

ANALYSE ET SIMULATION D'UNE SURFACE DE FRACTURE ROCHEUSE

S. GENTIER*, J.-P. CHILÈS*, J. RISS**

*** BRGM**

B.P. 60069 - 45060 ORLÉANS Cedex 02

**** Université de Bordeaux I**

Avenue des Facultés

33405 TALENCE Cedex

RÉSUMÉ. Une surface de fracture rocheuse naturelle (granite de Guéret, France) est échantillonnée le long de deux ensembles de cinq profils orthogonaux entre eux. Les hauteurs mesurées constituent autant de fonctions topographiques $Z = f(x, y)$ qu'il y a de profils. Ces données font l'objet d'une analyse géostatistique : analyse variographique et simulation de surface. L'analyse variographique porte sur les hauteurs z et sur les dérivées premières Z' des fonctions f . Un modèle de variogramme des hauteurs, somme de deux modèles cubiques, est déduit de l'ajustement simultané et non indépendant des variogrammes des hauteurs et des dérivées premières. Pour la fracture étudiée, une anisotropie zonale est mise en évidence. La simulation présentée est déduite de ce modèle de variogramme ; elle est jugée réaliste en raison de la prise en compte de la régionalisation non seulement des hauteurs mais également des dérivées premières.

ABSTRAT. A natural rock fracture surface (granite de Guéret, France) is sampled along two mutually orthogonal set of five profiles. The measured heights are as many topographical functions $Z = f(x, y)$ as there are profiles. The geostatistical analysis is concerned both with the heights and with the first derivatives Z' of the profiles. Theoretical variograms for the heights z are fitted to the average experimental one taking into account structural informations derived not only from heights but also from the first derivatives. Consequently the theoretical variogram of z is the sum of two cubical variograms with isotropic ranges but anisotropic variances. These theoretical variograms are basic tools for simulating surface of the fracture.

TABLE DES MATIÈRES

1 - INTRODUCTION

2 - LA FRACTURE ROCHEUSE

3 - ANALYSE GÉOSTATISTIQUE DES PROFILS

4 - AJUSTEMENT DES VARIOGRAMMES EXPÉRIMENTAUX

5 - KRIGEAGE ET SIMULATION DE LA SURFACE DE FRACTURE

6 - CONCLUSION

1. INTRODUCTION

Le comportement mécanique et hydraulique d'un massif rocheux dépend des sollicitations auxquelles il est soumis, ainsi que de ses caractéristiques intrinsèques c'est-à-dire de ses propriétés physiques, pétrographiques (minéralogie, texture, nature des joints de grains, altération...) et structurales.

Les caractéristiques structurales d'un massif comprennent d'une part la distribution spatiale des différentes familles de joints ou de failles et d'autre part leurs propriétés morphologiques. On trouvera dans Chilès (1988), une présentation générale sur l'analyse géostatistique de la distribution spatiale des discontinuités d'un massif rocheux. On s'attache ici à l'étude morphologique de la surface d'une fracture

En effet, si le nombre, l'extension, la nature connectée ou non, la position et l'orientation des fractures d'un massif sont des caractéristiques essentielles dans l'analyse et la simulation du comportement hydraulique et mécanique d'un massif fracturé, la morphologie des épontes des fractures et de leur vide fissural s'avère être également déterminante : la morphologie des discontinuités subordonne tout à la fois leur aptitude à résister à un cisaillement et à modifier l'écoulement des fluides en fonction du régime de contraintes.

On s'intéresse ici à l'analyse géostatistique d'une variable prise comme variable régionalisée : l'élévation ou la hauteur z d'une surface de fracture mesurée au-dessus d'un plan de référence OXY. La fonction topographique $z = f(x, y)$ et les fonctions gradient :

$$Z'_x = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \quad Z'_y = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$$

sont analysées simultanément afin de bien modéliser les variations d'orientation de la surface. Ces variations liées à la présence d'aspérités sur la surface de fracture conditionnent en particulier le comportement en cisaillement de la fracture.



