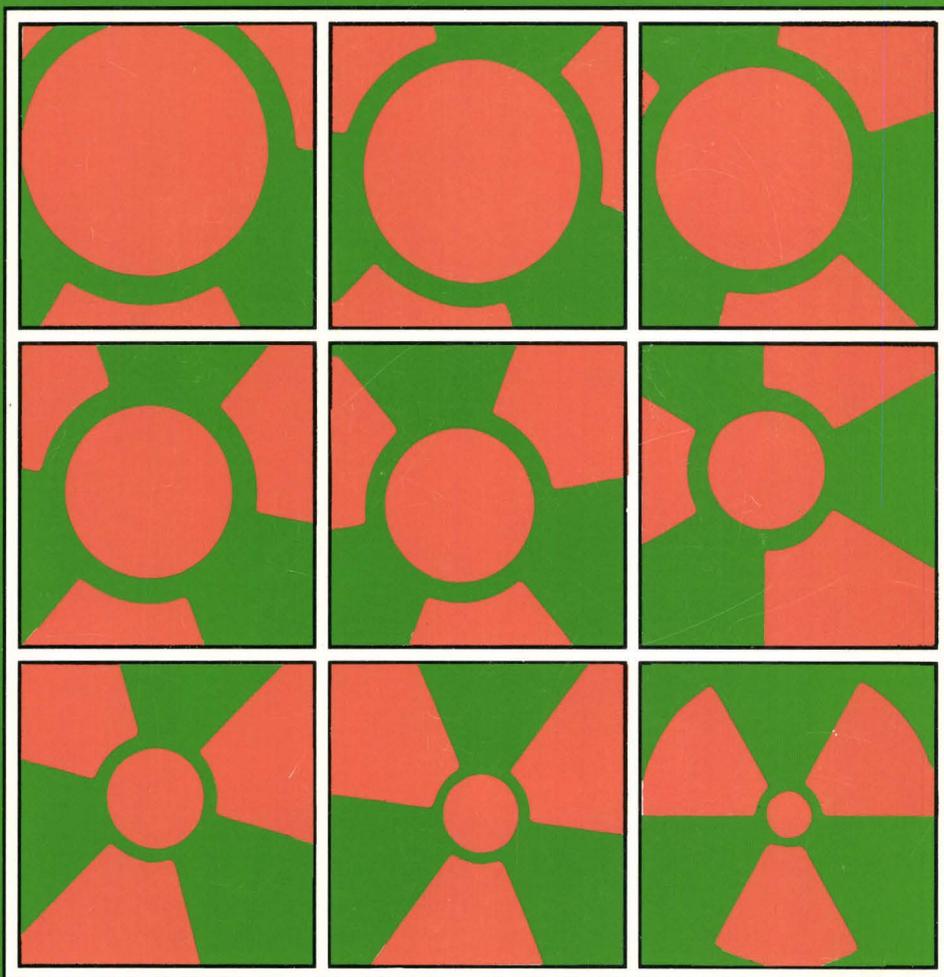




Commission européenne

sciences et techniques nucléaires

Études de la fissuration et de la microfissuration du granite



Rapport

EUR 15185 FR

La publication du présent rapport a bénéficié du soutien de l'unité «diffusion des connaissances scientifiques et techniques» de la direction générale Télécommunications, marché de l'information et valorisation de la recherche de la Commission européenne, Luxembourg.

Commission européenne

sciences et techniques nucléaires

Études de la fissuration et de la microfissuration du granite

J. Y. Boisson et H. S. Derlich

CEA
IPSN-DPEI-SERGD
BP n 6
F-92265 Fontenay-aux-Roses Cedex

Contrat n° F11W-0053

Rapport final

Ces travaux ont été réalisés sous contrat à frais partagés avec la Communauté européenne de l'énergie atomique dans le cadre de son programme de R & D sur la gestion et le stockage des déchets radioactifs (1985-1989), tâche 4: «stockage et évacuation en formations géologiques».

Direction générale
Science, recherche et développement

1994

EUR 15185 FR

Publié par
COMMISSION EUROPÉENNE

Direction générale XIII
Télécommunications, marché de l'information et valorisation de la recherche

L-2920 Luxembourg

AVERTISSEMENT

Ni la Commission européenne ni aucune personne agissant
au nom de la Commission n'est responsable de l'usage qui
pourrait être fait des informations ci-après.

Une fiche bibliographique figure à la fin de l'ouvrage.

Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes, 1994

ISBN 92-826-8666-3

© CECA-CE-CEEA, Bruxelles • Luxembourg, 1994

Printed in Spain

RESUME

La recherche entreprise dans le cadre de ce contrat avait pour objectif de caractériser l'extension des zones altérées autour de galeries ou de sondages dans des formations granitiques par changement de régime de contraintes, en tentant de qualifier et de quantifier la fissuration induite dans la roche par ces ouvrages. En effet, dans les roches cristallines susceptibles de recevoir un stockage de déchets radioactifs, le réseau microfissuré jouerait un rôle prépondérant dans la migration éventuelle des radio-éléments vers la biosphère. La quantification de ce réseau est donc fondamentale.

Le travail a porté à la fois sur un programme de prélèvement d'échantillons issus de différents travaux souterrains (effets des explosifs, des carottages...), sur la sélection de quelques méthodes de caractérisation de la fissuration, et leur application à des échantillons d'origine connue.

La sélection d'échantillons a concerné des granites de la région limousine (Tenelles, Vénachat), les prélèvements ayant été faits à partir de parois de galeries ou de chambre souterraine excavées à l'explosif, à partir de carottages en grands et très grands diamètres, à partir de surcarottages autour de sondages pré-imprégnés in situ, et à partir de carottes des deux forages profonds d'Auriat (de 500 et de 1000 m).

L'étude de la microfissuration du granite d'Auriat a été réalisée grâce à la mise au point de deux techniques complémentaires:

- l'imprégnation sous pression d'échantillons rocheux par une résine colorée permettant la visualisation des fissures en lames minces. Ces fissures sont quantifiées et répertoriées suivant leurs dimensions, leur orientation et leur environnement par analyse d'image semi-automatique. La méthode couvre le domaine des fissures dont la largeur est comprise entre 20 μm et 1 μm ;

- la porosimétrie au mercure, utilisée pour des dimensions plus faibles, de 2 μm à 60 Å. Compte tenu de la très faible porosité du granite, une nouvelle cellule de mesure a été construite et un logiciel de traitement des données spécifique a également été élaboré prenant en compte des effets du second ordre.

L'analyse d'échantillons des forages d'Auriat (de 500 et 1000 mètres de profondeur) en appliquant ces deux méthodes, a montré qu'une altération croissante du granite entraîne une augmentation du réseau poreux, mais que la profondeur ne paraît pas avoir d'influence déterminante sur les grandeurs mesurées. Par contre, la présence de fractures et le phénomène de colmatage ultérieur de celles-ci sont de nature à influencer ces grandeurs.

Par ailleurs, la nécessité, pour ce type d'étude, d'obtenir des échantillons aussi peu perturbés possible lors de la phase de prélèvement, nous a conduit à étudier et à mettre en oeuvre des techniques spécifiques:

- une technique d'imprégnation in situ par résine colorée injectée à partir d'un forage suivie d'un surcarottage en gros diamètre;

- une technique carottage en très gros diamètre (1 mètre et plus) en trou borgne à partir de galeries de mines permettant non seulement de fournir des carottes de grandes proportions pour échantillons préservés suivant les besoins, mais aussi de forer des puits de grandes dimensions avec parois saines et d'excellente qualité.

ABSTRACT

The objective of the research carried out in the framework of this contract was to characterize the extension of altered zones around galleries or boreholes into granite rocks due to field stress modifications, trying to qualify and quantify the induced fissuration within the rock by these works. It is possible that, in the crystalline rocks, the microfissured network could play a dominating part in the radionuclides migration processes to the biosphere. Quantification of this fissure network is fundamental.

The present work was concerned both with a sampling program for samples of various origins (explosives effects, coring effects...), with the selection of different methods for the fissuration characterization, and with the application of these methods on samples of known origins.

The sampling phase has involved granites from limousin area (France) like Tenelles and Vénachat mines, and samples have been taken from gallery or room walls excavated with the use of explosives, from large and very large cores, from overcores around in situ pre-impregnated boreholes, and from the two deep cores (500 and 1000 m) at Auriat (France).

The study of microcracks in Auriat granite has been carried out by perfecting two complementary techniques:

- the impregnation under pressure of rock samples with a colored resin, enabling rock cracks to be observed from thin section. These cracks are quantified and listed according to their size, orientation and environment using semi-automatic image analysis. This method covers cracks having a width between 20 μm and 1 μm ;

- the mercury porosimetry, used for smaller-sized cracks, between 2 μm and 60 \AA . Considering the low porosity of granite, a new measuring device has been designed and a specific data-processing software has also been developed integrating additional parameters.

A study performed on Auriat samples (500 and 1000 m boreholes) using the two methods has shown that an increasing alteration state leads to increase the porous network, but that depth does not seem to have any determining influence on the measured values. On the opposite, fractures and their post-filling could have an apparent influence on these values.

