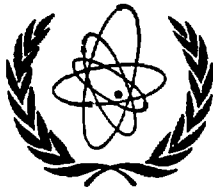


XA 9414603



AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE

**SEMINAIRE SUR LES TECHNIQUES D'ETUDE ET LES METHODES  
D'EVALUATION DES SITES EN VUE DU STOCKAGE DEFINITIF  
SOUTERRAIN DES DECHETS RADIOACTIFS**

Sofia, Bulgarie, 6-10 février 1984

IAEA-SR-104/ 8

**CARACTERISATION DE LA FRACTURATION DES MASSIFS ROCHEUX  
POUR LA DETERMINATION DES ECOULEMENTS**

S. DERLICH

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE  
INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETE NUCLEAIRE  
DEPARTEMENT DE PROTECTION TECHNIQUE  
FONTENAY AUX ROSES, FRANCE

---

*Ce polycopié reproduit le texte d'un mémoire qui sera présenté lors d'une réunion scientifique. Le texte en est provisoire et des changements de fond ou de détail pourront y être apportés avant publication. Il n'est communiqué qu'à la condition expresse de n'être cité ou reproduit sous sa forme actuelle dans aucun autre ouvrage. Les opinions et les thèses qui y sont avancées engagent uniquement la responsabilité des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles des gouvernements des Etats Membres désignant ou celles des organisations désignantes. En particulier, l'AIEA et les autres organisations ou organismes patronnant éventuellement la réunion ne peuvent être tenus responsables de tout ou partie du texte qui y est reproduit.*

CARACTERISATION DE LA FRACTURATION DES MASSIFS ROCHEUX POUR LA DETERMINATION DES ECOULEMENTS

S. DERLICH

Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, CEA, Centre d' Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses, France

Les écoulements dans un massif rocheux sont une conséquence de l'existence de la perméabilité de la roche que l'on peut diviser sommairement en perméabilité de matrice et perméabilité de fissure.

Dans le cas des roches cristallines, la perméabilité de fissure est prépondérante, surtout dans le cas d'une fracturation intense. Il est donc essentiel de caractériser par des études, soit de surface, soit de profondeur, l'état de la fracturation en volume dans un massif considéré. L'objet de cette communication est d'illustrer la méthodologie d'analyse de la fracturation d'un site au moyen des études effectuées sur le massif granitique d'Auriat situé en France dans le Massif Central.

Plusieurs laboratoires de géologie ont participé à cette étude et on dispose d'un éventail d'observations qui conduit à déterminer les différentes étapes d'une étude destinée à la sélection d'un site, l'intérêt et les limites de chaque méthode ou plan d'étude, l'utilisation de méthodes complémentaires permettant d'acquérir la représentation la plus complète de la fracturation. Un examen sommaire des résultats obtenus à Auriat permet de comparer l'intérêt de l'utilisation de ces différentes méthodes sur un site particulier.

Les étapes de l'étude sont les suivantes :

Acquisition des données

- de surface

On peut les diviser suivant l'échelle de l'observation :

- Télédétection : examen des images obtenues à partir de satellites, échelles utilisées 1/1 000 000, 1/320 000 et agrandissements.
- Photos aériennes, échelle du 1/20 000
- Relevé des fractures sur le terrain : failles et discontinuités géologiques diverses.
- Relevé systématique de la fracturation sur des affleurements ponctuels.
- Etude des textures sur échantillons de surface.

- de profondeur

- Analyse des failles, des fractures et des stries sur les carottes.
- Etude microscopique des textures.

Analyse et interprétation des données

Dans ce domaine plusieurs méthodes ont été utilisées :

- répartition non directionnelle des fractures,
- répartition directionnelle,
- différenciation par les remplissages des fractures,
- cinématique de la fracturation,
- organisation des systèmes de fractures.

### Synthèse des résultats

L'objectif final de l'étude de la fracturation est la détermination de l'aptitude d'un site au creusement de cavités de stockage et dans le cas favorable de permettre l'établissement du programme de mesures et de calculs conduisant à l'estimation des transferts et à l'évaluation des risques radiologiques dans le massif considéré.

Les résultats essentiels sont les suivants :

- 1 - mesure de la perméabilité zone par zone et si possible accident par accident.
- 2 - détermination de la géométrie des réseaux de fractures perméables :
  - dimension de la maille unitaire, orientation des familles de plans,
  - détermination des ouvertures des fractures.
- 3 - estimation de la probabilité d'existence d'accidents à forte perméabilité dans le volume de massif rocheux pris en considération.

## PLAN

### INTRODUCTION

### ACQUISITION DES DONNEES SUR LA FRACTURATION

#### Etudes de surface

- Etude de la surface
- Etude détaillée des affleurements

#### Etudes en forages

### TRAITEMENT DES DONNEES DE FRACTURATION

#### Analyse statistique des cartes de fracturation

##### Analyse linéamentaire globale

##### Analyse directionnelle

- Découpage par mailles
- Découpage par stations

##### Etude des sondages verticaux

##### Analyse non directionnelle de la fracturation

- Etude en fonction des pendages
- Etude par pas de 10 m ; distance interfracturale

##### Analyse directionnelle de la fracturation

- Familles directionnelles
- Analyse des fractures par catégories et par familles
- Evolution des familles directionnelles avec la profondeur

##### Analyse géologique globale

- Analyse de la densité de fracturation avec la profondeur
- Répartition spatiale des pendages faibles et forts
- Etude des remplissages des cassures
- Analyse détaillée de zones ponctuelles

## INTERPRETATION, RESULTATS SUR AURIAT ET ST SYLVESTRE

### Résultats des études de surface

- Etudes de la fracturation
- Détermination des tenseurs de perméabilité sur le massif de St Sylvestre

### Résultats des forages d'Auriat

- Distribution des fractures
- Nature des fractures horizontales

## CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

La fracturation des roches, tant en surface pour les massifs affleurant, qu'en profondeur pour certaines couches sédimentaires, a fait l'objet de recherches très poussées.

On s'est rendu compte en effet que dans les milieux compacts, les circulations ou les accumulations de fluides se faisaient dans des zones dont la perméabilité et la porosité avaient pour origine la fracturation induite par les contraintes provoquées par les déformations de l'écorce terrestre.

Les cassures de tailles très diverses ont une influence prépondérante sur la modification des propriétés du milieu. Elles créent en effet des voies de passage à divers fluides qui par leurs propriétés chimiques, contribuent à l'accélération de l'altération des matrices rocheuses, par dissolution dans les calcaires, ou microfissuration et décomposition dans les roches grenues. En outre, suivant les déplacements engendrés par les forces tectoniques, les cassures peuvent s'ouvrir et devenir d'importantes voies de circulations préférentielles.

Les nombreux travaux effectués dans ce domaine avaient pour objet de déterminer la répartition et les propriétés de ces cassures, d'en rechercher les causes initiales, les mécanismes de formation, et finalement leurs propriétés hydrauliques.

Les centres d'intérêt étaient essentiellement l'exploitation des gisements d'hydrocarbures, la géotechnique des grandes réalisations de génie civil, usines souterraines et barrages hydroélectriques, la recherche et la production d'eau potable et la création de réservoirs souterrains de stockage d'hydrocarbures.

Depuis plusieurs années, le problème du stockage des déchets radioactifs a nécessité le développement de recherches dans plusieurs pays ayant développé la technologie nucléaire.

Les problèmes sont en partie semblables à ceux des réservoirs d'hydrocarbures, ils concernent l'étanchéité d'une zone, et par conséquent, la détermination des caractéristiques hydrauliques du milieu.

Mais en outre, on s'intéresse également aux fluides et aux produits qui occupent les cassures car le comportement physico-chimique des déchets au cours de leur mise en solution par les eaux souterraines et de leur dispersion dans le milieu est fonction des propriétés de ces fluides et des matériaux de remplissage.

L'objectif à atteindre est donc la connaissance de la répartition spatiale des cassures, leur composition géochimique, les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines et l'évolution de l'ensemble du système, milieu, fractures, fluides, en fonction du temps (à l'échelle de la durée de vie des radioéléments à longues périodes) dans les conditions géologiques naturelles et sous l'influence des déchets déposés. L'expérience a montré que les propriétés hydrauliques des milieux (tenseurs de perméabilité en particulier) n'étaient pas liées de façon simple aux réseaux de fracturation constitués par des familles de plans (ou de surfaces plus complexes). Le long de ces surfaces, l'épaisseur des espaces ouverts n'est pas constante et le réseau des vides se rapproche plus d'un réseau formé par des familles de cassures planes dont les lèvres sont écartées de distances constantes.

Le calcul des circulations nécessite la connaissance des propriétés hydrauliques du milieu et l'objet de cet exposé est d'examiner les différentes méthodes d'études de la fracturation mises en oeuvre et d'évaluer leur efficacité pour l'établissement du modèle de réseau perméable.

#### ACQUISITION DES DONNEES SUR LA FRACTURATION

Les études de la fracturation sont basées sur le traitement et l'interprétation d'un certain nombre de données géologiques qui sont ensuite utilisées en vue de déterminer la meilleure représentation des réseaux de fractures.

Ci-dessous une liste non exhaustive des données :

- direction des fractures
- valeur et orientation du pendage
- longueur des fractures
- distance interfracturale
- écartement des bords des fractures
- remplissage des fractures
- état de surface des plans de fracture
- direction des stries
- intersection de fractures et déplacements relatifs

Ces données sont acquises soit par des études de la surface sur images ou photographies soit par des relevés de la fracturation sur le terrain, en affleurements de surface, en galeries minières ou en cavités naturelles et enfin par analyse des échantillons ou parois de forages verticaux ou inclinés.

### Etudes de surface

Dans ces études, on peut distinguer deux approches fondamentales (1) :

#### Etude de la surface

L'observation est faite à une altitude plus ou moins élevée et par différents procédés d'enregistrements. Suivant ces paramètres, on obtient des représentations de la surface à différentes échelles. L'utilisation de ces méthodes est appelée étude multiscalair. Elle peut aller de l'échelle du 1/100.000 jusqu'à l'étude de l'échantillon au microscope.

#### Etude détaillée des affleurements

On regroupe les stations de surface, carrières ou talus ainsi que les galeries minières ou cavités naturelles qui offrent généralement des stations d'observations de faible profondeur à développement horizontal.

Cette étude permet le relevé d'un grand nombre de fractures, mais la possibilité d'observation des surfaces verticales est très limitée en hauteur et les cassures horizontales sont rarement observées.

#### Etude de la surface

Outre les études descriptives de surface, certaines méthodes géophysiques telles que la gravimétrie ou la sismique permettent d'obtenir des valeurs en profondeur et leur interprétation permet de situer certains "accidents" qui peuvent être comparés aux traits structuraux mis en évidence par les observations aériennes.

Les deux principales méthodes aériennes sont la télédétection par satellites et la photographie aérienne.

#### - La télédétection

Les images de base ont des échelles voisines de 1/800.000. Elles peuvent être agrandies jusqu'à 1/200.000 et plus. On peut ainsi les comparer aux cartes géologiques à 1/1 000.000, à 1/320.000 et 1/250.000.

- La photographie aérienne donne des images à l'échelle du 1/30.000 pouvant être agrandies au 1/20.000 et plus.

#### Etude des affleurements

En général, l'altération météorique et la couverture végétale recouvrent la roche saine qui ne peut être observée que dans des carrières ou dans des tranchées et talus creusés pour des travaux de génie civil. Au lieu d'avoir des relevés continus, les observations



sont faites dans des stations ponctuelles éloignées les unes des autres et donnant souvent des résultats dispersés et difficiles à corrélés.

Les ouvrages miniers ou les cavités naturelles offrent de bonnes stations d'étude de la fracturation mais ils sont rares sur les sites sélectionnés pour les études préliminaires de qualification au stockage des déchets.

Les méthodes d'études sont applicables aux recherches dans les cavités ou laboratoires expérimentaux, la phase de qualification qui suivra les forages de reconnaissance.

Les observations ont deux objectifs principaux : les levées systématiques des cassures visibles sur un affleurement et l'étude des volumes tectoniques déterminés par les systèmes de cassures, orientation des arêtes, relations entre les faces, recherche des stries de déplacement.

#### Etudes en forages

Les meilleures études de surface ne permettent pas de définir parfaitement la maille structurale en profondeur. Certaines familles de cassures peuvent même échapper à l'observation de surface alors qu'au contraire l'altération de surface (altération météorique, écaillage de décompression ou par effet de glissements et fauchages parallèles à la surface topographique) peut faire apparaître des familles de cassures superficielles sans prolongement vertical.

