

Relations entre les circulations des fluides et l'ouverture des fractures

Philippe Loiseau *

Mots-clés : Variogramme, Fracture ouverte, Sondage, Extension tectonique, Perméabilité, Puy-de-Dôme (Chassolle).

Résumé

La circulation des fluides dans les roches cristallines a lieu préférentiellement dans les plans de fractures et plus particulièrement dans les zones d'intersections. La composante de débit dépend de l'ouverture initiale des fractures. Cette étude utilise les données du forage profond de Chassolle (Cézallier, France). Les résultats de l'analyse variographique et des histogrammes de fréquences pour les ouvertures supérieures à 1 centimètre sont examinés. Certaines différences sont évidentes, et nous permettent de diviser les familles de fracture en trois groupes. La direction et le pendage des familles directionnelles sont en relation directe avec le tenseur des contraintes et induiront quatre types de déplacement. Utilisant les statistiques et la géostatistique, la dernière phase tectonique majeure peut être déterminée, ainsi que les familles de fractures ayant le plus haut degré de perméabilité.

Abstract

Relations between fluid circulation and the aperture of fracture

Groundwater flow in crystalline rock occurs both in slip planes and in the zone of intersections of fractures, the component of discharge depending on the initial aperture of the fracture. This study uses data from the Chassolle deep borehole (Cézallier, France). The variographic results and the frequency histograms for apertures greater than 1 cm are examined. Certain differences are evident, that enable the fracture sets to be divided into three groups. The attitude of the fracture sets in relation to stress will induce four types of displacement. Using statistics and geostatistics the latest major tectonic phase can be determined and the orientation of stresses in those sets which have a high level of permeability, can be identified.

1. – Introduction

La réalisation du forage profond de Chassolle (Cézallier France, programme Géologie Profonde de la France, thème 10, Géothermalisme actuel) a permis grâce à un relevé précis des différents paramètres relatifs à la fracturation (position le long du forage, orientation, pendage, ouverture, etc ...) d'acquérir une série de données (6 100 fractures recoupées).

Les écoulements des eaux souterraines au sein d'un massif cristallin s'effectuent soit dans les plans de fractures soit dans des zones particulières que constituent les intersections de ces fractures. Aussi la perméabilité des milieux fissurés est anisotrope, comme l'est la fracturation, et s'exprime mathématiquement sous la forme d'un tenseur (Király L., 1969; Snow D., 1969). La composante de débit dépend de l'ouverture initiale des fractures (Király L. et al., 1971), paramètre qui lors du calcul de la perméabilité intervient au cube de sa valeur (Louis C., 1968).

L'étude de ces ouvertures des fractures est essentielle pour la connaissance de la géométrie des réservoirs et par là-

même, pour la circulation des fluides au travers d'un massif cristallin. L'étude qui suit tente de montrer comment on peut arriver à déduire de façon réaliste la perméabilité d'un milieu fissuré.

2. – Cadre géologique et structural

Le socle du Cézallier (Massif central français) est constitué de terrains métamorphiques appartenant à la zone interne varisque. Il comprend un autochtone relatif (orthogneiss et paragneiss) chevauché par l'ensemble des migmatites et du groupe leptyno-amphibolique. Ces séries sont organisées en une vaste antiforme d'axe NW-SE, au cœur de laquelle apparaissent, dégagés par l'érosion, les terrains de l'unité inférieure (fenêtre de Massiac).

La zone de Chassolle (fig. 1) se situe dans l'orthogneiss de Saint-Alyre. On différencie deux types de structures :

- les structures de déformation souple exprimées par une foliation synmétamorphe et des plis datant de l'évolution polyphasée médio-varisque (Burg et al., 1983).
- des structures de déformation cassante, datant de l'époque tardihercynienne et de la phase distensive oligocène.