Moreover, the necessity, for this study, to get less possible disturbed samples during the sampling phase, has led us to study and to utilize specific techniques:

- in situ impregnation of rocks with colored resin injected from a first borehole, followed by a large diameter overcoring operation;

- a very large diameter coring technique (1 m at least), from galleries in a mining environment, allowing not only the obtention of very large core suitable for preserved samples if needed, but also the coring of very large wells with safe and high quality wall.

AVANT-PROPOS

Le présent document rend compte de l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du contrat à frais partagés n° FI 1W-0053-F (CD) entre la Commission des Communautés Européennes et l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire du Commissariat à l'Energie Atomique et intitulé : "Etude de la fissuration et de la microfissuration du granite".

Cette étude s'inscrit dans le cadre de programmes de recherche sur la sûreté concernant l'isolement définitif d'un stockage de déchets de haute activité dans des formations granitiques à grande profondeur, et porte particulièrement sur la reconnaissance de la fissuration induite par changement de régime de contraintes sous l'effet de travaux miniers (explosifs ou forages).

Cette étude, réalisée sous la responsabilité de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (responsables H.S. DERLICH et J.Y. BOISSON, ingénieurs à l'I.P.S.N.) a été menée à bien grâce aux travaux de Christine VUILLEUMIER qui a réalisé l'étude sur la visualisation et la quantification du système microfissural du granite d'Auriat du Laboratoire de Microanalyses Nucléaires de l'Université de Besançon dirigé par le Professeur A. CHAMBAUDET. La société de forage SOREIS/COREIS de Limoges a assuré la réalisation de toutes les opérations de foration y compris les carottages en très grands diamètres. Justo CABRERA-Géologue Consultant a assuré une part importante des études géologiques pour cette recherche.

TABLE DES MATIERES

RESUME	III
ABSTRACT	V
AVANT-PROPOS	VII
TABLE DES MATIERES	IX
LISTE DES FIGURES	XV
LISTE DES TABLEAUX	XXI
1. OBJECTIFS GENERAUX DE L'ETUDE	1
1.1 Objectifs de l'étude	1
1.2 Choix des échantillons et méthodes de prélèvements	6
1.2.1 Etude détaillée d'échantillons de grainite d'un forage carotté de 0 a 1000 m déjà existant	6
1.2.2 Observations sur les prélèvements par carottages en parois d'une galerie de mine excavée à l'explosif	7
1.2.3 Différents échantillonnages pour observation des effets de l'utilisation conjuguée d'un prédécoupage et d'un explosif	7
1.2.3.1 Observations sur prélèvements par petits carottages de blocs issus de la réalisation du radier de la chambre souterraine par prédécoupage et explosifs (expérience THM)	8
1.2.3.2 Observations sur les prélèvements par petits carottages des carottes très gros diamètres dans le radier de l'expérience THM	8
1.2.4 Carottages en très gros diamètres	8
1.2.5 Observations sur prélèvements issus de surcarottages réalisés autour de forages injectés au préalable de résine colorée in situ, en paroi de mine	9
1.3 Sélection des méthodes d'étude	10

2.	MICROFISSURATION ET POROSITE DES ROCHES ET LEURS METHODES D'INVESTIGATION	15
2.1	Introduction	15
2.2	Structure d'un corps poreux	15
2.2.1	Définition de la porosité et différents types de discontinuités	15
2.2.2	Origine de la porosité	17
2.3	Méthodes d'étude en laboratoire de la porosité des roches	19
2.3.1	Méthode d'Archimède	19
2.3.2	Pycnométrie à liquide ou à gaz	19
2.3.3	Etude des isothermes d'absorption de gaz. Méthode de Brunauer - Emmet - Teller (B.E.T.)	20
2.3.4	Porosimétrie au mercure	22
2.3.5	Méthodes de quantification de la porosité close	27
2.4	Méthodes d'étude de la microfissuration d'une roche	27
2.4.1	Microscopie optique	27
2.4.2	Microscopie électronique	28
2.4.3	Emission acoustique	28
2.5	Influence de l'altération sur la porosité des roches cristallines	29
3.	MISE AU POINT DE DEUX TECHNIQUES POUR L'ETUDE DE LA POROSITE ET DE LA MICROFISSURATION DE ROCHES GRANITIQUES FAIBLEMENT POREUSES	37
3.1	Adaptation d'un porosimètre au mercure pour la mesure de la porosité de roches faiblement poreuses	37
3.1.1	Introduction	37
3.1.2	Présentation du porosimètre au mercure	38
3.1.2.1	Description de l'appareil et de ses composants	38
3.1.2.2	Principe des mesures de volume	38
3.1.2.3	Conduite d'une expérience	40
3.1.3	Premières mesures de porosité sur une roche granitique	42
3.1.3.1	Présentation des résultats	42
3.1.3.2	Améliorations envisagées	49
3.1.4	Conception d'un nouveau pénétromètre	49
3.1.4.1	Critères de choix	49
3.1.4.2	Caractéristiques du nouveau pénétromètre	49
3.1.5	Détermination du facteur de calibrage	51
3.1.5.1	Description du banc de mesure et mode opératoire	51

3.1.5.2	Résultats	51
3.1.5.3	Détermination théorique du facteur de calibrage	53
3.1.6	Mise au point de la nouvelle configuration	57
3.1.6.1	Choix du domaine d'étude	57
3.1.6.2	Quantification du bruit de fond	57
3.1.6.3	Logiciels	58
3.2.	Conception et mise au point d'une méthode de quantification de la microfissuration d'une roche	59
3.2.1	Introduction	59
3.2.2	Mise en oeuvre de l'imprégnation sous pression d'échantillons rocheux par une résine colorée	60
3.2.2.1	Choix d'une résine	60
3.2.2.2	Appareillage	61
3.2.2.3	Préparation des échantillons	61
3.2.2.4	Mise en oeuvre de l'imprégnation	61
3.2.3	Conception d'un poste d'analyse en vue de la quantification de la microfissuration d'une roche granitique	63
3.2.3.1	Préparation des échantillons	63
3.2.3.2	Appareillage	63
3.2.3.3	Observation de la microfissuration	63
3.2.4	Calcul des différents paramètres de quantification	70
3.2.4.1	Calcul du périmètre d'une fissure	70
3.2.4.2	Calcul de la surface d'une fissure	70
3.2.4.3	Calcul de l'orientation d'une fissure	72
3.2.4.4	Calcul de la longueur et de la largeur d'une fissure	72
3.2.5	Prise en compte des différents paramètres qualitatifs des fissures ..	72
3.2.5.1	Phase(s) minérale(s) adjacente(s) à une fissure	72
3.2.5.2	Type de fissure	72
3.2.6	Calcul des valeurs statistiques et représentations graphiques	73
3.2.7	Logiciels	73
3.2.7.1	Logiciel de quantification "ANAGRAN"	73
3.2.7.2	Logiciel de traitement statistique "STATGRAN"	74
3.2.8	Conduite d'une expérience de quantification et appréciation de la reproductibilité des mesures	74
4.	VISUALISATION ET QUANTIFICATION DU SYSTEME MICROFISSURAL DU GRANITE D'AURIAT	77
4.1	Presentation du granite d'Auriat	77

4.1.1	Travaux antérieurs réalisés par le B.R.G.M.	78
4.1.1.1	Caractéristiques pétrographiques, minéralogiques et géochimiques du granite d'Auriat	78
4.1.1.2	La fracturation et ses produits d'altération	81
4.1.1.3	Analyse de l'espace poreux	83
4.1.2	Altération hydrothermale du granite d'Auriat	84
4.1.2.1	Définition et causes de l'altération hydrothermale	84
4.1.2.2	Etude du granite d'Auriat	91
4.1.2.3	Influence de l'altération hydrothermale sur la porosité du granite d'Auriat	93
4.1.3	Comportement mécanique du granite d'Auriat	93
4.2	Quantification de la porosité et de la microfissuration en fonction de l'altération pour différents échantillons du granite du site d'Auriat (forage de 500 m)	94
4.2.1	Choix des échantillons	97
4.2.2	Quantification de la porosité	97
4.2.2.1	Conditions opératoires	97
4.2.2.2	Résultats	98
4.2.2.3	Discussion des résultats	98
4.2.3	Quantification de la microfissuration	106
4.2.3.1	Conditions opératoires	106
4.2.3.2	Résultats	106
4.2.3.3	Discussion des résultats	108
4.2.4	Interprétation des résultats et conclusion de l'étude	108
4.3	Etude du forage de 1000 mètres d'Auriat : analyse de la porosité et de la microfissuration du granite en fonction de sa profondeur et de ses caractéristiques	109
4.3.1	Choix des échantillons	110
4.3.2	Quantification de la porosité du granite d'Auriat en fonction de la profondeur du prélèvement	111
4.3.2.1	Conditions opératoires	111
4.3.2.2	Résultats et premières constatations sur les résultats de porosimétrie	111
4.3.3	Quantification de la microfissuration du granite d'Auriat en fonction de la profondeur du prélèvement	121
4.3.3.1	Conditions opératoires	121
4.3.3.2	Premières constatations sur les résultats de l'analyse optique	122