Il est nécessaire d'effectuer des forages de reconnaissance profonds afin de déterminer les caractères généraux du massif suivant une verticale. L'implantation de ce genre de forage ne doit pas nécessiter de recherches poussées d'un site particulièrement sain. En effet, que l'on considère la nature pétrographique ou structurale en surface, il est peu probable qu'elle se prolonge sans changement en profondeur. A condition d'éviter la proximité des grands accidents à caractère régional, les études de reconnaissance légères suffisent.

Si la reconnaissance confirme la qualité du site, il est alors nécessaire d'améliorer la connaissance du milieu sur une surface au moins égale à celle du stockage par la réalisation de forages d'extension permettant de déterminer l'existence éventuelle d'accidents disqualificatifs et de permettre l'exploration géophysique en volume.

Les carottes recueillies sont analysées suivant les techniques d'observation des affleurements. Les forages verticaux ne recoupent qu'une très faible quantité de fractures verticales et il est nécessaire d'effectuer des forages inclinés afin de recouper le maximum de familles de cassures très pentées.

## TRAITEMENT DES DONNEES DE FRACTURATION

### Analyse statistique des cartes de fracturation

#### Analyse linéamentaire globale

Sur une carte de linéaments ou de fractures on digitalise ces accidents en segments linéaires (2). Ces segments sont ensuite rangés en fonction de leur direction par classes de  $1^\circ$ , de 0 à  $180^\circ$ . On obtient l'histogramme des fréquences en fonction de la direction (fig.1). On le lisse afin d'individualiser les maxima et minima.

On introduit ensuite la longueur des alignements par fréquences. Finalement on détermine deux sortes d'intervalles de valeurs significatives :

- les valeurs tirées de l'histogramme des fréquences brutes
- les valeurs tirées de l'histogramme de fréquence des alignements en tenant compte de leur longueur.

Au moyen du filtrage directionnel on peut rechercher les alignements caractéristiques et leurs associations.

A partir de la digitalisation des segments unitaires on peut tracer des cartes de contour de densité de tous les alignements (fig.2) ou encore la carte de contour de densité des alignements pour une direction donnée (fig.3).

Toutes ces démarches numériques conduisent à l'établissement de la carte synthétique des grands traits structuraux.

#### Analyse directionnelle

##### - Découpage par mailles

Cette méthode nécessite de bonnes observations en photo-fracturation, (3) ; pour chaque carré, on détermine une rosace qui représente la répartition, en pourcentage, des longueurs de fractures rencontrées dans des classes de direction de 4 en 4 degrés. Les rosaces sont étudiées par mailles et étudiées par analyse en composantes principales (ACP). On trace ensuite les variogrammes des rosaces principales et des cosinus directeurs afin de calculer la régionalisation des phénomènes. Pour obtenir une bonne corrélation entre rosaces, on cherche l'angle de rotation permettant d'obtenir la meilleure superposition des rosaces. La répartition des grandes directions de fracturation est enfin déterminée.

Si la répartition spatiale des directions principales est bien organisée, il sera possible de la représenter à l'aide d'une simulation.

### - Découpage par stations

Dans ce cas, le maillage n'est pas systématique mais les stations sont choisies en fonction des affleurements (c'est le cas d'étude tectonique de surface effectuée par le BRGM) T (fig.4).

Après tracé des stéréogrammes de densité de la fracturation, on trace, par station, les histogrammes directionnels circulaires. Les observations sont quantifiées par traitement statistique du nombre de fractures par classe directionnelle. Après calcul de la moyenne du nombre de fractures, l'écart type quantifie les écarts absolus et la comparaison entre plusieurs séries de données est effectuée au moyen d'un coefficient dit de variation (1).

On détermine ainsi les fractures principales et leur répartition géographique.

### Etude des sondages verticaux

La méthode d'étude des sondages est essentiellement extraite de l'ouvrage cité en (1).

### Analyse non directionnelle de la fracturation

L'analyse est effectuée par l'observation des carottes non orientées ou d'après une étude des parois de sondage (par caméra de télévision ou par "televiwer" ou par packers à impression).

On fait une distinction entre pendages faibles et pendages forts, entre fractures minéralisées ou non, entre fractures avec ou sans déplacement et finalement entre fractures et failles à remplissage important et traces de déplacements.

Les deux éléments principaux de l'analyse non directionnelle sont les relevés des pendages et des distances interfracturales.

### - Etude en fonction des pendages

On relève les fractures par classes de  $10^\circ$  et on étudie leur distribution en considérant les variables suivantes :

- la caractérisation des fracturations par catégories :
  - . fractures non différenciées (f.n.d ; ensembles des fractures)
  - . fractures non minéralisées (f.n.m)
  - . fractures minéralisées (f.m)
  - . failles (F) (fig.5)
- les tranches de 100 m de forage.

On réalise des histogrammes circulaires des pendages par tranches de profondeur (fig.6).

Un autre résultat est donné par la représentation du pourcentage de fractures en fonction du pendage, des caractéristiques et des tranches de 100 m (fig.7).

- Etude par pas de longueur de 10 m ; distance interfracturale

On dénombre les fractures par pas de 10 m pour les différentes catégories de fractures. On peut tracer des diagrammes qui permettent de préciser la répartition de chaque catégorie.

On cherche ensuite le mode de distribution des distances interfracturales. La construction des droites de Henry montre que les distributions sont log-normales et que chaque groupe par 100 m permet d'ajuster des droites de Henry avec distribution des distances interfracturales (fig.8).

Les résultats de ces distributions sont analysés par les variogrammes.

Analyse directionnelle de la fracturation

Cette étude nécessite l'orientation, en direction et pendage, des carottes (ou des relevés de parois de forage) sur toute la longueur du forage. Au fur et à mesure de leur prélèvement, les carottes sont ajustées les unes aux autres afin de tracer une génératrice origine qui doit être orientée par une ou plusieurs mesures. Quand une zone de fractures empêche la continuité du tracé de la génératrice, il faut faire des mesures pour le tronçon suivant.

- Familles directionnelles

On classe les cassures en utilisant une représentation stéréographique telle que les stéréogrammes de Schmidt ou des projections stéréographiques adaptées à la figuration des données d'un sondage vertical (1). Les diagrammes de densité obtenus peuvent être corrigés pour tenir compte du pendage (ou plus exactement de l'inclinaison des fractures par rapport à l'axe du forage) (fig.9).

On obtient ainsi une représentation globale de l'ensemble des fractures relevées. On peut ensuite procéder à l'analyse détaillée.

- Analyse des fractures par catégories et par familles (fig.10)

Les stéréogrammes montrent des groupements qui peuvent être comparés à la distribution générale.

L'analyse quantitative permet de rechercher les corrélations entre la distribution directionnelle et les catégories de fractures.

L'analyse qualitative porte sur les corrélations entre familles directionnelles et nature du remplissage.

- Evolution des familles directionnelles avec la profondeur

On utilise pour cela deux traitements :

1) Les stéréogrammes de densité par pas de 100 m. On peut sortir des histogrammes circulaires d'un pendage choisi pour les tranches de 100 m.

2) Distribution des densités par familles et par pas de 10 m

Analyse géologique globale (4)

- Analyse de la densité de fracturation avec la profondeur

L'examen détaillé de ce diagramme permet de mettre en évidence une certaine périodicité dans la répartition des fractures.

- Répartition spatiale des pendages faibles et forts

Elle permet de déterminer les relations éventuelles entre les deux systèmes.

- Etude des remplissages des cassures (fig.11)

On constate une répartition non aléatoire du remplissage des cassures. Certains matériaux sont caractéristiques de certains pendages mais il n'y a pas de répartition par familles. Le contenu des fractures permet parfois d'établir la chronologie des remplissages.

- Analyse détaillée de zones ponctuelles

L'analyse directionnelle montre les arrangements de fractures avec variation de pendage à direction constante ou variation de direction à pendage constant.

La détermination des arêtes intersections de familles de cassures (fig.12) permet de préciser les volumes des corps tectoniques.

## INTERPRETATION, RESULTATS SUR AURIAT ET ST SYLVESTRE

Auriat est un massif granitique intrusif situé à 17 km à l'est de Limoges (fig.13). Il a une forme grossièrement ellipsoïdale dont le grand axe en direction nord-sud à 13 km de longueur et le petit axe 10 km. Sur ce site le CEA a fait réaliser deux forages verticaux de 500 et 1000 m de profondeur depuis la surface située à une altitude de 520 m. Les deux forages sont distants de 10 m en surface et de 6,5 m à 500 m (fig.14).

Le massif de St Sylvestre est situé au nord de Limoges. Il s'allonge suivant la direction nord-sud sur 21 x 42 km. La présence de nombreuses mines dont les galeries s'étagent jusqu'à 300 m de profondeur environ a permis une étude détaillée de la fracturation à plusieurs niveaux entre le fond et la surface.

Les différentes méthodes d'étude exposées précédemment ont été appliquées sur ces deux sites.

### Résultats des études de surface

#### Etudes de la fracturation

Un secteur du massif de St Sylvestre a été découpé en mailles de 1 km<sup>2</sup>.

Après décomposition des rosaces de densité de chaque maille par analyse en composantes principales, on constate que pour cette dimension de maille (1 km<sup>2</sup>) la distribution des rosaces est assez aléatoire (3). L'analyse en composantes principales ne tient pas compte des rotations entre rosaces identiques.

On calcule l'angle de rotation qui pour chaque rosace donne le maximum de corrélation avec une rosace de référence.

On constate que dans la région étudiée, la direction de fracturation est homogène pour cette dimension de maille.

Sur le massif d'Auriat, l'étude de surface a été effectuée par stations regroupées en secteurs (fig.15). Dans le secteur 7 au sud du massif, deux stations de 250 m<sup>2</sup> chacune et distantes de 400 m sans continuité d'affleurement montrent sur les stéréogrammes de densité de la fracturation une rotation de 30° entre les directions de deux familles bien caractérisées. L'auteur (1) donne trois explications possibles : proximité d'un grand accident, rotation en masse d'un bloc déjà isolé par des fractures, déviation des contraintes ayant contrôlé la fracturation. L'hypothèse deux serait en accord avec des observations effectuées dans une carrière du massif de St Sylvestre : une surface courbe indiquait la présence d'un corps cylindrique entre deux fractures coulissantes de même sens (2).

Le relevé du BRGM du massif d'Auriat (fig.4) indique, d'une station à une autre, une répartition différente des directions principales de fractures et on peut ainsi déterminer des zones à directions principales différentes. Un traitement statistique nécessiterait un plus grand nombre de stations d'observations.

Détermination des tenseurs de perméabilité sur le massif  
de St Sylvestre (3)

La densité de fracturation locale mesurée d'après des relevés sur affleurements (en surface et en galeries) a permis de calculer les trois vecteurs principaux de perméabilité puis la perméabilité quadratique moyenne du milieu, en prenant en compte l'ensemble des fractures et en faisant deux hypothèses : chaque fracture a une longueur infinie et l'ouverture des fractures est constante. On a calculé ensuite les six composantes du tenseur de perméabilité.

Les interprétations géostatistiques des résultats, effectuées à deux échelles sur la perméabilité moyenne quadratique (le kilomètre et la centaine de mètres), ont donné des variogrammes de portée faible (700 m à 1 km) qui indique une faible régionalisation du phénomène.

L'étude des tenseurs de perméabilité ne montre pas de régionalisation. Les paramètres ont un comportement aléatoire qui ne permet pas une cartographie correcte.

Seule la valeur moyenne a été distribuée dans le domaine considéré.

Résultats des forages d'Auriat

Distribution des fractures

Les variogrammes sur la distance interfracturale de chaque catégorie de fractures (1) donnent des résultats qui ne sont pas très clairs mais dont on doit tenir compte pour la comparaison avec des analyses différentes de la fracturation.

On peut noter les résultats suivants :

- il existe un important effet de pépite (fig.16) sur les variogrammes de toutes les catégories de fractures. Il apparaît une maille de 25 m sur l'ensemble des fractures, de 50 m pour les fractures non minéralisées, les fractures minéralisées, les failles ne présentant aucune organisation.

- tous les variogrammes présentent un effet de pépite important et il apparaît une structure périodique de 40 m environ que l'auteur de l'étude présente comme une possibilité de structures gigognes.

