche) ; R_{c_w} : résistance à la compression (roche saturée) ; R_t : résistance à la traction (roche sèche) ; R_{t_w} : résistance à la traction (roche saturée) ; C : cohésion ; φ : angle de frottement.
Sources : essais LCPC [12], et données bibliographiques [7-11].

APPROCHE PAR MODÉLISATION DE LA FORMATION DES FAILLES DE VERSANT

L'introduction, dans un modèle numérique, de données concernant la géométrie et les propriétés estimées des différentes formations constituant un versant rend possible une évaluation de l'état de contrainte et de ses conséquences éventuelles sur la fracturation. Une comparaison avec les faits observés permet une discussion de la validité des données et des hypothèses proposées.

Un modèle mécanique continu est employé dans le but de retrouver l'état de contraintes à l'origine de la fracturation de la craie. La méthode aux éléments finis est appliquée au cas de la carrière des Brillants à l'aide du logiciel CESAR-LCPC [12]. Les calculs sont réalisés à l'aide de lois tridimensionnelles (contraintes principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) en déformation plane : on suppose la déformation perpendiculaire au plan du modèle égale à zéro. Ces deux conditions restreignent l'interprétation des résultats, mais permettent néanmoins une approche réaliste du problème. Le modèle comprend les principales couches du massif (Fig. 7).

□ **Figure 7**
Caractéristiques géométriques du modèle.
Les conditions aux limites sont : bords latéraux, déplacement horizontal U nul ; bord horizontal inférieur, déplacement vertical V nul.



Le plan du modèle correspond au plan de coupe de la figure 1, positionné sur la même figure. Le modèle est pris suffisamment grand pour s'affranchir des conditions aux limites qui imposent un déplacement horizontal nul sur les bords latéraux du modèle et un déplacement vertical nul sur le bord horizontal inférieur. L'état de contrainte dans le massif est évalué avant creusement (poids des terres), puis après creusement de la vallée. Ce creusement peut être effectué en une ou plusieurs étapes, la solution d'une étape devenant alors l'état initial du creusement suivant pour tenir compte d'une évolution progressive de la topographie. Le profil final du versant tracé dans le modèle correspond schématiquement au profil actuel.

Les roches sont considérées comme homogènes, isotropes, et élasto-plastiques pour tenir compte des déformations irréversibles qui peuvent apparaître à long terme. Leurs caractéristiques mécaniques sont par ailleurs celles de matériaux relativement dégradés, notamment pour l'argile et la craie, afin d'intégrer dans la mesure du possible leur réponse sur le long terme à l'évolution de la géométrie du massif et des contraintes exercées (Tableau II).

TABLEAU II
Caractéristiques mécaniques et critères de ruptures choisis pour la modélisation

Couche	Nature	Critère de rupture	E (GPa)	ν	R_{C_w} (MPa)	R_{t_w} (MPa)	C (MPa)	φ (°)
1	Calcaire	Parabolique	10	0,25	5	0,5		
2	Argile	Mohr-coulomb	1.10^{-4}	0,4			5.10^{-2}	30
3	Marno-calcaire	Parabolique	5	0,2	3	0,3		
4	Craie	Parabolique	1	0,2 à 0,5*	1	0,1		
5	Craie	Parabolique	1	0,2	3	0,1		

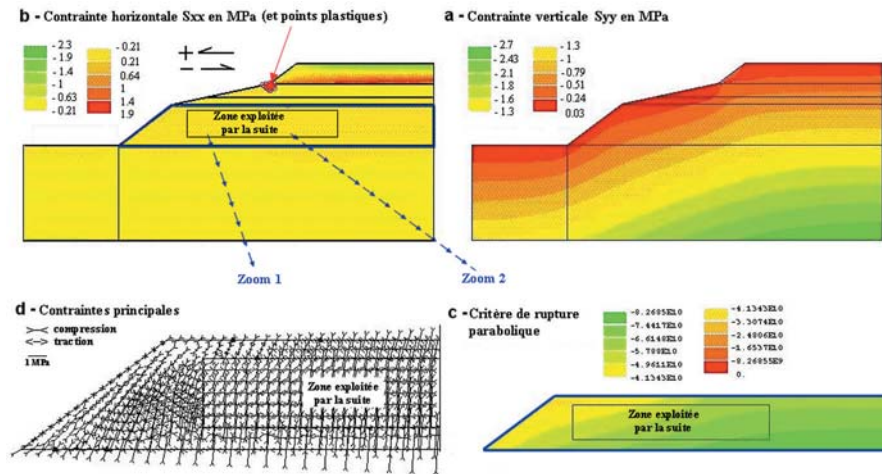
E : module d'élasticité (roche saturée) ; ν : coefficient de Poisson (roche saturée ; * valeur de ν après fluage) ; R_{C_w} : résistance à la compression (roche saturée) ; R_{t_w} : résistance à la traction (roche saturée) ; C : cohésion ; φ : angle de frottement.