4.3.4	Interprétation des résultats et conclusion	126
4.3.4.1	Caractères généraux des prélèvements et premier examen des différents résultats	127
4.3.4.2	Corrélations entre les résultats de porosimétrie et de mesure de la microfissuration avec les caractéristiques des prélèvements	143
4.3.4.3	Conclusion de cette étude	145
5.	EFFETS SUR LA FISSURATION INDUITE DANS DES GRANITES PAR CAROTTAGES OU EXPLOSIFS	147
5.1	Introduction	147
5.2	Observations sur les parois de galerie de mine excavée par tirs d'explosif	149
5.2.1	Prélèvements par carottages	149
5.2.2	Echantillonnages à partir de carottages horizontaux ($\varnothing = 250$ mm) dans la galerie d'accès R 431 de THM	153
5.2.2.1	Carotte $\varnothing 250$ N° 1	153
5.2.2.2	Carotte $\varnothing 250$ N° 2	158
5.3	Effets dus à la réalisation du radier THM par prédécoupages et tirs à la poudre noire	163
5.3.1	Introduction	163
5.3.2	Echantillonnage dans les blocs de prédécoupage du radier de la chambre expérimentale THM	166
5.3.2.1	Situation	166
5.3.2.2	Description de l'échantillonnage	167
5.3.3	Echantillonnage dans une carotte de forage de grand diamètre (FGD) vertical descendant ($\varnothing = 1000$ mm), chambre THM des Tenelles	173
5.3.3.1	Objectifs de l'étude de ces échantillons	173
5.3.3.2	Echantillonnage FGD2 $\varnothing 1000$	173
5.4	Réalisation de forages carottes grands diamètres dans un massif granitique en mine	177
5.4.1	Objectifs du creusement de puits de grands diamètres à partir de galeries minières	177
5.4.2	Description du site et du projet	178
5.4.3	Moyens mis en oeuvre	179
5.4.3.1	La sondeuse	179
5.4.3.2	Les carottiers	179
5.4.3.3	Autres moyens	180

5.4.3.3.1	Système d'injection	180
5.4.3.3.2	Système de manutention	182
5.4.3.3.3	Infrastructures de génie civil	182
5.4.4	Réalisation des forages	184
5.4.4.1	Réalisation du forage FGD1 Ø 1000	184
5.4.4.2	Réalisation du forage FGD2 Ø 1000	185
5.4.4.3	Réalisation du forage FGD3 Ø 750	185
5.4.5	Conclusion sur les opérations de carottage très gros diamètre	187
6.	ETUDE DE LA FRACTURATION INDUITE PAR LES FORAGES DANS LE GRANITE DE LA MINE DE VENACHAT	189
6.1	Introduction	189
6.2	Description du site retenu	189
6.2.1	Cadre structural de la région	190
6.2.2	Caractéristiques structurales de la mine de Vénachat	190
6.2.3	Localisation des forages	194
6.2.3.1	Site A	194
6.2.3.2	Site B	197
6.3	Réalisation des opérations de forage, injection et surcarottage	200
6.3.1	Réalisation des forages	200
6.3.2	Analyse des carottes	202
6.3.3	Opération d'imprégnation	204
6.3.3.1	Essais de laboratoire	204
6.3.3.2	Dispositif d'injection in situ	206
6.3.3.3	Opération de remplissage	206
6.3.4	Les surcarottages	208
6.3.4.1	Surcarottage de F1 en 148 mm	208
6.3.4.2	Surcarottage de F2, F3, F4 et F5 en 260 mm	209
6.4	Sélection et observation de sections surcarottées	209
6.4.1	Forage F1	211
6.4.2	Forage F2	214
6.4.3	Forage F3	214
6.4.4	Forage F4	217
6.4.5	Forage F5	220
6.5	Intérêts de l'imprégnation in situ	224
	CONCLUSION GENERALE	227
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	231

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 - Fissures à proximité d'une charge explosive, 2
- Figure 2 - Ecaillage en galeries de mine, 4
- Figure 3 - Discages de carottes, 5
- Figure 4 - Différents paramètres descriptifs de la fissuration d'une roche (KATSUBE et al., 1985), 17
- Figure 5 - Adsorption de molécules gazeuses à la surface d'un solide (FAUDOT, 1980), 20
- Figure 6 - Angle de contact entre un solide et un liquide mouillant et non mouillant (FAUDOT, 1980), 21
- Figure 7 - Pénétration du mercure dans un pore conique (BOEGLIN, 1989), 25
- Figure 8 - a) Pore en forme d' "encrier" - b) Ouverture définitive d'un pore par le mercure sous l'effet de la pression (BOEGLIN, 1988), 26
- Figure 9 - Différents types de courbes de distribution poreuse (FAUDOT, 1980), 26
- Figure 10 - Emission acoustique enregistrée sur une roche granitique soumise à différentes températures (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984), 30
- Figure 11 - Valeurs maximales d'émission acoustique enregistrées en fonction de la température (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984), 30
- Figure 12 - Variation de la porosité ouverte et totale en fonction de la température (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984), 31
- Figure 13 - Variation du maximum d'émission acoustique en fonction de la porosité (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984), 31
- Figure 14 - Distribution du volume poreux en fonction du diamètre des pores dans des échantillons de granite (DEJOU et al., 1982), 34
- Figure 15 - Pénétrömètre: schéma d'ensemble et vue éclatée, 39
- Figure 16 - Schéma de principe des mesures de volume, 39
- Figure 17 - Courbe du pourcentage du volume cumulé en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard, 44
- Figure 18 - Courbe du pourcentage du volume incrémenté en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard, 45
- Figure 19 - Courbe du pourcentage du volume différentiel en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard, 46
- Figure 20 - Courbe du pourcentage de la surface cumulée en fonction du diamètre des pores obtenue avec la pénétromètre standard, 47

- Figure 21 - Courbe du pourcentage de la surface incrémentée en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard, 48
- Figure 22 - Plans du nouveau pénétromètre, 50
- Figure 23 - Schéma du banc de calibrage, 52
- Figure 24 - Courbe de bruit de fond du nouveau pénétromètre, 56
- Figure 25 - Dispositif d'imprégnation à la résine, 62
- Figure 26 - Schéma de principe du dispositif d'imprégnation, 62
- Figure 27 - Schéma synoptique du poste d'analyse de la microfissuration sur lames minces, 64
- Figure 28 - Fissuration intragranulaire dans un quartz (380,50 m), 65
- Figure 29 - Fissuration intragranulaire dans un plagioclase (380,50 m), 65
- Figure 30 - Fissuration intragranulaire dans un feldspath potassique (249 m), 66
- Figure 31 - Fissuration intragranulaire dans une biotite (100 m), 66
- Figure 32 - Fissuration intergranulaire entre un plagioclase et un quartz (100 m), 67
- Figure 33 - Fissuration intergranulaire entre un plagioclase et un quartz (100 m), 67
- Figure 34 - Fissures colmatées (100 m), 68
- Figure 35 - Fissures colmatées (100 m), 68
- Figure 36 - Fissures colmatées (100 m), 69
- Figure 37 - Fissures colmatées (486,05 m), 69
- Figure 38 - Schéma d'une fissure représentée dans un repère de coordonnées cartésiennes, 71
- Figure 39 - Schéma d'une lame mince et des zones étudiées, 71
- Figure 40 - Localisation du granite d'Auriat, 77
- Figure 41 - Colonne pétrographique des deux forages du granite d'Auriat et sa fracturation (in PARNEIX, 1987 d'après BRGM, 1980), 79
- Figure 42 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 12,05 mètres (B.R.G.M., 1981), 86
- Figure 43 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 512,55 mètres (B.R.G.M., 1981), 87
- Figure 44 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 654 mètres (B.R.G.M., 1981), 88
- Figure 45 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 952,20 mètres (B.R.G.M., 1981), 89
- Figure 46 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 1003,15 mètres (B.R.G.M., 1981), 90
- Figure 47 - Courbe effort-déformation ($\sigma = f(\epsilon)$) obtenue sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983), 95

- Figure 48 - Courbe effort-déformation ($\sigma = f(\epsilon 2)$) obtenue sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983), 96
- Figure 49 - Courbe $\sigma = f(\Delta V / V)$ obtenue sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983), 96
- Figure 50 - Courbes de volume cumulé des échantillons de granite de types 1, 2 et 3, 100
- Figure 51 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite de type sain, 101
- Figure 52 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite de type peu altéré, 101
- Figure 53 - Courbe de volume incrémenté de échantillon de granite de type 3, 102
- Figure 54 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite de différents types réunies sur un même graphe, 102
- Figure 55 - Courbes de surface cumulée des échantillons de granite de types 1, 2 et 3, 103
- Figure 56 - Courbes de surface incrémentée des échantillons de granite de types 1, 2 et 3, 104
- Figure 57 - Distribution de la porosité des échantillons de granite de types 1, 2 et 3, 105
- Figure 58 - Graphe représentant l'évolution de la porosité en fonction de la profondeur, 113
- Figure 59 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 297,22 m et 404,10 m, 114
- Figure 60 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 500,95 m et 598,49 m, 114
- Figure 61 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 600,24 m et 681,61 m, 115
- Figure 62 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 699,89 m et 700,20 m, 115
- Figure 63 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 721,05 m et 799,72 m, 116
- Figure 64 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 801,55 m et 801,88 m, 116
- Figure 65 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 899,85 m et 984,80 m, 117
- Figure 66 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 997,25 m et 998,18 m, 117