L'étude de la distance interfracturale par familles directionnelles et par pas de 10 m donne une répartition périodique par familles de l'ordre de 40 à 100 m pour les familles fortement pentées et de 200 m pour les fractures verticales.

La conclusion de l'étude est que les fractures se répartissent en faisceaux liés à la présence des failles et séparés par des tronçons non fracturés. Le maillage est évalué à 100 m et les cassures sont parallèles aux failles.

L'approche déterministe du rapport de l'Institut de Géologie de Strasbourg conduit à la réalisation d'un schéma représentatif de la fracturation. Cette hypothèse est basée sur les conclusions suivantes :

- répartition périodique des fractures pentées avec une maille (ou longueur d'onde) de 50 m en surface et de 300 m en profondeur.
- à l'intérieur des mailles, répétition du motif avec des dimensions réduites.

Entre l'approche probabiliste et l'approche déterministe les résultats présentent une bonne convergence.

Les différences qui apparaissent ne doivent pas servir à hiérarchiser les méthodes d'étude entre elles, mais au contraire à permettre la progression simultanée des deux en vue de préciser les données déficientes et de les améliorer.

#### Nature des fractures horizontales

La nature et l'origine de ces fractures n'est pas encore expliquée. Habituellement, ce genre de structure est considéré comme un phénomène de faible profondeur provoqué par une diminution de la charge lithostatique, donc de la contrainte verticale, et par un dépassement de la limite de résistance à la traction du matériau dans le sens du déplacement vertical.

Or ce phénomène a été rencontré tout le long du forage de 1000 m avec une intensité plutôt croissante avec la profondeur. Peut-on le rattacher à un phénomène d'écaillage au moment de la mise en place ou de la remontée du batholite ?

Le système classique des diaclases comprend des diaclases radiales et des tangentielles avec développement des tangentielles sur un axe vertical dans le cas de diminution de la contrainte verticale. Le forage étant sur la moitié ouest du massif (fig.14) le pendage devrait être légèrement ouest or il est nord est.

Un des auteurs (5) relie la formation des fractures à une phase tectonique tardive. Mais il est alors difficile d'expliquer l'absence de mouvements suivant les plans horizontaux.

Il n'est pas possible à l'heure actuelle de donner une bonne explication de leur formation.



## CONCLUSIONS

Les rapports ou mémoires consultés pour cette synthèse méthodologique d'étude de la fracturation ont été réalisés dans différents centres de recherches géologiques avancées dans les domaines de la géologie structurale, de la géostatistique appliquée à la fracturation et à la recherche hydrogéologique. On peut citer le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, l'Institut de Géologie de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, le laboratoire d'hydrogéologie mathématique de l'Ecole des Mines de Paris et le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université des Sciences de Montpellier.

L'objectif final de toutes ces recherches est la mise au point de modèles d'écoulement représentatifs d'un régime d'écoulement à l'échelle d'un site de plusieurs dizaines de kilomètres carrés en milieu fracturé.

Outre un certain nombre de données hydrauliques de base, il est nécessaire d'établir un modèle du réseau de fracturation profonde au niveau présumé des galeries de stockage.

Il est probable que l'étude de surface et l'analyse d'un nombre suffisant de forages verticaux et inclinés permettra d'acquérir une bonne connaissance du réseau de fracturation.

Nous avons vu quelles étaient les possibilités de passer du modèle ou du réseau de fracturation au tenseur de perméabilité du système fissural considéré.

Actuellement les résultats obtenus ne sont pas probants. Les tentatives de corrélation entre les résultats des mesures hydrauliques et les résultats obtenus par modèles de simulation d'un massif ne concordent pas encore.

Un certain nombre de raisons sont avancées : ignorance de la longueur réelle des fractures, variation des ouvertures,...

On peut également constater que les remplissages de nombreuses fractures (quartz, argiles, brèches cimentées par de la silice...) sont aussi imperméables que la matrice rocheuse. La modélisation de toutes les fractures n'est donc qu'une première étape de la connaissance des propriétés hydrauliques du milieu. Il faut rechercher une méthode d'identification des voies réelles de circulation. Les mesures détaillées de la conductivité hydraulique devraient permettre d'améliorer la représentativité du modèle du réseau.

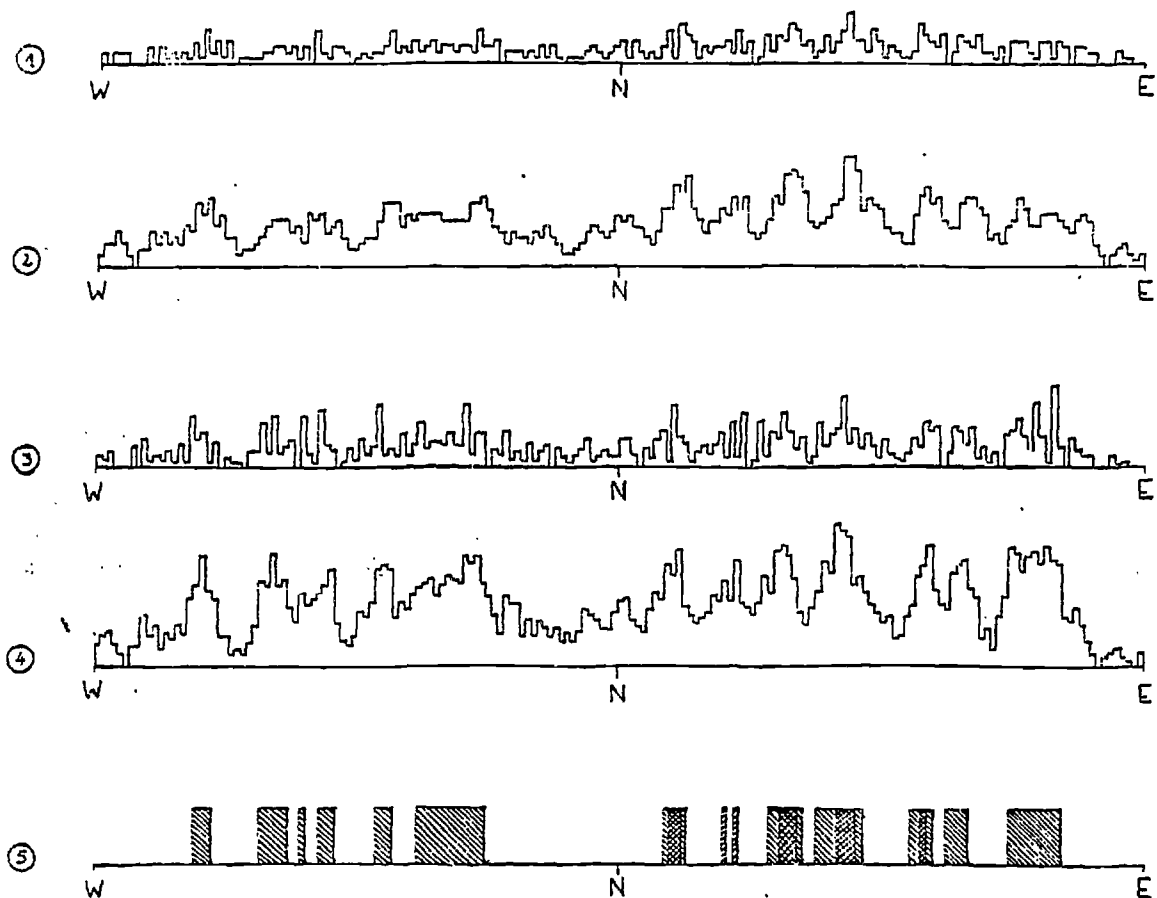
L'étude du forage d'Auriat a mis en évidence un phénomène particulier de fracturation horizontale ou à pendage inférieur à 25°. Malgré certaines observations d'intersection de fractures très inclinées par des cassures subhorizontales, il semble que cette fracturation se produise au sein de noyaux limités par des fractures très redressées. Il existe une controverse sur l'existence potentielle ou non de tels systèmes.

En réalité le problème n'est pas là mais bien plutôt sur la définition de leur capacité de conductivité hydraulique. Les études effectuées dans le forage d'Auriat n'ont pas permis de répondre clairement aux questions : Quelle est la conductivité hydraulique de ces failles ? Sont-elles interconnectées avec les failles subverticales qui peuvent être les voies principales d'écoulement ?

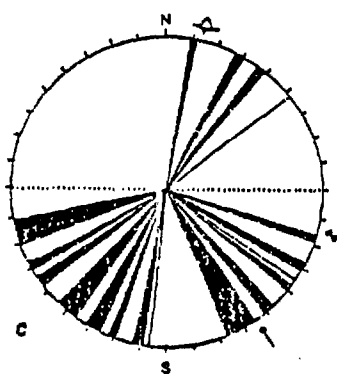
Les prochains travaux devront tenter d'y apporter une réponse.

## REFERENCES

- (1) CROCHET, P., "Fracturation profonde en milieu cristallin" (1983) "Sciences de l'eau" Thèse docteur ingénieur - Université Science et Techn. du Languedoc. Montpellier
- (2) DE FRAIPONT, P., "Approche multiscalaire de la fracturation du massif granitique de St Sylvestre" (1982) Thèse de docteur de spécialité en géologie. Institut de Géologie - Université Louis Pasteur Strasbourg
- (3) BEUCHER, H., "Contribution de la géostatique à l'étude d'un milieu fracturé et mise au point d'un modèle hydraulique sur Fanay Augères (1983) - Rapport LHM/RE/83/10 - Ecole des Mines de Paris
- (4) DE FRAIPONT, P., RUHLAND, M., and al de l'Université de Strasbourg "Analyse tectonique des sondages d'Auriat" (1982) Rapport CEA/IPSN/CSDR n°82/20
- (5) "Investigation par forages profonds du granite d'Auriat" par le BRGM (1981) Rapport CEA/IPSN/CSDR n°81/03



- 1 Histogramme brut des fréquences d'alignements rangées par classe de un degré
- 2 Histogramme lissé des fréquences brutes
- 3 Histogramme de fréquences où est pris en compte la longueur des alignements
- 4 Histogramme lissé de fréquences des alignements où leur longueur est prise en compte
- 5 Intervalles directionnels des valeurs significatives
  - valeurs significatives tirées de l'histogramme 2
  - valeurs significatives tirées de l'histogramme 4

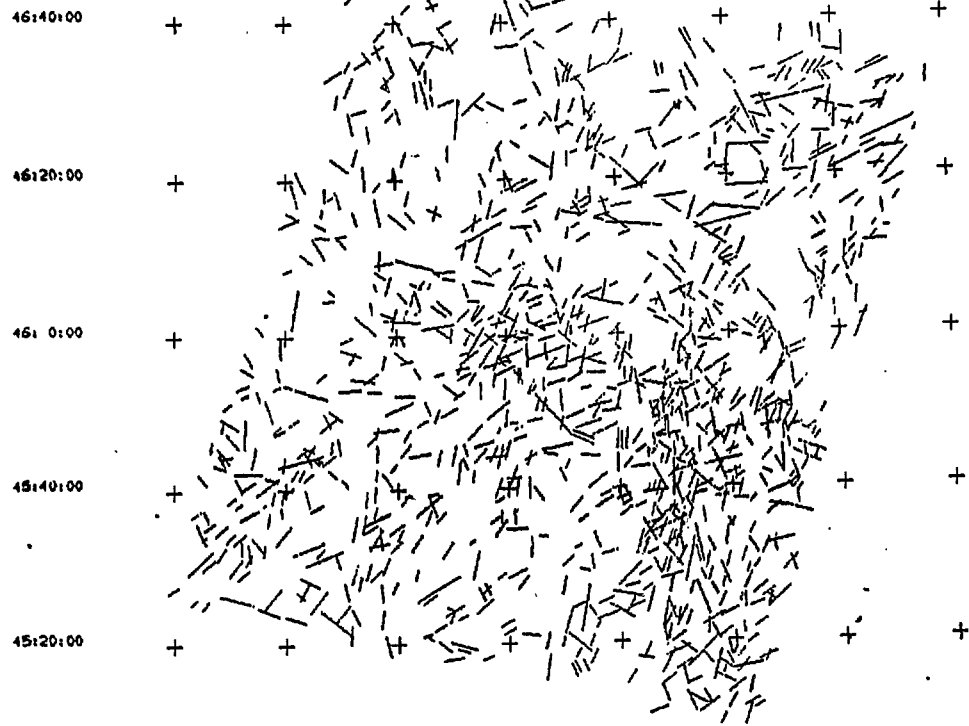


- : demi-cercle supérieur à partir des histogrammes bruts
  - : demi-cercle inférieur en tenant compte des longueurs des alignements
  - : position du satellite
  - : orientation des lignes de balayage
  - : direction de l'éclairage du satellite
- Ces 3 paramètres peuvent influencer l'interprétation des images.