Figure 1 - La surface de fracture

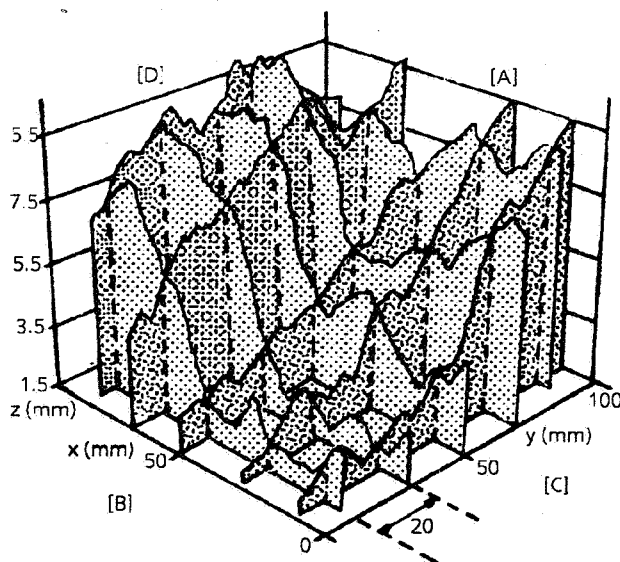


Figure 2 - Schéma d'échantillonnage

2. LA FRACTURE ROCHEUSE

Une fracture est une discontinuité dans un massif rocheux, ici le massif du granite de Guéret (France). A l'échelle d'un affleurement (ou d'une carrière) une fracture apparaît comme l'ensemble de deux surfaces gauches (les épontes) séparées par un vide fissural rempli ou non de matière minérale. La fracture étudiée est sans remplissage et naturelle. A cette échelle, la trace de la fracture dans le massif est généralement assimilable à celle d'un plan appelé plan moyen. L'échantillonnage de la fracture est réalisé au moyen d'éprouvettes cylindriques carottées perpendiculairement au plan moyen de la fracture (Gentier, 1987). L'étude géostatistique présentée porte sur une éprouvette particulière et plus précisément sur l'une de ses épontes (fig. 1) ; l'étude statistique et simultanée des deux épontes est présentée par ailleurs (Riss et Gentier ; Gentier et Riss, 1990), l'analyse du vide fissural par moulage est présentée dans Gentier et Billaux (1989).

La morphologie de la surface de fracture est mémorisée sous la forme des valeurs numériques des hauteurs $Z = f(x,y)$ de la surface au-dessus d'un plan arbitraire OXY parallèle au plan moyen ; les hauteurs sont mesurées le long de "profils" au moyen d'un rugosimètre de laboratoire. Deux familles de 5 profils parallèles et équidistants sont définies. Dans chaque direction, l'échantillonnage des profils est fait à pas régulier (fig. 2) ; les axes OX et OY du plan de référence OXY sont respectivement choisis parallèles aux directions CD et AB.

L'équidistance entre profils est égale à 20 mm, l'équidistance entre points échantillonnés $\Delta X = \Delta Y$ est égale à 0,5 mm. Ce mode d'échantillonnage, établi pour une éprouvette cylindrique de rayon 12 cm conduit à un ensemble de 964 points échantillonnés dans la direction AB et 968 dans la direction CD soit un total de 1932 valeurs d'élévation. Les dix profils représentent donc dix fonctions topographiques discrètes $Z = f(x,y)$ pour chacune desquelles l'analyse variographique des hauteurs z_i et de leurs dérivées premières est présentée ci-dessous.

3. ANALYSE VARIOGRAPHIQUE DES PROFILS

L'étude variographique est réalisée d'une part sur les hauteurs des profils et d'autre part sur la dérivée première de ces mêmes profils. Les figures 3a et 3e présentent deux exemples de profils.

Les variogrammes des hauteurs sont calculés tout d'abord (fig. 3b et 3f). Certains de ces variogrammes sont caractérisés par la présence d'une dérive (fig. 3f). Celle-ci est due à l'existence de structures dont la taille est grande par rapport à celle de l'échantillon étudié, masquant ainsi les structures de plus petite taille ; dans ce cas la surface de fracture s'écarte localement du plan moyen. L'étude est donc poursuivie sur les variogrammes des résidus (fig. 3c et 3g). Pour chacune des directions d'enregistrement AB et CD, on calcule le variogramme moyen des résidus (fig. 4a et 4b).