- Figure 67 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 998,50 m et 999,40 m, 118
- Figure 68 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 998,50 m et 999,58 m, 118
- Figure 69 - Distribution de la porosité pour les échantillons de granite prélevés entre 297,22 m et 721,05 m, 119
- Figure 70 - Distribution de la porosité pour les échantillons de granite prélevés entre 799,72 m et 999,58 m, 120
- Figure 71 - Schéma d'une lame mince réalisée dans une carotte de granite issue du forage de 1000 mètres de profondeur, 121
- Figures 72 à 84 - Evolution des différents paramètres de quantification de la microfissuration des échantillons prélevés à différentes profondeurs, 128 - 134
- Figures 85 à 95 - Histogrammes des orientations des fissures dans le plan d'observation des lames minces des échantillons de granite prélevés à différentes profondeurs, 135 - 140
- Figure 96 - Situation des mines des Tenelles et Vénachat, 148
- Figure 97.a - Site THM des Tenelles (vue en plan), 150
- Figure 97.b - Site THM des Tenelles (vue en coupe), 151
- Figure 98 - Creusement d'une galerie par tirs d'explosifs, 152
- Figure 99 - Echantillon d'écaille de paroi (position et photo), 154
- Figure 100 - Carotte Ø 250 N° 1 et ses cinq échantillons carottés: (a) photo d'ensemble, (b) vue schématique, 155
- Figure 101 - Echantillonnage dans Ø 250 N° 1 (a) photo de détail, (b) schéma explicatif des positions de lames dans 1.1, 156
- Figure 102 - Exemples d'échantillons carottés pour étude de lames de la carotte Ø 250 N° 1, 157
- Figure 103 - Carotte Ø 250 N° 2 et position des quatre échantillons re-carottés pour la confection de lames minces, 160
- Figure 104 - Exemple du découpage pour lames minces de l'échantillon 2.2: (a) photo (b) situation schématique des lames, 161
- Figure 105 - Exemples d'échantillons carottés pour étude en lame mince de la carotte Ø 250 N° 2, 162
- Figure 106 - Forages de prédécoupage du radier de la chambre THM, 164
- Figure 107 - Echantillons dans le bloc n° B-2, 168
- Figure 108 - Détail des découpes de l'échantillon B2-1 dans le bloc n° B-2, 169
- Figure 109 - Echantillon dans le bloc n° B-3, 170
- Figure 110 - Echantillons dans le bloc n° B-4, 171

- Figure 111 - Implantation des forages FGD dans la chambre THM, 174
- Figure 112 - (a) Disposition des 5 échantillons sur FGD2 Ø 1000 - (b) Exemple de la section GD5 pour analyses, 175
- Figure 113 - Sondeuse et carottier Ø 1000, 181
- Figure 114 - Carotte FGD2 Ø 1000 et virole en tête de forage, 183
- Figure 115 - Extraction de la carotte inclinée FGD3 Ø 750, 186
- Figure 116 - Parois parfaitement lisses du forage FGD2 Ø 1000, 188
- Figure 117 - Localisation de la mine de Vénachat dans le contexte du complexe granitique du massif de Saint Sylvestre (Carte d'après J. Barbier et G. Ranchin, 1969), 191
- Figure 118 - Schéma structural de la région d'Ambazac (Carte BRGM, 1974), 192
- Figure 119 - Panorama de la mine à ciel ouvert de Vénachat, 193
- Figure 120 - Projection stéréographique des plans du site A (Projection de Wulff, hémisphère inférieur), 194
- Figure 121 - Localisation des forages F1, F2 et F3 dans le site A, 195
- Figure 122 - Profils structuraux du site A avec la localisation des forages F1, F2 et F3, 196
- Figure 123 - Projection stéréographique des plans du site B (Projection de Wulff, hémisphère inférieur), 197
- Figure 124 - Localisation des forages F4 et F5 dans le site B, 198
- Figure 125 - Profils structuraux du site B avec la localisation des forages F4 et F5, 199
- Figure 126 - Réalisation des forages en diamètre 56 mm, 201
- Figure 127 - Circulation d'eau le long des plans pendant la réalisation des forages en diamètre 56 mm. L'exemple montre plusieurs sorties d'eau autour du forage F1, 201
- Figure 128 - Développées des carottes (diamètre 56 mm) des forages F1, F2, F3, F4 et F5, 203
- Figure 129 - Schéma du dispositif en tête de forage pour mise en oeuvre des imprégnations in situ, 207
- Figure 130 - Surcarotte du forage F5 de 250 mm de diamètre, 209
- Figure 131 - Coupe des forages et surcarottages avec la fracturation interceptée et les sections choisies pour l'analyse, 210
- Figure 132 - Orientation des carottes, 212
- Figure 133 - Légende des symboles utilisés pour les figures 134 à 139, 213
- Figure 134 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces, 215

- Figure 135 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces, 216
- Figure 136 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces, 218
- Figure 137 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces, 219
- Figure 138 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix des secteurs pour prélèvements et pour étude en lames minces, 222
- Figure 139 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix des secteurs pour prélèvements et pour étude en lames minces, 223

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	1	- Caractéristiques des échantillons de granodiorite provenant de la Sierra Nevada (KRANK et WATTERS, 1983), 33
Tableau	2	- Caractéristiques des pores et degré d'altération des échantillons de granite provenant d'Atikokan (Ontario, Canada) (KATSUBE et KAMINENI, 1983), 35
Tableau	3	- Résultats de mesures par porosimétrie au mercure obtenus avec un pénétromètre standard, 43
Tableau	4	- Détermination du facteur de calibrage d'un pénétromètre standard, 54
Tableau	5	- Détermination du facteur de calibrage du nouveau pénétromètre, 54
Tableau	6	- Calcul de la permittivité diélectrique relative du verre pour différentes valeurs du diamètre intérieur du condensateur, 55
Tableau	7	- Résultats de la quantification de la microfissuration d'un échantillon de granite, 75
Tableau	8	- Composition chimique des granites G1 et G2 (B.R.G.M., 1981), 82
Tableau	9	- Composition modale des granites de type G1 et G2 (B.R.G.M., 1981), 82
Tableau	10	- Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur le granite d'Auriat prélevé à différentes profondeurs (B.R.G.M., 1981), 85
Tableau	11	- Résultats de mesure par adsorption gazeuse sur le granite d'Auriat prélevé à différentes profondeurs (B.R.G.M., 1981), 85
Tableau	12	- Résumé des observations pétrographiques concernant l'altération hydrothermale dans le granite d'Auriat (PARNEIX, 1987), 92
Tableau	13	- Résultats obtenus en compression sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983), 95
Tableau	14	- Table des pressions appliquées pour les mesures par porosimétrie au mercure, 99
Tableau	15	- Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur des échantillons de granite de types 1, 2 et 3, 99
Tableau	16.b	- Importance relative de la porosité vis à vis de la microfissuration, 106
Tableau	16.a	- Résultats de la quantification de la microfissuration des échantillons de granite de types 1 à 3, 107
Tableau	17	- Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur des échantillons de granite prélevés entre 297,22 et 721,05 mètres, 112
Tableau	18	- Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur des échantillons de granite prélevés entre 799,72 et 999,58 mètres, 112

- Tableau 19 - Résultats de quantification de la fissuration des échantillons de granite prélevés entre 297,22 m et 999,40 m, 123
- Tableau 20 - Importance relative de la porosité vis à vis de la microfissuration dans les granites, 124
- Tableau 21 - Caractéristiques dimensionnelles des fissures adjacentes aux différentes phases des échantillons de granite prélevés entre 297,22 m et 799,72 m, 125
- Tableau 22 - Caractéristiques dimensionnelles des fissures adjacentes aux différentes phases des échantillons de granite prélevés entre 801,55 m et 999,40 m, 126
- Tableau 23 - Echantillonnage dans la carotte Ø 250 N° 1. Liste des lames à étudier, 158
- Tableau 24 - Echantillonnage dans la carotte Ø 250 N° 2. Liste des lames à étudier, 159
- Tableau 25 - Echantillonnage dans les blocs du radier prédécoupé et excavé à la poudre noire de la chambre THM, 172
- Tableau 26 - Echantillonnage carotté dans FGD2 Ø 1000, 176
- Tableau 27 - Caractéristiques géométriques de la fracturation dans les sites A et B choisis pour les opérations de forage, 197
- Tableau 28 - Sélection d'échantillon imprégnés in situ et surcarottés dans le granite de la mine de Vénachat, 221

1. OBJECTIFS GENERAUX DE L'ETUDE

1.1 Objectifs de l'étude

Une des solutions envisagées pour le stockage des déchets nucléaires de haute activité est le stockage en profondeur, les sites géologiques envisagés pouvant être, entre autre, des formations cristallines tels les granites, ou les schistes.

Les déchets vitrifiés seraient enfouis profondément en galeries ou puits dans la formation géologique choisie, cette formation constituant la barrière géologique. Une barrière dite "ouvragée" pourrait être interposée entre la barrière géologique et les conteneurs.