: Statistiques des alignements de l'image agrandie à 1/200 000 centrée sur les Monts d'Ambacac et de St-Goussaud : histogrammes et rosace directionnelle des intervalles de valeurs significatives.

Figure 1 d'après (2)

: Carte brute  
 des alignements de la  
 scène du Limousin res-  
 tituée à l'échelle  
 voulue dans un repère  
 latitude-longitude en  
 degrés.  
 Les zones à forte  
 densité de traits  
 sont, au centre de  
 la carte, le Massif  
 de St-Sylvestre et  
 dans la partie ESE  
 Le Millevaches.



: Carte de  
 contours de densité  
 de tous les aligne-  
 ments de la scène.  
 Les valeurs sur les  
 courbes sont rela-  
 tives et permettent  
 de différencier les  
 fortes des faibles  
 densités.

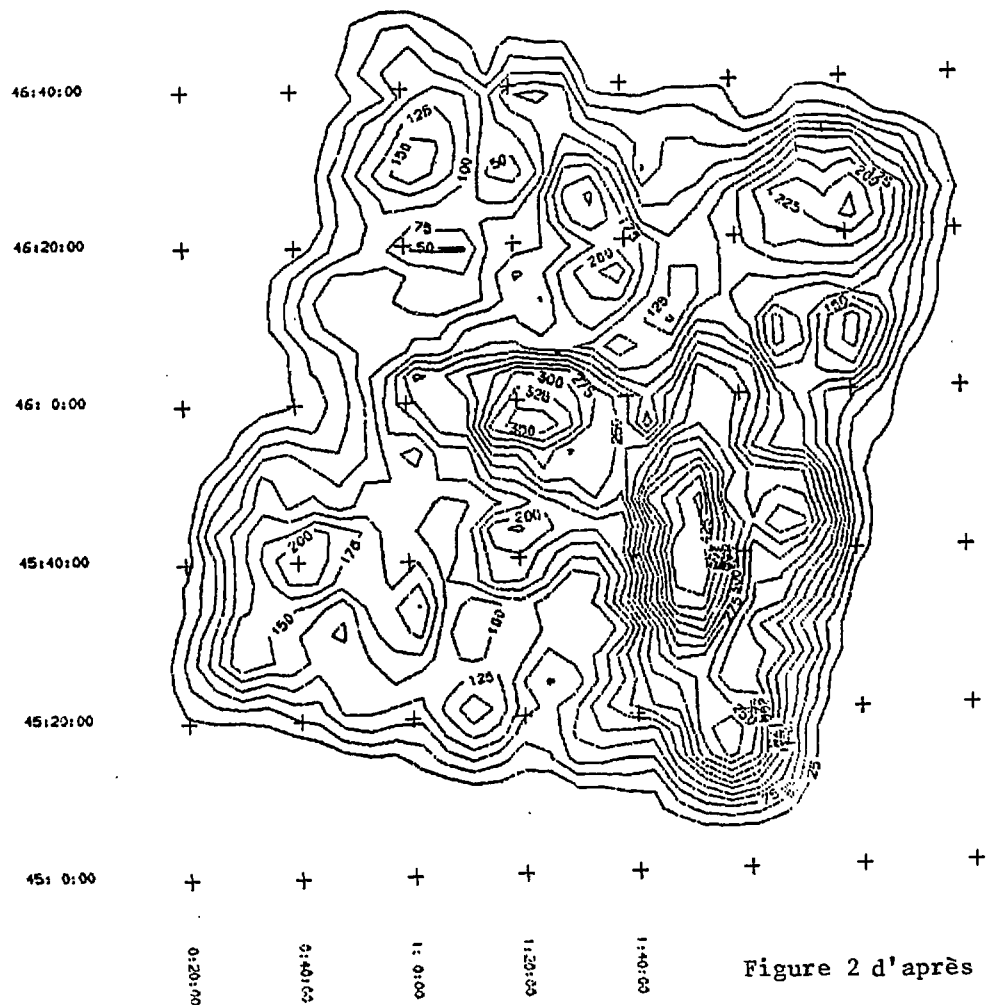


Figure 2 d'après (2)

: Carte des alignements de directions comprises entre N 03 et N 23 degrés, cette fourchette correspondant à un intervalle de valeurs significatives.

: Carte de contour de densité des alignements de l'intervalle de direction N 03 à N 23 degrés. En traits gras sont représentés les linéaments de directions comprises entre N 03 et N 23 degrés. Ces linéaments sont obtenus en reliant les aires de forte densité d'alignement.

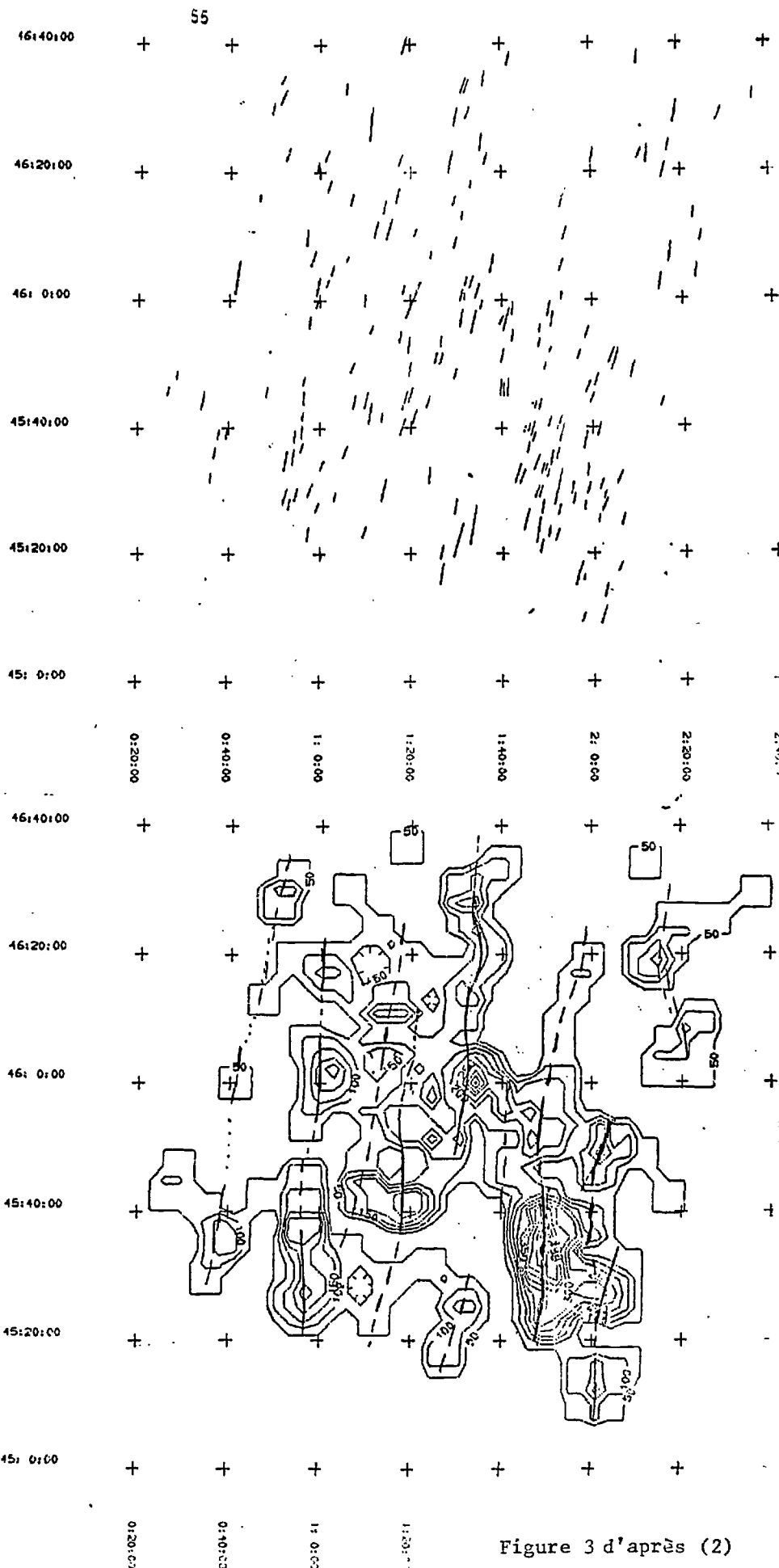
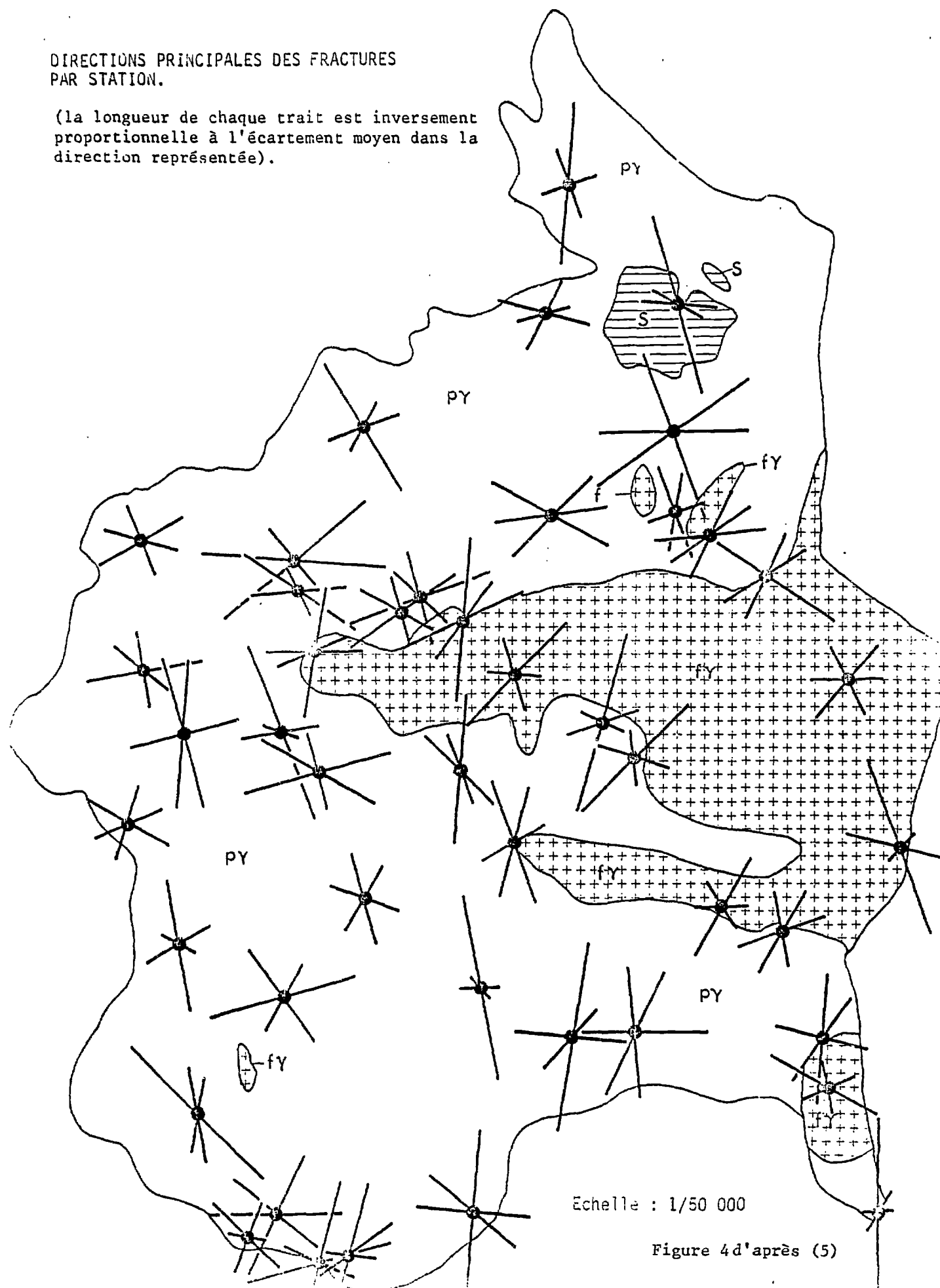