Les comportements à l'origine des deux variogrammes sont semblables et traduisent une variable continue et même dérivable (comportement parabolique).

Le variogramme de la direction AB est caractérisé par une portée de 20 mm et une variance de $0,88 \text{ mm}^2$. Celui de la direction CD est caractérisé par une portée de 25 mm et une variance de 2 mm^2 . Si les portées sont d'ordre équivalent, les variances sont quant à elles différentes (facteur 2) et traduisent une anisotropie zonale.

Des exemples de variogrammes de la dérivée des profils sont présentés figures 3d et 3h. D'une manière générale ils sont caractérisés par une portée très faible de l'ordre de 3 à 5 mm et le raccordement au palier est souligné pour certains par un pic. Au-delà de ce pic, il existe souvent une courbure globale concave entre 10 mm et 35 mm. Ceci se retrouve sur les variogrammes moyens directionnels à l'exception du pic (fig. 4c et 4d).

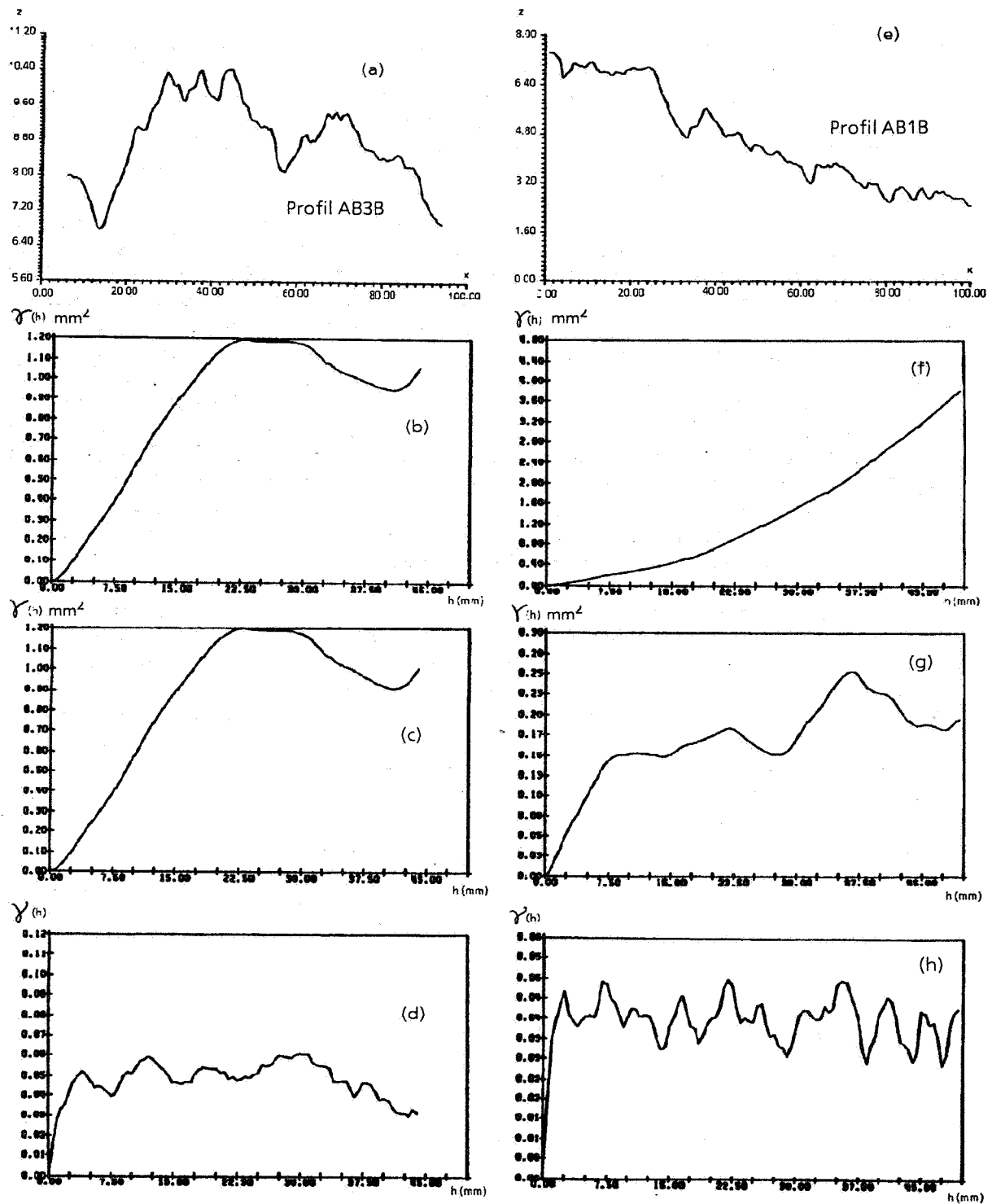


Figure 3- a, b, c, d : un profil sans dérive, le variogramme $\gamma(h)$ des hauteurs, celui des résidus et le variogramme des dérivées. e, f, g, h : idem pour un profil avec dérive

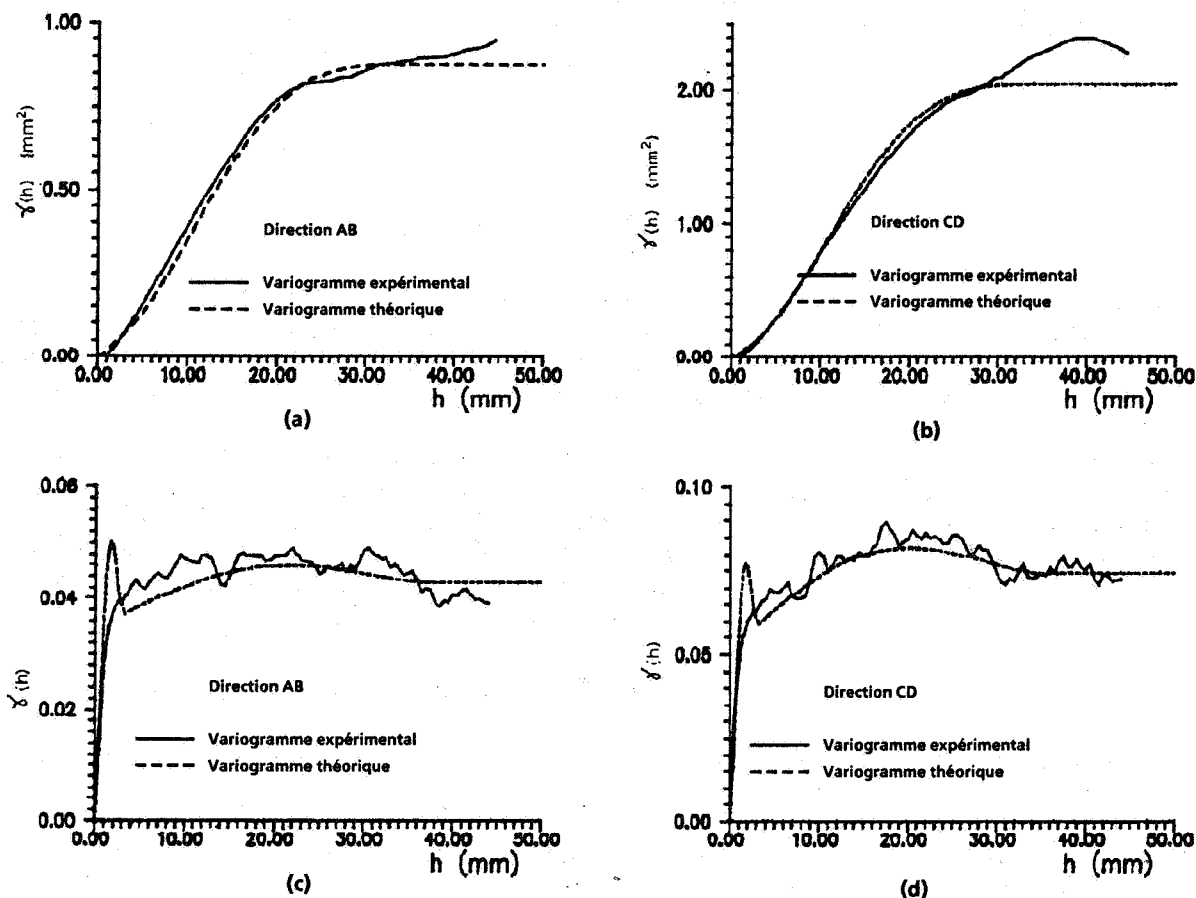


Figure 4 - Les variogrammes moyens et leurs ajustements pour chacune des directions AB et CD