* B.R.G.M., Orléans

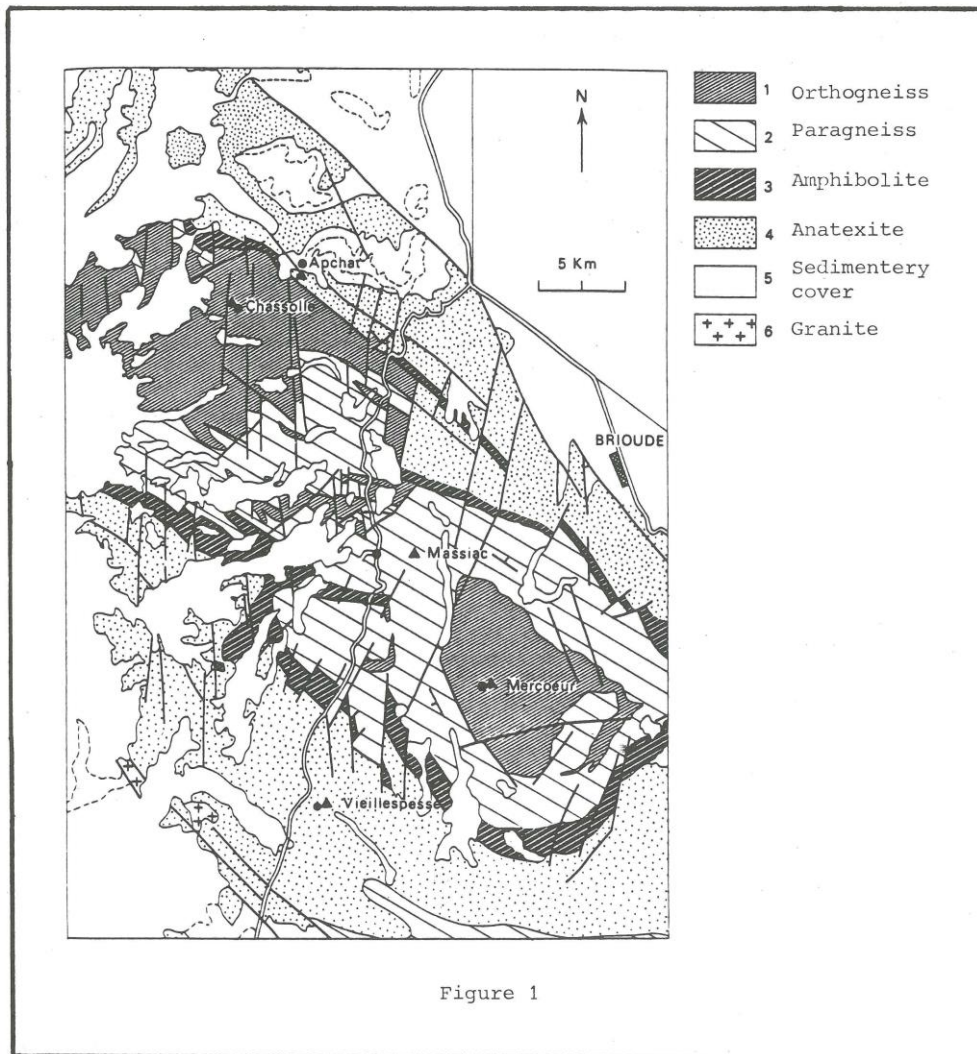


Figure 1

Fig. 1. — Carte géologique de la région du Cézaillier et localisation du forage de Chassolle.
Geological map of Cezallier region and location of the Chassolle deep borehole.

3. — Rappel de géostatistique

La géostatistique est une discipline mathématique ; elle a été développée à partir de la constatation que les éléments étudiés ne sont pas toujours distribués de façon aléatoire dans l'espace, mais peuvent présenter un certain degré de corrélation spatiale que l'on appelle structure.

Le variogramme

Le variogramme $\gamma(h)$ est une courbe représentant les variations du demi-écart quadratique moyen de la variable étudiée $Z(x)$, entre les points distants d'une longueur h . Par définition, le variogramme théorique d'une fonction intrinsèque est $\gamma(h) = 1/2 (\text{Var } Z(x+h) - Z(x))$. Comme l'on suppose que $E[Z(x+h) - Z(x)] = 0$ (hypothèse intrinsèque), on peut également écrire l'expression sous la forme $\gamma(h) = 1/2 E [Z(x+h) - Z(x)]^2$ (Matheron, 1965).