Figure 3 d'après (2)

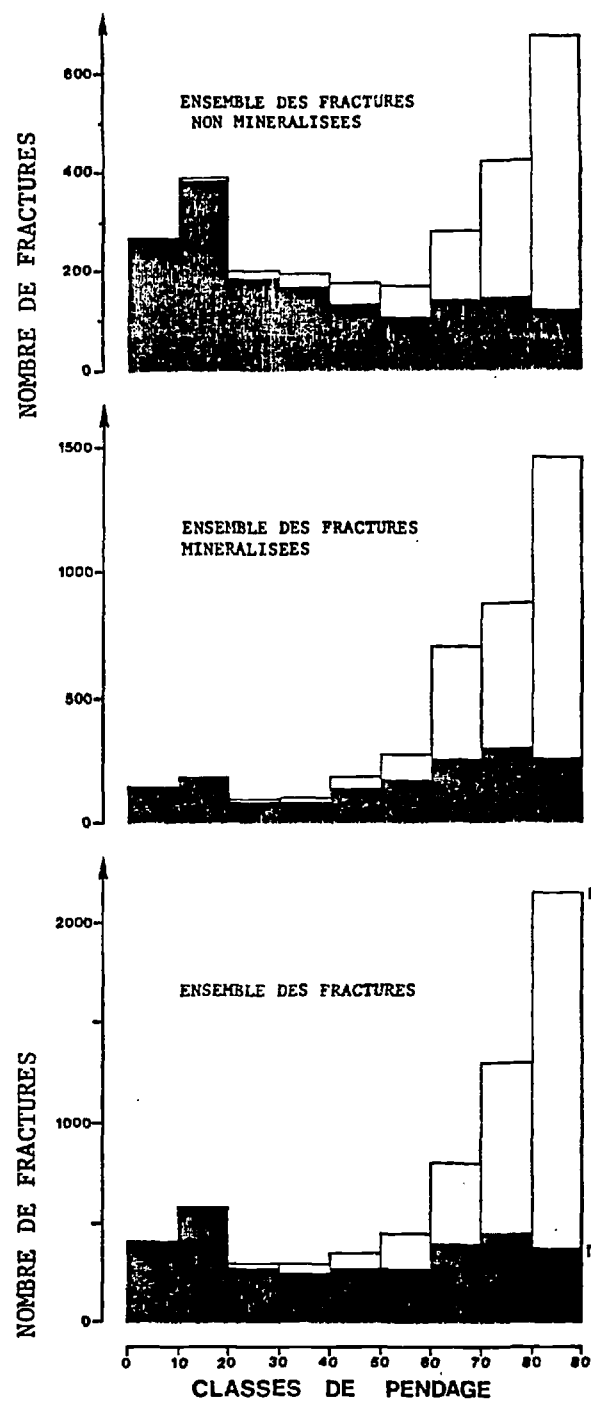
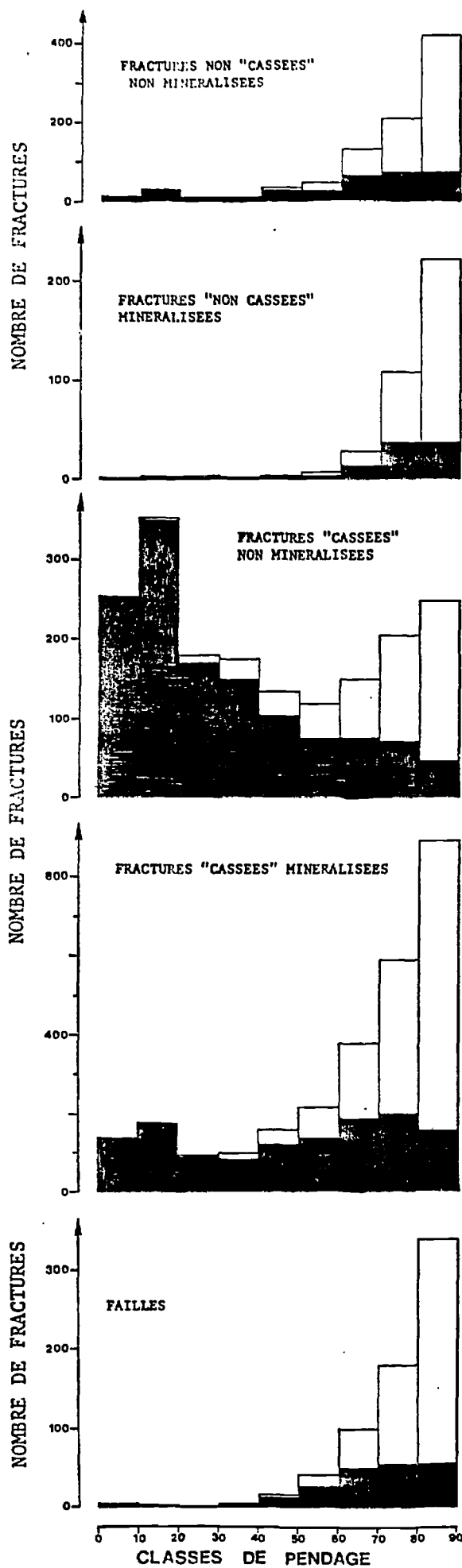
DIRECTIONS PRINCIPALES DES FRACTURES  
PAR STATION.

(la longueur de chaque trait est inversement  
proportionnelle à l'écartement moyen dans la  
direction représentée).



Echelle : 1/50 000

Figure 4d'après (5)



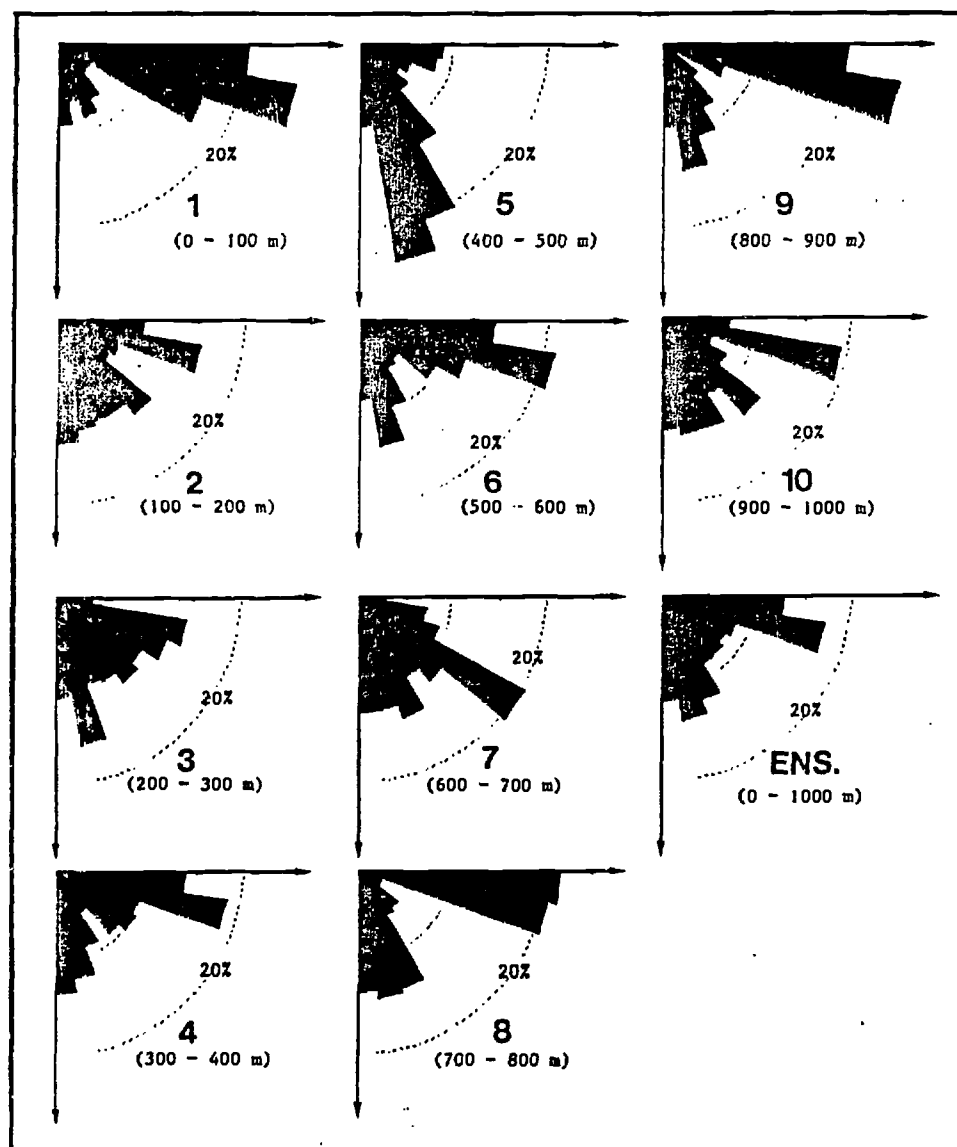
- Sondage d'Auriat :  
ventilation des fractures en fonction  
de leur pendage et de leurs caractéristiques

en noir : effectif réel  
en blanc: effectif corrigé en fonction du pendage

Figure 5 d'après (1)



Il semble intéressant de voir s'il y a une évolution des pendages en fonction à la fois des caractéristiques des fractures, et de la profondeur. Pour cela, on considère les pourcentages des classes de pendage de 10° par rapport aux effectifs de chaque caractéristique (fractures indifférenciées, non minéralisées, minéralisées et failles) considérée par tranche de 100 mètres de profondeur. Les histogrammes obtenus sont reportés à la figure 38. De plus, des histogrammes circulaires ont été réalisés en ce qui concerne la ventilation des pendages de l'ensemble des fractures par tranche de 100 m (fig. 39). La fracturation subhorizontale ne décroît pas avec la profondeur. Elle diminue sur quelques tronçons (3, 5 et 7) mais elle est à nouveau prédominante entre 700 et 1000 mètres. Comme on le verra par la suite, ces fractures constituent une famille directionnelle à part entière. Les fractures subverticales (pendage supérieur à 70°) ont un pourcentage constant sur l'ensemble du sondage, mis à part les 100 premiers mètres. Les principales variations de pourcentages interviennent pour les fractures de pendage moyen qui peuvent disparaître sur certains tronçons ou prédominer sur d'autres.



Sondage d'Auriat : histogrammes circulaires des pendages  
par tranche de profondeur de 100 m

Figure 6 d'après (1)