4. AJUSTEMENT DES VARIOGRAMMES EXPÉRIMENTAUX

Dans des études antérieures (Gentier, 1987), des ajustements à des variogrammes théoriques sont réalisés à partir des variogrammes des hauteurs à des fins de krigeage. Pour ce faire les variogrammes expérimentaux sont ajustés à l'aide d'un variogramme sphérique de portée 25 mm et de palier 1,2 mm². Le choix de ce modèle est une simplification délibérée. En effet, il présente un comportement à l'origine qui ne reflète pas le comportement à l'origine des variogrammes des profils. Le modèle sphérique permet toutefois un ajustement acceptable si on ne se préoccupe pas de la variabilité à petite échelle. Un exemple de krigeage ainsi obtenu est présenté figure 5.

Pour les besoins actuels, en l'occurrence la modélisation du comportement en cisaillement des joints rocheux, le paramètre essentiel est l'inclinaison de chaque facette de la surface de fracture. Il doit donc être pris en considération pour la simulation des surfaces de fracture. L'ajustement des variogrammes expérimentaux des hauteurs doit donc se faire en tenant compte du variogramme de la dérivée des profils. Le choix d'un modèle de variogramme cohérent avec les informations structurales contenues dans les fonctions Z et Z' s'impose de lui-même.

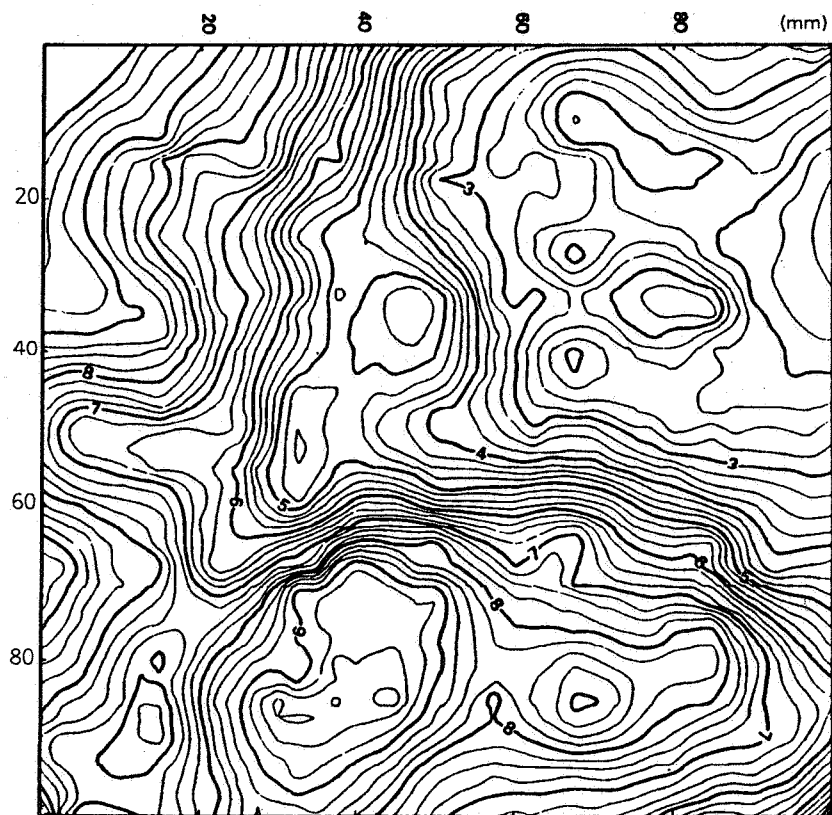


Figure 5 - Exemple de krigeage de la surface de fracture présentée figure 2 fondé sur un modèle de variogramme sphérique isotrope