Un variogramme est caractérisé par une ordonnée à l'origine, une portée et un palier (fig. 2). Si l'ordonnée à l'origine n'est pas nulle elle est appelée « effet de pépite ». Les causes peuvent être diverses comme l'influence d'une structure de dimension inférieure à l'échelle d'observation, ou bien des erreurs de mesures. La portée correspond à la distance maximale de corrélation entre les données. Le palier représente la valeur de la variance en dehors de la zone de corrélation.

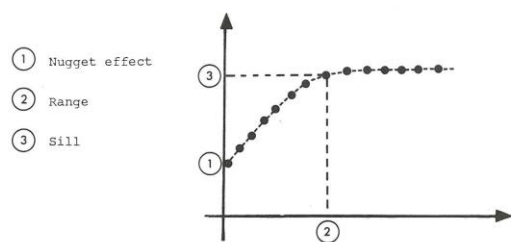


Figure 2

Fig. 2. — Variogramme sphérique avec effet de pépite :
1 effet de pépite; 2 portée; 3 palier;
Spherical variogram with nugget effect: 1 nugget effect; 2 range; 3 sill.

4. — Étude statistique

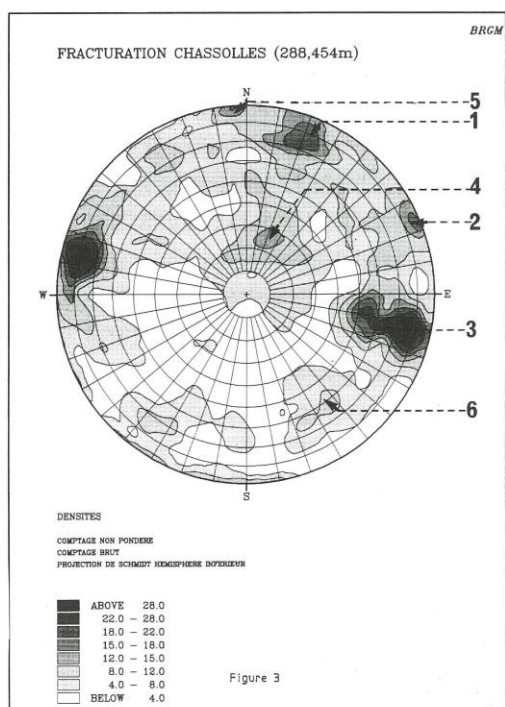


Fig. 3. — Canevas de Schmidt, projection en hémisphère inférieure des fractures du forage de Chassolle.
Schmidt stereographic net, lower hemisphere, for the fractures in the Chassolle borehole.

L'étude va porter sur une population de diaclases (pas de critères de mouvement). La fracturation ne peut être quantifiée par un seul scalaire comme l'est par exemple un teneur, mais elle se caractérise par une orientation et un pendage. Pour résoudre en partie ce problème, on reporte les mesures sur un canevas de Schmidt (fig. 3), celui-ci permet de sélectionner différentes orientations et de classer les fractures par « famille statistique » que nous appellerons par abus de langage « famille directionnelle ».

Les histogrammes de répartition des ouvertures (1) de ces fractures par familles directionnelles (fig. 4) présentent tous de grandes similitudes. Toutefois si l'on considère les classes d'ouvertures supérieures à 1 cm, on note des disharmonies qui nous permettent de distinguer trois groupes :

- groupe n° 1 : 8 % des fractures présentent une ouverture supérieure à 1 cm (familles 1-5-6) ;
- groupe n° 2 : 4 % des fractures présentent une ouverture supérieure à 1 cm (familles 2-4) ;
- groupe n° 3 : 2 % des familles présentent une ouverture supérieure à 1 cm (famille 3).

Le nombre de fractures par famille (entre 300 et 600 mesures) est suffisant statistiquement pour rendre compte des variations des classes supérieures à 1 cm. Un test de validité a été réalisé sur la famille 1 (297 échantillons), il nous montre que les résultats que nous obtenons sont significatifs.