Cette succession de barrières doit permettre d'éviter ou, le cas échéant, de ralentir la migration des radioéléments vers la biosphère. Dans ce processus, la barrière géologique est d'une importance capitale car c'est elle qui, en dernier ressort, doit retarder les processus migratoires.

On sait que le creusement de puits ou de galeries de mines est réalisé soit par des tirs d'explosifs permettant de donner des profils variés à la galerie, soit au moyen de forages ou mieux de tunneliers conduisant à des sections circulaires parfaites. Ainsi, dans le domaine minier, ces techniques sont deux des causes majeures à l'origine des phénomènes de fracturation en parement:

- l'utilisation couplée de forages rapides et des explosifs pour le creusement;
- la libération des contraintes naturelles autour des cavités réalisées, avec parfois un accroissement de leur valeur par concentration autour des excavations.

La méthode par tirs d'explosifs induit une zone de fracture en anneau autour de la galerie pouvant avoir une extension importante suivant la nature de l'explosif et la disposition des charges explosives dans le front de taille. Dans une zone très proche des charges explosives, on peut voir ainsi apparaître dans le granite des ruptures par compression provoquant des fissures de quelques millimètres à quelques microns d'épaisseur (Cf fig n°1). Suivant la géométrie du milieu de propagation, on peut avoir une réflexion de l'onde de choc sur une surface libre. L'onde de compression se transforme alors en onde de traction, et provoque la formation d'une ou plusieurs écailles successives.

Moins bien étudiés sont les effets d'écaillage obtenus dans les galeries ayant subi les effets d'une forte explosion (nucléaire par exemple), ou bien ayant été creusées après le tir, à une distance relativement faible de celui-ci. Certaines fractures sont dues au dépassement des contraintes de rupture en condition statique, mais pour les cassures provoquées au moment d'un tir, on peut être aussi en présence de condition de fracturation dynamique par réflexions complexes (DERLICH S., 1970).

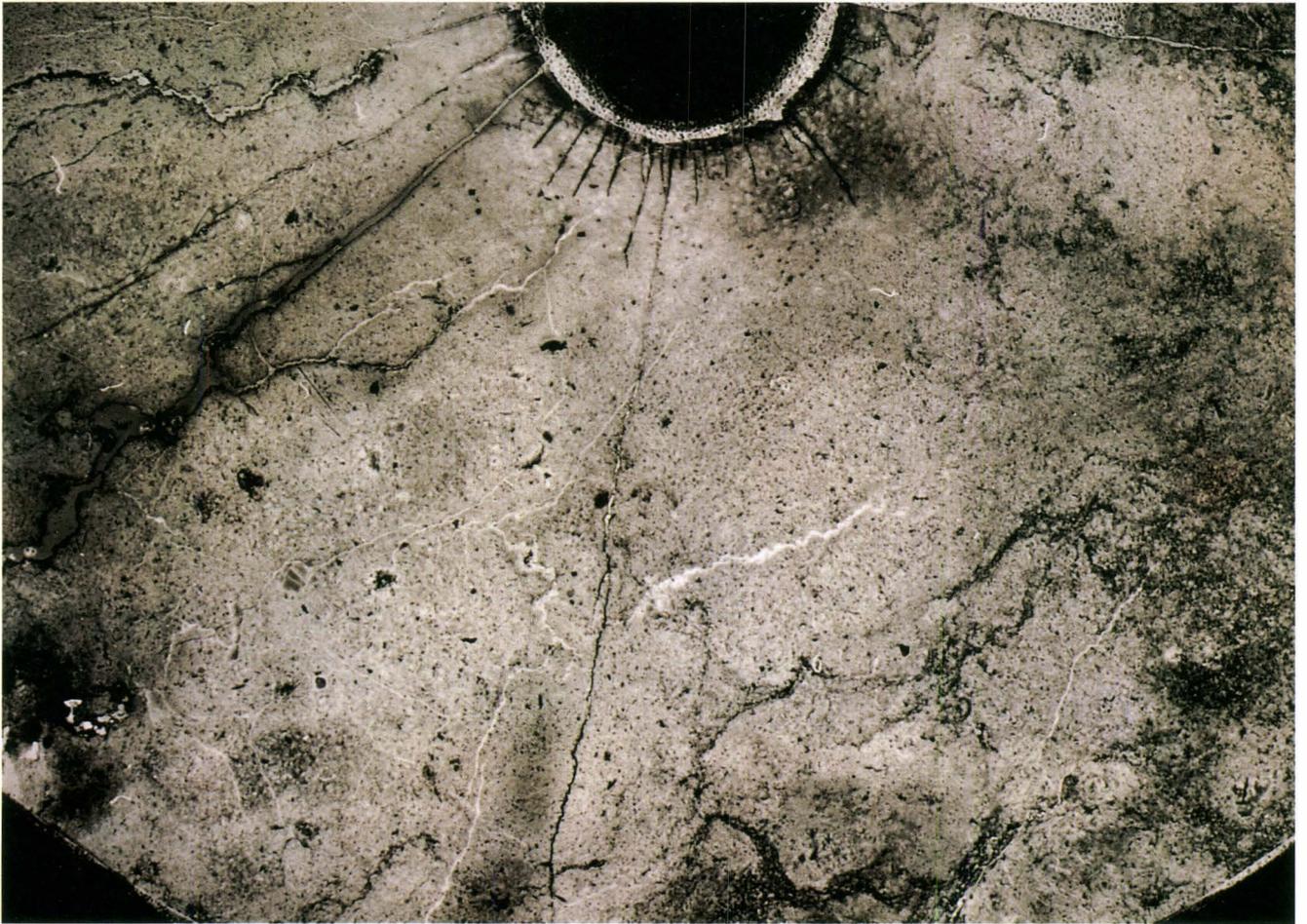


Figure 1 - Fissures à proximité d'une charge explosive

Dans le cas de forages réalisés par carottage au diamant ou de galeries creusées à l'aide de tunnelier, on observe également la création de fractures. Il s'agit en général d'une conséquence des modifications du champ des contraintes naturelles dans les parois de l'excavation.

On sait, dans des cas relativement simples, calculer la modification apportée aux contraintes naturelles des milieux dans lesquels sont creusées des cavités (OBERT L. et DUVALL W.I., 1967). Suivant la position considérée autour des excavations, les contraintes initiales peuvent être multipliées par un facteur trois. La réalisation de plusieurs opérations consécutives, par exemple faire un forage au parement d'une galerie, provoque dans les parois du forage un même effet multiplicateur qui se superpose à celui de la galerie. Il est possible alors, de voir se créer non seulement de l'écaillage en galerie ou sur les carottes (DERLICH S., 1970, 1972), mais encore un élargissement des forages eux-

mêmes par écaillage, jusqu'à l'obtention d'un profil d'équilibre en forme d'ellipse aplatie, dont l'orientation dépend de celle des contraintes locales.

Les plus fortes perturbations de l'état de contraintes initial se situent entre un et deux rayons d'excavation, distance comptée à partir de la paroi. Dans le cas de situations à contraintes naturelles élevées, on peut donc avoir éclatement des parois soit sous forme d'écailles, soit sous forme de fractures radiales.

Plus généralement on constate des effets de rupture par traction directe ou indirecte par écaillage aux parois des galeries (figure 2) ou discage (figure 3) des carottes de forages. Les écaillages aux parements des galeries sont bien connus des mécaniciens des roches et des mineurs. Ils se produisent dans les milieux à comportement fragile: ces ruptures sont importantes dans les roches comme le granite, mais également dans le sel et vraisemblablement l'argile. La gamme des effets rencontrés s'étend depuis la fissure pluridécimétrique jusqu'à la micro-fissure inter ou intra-cristalline.

Ces phénomènes doivent être considérés avec une attention particulière car leurs effets ont une influence non négligeable sur le comportement de la roche: ils en diminuent les propriétés d'étanchéité, et permettent une plus grande mobilité des fluides transitant dans le milieu.

De plus, ces phénomènes de fissuration peuvent augmenter la surface spécifique du matériau, et donc les possibilités de fixation des éléments en solution ou en suspension dans les fluides. Ils peuvent enfin modifier l'altérabilité de la roche.

Des études sont ou ont été menées sur ces sujets, notamment au plan international au sein de grands projets de laboratoires souterrains tels Stripa en Suède, Grimsel en Suisse ou l'URL (l'Underground Research Laboratory) au Canada.

In situ, l'utilisation de méthodes géophysiques (variations de vitesse de propagation de l'onde élastique p.e.) a permis de déterminer, lors de travaux dans les différents laboratoires susmentionnés, l'extension des zones affectées autour de puits ou de galeries de mines.

Nous avons pensé qu'il était important de faire une étude phénoménologique de tous ces effets, et de chercher à étudier les relations entre les paramètres de la fracturation induite (intensité, orientation...), les caractéristiques initiales du milieu (résistance mécanique...) et les causes des perturbations.

Dans ce cadre, l'objectif général de notre étude est de rechercher l'extension des zones altérées autour de galeries ou de sondages dans des formations granitiques bien connues, et de tenter d'en évaluer l'importance et les conséquences sur l'environnement d'un stockage de déchets radioactifs en milieu granitique.