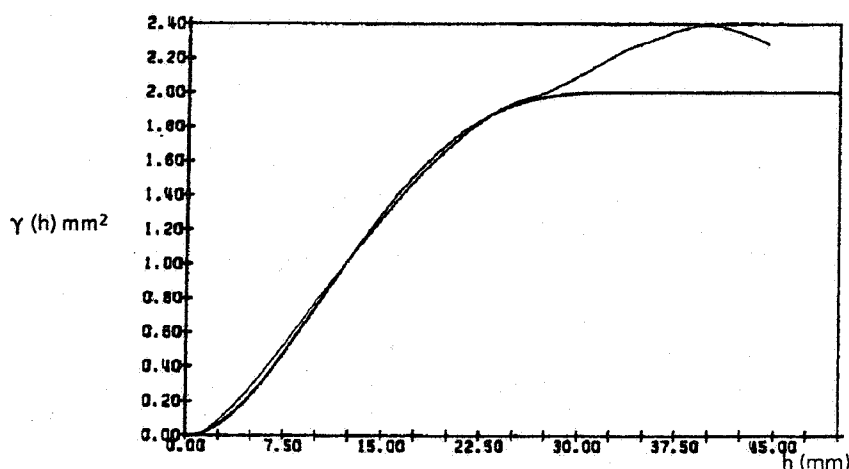
Le variogramme de la fonction $Z(s)$ (représentant le profil le long de l'abscisse curviligne s) étant noté $\gamma(h)$, le variogramme de la dérivée :

$$Z'(s) = \frac{Z(s + \varepsilon) - Z(s)}{\varepsilon} \quad \text{est} \quad \frac{1}{\varepsilon^2} \left[\gamma(h) + \gamma(\varepsilon) - \frac{1}{2} \gamma(h + \varepsilon) - \frac{1}{2} \gamma(h - \varepsilon) \right]$$

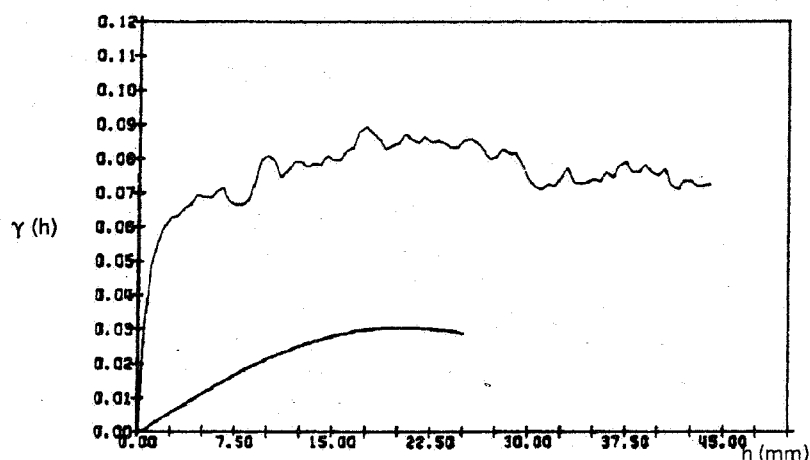
Pour modéliser correctement le comportement à l'origine du variogramme des hauteurs, l'ajustement des variogrammes expérimentaux a été repris avec un modèle cubique dont la covariance est donnée par :

$$\text{Cov}(h) = c \left[1 - 7 \frac{h^2}{b^4} + \frac{35 h^3}{b^3} - \frac{7}{2} \frac{h^5}{b^5} + \frac{3}{4} \frac{h^7}{b^7} \right] \quad \text{pour } h \leq b$$

où b est la portée et c le palier.



a - Ajustement du variogramme des hauteurs sans tenir compte des dérivées premières



b - Variogramme expérimental et variogramme calculé des dérivées premières

Figure 6 - Comparaison entre les variogrammes expérimentaux des hauteurs et des dérivées premières, et les variogrammes théoriques calculés à partir d'un modèle cubique (direction CD)

Dans la direction CD, on peut obtenir un ajustement convenable du variogramme des hauteurs à l'aide d'un seul modèle cubique de portée 35 mm et de palier 2 mm² (fig. 6a). Mais ce modèle ne permet pas du tout de rendre compte du variogramme des dérivées (fig. 6b).

Pour ajuster au mieux ces deux variogrammes il faut faire intervenir deux structures cubiques, de portées respectives 3 mm et 35 mm et de paliers 0,04 mm² et 2,2 mm² (fig. 4b et 4d).