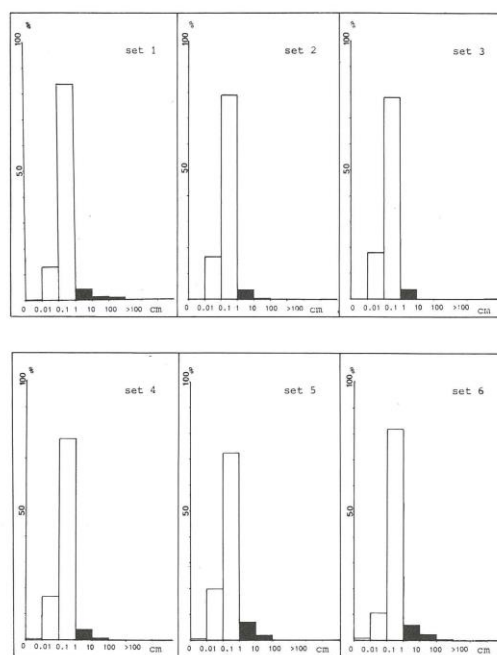


Figure 4

Fig. 4. — Histogrammes de fréquence des ouvertures des fractures sur le forage de Chassolle.
Frequency histograms giving the apertures of fractures on the Chassolle borehole.

(1) L'ouverture que nous étudions est la distance qui sépare les deux épontes de la fracture. Le colmatage par les fluides hydrothermaux étant presque total, cela nous permet de donner une mesure vraie de leur dimension (sans le problème de la décompression).

5. — Étude variographique

5.1. — Rappel des résultats variographiques sans tri sur les ouvertures

Des variogrammes du nombre de fractures par support (1) de 2,5 mètres ont été calculés pour chaque famille directionnelle. Il est important de connaître le comportement des différentes familles dans leur ensemble avant d'étudier l'influence du tri sur les ouvertures. De façon générale, on rencontre une portée d'environ 15 mètres avec fréquemment un effet de pépite, ceci pour toutes les familles. Cette première structure correspond à l'organisation de la fracturation en paquets.

5.2. — Variogrammes sur les fractures d'ouvertures supérieures à 1 centimètre

Les variogrammes sont calculés de la même façon que précédemment (le nombre de fractures par support de 2,5 mètres). On peut observer deux types de comportement :

— des variogrammes ayant une structure et un effet de pépite, avec une portée de 5 à 7,5 mètres (fig. 5), ils correspondent aux familles 1-5-6;

— des variogrammes ayant uniquement une composante pépitique, ils correspondent aux familles 2 et 4 (fig. 5).

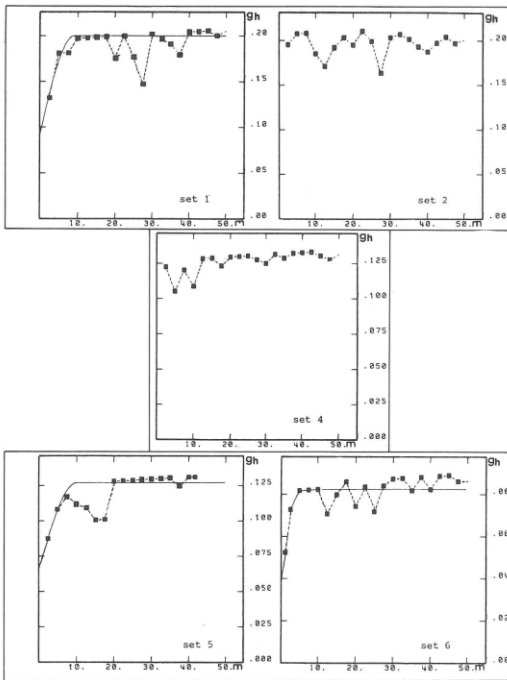


Figure 5

Fig. 5. — Variogrammes directs du nombre de fractures ayant une ouverture supérieure à 1 cm sur le forage de Chassolle.
Direct variograms of the number of fractures with apertures > 1 cm on the Chassolle borehole.