Ainsi, le programme de recherche, poursuivi au cours de ce travail a été développé suivant deux axes:

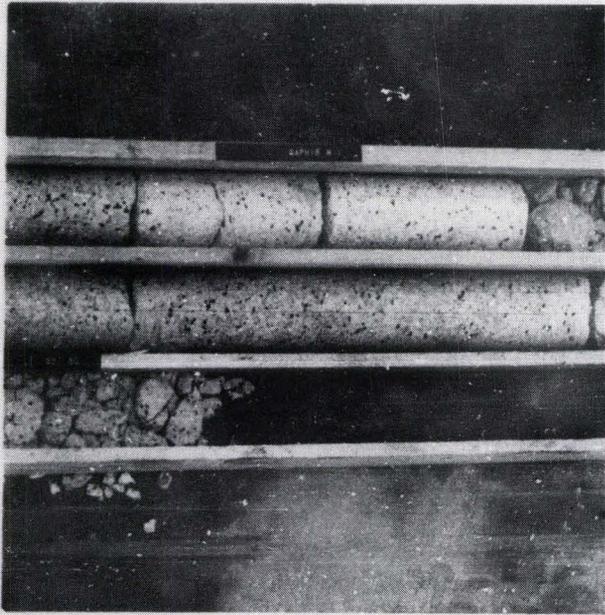
- mieux appréhender l'occurrence de ces phénomènes de fissuration, grâce à une sélection d'échantillons dans différents cas d'altération induite, soit par les effets des carottages, soit par les effets des tirs à l'explosif ;

- sélectionner et mettre en oeuvre des méthodes d'analyses adéquates pour qualifier et quantifier au mieux les phénomènes de fissuration ayant affecté les échantillons sélectionnés.

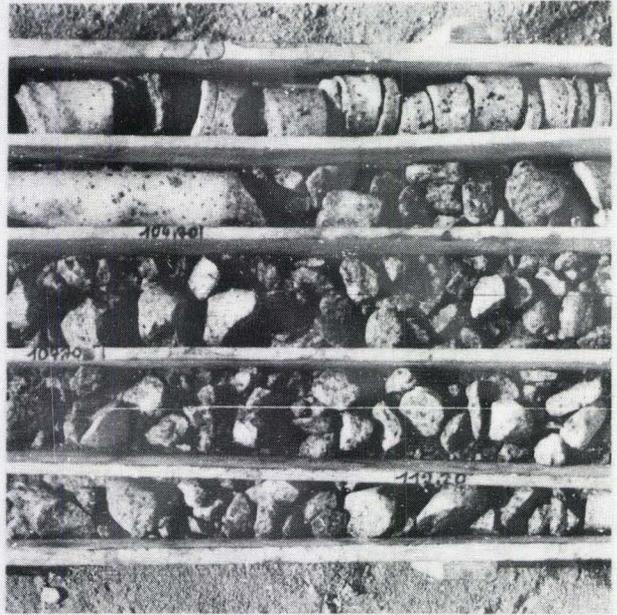
On notera que les méthodes de prélèvement des échantillons et de réalisation des lames minces ou sections polies par exemple, sont elles-mêmes la cause de fracturations parasites; on tentera dans la mesure du possible de les distinguer par traçages préalables des fissures au moyen d'injection de colorants par exemple, aux différents stades de la préparation.



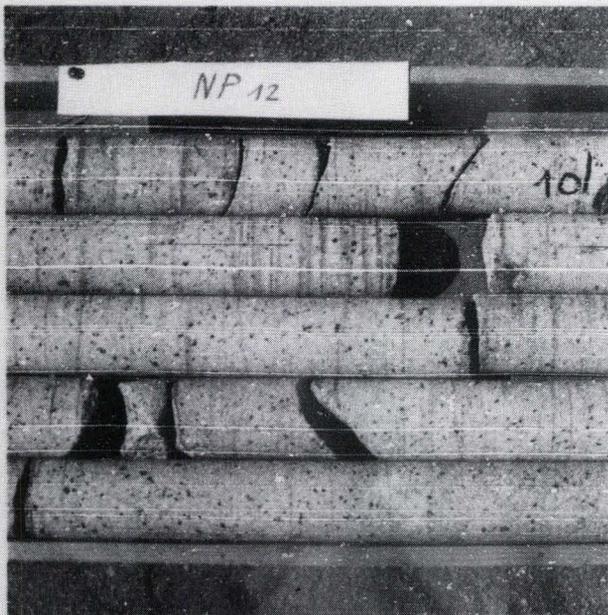
Figure 2 - Ecaillage en galeries de mine



1
Carotte pulvérisée



2
Carotte très fracturée



3
Roche saine



4
Roche fracturée en rondelles

Figure 3 - Discages de carottes

1.2 Choix des échantillons et méthodes de prélèvements

Le programme de recherche d'échantillons représentatifs quant à l'objectif visé s'est articulé comme suit:

- étude détaillée d'échantillons de granite d'un forage carotté de 0 - 1000 m déjà existant ;
- observations sur prélèvements par carottages en parois d'une galerie de mine excavée à l'explosif;
- observations sur prélèvements par petits carottages de blocs issus de la réalisation d'un radier de chambre souterraine par pré-découpage et tirs à la poudre noire;
- étude et démonstration de la faisabilité de forages miniers en très gros diamètres (1,00 m) en mine;
- observations sur prélèvements par petits carottages des carottes très gros diamètre dans le radier sus-mentionné;
- observations sur prélèvements issus de sur-carottages réalisés autour de forages d'injection préalable de résine colorée, en paroi de mine.

Nous présentons ci-après ces différents points. Ils sont développés en détail dans chacun des chapitres constituant le présent document.

1.2.1 Etude détaillée d'échantillons de granite d'un forage carotté de 0 à 1000 m déjà existant

Cette importante étude réalisée dans le cadre de ce contrat concerne des échantillons de carottes de forage entre 200 et 1000 m de profondeur pour examens systématiques: mesures porosimétriques et quantifications de la fissuration en microscopie optique.

En effet, la première série d'échantillons retenue provient de tronçons de carottes du granite des forages d'Auriat. Rappelons qu'après un examen de différents sites cristallins entrepris par l'I.P.S.N./C.E.A., une investigation poussée a été menée sur le massif granitique d'Auriat (Creuse) en procédant à deux forages carottés de 500 et 1000 mètres de profondeur. On a ainsi pu disposer d'échantillons (notamment pour le sondage 1000 m) issus d'une situation géotechnique bien précise et connue :

- roche prélevée par carottage ;
- échantillons situés entre 0 et 1000 m dans un état de contraintes in situ au moins fonction de la profondeur de prélèvement ;
- forage considéré comme vertical (1,5° env. de pendage vers N 70°) ;
- carottes orientées sur toute la distance de 0 à 1000 m (repérage du Nord magnétique).

Les échantillons sont des morceaux de carottes de diamètre 63 mm entre 250 et 500 m, et diamètre 48 mm entre 500 et 1000m, qui ont servi de support à notre étude en labo-

ratoire sur la mise en oeuvre de deux méthodes de caractérisation de la microfissuration des granites (porosimétrie, et analyse optique de lames colorées).

1.2.2 Observations sur les prélèvements par carottages en parois d'une galerie de mine excavée à l'explosif

Ces études sur les effets dus à l'utilisation d'explosif pour le creusement de galerie reposent sur l'analyse d'échantillons provenant du site des Tenelles (Haute-Vienne) qui est une chambre souterraine en milieu granitique (située à -100 m de profondeur environ) ayant servi à la réalisation d'une expérience Thermo-Hydro-Mécanique in situ. Deux situations distinctes ont conduit l'échantillonnage ainsi effectué pour ces études (S. DERLICH, 1990).

La première situation correspond à la possibilité d'étudier directement les effets dus aux explosifs et particulièrement le phénomène de "l'anneau" autour des parements et affecté d'une fissuration décroissante en fonction de l'éloignement à la paroi. Pour ce faire, on a réalisé des prélèvements par carottages dans le parement d'une galerie creusée à l'explosif par la technique du "bouchon canadien". Les carottages sont positionnés à l'endroit précis d'un "fourneau de tir" correspondant donc à une ancienne explosion en forage effectuée pour le creusement de la galerie. Les carottages ont été prévus pour explorer une profondeur horizontale de plusieurs mètres et les diamètres des carottes sont tels (diam : 250 mm) qu'on a tenté de minimiser la nouvelle perturbation fatalement induite par ces prélèvements eux-mêmes.

On étudie ainsi les effets directs des tirs de mines sur les parois et les effets induits par relâchement des contraintes sur les carottes.

1.2.3 Différents échantillonnages pour observation des effets de l'utilisation conjuguée d'un prédécoupage et d'un explosif

Cet échantillonnage concerne également l'influence de l'utilisation des explosifs en excavation minière, mais dans d'autres conditions que précédemment. Il s'agit de la seconde situation qui correspond à l'étude des fractures induites par le "prédécoupage" du radier du laboratoire souterrain THM de la mine des Tenelles (Haute Vienne) en milieu granitique. La surface du radier de cette chambre expérimentale creusée par - 100 m de profondeur, a été achevée à partir de forages horizontaux de prédécoupage suivis de tirs à la poudre noire (explosif à faible brisance). Cette méthode permettait d'éviter la formation d'un réseau de fractures venant s'ajouter aux fractures naturelles reconnues par ailleurs grâce à des forages ad hoc.