Pour la direction d'enregistrement AB, l'ajustement du variogramme moyen est réalisé comme pour la direction CD par la somme de deux variogrammes cubiques dont les caractéristiques sont respectivement 3 mm et 35 mm de portée et 0,028 mm² et 0,85 mm² de palier (fig. 4a et 4c).

Les portées sont donc les mêmes dans les deux directions, mais les paliers diffèrent. Pour obtenir un modèle 2D, on a recours à une anisotropie zonale : le variogramme est la somme d'un modèle isotrope identique à celui de la direction AB, et d'un modèle complémentaire qui ne dépend que de la composante de h selon la direction CD :

$$\gamma(h_x, h_y) = \gamma_1(\sqrt{h_x^2 + h_y^2}) + \gamma_2(h_x)$$

Il subsiste cependant une légère différence entre les variogrammes théoriques de la dérivée et les variogrammes expérimentaux. Le pic du variogramme théorique correspondant à la première structure n'existe pas sur les variogrammes moyens. Il apparaît cependant sur certains variogrammes de profils. Le fait de moyenner les variogrammes de plusieurs profils le fait disparaître, car la portée varie plus ou moins d'un profil à l'autre.

5. KRIGEAGE ET SIMULATION DE LA SURFACE DE FRACTURE

La figure 7 présente la surface krigée à partir du nouvel ajustement de variogramme. Elle ne présente pas de grosses variations par rapport à la figure 4. Pour prendre en compte les fluctuations locales qui ne peuvent pas être restituées par le krigeage, nous avons réalisé une simulation conditionnelle. Le résultat de celle-ci est présenté figure 8. Elle est basée sur le modèle présenté précédemment (somme de deux variogrammes cubiques et anisotropie zonale). La méthode de simulation employée est la dilution de germes poissonniens par des sphères. Cette simulation présente plus de détails que la carte krigée, mais n'en diffère pas énormément. L'échantillonnage de la fracture par une dizaine de profils donne donc une bonne image de la surface. L'intérêt d'une simulation est plus net dans le cas d'un échantillonnage moins dense.

6. CONCLUSION

L'étude géostatistique des surfaces de fracture permet, quand elle est purement descriptive, de comparer et de classer les différents types de fracture existants. Les simulations de surface qui sont des images possibles de la fracture étudiée constituent des éléments de base pour l'étude de leur comportement hydromécanique. L'organisation du vide fissural qui existe entre les deux épontes est fonction de leurs morphologies respectives. Pour un grand nombre de fractures rocheuses, ces deux épontes présentent des morphologies équivalentes. Dans ce cas, le vide fissural peut se déduire de la morphologie d'une des deux surfaces, la morphologie de la seconde résulte de celle de la première affectée d'un vecteur de translation (directionnel, aléatoire,...). Les surfaces de fracture simulées peuvent donc être utilisées pour étudier le vide fissural. En jouant sur le vecteur translation, on reproduit l'évolution des vides lorsque la fracture est soumise à un cisaillement. Connaissant le vide fissural et son évolution, des simulations d'écoulement des fluides pourront être envisagées. De plus, l'étude du comportement mécanique d'une fracture à proprement parler nécessite de plus en plus une description fine de sa morphologie, et l'obtention de surfaces simulées réalistes permet d'espérer une meilleure compréhension du phénomène tout en limitant le nombre d'essais en laboratoire.