(1) On entend par support dans le cadre d'un forage, une section longue de 2,5 mètres sur laquelle on somme le nombre de fractures pour une famille directionnelle, le résultat représente la variable pour ce tronçon.

La famille n° 3 qui correspond à une direction majeure bien représentée statistiquement, ne possède pas suffisamment d'ouvertures supérieures au centimètre pour être caractérisée variographiquement.

6. — Relations contraintes-ouvertures

Au cours d'une phase tectonique postérieure à l'apparition des discontinuités l'attitude qu'elles occupent par rapport au système de contraintes va induire des comportements et des mouvements différents (fig. 6). Les ouvertures de ces fractures se différencieront par leur morphologie (fig. 7). Pour la circulation des fluides, ces caractéristiques vont induire des contrastes importants; en zone ouverte, comme le sont des fentes de traction ou des failles normales, nous aurons des échanges aisés (fig 7a); avec une composante de glissement, la présence des indentations va ralentir voire stopper la circulation le long de la fracture (fig 7b et 7c).

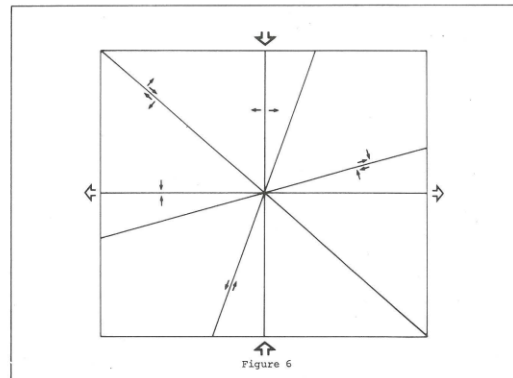


Fig. 6. — Déplacements des fractures en relation avec le tenseur des contraintes.
Displacement of fractures in relation to stress tensor.

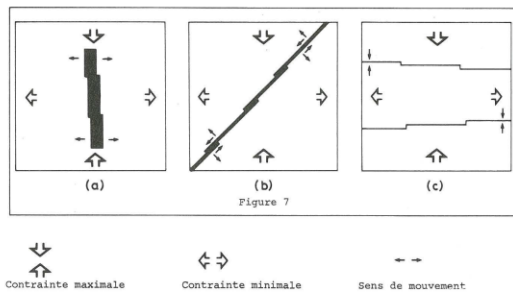


Fig. 7. — Morphologies des fractures en relation avec le système de contraintes :
a) déplacement en ouverture — b) déplacement en glissement
c) déplacement en fermeture ou pas de déplacement.
Morphology of fractures in relation to stress system :
a) opening displacement — b) slip displacement
c) closing displacement or non displacement

7. — Relations entre le variogramme et l'ouverture des fractures

Les portées qui ont été déterminées lors de l'analyse de toutes les fractures (sans tri sur les ouvertures) étaient de l'ordre de 15 mètres. Elles sont associées à une structure en paquet typique de la fracturation. Lors d'un rejeu consécutif à une phase tectonique postérieure, un paquet quelconque peut avoir quatre types de comportement, suivant l'attitude des fractures qui le compose par rapport au système de contraintes :

- un jeu en ouverture, — un jeu en fermeture,
- un jeu en glissement, — pas de mouvement.

7.1. — Jeu en ouverture d'un paquet de fractures d'une famille quelconque

En considérant que dans un paquet, toutes les fractures rejoignent, la surface ouverte créée par un jeu en ouverture est importante, comparée à la surface totale de la fracture. Le rapport surface ouverte sur surface totale représente la probabilité que la discontinuité intersectée soit ouverte.

Dans un paquet où le nombre de fractures est important, dans la mesure où la probabilité qu'elles soient ouvertes est forte, le variogramme des fractures ayant une ouverture supérieure au centimètre restituera une portée directement héritée des structures préexistantes, à savoir les paquets initiaux (fig. 8).