en  
ort  
ra-  
on-  
to-  
da-  
ion  
ues  
000  
lle  
eur  
les  
ent  
ons

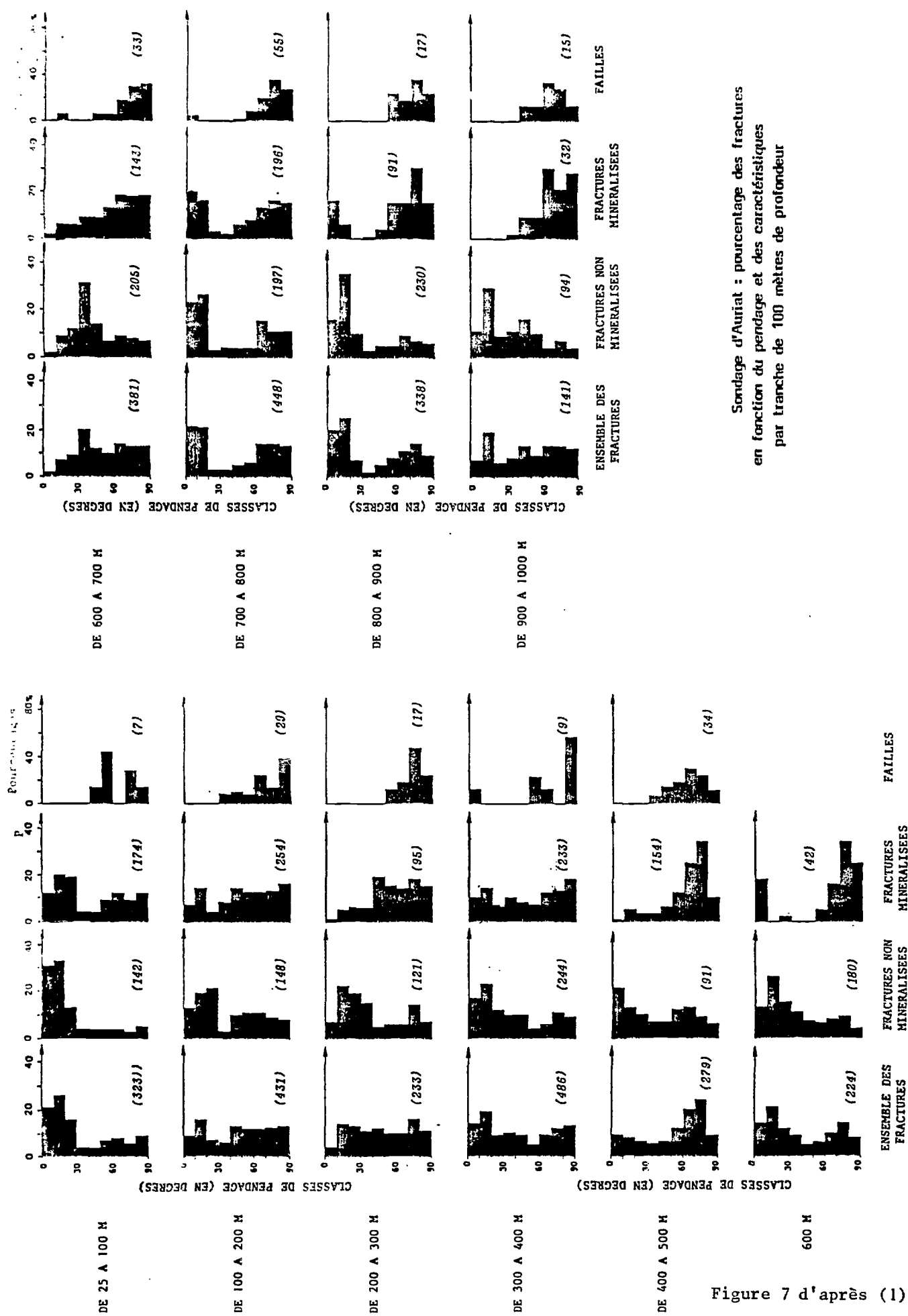
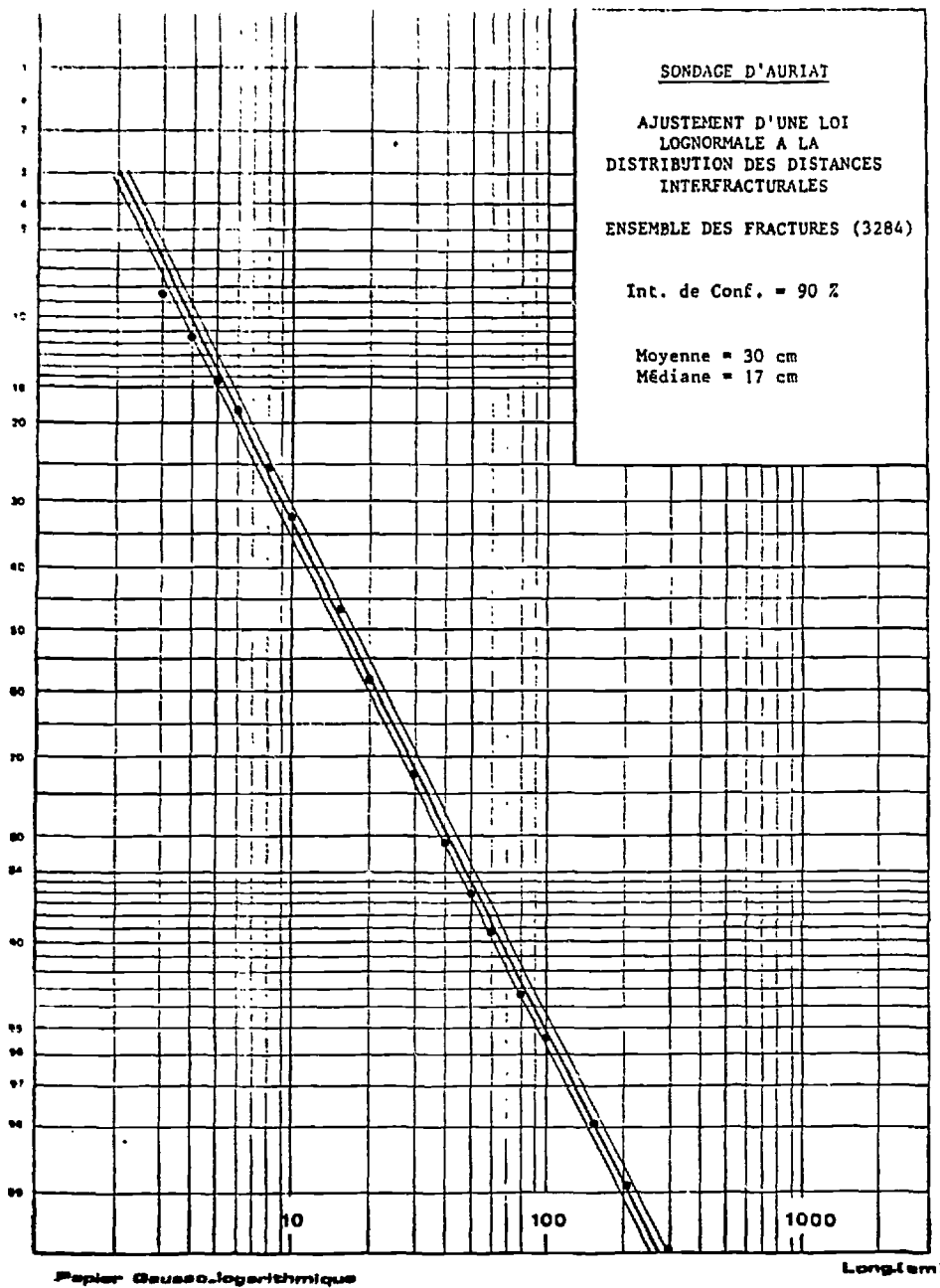


Figure 7 d'après (1)

Sondage d'Auriat : pourcentage des fractures  
en fonction du pendage et des caractéristiques  
par tranche de 100 mètres de profondeur



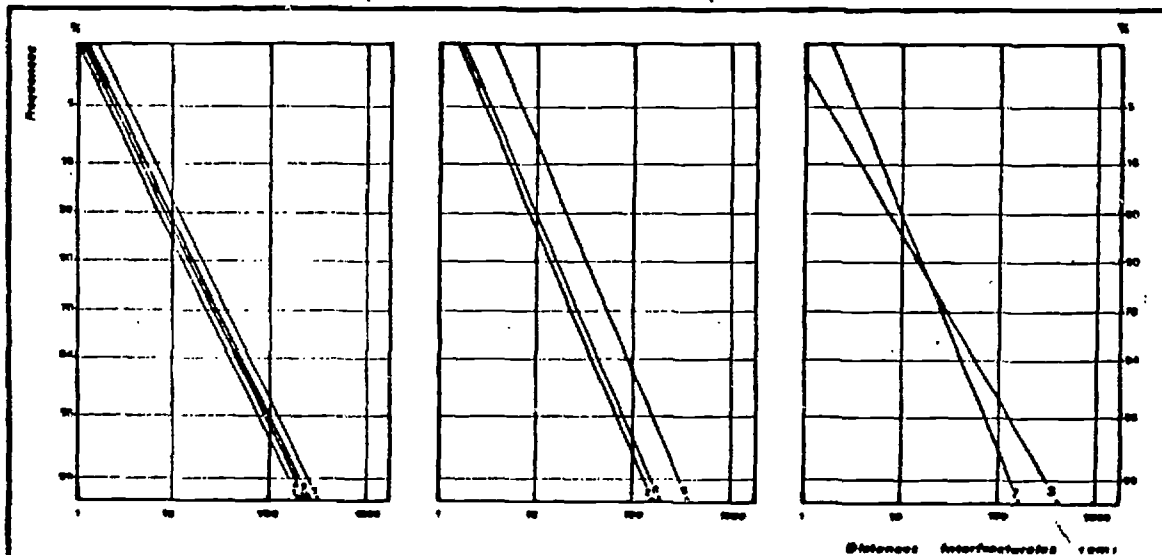
Sondage d'Auriat  
ajustement d'une loi lognormale  
à la distribution des distances  
interfracturales  
(ensemble des fractures)

Figure 8 d'après (1)

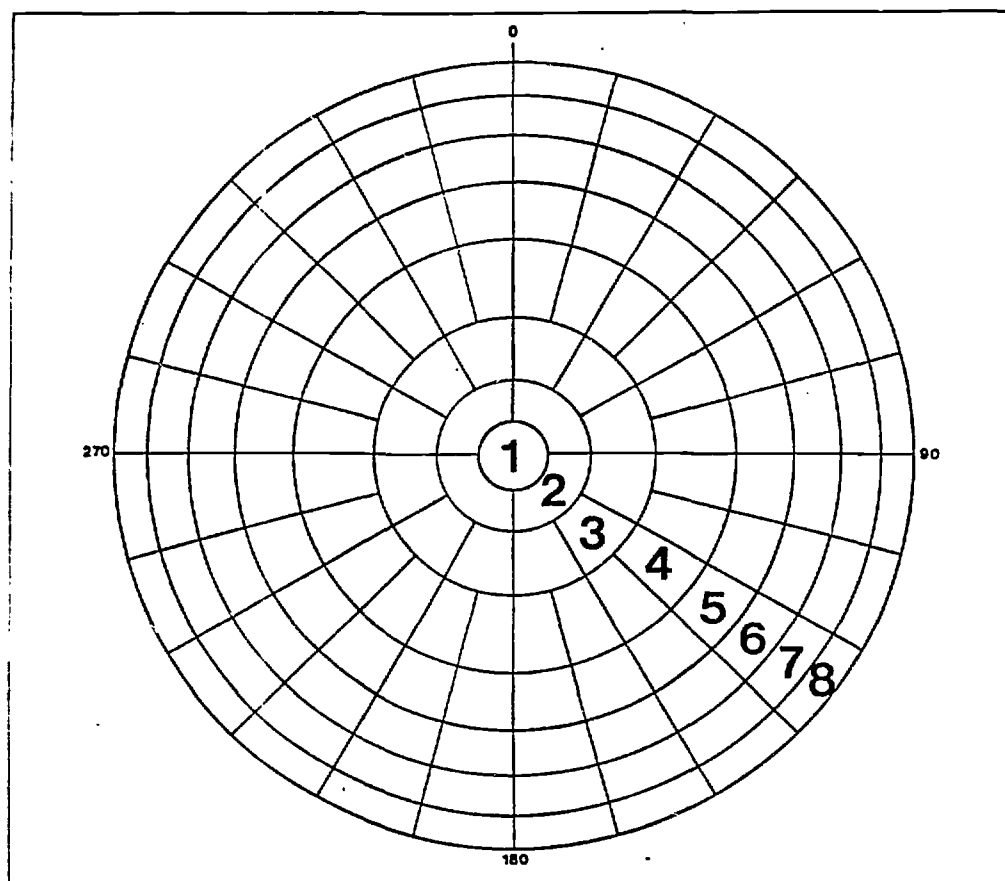
Légende de la Figure 44

- 1 : 25 à 125 m
- 2 : 125 à 225 m
- 3 : 225 à 325 m
- 4 : 325 à 425 m
- 5 : 425 à 525 m
- 6 : 525 à 625 m
- 7 : 625 à 725 m
- 8 : 725 à 825 m
- 9 : 825 à 925 m

Sondage d'Auriat : droites de Henry ajustées aux distributions des distances interfracturales  
par tranche de 100 mètres de profondeur



(1)