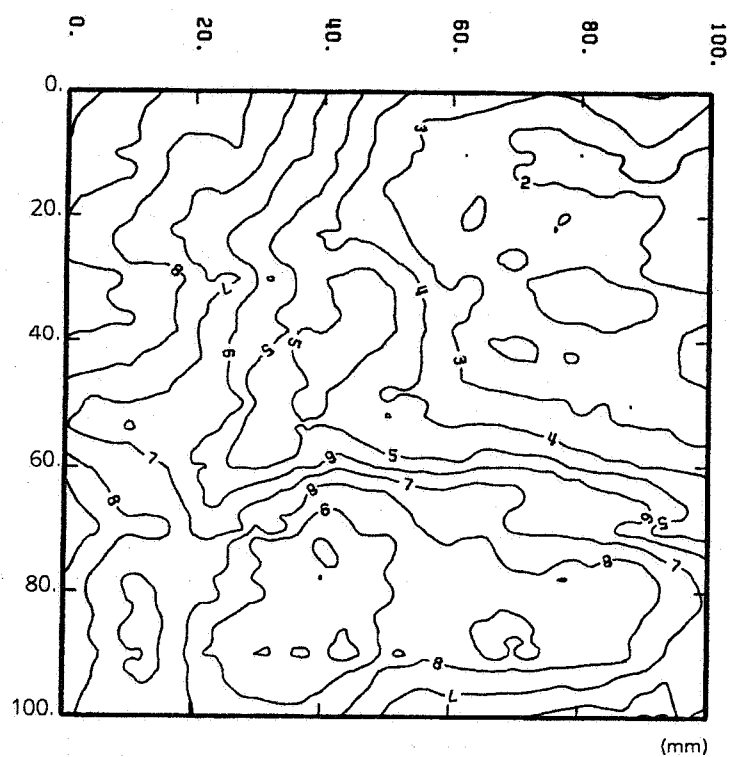


Figure 7 - Krigeage de la surface de fracture

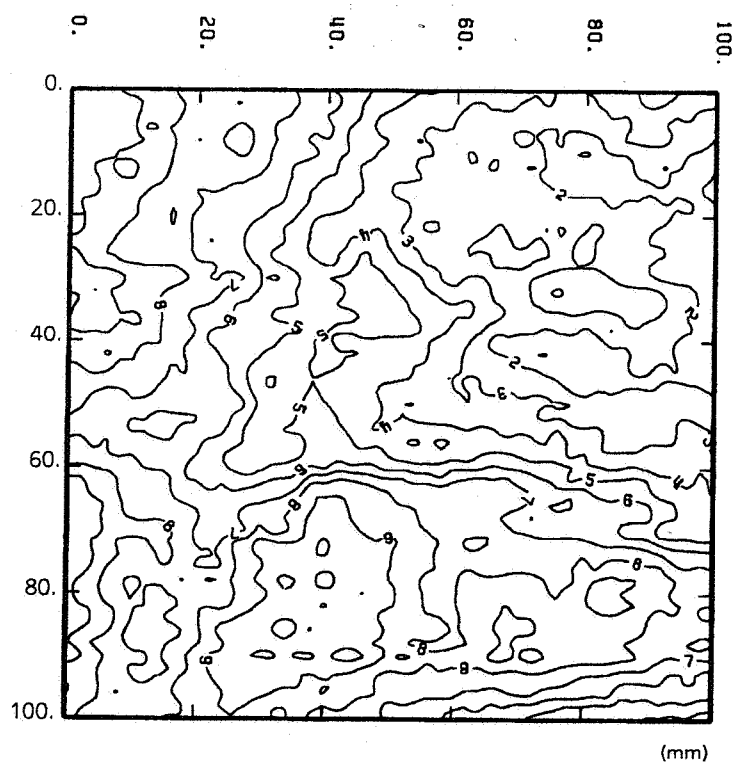


Figure 8 - Simulation de la surface de fracture

BIBLIOGRAPHIE

Billaux D., Gentier S. (1990) - Numerical and laboratory studies of flow in a fracture. Rock joints, Loën 4-6 juin 1991. Ed. N. Barton, O. Stephansson, Balkema, p. 369-373.

Chauvet P., Pailleux J., Chilès J.-P. (1976) - Analyse objective des champs météorologiques par cokrigeage. Sciences et techniques, p. 37-54.

Chilès J.-P. (1988) - Modélisation géostatistique de réseaux de fractures. 3ème congrès intern. de géostatistique, Avignon, 5-9 Sept. 1988.

Gentier S. (1987) - Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture dans un granite sous contrainte normale. Documents du BRGM, Orléans, vol. 134, 597 p.

Gentier S., Riss J. (1990) - Quantitative description and modelling of joints morphology. Rock joints, Loën, 4-6 juin 1991. Ed. N. Barton, O. Stephansson, Balkema, p. 375-382.

Riss J., Gentier S. (1990) - Angularity of a natural rock fracture. Mechanics of jointed and faulted rock, Vienne, 18-20 avril 1990. Ed. H.P. Rossmanith, Balkema, p. 399-406.