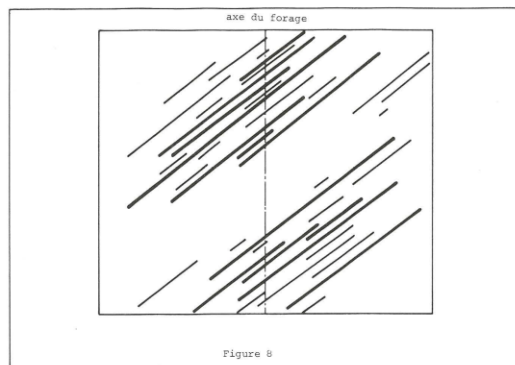


Fig. 8. — Distribution des ouvertures dans un paquet quelconque ayant rejeu en extension.
Distribution of apertures in any cluster with renewed movement in extension.

7.2. — Jeu en glissement d'un paquet de fractures d'une famille quelconque

Dans un jeu en glissement, l'ouverture créée est plus faible et liée aux indentations et donc la probabilité de recouper une fracture possédant une ouverture supérieure au centimètre est elle aussi faible. Dans un paquet de ce type, le nombre de fractures ouvertes sera peu important voire nul et l'on comprend ainsi que les variogrammes ne possèdent pas de portée (fig. 9). Sur le forage les ouvertures créées par ce type de rejeu vont être rares et localisées ponctuellement dans les paquets ; la distribution de ceux-ci sur de petites distances étant aléatoire, on peut penser que la position des ouvertures sera elle aussi aléatoire (il est à noter qu'il existe de grandes portées rendant compte de la variation de densité, mais elles n'interviennent pas dans le cas présent).

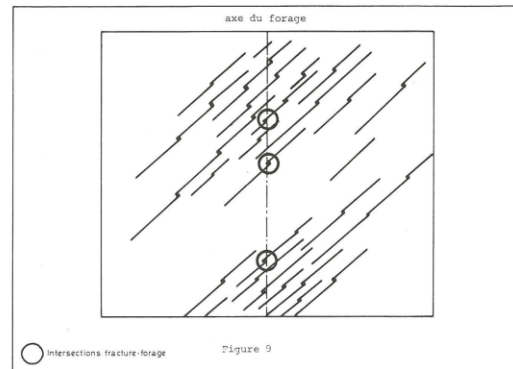


Fig. 9. — Distribution des ouvertures dans un paquet quelconque ayant rejeu en glissement
Distribution of apertures in any cluster with slip movement.

8. — Application au forage du Cézellier

Ce que l'on observe actuellement dans la région du Cézellier résulte, en ce qui concerne les ouvertures, de la dernière phase tectonique majeure qui a affecté cette région. La disposition des différentes familles et de leur rejeu respectif doit être corrélée avec un événement régional important.

En replaçant sur un canevas de Schmidt les familles directionnelles ayant rejeu en ouverture (fig. 10a), il est possible de dégager la composante principale (σ_3) d'une phase distensive N-S. L'apport des autres familles, à savoir celles rejoignant en glissement et surtout celle ne rejoignant pas (famille n° 3), nous permet de préciser cette direction de distension, comme étant N 20 °E, rendant ainsi cohérentes toutes les hypothèses exposées au-dessus (fig. 10b).

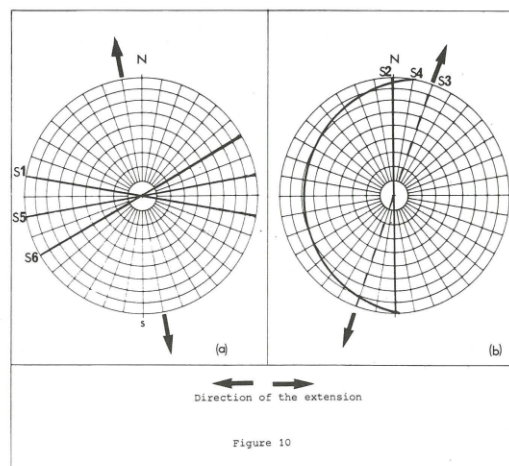


Fig. 10. — a) arrangement des familles du groupe 1.
b) arrangement des familles des groupes 2 et 3.
a) arrangement of sets, group 1. — b) arrangement of sets, group 2 and 3.