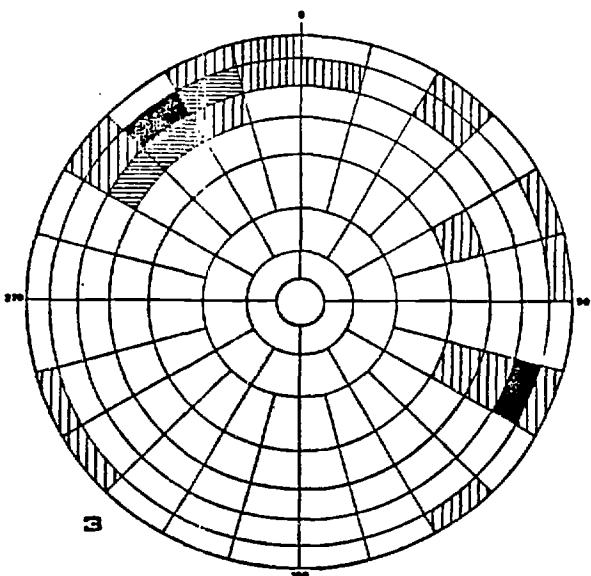
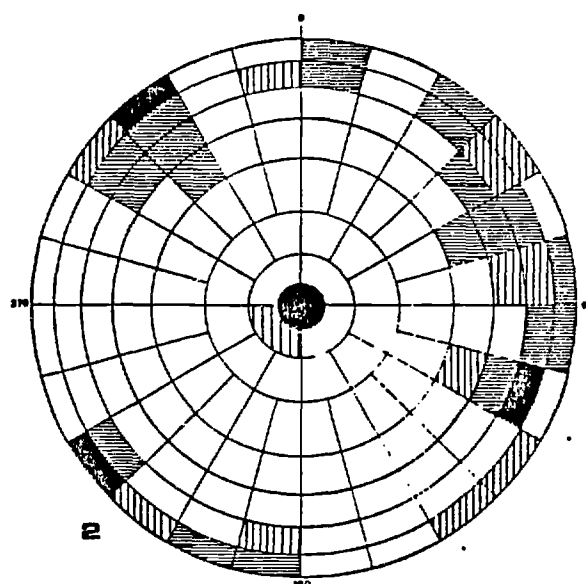
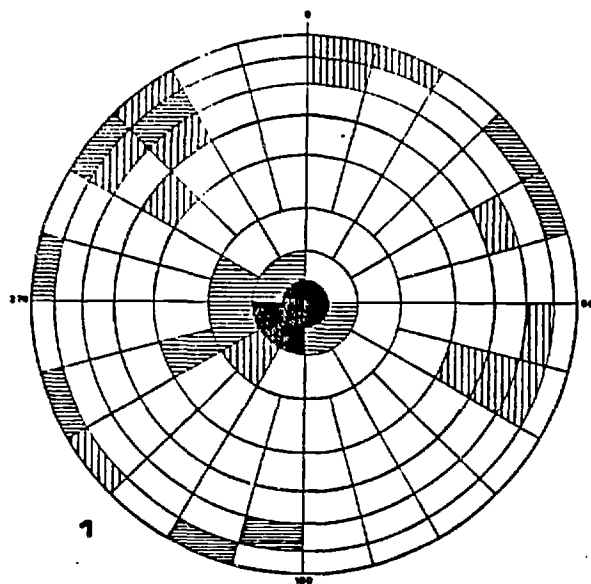
	$\theta$	$\alpha$
1	360°	8°
2	90°	17°
3	30°	32°
4	15°	49°
5	15°	62°
6	15°	73°
7	15°	82°
8	15°	90°

- Stéréogramme de densité adopté pour l'analyse de la fracturation du sondage d'Auriat




$\theta$  = angles entre les rayons de chaque couronne

$\alpha$  = valeurs des pentages correspondant aux cercles concentriques

Figure 9 d'après (1)



### Légende des stéréogrammes

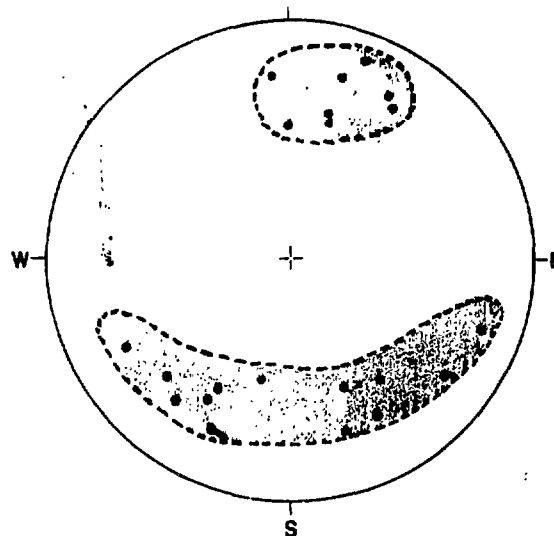
	1	2	3
Caract. des fractures	Fractures non minéral.	Fractures minéral.	Faïlles
Effectif	1246	893	163
	1.1 à 1.5 %	1.1 à 1.4 %	1.8 à 2.8 %
	1.5 à 3.5 %	1.4 à 2.3 %	2.8 à 3.8 %
	3.5 à 9.0 %	2.3 à 3.5 %	3.8 à 5.0 %

Sondage d'Auriat : stéréogrammes de densité en fonction des caractéristiques des fractures

Figure 10 d'après (1)

remplissage de quartz

447 à 906 m



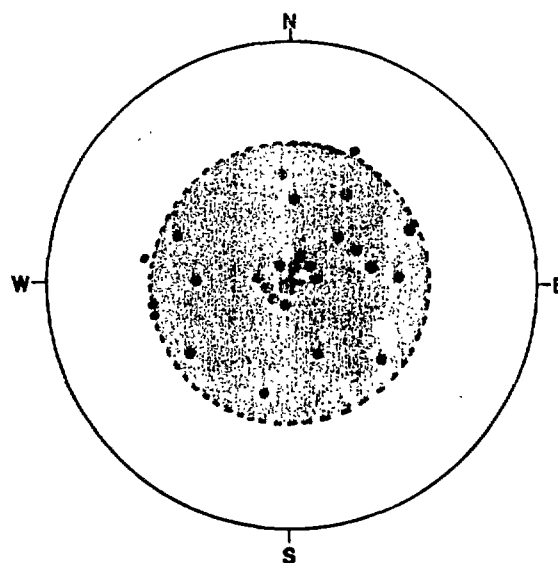
- 5 -

diaclasses à calcite

côte 587 m à 1002 m

pendage maximum 60°

moyen 20°



colmatage argileux

300 à 587 m

pendages Sud

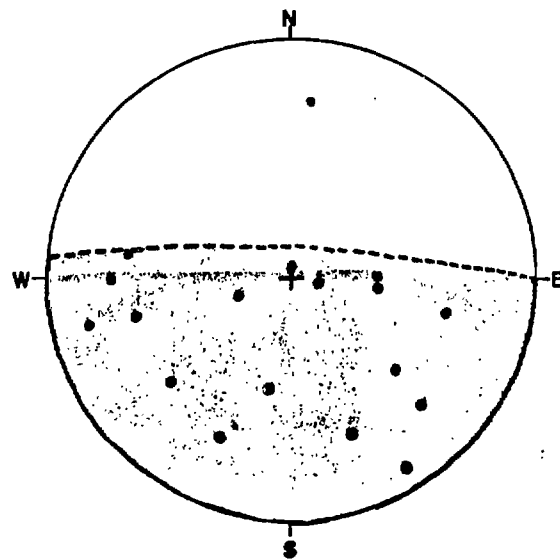


Figure 11 d'après (4)

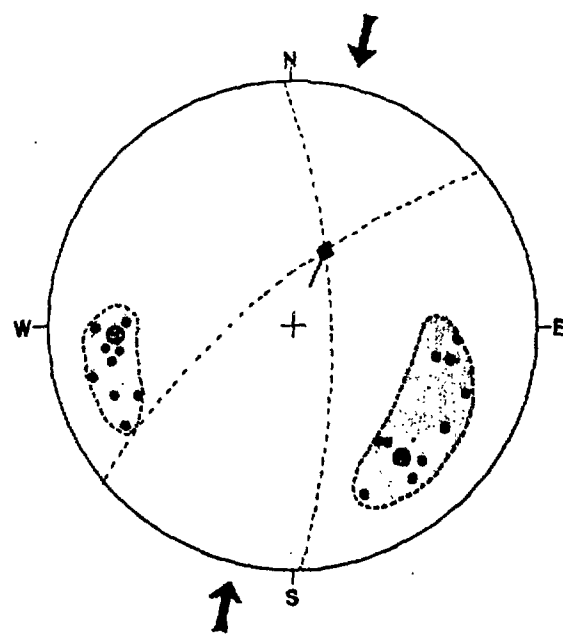
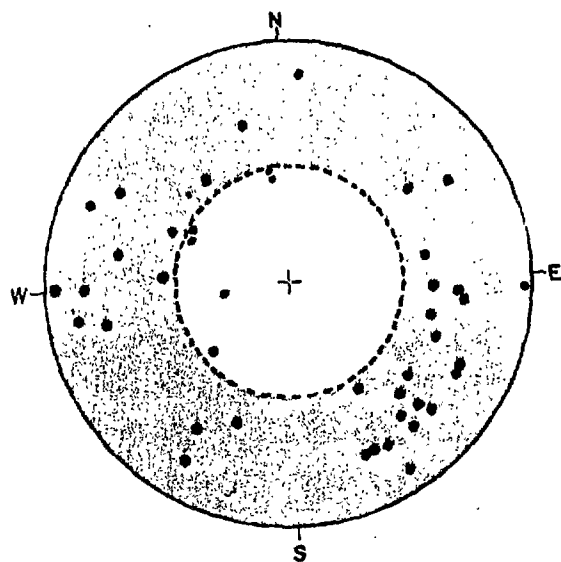
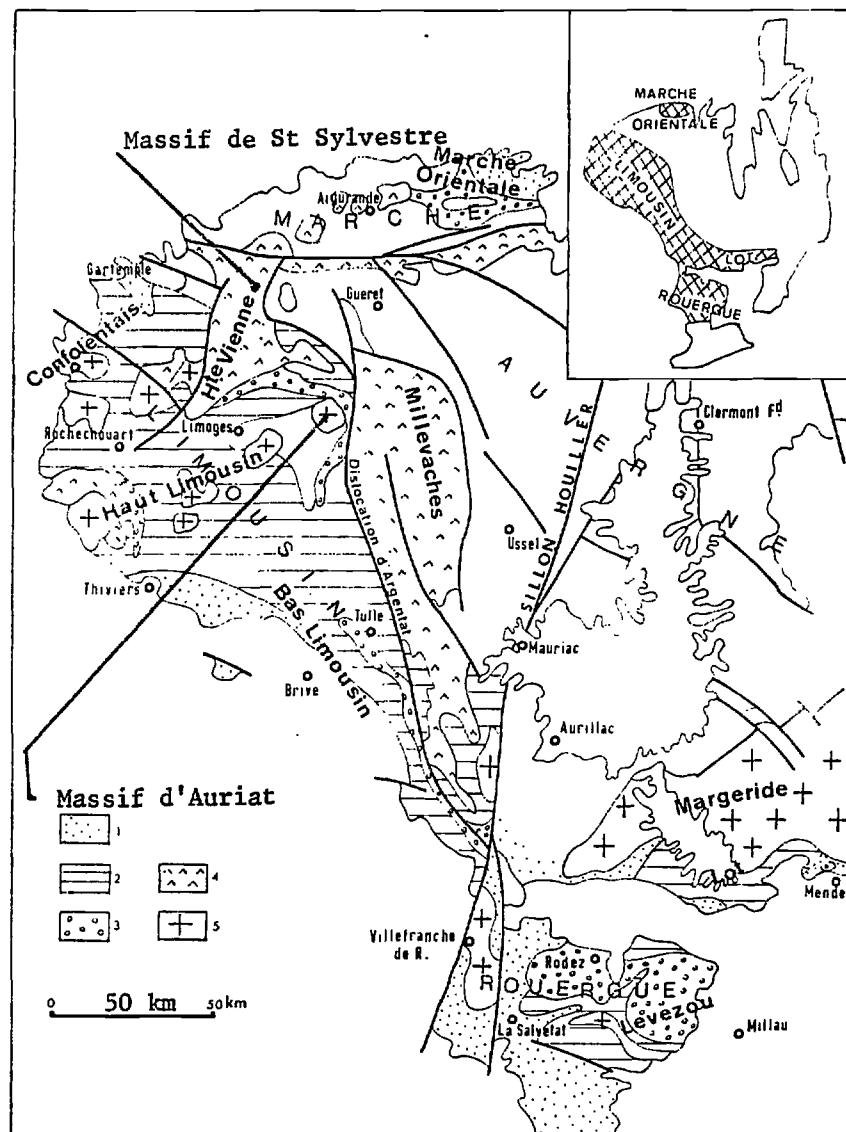


Figure 12 d'après (4)



L'ensemble ruténo-limousin : principales formations.  
 1. = Formations épizonales. - 2. = Micaschistes et gneiss mésozonaux. - 3. = Gneiss ceillés et amygdalaires. -  
 4. = Granites à muscovite de type « Millevaches ». - 5. = Autres granites.