Le critère de rupture choisi est le critère parabolique bien adapté aux roches [13]. Il prend en compte les valeurs des résistances en compression simple et en traction. Il est adopté pour l'ensemble des formations, à l'exception de l'argile plastique sparnacienne dont le comportement de type sol (au sens mécanique) nécessite l'utilisation du critère de Mohr-Coulomb (critère utilisant les valeurs de cohésion et d'angle de frottement).

❶ Dans une première simulation (Fig. 8), le coefficient de Poisson adopté pour la craie est égal à 0,2, ce qui suppose l'absence d'une étape de fluage de cette roche avant sa fracturation. Les valeurs de la contrainte verticale correspondent aux valeurs estimées (Fig. 8a). Les points plastiques sont localisés en front de versant dans l'argile (Fig. 8b). Des contraintes de traction horizontale apparaissent à la base du calcaire grossier mais pas dans le massif de craie (cf. Fig. 8b). Le seuil de rupture n'est par ailleurs jamais atteint (valeur nulle du critère parabolique) dans ce massif (Fig. 8c) où n'apparaissent que des contraintes en compression (Fig. 8d). L'établissement du profil actuel du versant en une ou trois étapes a peu d'influence sur les résultats de la modélisation.

❷ Dans une seconde simulation (Fig. 9), le coefficient de Poisson adopté pour la craie est égal à 0,45 pour tenir compte des conséquences d'une éventuelle étape préliminaire de fluage de cette roche. Dans ces conditions, des points plastiques apparaissent dans la craie en pied de versant (Fig. 9a), là où les contraintes de traction horizontale sont les plus fortes ($> 0,4$ MPa, Fig. 9b, 9c) et le critère de rupture parabolique dépassé (Fig. 9d). Ce dernier est presque nul au toit de la carrière dans sa partie la plus proche du versant (traction horizontale $> 0,2$ MPa), mais sa répartition dans le massif crayeux n'explique pas la fracturation observée dans la zone exploitée.

Cette modélisation rend difficilement compte de la fracturation de la craie liée à l'incision de la vallée, même en supposant un fluage de la craie. Il faudrait dégrader encore les caractéristiques de la craie pour obtenir une fracturation importante (assimilée à une plasticité dans notre modèle) du massif dans la zone observée (zone d'exploitation), ce qui semble irréaliste. Cette modélisation considère le profil topographique actuel, modifié par une accumulation de formations de pente en pied de versant et par des actions anthropiques importantes : peut-être dans l'histoire du creusement



□ **Figure 8**

Première simulation avec un coefficient de Poisson de la craie estimé à 0,2.

Remarque : le critère de rupture parabolique s'écrit en fonction des invariants du tenseur des contraintes [13] :

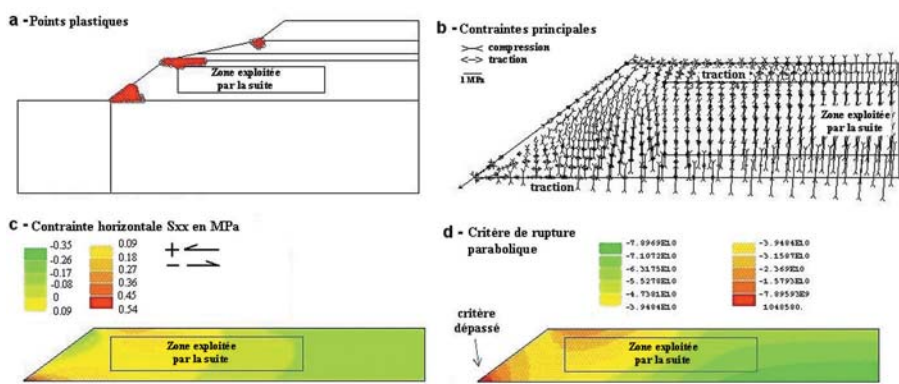
$$J_2 - [(R_c - R_t)/3] \cdot I_1 + [R_c \cdot R_t/3] = 0$$

avec :

$$J_2 = (1/6) \cdot [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2];$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3;$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: contraintes principales. ; R_c : résistance en compression simple du matériau ; R_t : résistance en traction du matériau.



□ **Figure 9**

Seconde simulation avec un coefficient de Poisson de la craie estimé à 0,45.

Remarque : le critère de rupture parabolique est dépassé (valeur supérieure ou égale à zéro) en pied de versant et presque dépassé au toit du bloc de craie concerné par le creusement de l'exploitation (près du versant).

de la vallée, le versant a-t-il été plus raide à une certaine époque ? Des incertitudes demeurent également sur le niveau de la nappe de la craie au moment de la fracturation.

Par ailleurs, cette modélisation ne tient pas compte des variations d'épaisseur des couches surmontant la craie (seules des épaisseurs moyennes sont considérées), ni surtout de la présence de joints qui influe clairement sur la fracturation, comme cela a été observé dans les carrières de calcaires grossiers.