L'échantillonnage réalisé sur ce site correspond à deux techniques de prélèvement tout à fait différentes:

1.2.3.1 Observations sur prélèvements par petits carottages de blocs issus de la réalisation du radier de la chambre souterraine par prédécoupage et explosifs (expérience THM)

Il s'agit de carottages sur les blocs issus de ce prédécoupage, soit dans la trace, soit à côté de la trace des forages de prédécoupages.

1.2.3.2 Observations sur les prélèvements par petits carottages des carottes très gros diamètres dans le radier de l'expérience THM

Il a en effet été étudié et réalisé dans le cadre de ce contrat des carottages en très gros diamètres (1 mètre) à partir du radier de ce laboratoire souterrain, pour prélèvements quasi intacts de granite sur les forages de prédécoupage.

Les échantillons mentionnés ici proviennent de petits carottages effectués dans les carottes de très gros diamètre qui recoupaient au niveau du radier des zones avec traces de forages de prédécoupage et des zones sans traces permettant ainsi les comparaisons.

1.2.4 Carottages en très gros diamètres

Il s'est agi de l'étude et de la démonstration de la faisabilité, dans le cadre de ce contrat, de forages miniers en très gros diamètres (1,00 m) à partir du radier de la chambre expérimentale THM des Tenelles. On a envisagé ce mode de prélèvement dans l'espoir de supprimer les effets perturbateurs des procédés par explosifs et d'améliorer la méthode habituellement utilisée dans ces cas là et qui consiste à découper dans une paroi un prisme à section carrée par des forages de petit diamètre (56 ou 66 mm) pratiquement jointifs, et à casser la base de ce prisme le plus près possible de l'extrémité des trous forés.

Comme on l'a indiqué au paragraphe précédant, le premier objectif visé par la mise en oeuvre de ce procédé est le prélèvement d'échantillons de granite autour des forages de prédécoupage du radier THM qui soient aussi peu perturbés que possible.

La technique des carottages de très gros diamètre avait été déjà expérimentée et mise en oeuvre par les Suédois à STRIPA pour des forages de diamètres plus petits. La réalisation de nos travaux dans la mine des Tenelles a été confiée à la société SOREIS qui a établi une étude de faisabilité préalable avant de s'engager dans l'exécution.

La démonstration de ce programme de Forages Grand Diamètre à partir du radier de la mine des Tenelles a comporté finalement les trois forages suivants:

- FGD 1, vertical, 1 m de diamètre pour 2,30 m de long. Carotte extraite à l'explosif, et non récupérée;
- FGD 2, vertical, 1 m de diamètre (0,98 int.) pour 2,30 m de long. Carotte extraite au vérin plat et palan, et récupérée intacte;

- FGD 3, inclinée à 45° située à l'intersection du radier et du parement, 0,75 m de diamètre (0,73 mm int.) pour 1 m de long. Carotte récupérée.

Cette technique de forage, mise au point pour le prélèvement de roche intacte, peut également être utilisée pour la réalisation de forages en gros diamètre en trou non débouchant.

L'opération comprend la foration par carottier spécial sur machine conventionnelle légèrement modifiée, jusqu'à la profondeur souhaitée dans le diamètre choisi puis dans le cas de creusement de puits verticaux, on a le choix, suivant les objectifs visés:

- soit de sectionner mécaniquement à la base la carotte et la remonter au câble pour la conserver intacte;

- soit opérer une rupture dynamique par explosif, avec expulsion des gaz et fragmentation de la carotte pour évacuation plus aisée.

Cette méthode présente de nombreux avantages, parmi lesquels:

- obtention de puits de grands diamètres (au moins 1 m et plus);

- bonne qualité de la paroi du puits, avec surface régulière et diamètre constant tant en direction radiale qu'axiale;

- possibilité d'atteindre des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres, en forages verticaux descendants;

- déplacement aisé du système de foration d'un emplacement à l'autre;

- utilisation en contexte minier conventionnel (hauteur minimale de galerie de 5 m).

1.2.5 Observations sur prélèvements issus de surcarottages réalisés autour de forages injectés au préalable de résine colorée in situ, en paroi de mine

Au cours de cette phase, il s'est agi d'abord de la mise au point d'une méthode comprenant:

- des forages pour injection de résine colorée;

- des surcarottages de ces forages;

- des observations à différentes échelles pour juger de l'impact relatif du surcarottage par rapport au premier carottage et à la fissuration naturelle.

Ces essais sont réalisés par des forages horizontaux en front de mine à ciel ouvert, avec injection in-situ de résine colorée, et prélèvements d'échantillons par surcarottages gros diamètre dans la mine à ciel ouvert de Vénachat (Haute Vienne).

1.3 Sélection des méthodes d'étude

La recherche d'échantillons correspondant à différentes situations telles que décrites ci-dessus a été précédée d'un inventaire et d'une sélection de méthodes parmi les solutions suivantes:

- étude destructive du volume de roche, avec fabrication de lames minces suivant trois directions orthogonales pour examens qualitatifs et quantitatifs, (dimensions des fissures, étude microstructurale avec orientations, détermination de plans de fissures...);
- étude de la porosité par mesures de porosimétrie au mercure;
- matérialisation des fissures par imprégnation avec de la résine suivie d'une dissolution de la roche par acide comme cela est utilisé en biologie;
- étude des lèvres des fissures, par méthode mécanique (microphotographie à l'aide de micromanipulateur) ou microphotographie optique (visualisation par moiré en interférométrie).

On a évalué les possibilités de ces diverses méthodes devant permettre d'identifier et de caractériser les modifications apportées à une roche cristalline par les différentes techniques utilisées pour exécuter des sondages ou creuser des galeries de mines.

La discussion concernant les avantages et inconvénients respectifs des différentes méthodes possibles et la justification des choix qui ont été retenus dans le cadre de ce contrat sont explicitées dans deux rapports (DERLICH S., 1989; VUILLEUMIER, 1986)). On en rappellera ci-après les principales idées.

- Imprégnation et dissolution de la matrice rocheuse.

Cette méthode est essentiellement appliquée en biologie sur des organes prélevés sur de petits mammifères. Après imprégnation à la résine, il est facile de dissoudre la matière organique. Le volume des parties vides est important et permet d'obtenir un microsquelette rigide. On le métallise en vue d'examens au microscope électronique. Ainsi opacifiée, la préparation est également visible au microscope optique ou à la loupe binoculaire.

Dans le cas de la fissuration des roches, après des premiers essais d'imprégnation, il est évident qu'une partie seulement des fissures est vide naturellement et accessible à la résine. En admettant qu'on réussisse à obtenir un squelette de résine, il ne donnerait qu'une idée des réseaux cristallins et de leur fissuration initiale. Cette méthode n'a donc pas été retenue.

- Quantification de l'espace fissural par étude des surfaces des lèvres.

L'objet de notre étude étant l'analyse de l'espace fissural, il est nécessaire de prendre en compte un maximum de fissures existantes. Donc a priori, cette méthode n'est pas une méthode qui puisse fournir une analyse statistique de la fissuration. On pourrait toutefois l'utiliser pour étudier des échantillons de fissures choisis judicieusement, et ainsi chercher à

caractériser par microphotographie les caractéristiques morphologiques des parois des fissures ainsi que leur influence sur les variations d'épaisseur de la section des vides.

Des études semblables, dans une gamme dimensionnelle de l'ordre du millimètre ont déjà été présentées (GENTIER S., 1987), et par exemple réalisées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières dans le cadre de l'expérience thermique THM dans le site des Tenelles (DERLICH S., 1990) On montre que l'ouverture estimée des fissures après application de charges normales au plan moyen de la fissure peut varier de 13% à 42% et que la quantification du volume fissural nécessite des études approfondies de la morphologie spatiale (3D) des épontes des fractures. On n'a pas retenu cette méthode car elle ne fournit pas de procédé simple de caractérisation de la fissuration induite, objet de la présente étude.

Les deux principales méthodes qui ont été retenues pour être mises en pratique dans le cadre de cette recherche, sont la mesure de la porosité de la roche au moyen d'un porosimètre au mercure, et l'analyse quantitative de la fissuration par analyses d'images.

Ces études entreprises par le Laboratoire de Micro-analyses Nucléaires de l'Université de Besançon à la demande de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire du Commissariat à l'Energie Atomique avaient pour but une meilleure connaissance du granite (VUILLEUMIER C., 1986; 1990), et en particulier du système fissural vu sa probable importance vis à vis des processus migratoires des radionucléides. Sa qualification et sa quantification sont donc fondamentales car ce réseau fissural serait responsable de la circulation des fluides susceptibles d'entraîner avec eux, dans le cas d'un site de stockage, les radionucléides.

Différentes techniques avaient été envisagées pour quantifier le réseau microfissural, et nous avons finalement retenu les deux techniques nous permettant de travailler dans des domaines dimensionnels complémentaires.