Le calcul du tenseur des contraintes sur une population de failles (avec stries) sur le forage du Cézallier nous a permis de mettre en évidence une distension post-miocène de direction SSW-NNE (Feybesse, 1987); il est probable que l'on peut rattacher cette phase tectonique avec celle qui engendre les ouvertures que l'on observe et qui gouverne encore la circulation actuellement. Il est à noter que l'étude géostatistique a été réalisée antérieurement à l'étude structurale; ces résultats nous apportent donc une confirmation naturaliste aux hypothèses que nous avons émises.

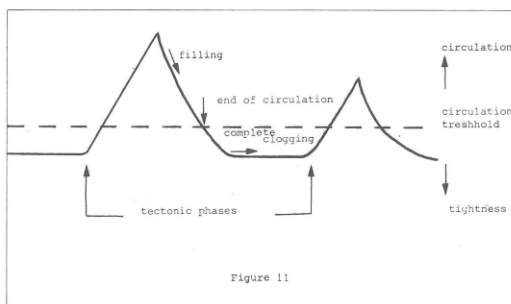


Fig. 11. — Création cyclique des vides par des phases tectoniques et fermeture de ces vides par les remplissages hydrothermaux.
Cyclical changes involving opening of a system by tectonics and closing by deposition of minerals from fluids, filling: remplissage;
tectonic phases: phases tectoniques
end of circulation: fin de la circulation
complete clogging: colmatage circulation: circulation
circulation threshold: seuil de circulation
tightness: imperméable.

Références bibliographiques

FEBESSE J.-L. (1987). — Contrôle structural des circulations hydrothermales du Cézallier (ce volume).

KIRALY L. (1969). — Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans le calcaire fissuré. *Ecol. Géol. helv.*, 62.

KIRALY L., MATHEY B., TRIPET J.-P. (1971). — Fissuration et orientation des cavités souterraines (Jura tabulaire). *Bull. Soc. Neuchâteloise Sci. Nat.*, 94.

9. — Conclusion

Le rejeu d'une phase tardive sur un bâti préfracturé comme celui du Cézallier peut avoir des conséquences importantes sur les circulations des fluides. Le tri des fractures d'après leur ouverture nous a montré que les familles jouant potentiellement en extension lors d'une phase tectonique tardive gardent une structure en paquet, que l'on retrouve sur les variogrammes. Les autres fractures avec un rejeu en glissement ont une distribution plus erratique, ce que l'on explique relativement simplement en raisonnant sur les probabilités qu'a une fracture ouverte d'intersecter le forage.

On peut donc grâce à une analyse géostatistique positionner la dernière phase tectonique majeure, alors que les fractures ne possèdent pas de critère de mouvement, cela veut également dire qu'une phase importante par son intensité sur une région précise, efface tout ou partie de ce qui s'est produit précédemment. On peut considérer que nous sommes dans un phénomène cyclique d'ouverture du système par la tectonique et de fermeture par les remplissages minéraux induit par les fluides (fig. 11). On peut appliquer cette méthode connaissant le champ de fractures et les directions de contraintes actuelles. Il est alors possible de déterminer quelle est la répartition des fractures ayant la plus grande perméabilité et ainsi d'appréhender de façon plus réaliste la géométrie du réservoir.

LOUIS C. (1968). — Etude de l'écoulement dans les roches fissurées et leur influence sur la stabilité des massifs rocheux. EDF. *Bull. Dir. Études et recherches (A)*.

MASSOUD H. (1987). — Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique. Thèse de docteur ingénieur de l'École des Mines de Paris.

MATHERON G. (1965). — Les variables régionalisées et leur estimation. Masson Ed., Paris.

SNOW D. (1968). — Rock fracture spacings, openings and porosities. *Journal of the soil mechanics and foundations division, SM 1*, Janvier 1968, p. 73-91.