CONCLUSIONS

Les observations effectuées dans une carrière de craie creusée à flanc de coteau conduisent à la mise en évidence d'un ensemble de fractures résultant de l'adaptation du massif à la modification de son

état de contrainte, consécutive à l'incision de la vallée. Les principales caractéristiques de cette famille de fractures sont les suivantes :

- le domaine fracturé s'étend horizontalement dans le massif crayeux au-delà d'une centaine de mètres ;
- les fractures, plus abondantes à proximité du versant, délimitent un ensemble de loupes imbriquées les unes dans les autres ;
- les mouvements, constatés le long des fractures et d'importance limitée (le centimètre), indiquent un déplacement des compartiments supérieurs du versant vers la vallée, soit un jeu normal.

Des observations identiques effectuées dans des exploitations souterraines de calcaire massif montrent que :

- le pendage augmente avec l'altitude ;
- la direction des discontinuités est toujours subparallèle aux courbes de niveau.

Une modélisation numérique par milieu continu élasto-plastique, comportant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices en raison du manque de données sur l'histoire du creusement de la vallée, a montré qu'il est difficile d'expliquer la fracturation de la craie liée à l'incision de la vallée avec le profil topographique actuel et avec des caractéristiques mécaniques considérées comme réalistes, même en tenant compte d'une éventuelle étape de fluage avant fracturation.

Le rôle de la stratification dans la genèse de ces discontinuités reste donc à préciser. Dans les exploitations souterraines de calcaire massif où ce type de fracturation existe, les joints stratigraphiques, à une profondeur conséquente, semblent avoir facilité le développement des fractures, soit par des mouvements bancs sur bancs près du versant (cas de la carrière de Chars), soit par leur simple présence (cas de la carrière du Pavillon). En revanche, à faible profondeur, les discontinuités, ici subverticales, décalent en jeu normal les joints stratigraphiques subhorizontaux (cas de la carrière Carrara).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Jean-Luc Maire de l'Inspection générale des carrières de Versailles pour leur avoir permis d'accéder aux carrières de Chars (Val d'Oise) et Carrara de Poissy (Yvelines).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GUILLOCHEAU F., ROBIN C., ALLEMAND P., BOURQUIN S., BRAULT N., DROMART G., FRIEDENBERG R., GARCIA J.-P., GAUMET F., GROSDOY B., HANOT F., LE STRAT P., METTRAUX M., NALPAZ T., PRIJAC C., RIGOLLET C., SERRANO O., GRANDJEAN G., Évolution géodynamique du Bassin de Paris : apport d'une base de données stratigraphiques 3D, *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris.*, **36 (4)**, 1999, pp. 3-35.
- [2] GELY J.-P., LORENZ CL., OBERT D., Tectonique synsédimentaire. Tectonique cassante et karst dans l'anticlinal de Meudon, *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris.*, **27(4)**, 1990, pp. 37-43.
- [3] POMEROL C., *Découverte géologique de Paris et de l'Ile-de-France*, collection Jean Ricour, Orléans, Édition BRGM, 1988, 75 pages.
- [4] AVIAS J.-V., *Sur la méthodologie d'étude de la décompression superficielle, morphologique et tectonique des milieux fissurés*, Document BRGM, **45**, 1982, pp. 47-51.
- [5] LEROUEIL S., Natural slopes and cuts : movement and failure mechanisms, *Géotechnique*, **51(3)**, 2001, pp. 197-243.
- [6] VAUNAT J., LEROUEIL S., FAURE R., Slope movements : a geotechnical perspective, *Proc. 7th Cong. Int. Assoc. Engng. Geol.*, Lisbonne, 1994, pp. 1637-1646.
- [7] MASSON M., Pétrophysique de la craie : choix des types de craie, caractéristiques physiques et mécaniques de différents types de craie, la craie dans son gisement, craies atypiques et proposition d'une méthode d'étude géotechnique d'un massif crayeux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, spécial V*, 1973, pp. 23-47.
- [8] HAZEBROUCK R., DUTHOIT B., Particularités du comportement mécanique des craies : rôle de l'eau ; rupture sous contrainte hydrostatique, *Rev. franç. Géotec.*, **8**, 1979, pp. 45-50.
- [9] DESSENNE J.-L., *Étude rhéologique et géotechnique de la craie*, Thèse de docteur-ingénieur de l'Université de Grenoble, 1971, 218 pages.

- [10] GHOREYCHI M., *Stabilité d'exploitations partielles avec piliers en état de post-rupture, application au cas des carrières souterraines de craie*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, **1983**, 236 pages.
- [11] MORLIER P., Le fluage des roches, *Ann. Ind. Tech. Bat. Tr. Pub.*, **217**, **1966**, pp. 90-112.
- [12] MOIRIAT D., *Évolution des désordres dans les carrières souterraines abandonnées : (Observations lithologiques et structurales, Instrumentation in situ, Caractérisation des roches rencontrées et modélisation)*, Thèse de l'Université Paris XI, bourse EPST du LCPC, décembre **2001**, 396 pages.
- [13] MESTAT Ph., *Lois de comportement des géomatériaux et modélisation par la méthode des éléments finis*, Études et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, Série géotechnique, **GT 52**, LCPC, **1993**, 193 pages.