Figure 13 d'après M. CHENEVOY



FORAGE N°0689/2x/14

DEVIATION\_PROJECTION HORIZONTALE

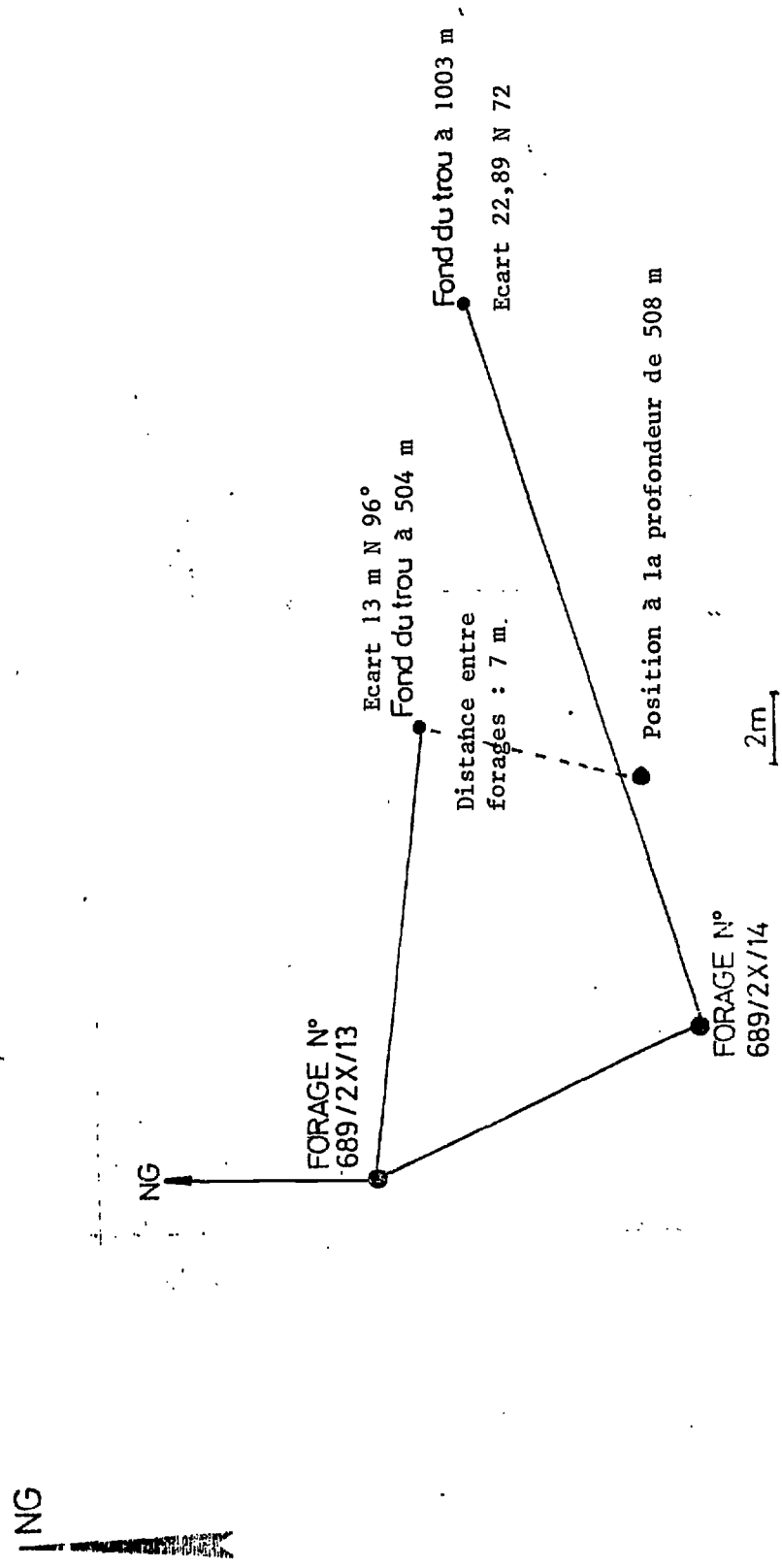
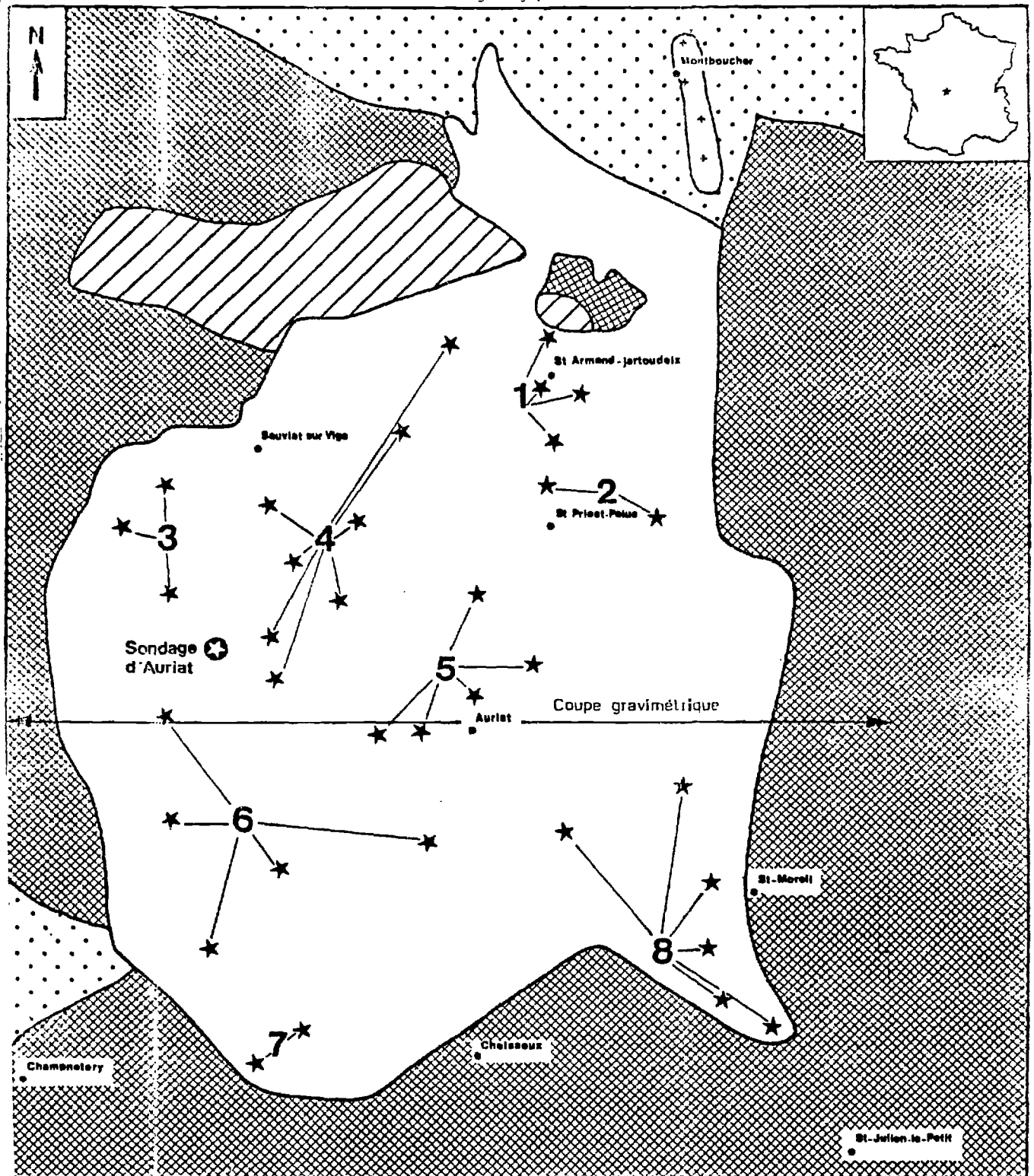


Figure 14 d'après (5)

Cadre géologique du massif d'Auriat



LEGENDE

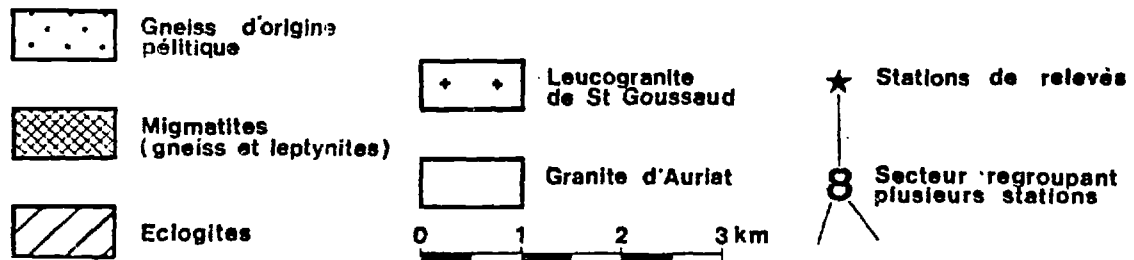
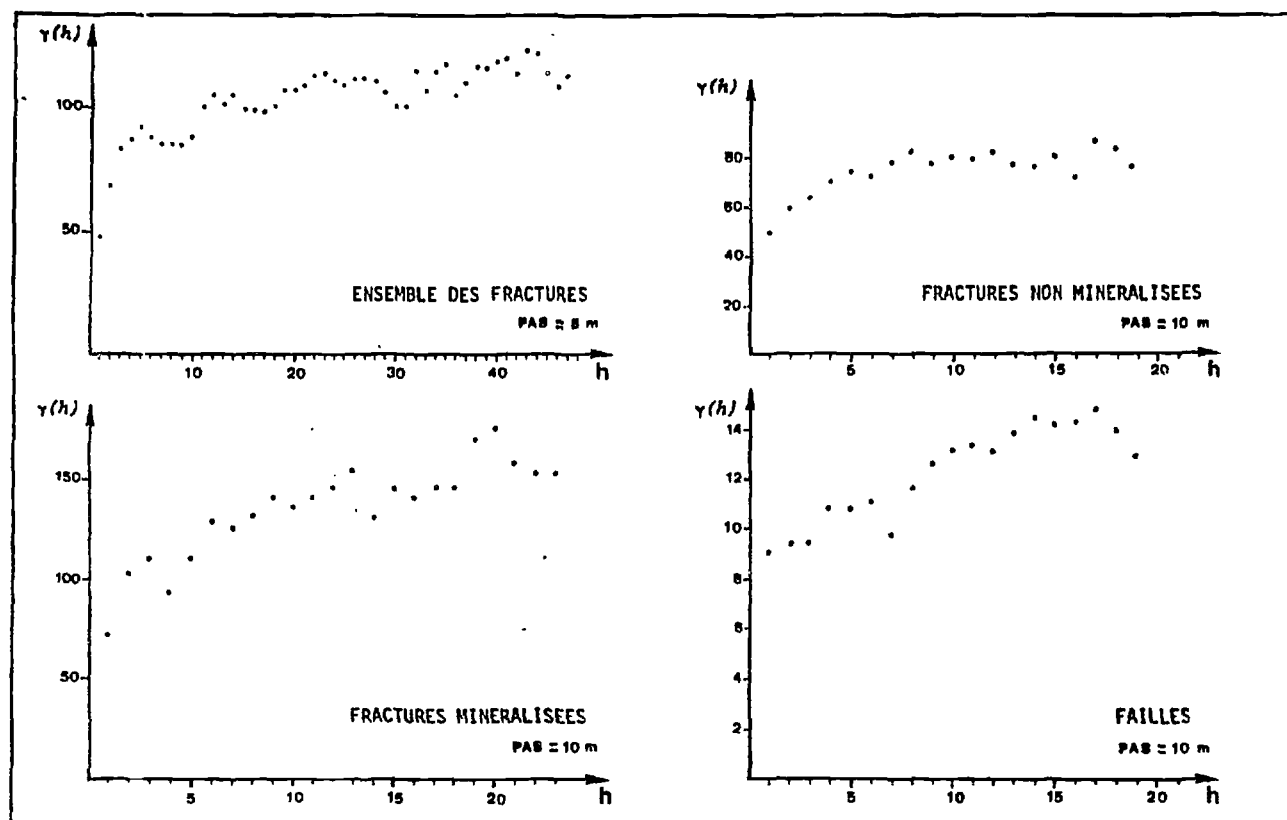


Figure 15 d'après (1)



Sondage d'Autiat : variogrammes calculés en fonction des caractéristiques des fractures d'après (1)

Figure 16 d'après (1)