Il s'agit d'une part de la porosimétrie au mercure adaptée aux granites (essais de mesure de la porosité par injection de mercure sous pression dans du granite provenant des forages d'Auriat (Creuse) et d'autre part, de l'imprégnation d'échantillons par résine colorée et analyses d'images par microscopie optique.

La première partie du travail (chapitre n°2) a été consacrée à une étude bibliographique sur les caractéristiques générales du réseau microfissural et poreux des roches cristallines, sur l'influence de différents paramètres sur ce réseau, et la présentation des différentes méthodes d'investigation de ce réseau microfissural et poreux.

On présente ensuite (chapitre n°3) les deux techniques d'étude retenues et développées pour cette étude.

La porosimétrie au mercure, mise en oeuvre au cours de cette étude permet d'avoir accès à des diamètres de pores compris entre 60 Å et 2 µm. Compte tenu de la très faible porosité des échantillons à analyser, il a fallu concevoir et réaliser une cellule adaptée au problème posé et élaborer un nouveau logiciel de traitement des données.

En effet, avant d'appliquer la méthode de façon systématique sur les échantillons ayant été soumis à différentes contraintes entre 0 et 1000 m, nous avons effectué des essais sur deux types de granites rencontrés dans les forages d'Auriat: un faciès sain, et un faciès ayant subi une altération hydrothermale. Il a été nécessaire, pour améliorer la méthode, d'augmenter fortement la sensibilité du porosimètre à mercure utilisé, en construisant un "pénétrromètre" de mêmes dimensions extérieures que ceux actuellement commercialisés, mais avec un capillaire à mercure beaucoup plus fin.

Pour les fissures d'une largeur supérieure, comprise entre 1 μm et 20 μm , on a procédé à des visualisations par imprégnation des échantillons avec une résine colorée puis à une analyse par microscopie optique couplée à une tablette à numériser. Cette seconde méthode sélectionnée et appliquée sur les mêmes échantillons de granite a pour objet de visualiser les microfissures par imprégnation de résine colorée sous pression. Les préparations sont ensuite étudiées par techniques optiques. La recherche menée sur ce point a consisté d'abord à définir une méthode fiable de préparation des échantillons. Les éprouvettes de granites sont déshydratées, dégazées, et imprégnées par une résine colorée sous pression de 20 bars. Les échantillons sont alors placés en étuve jusqu'à polymérisation complète de la résine. A partir de ceux-ci, des lames minces de 30 μm sont préparées et permettent l'analyse optique en lumière transmise des fissures imprégnées et des phases minérales adjacentes. La mise en oeuvre de ces analyses optiques est basée sur l'utilisation d'un microscope optique polarisant avec tube à dessiner permettant la visualisation d'une diode lumineuse colorée sur l'image observée. Cet ensemble est lié à une tablette à numériser avec curseur. On peut ainsi acquérir les caractéristiques (coordonnées, orientations, surfaces...) du contour d'une fissure imprégnée, et réaliser tous traitements mathématiques nécessaires à partir de ces données grâce à des logiciels développés pour ces applications dans le cadre de cette étude. Cette technique a nécessité également l'élaboration de différents logiciels pour traiter les données.

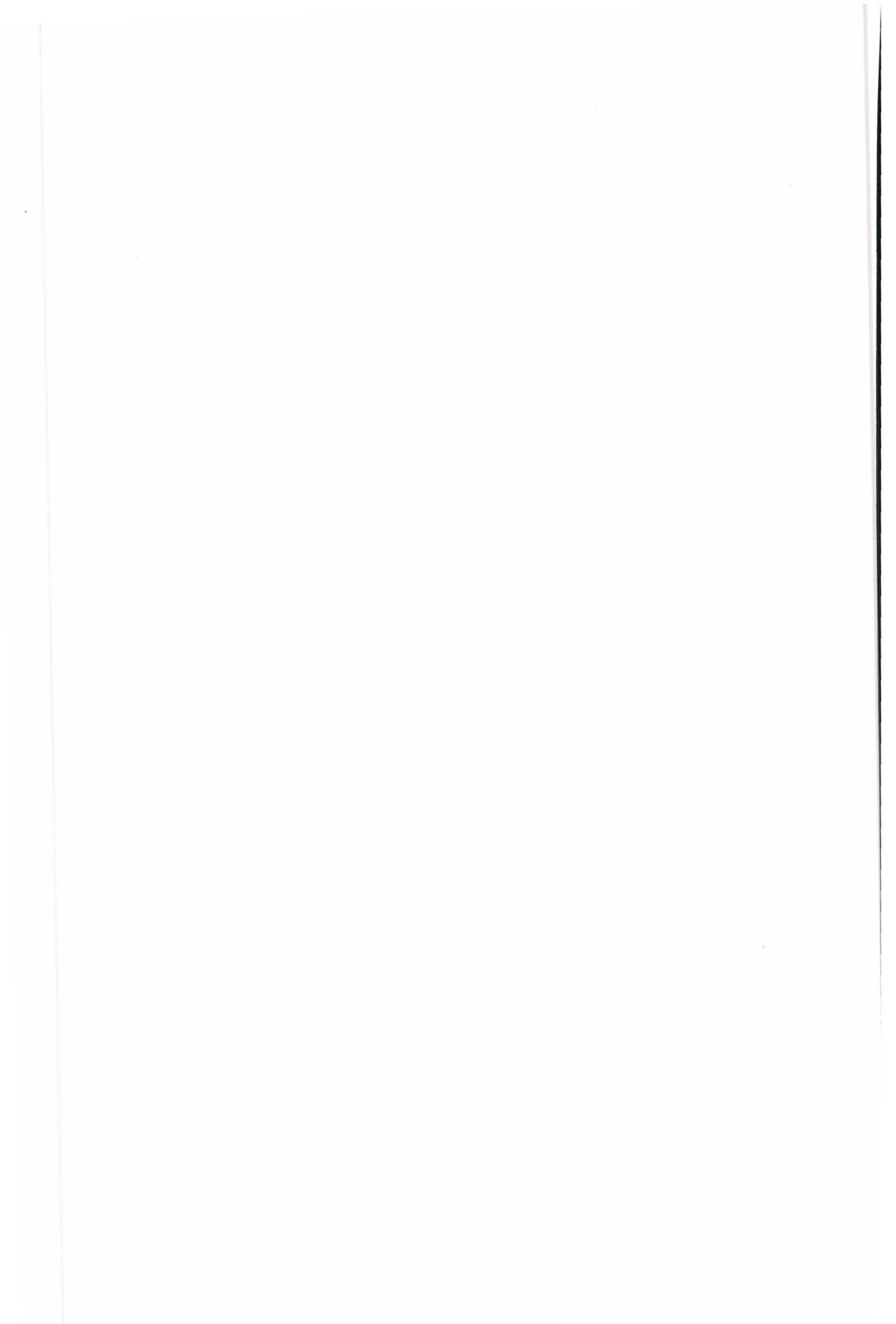
Ces deux techniques ont ensuite été appliquées à des échantillons de granite issus des forages carottés (500 et 1000m) d'Auriat (Creuse). Ainsi, le 4ème chapitre de ce présent document est consacré à la visualisation et à la quantification du système microfissural du granite d'Auriat.

On rappelle d'abord, dans le cadre de ce chapitre, les principaux résultats acquis à la suite de travaux antérieurs effectués sur un sujet d'étude équivalent.

On présente ensuite un essai de quantification de la porosité et de la microfissuration en fonction de l'altération d'échantillons du granite d'Auriat issus du forage de 500 m: on a notamment procédé à des mesures sur du granite très altéré, tel qu'il s'en trouve à la cote - 100 m dans le forage de 500 m d'Auriat, afin de corrélérer facilement et complètement les valeurs et la distribution de la porosité avec l'état d'altération de la roche.

On a enfin procédé à une analyse de la porosité et de la microfissuration du même granite provenant du forage de 1000 m prenant en compte différents paramètres tel que la profondeur de prélèvement et d'autres données géologiques de la roche. L'échantillonnage effectué à intervalles réguliers entre 100 m de profondeur et le fond du forage de 1000 m permet de disposer d'éprouvettes ayant été soumises à des contraintes naturellement différentes, croissantes en fonction de la profondeur.

On montre que tous les résultats obtenus mettent en évidence les avantages de ces méthodes ainsi développées dans le cadre de notre recherche, mais aussi leurs limites, en particulier pour les faibles porosités qui caractérisent les granites du Limousin d'Auriat ou des Tenelles par exemple.



2. MICROFISSURATION ET POROSITE DES ROCHES ET LEURS METHODES D'INVESTIGATION

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la structure d'un corps poreux rocheux par la définition des différents types de discontinuités qu'il contient et leurs origines respectives. On distingue des processus dits primaires ayant entraîné la formation d'une microfissuration au sein de la roche au moment de sa genèse et des processus secondaires survenus plus tardivement dans l'histoire de la roche, ces derniers ayant pour origine des contraintes thermiques ou mécaniques, reproduites en laboratoire dans le cadre d'études de l'évolution de la microfissuration.

Parmi les différentes méthodes d'investigation de la porosité utilisées en laboratoire, on distingue celles qui permettent d'obtenir une valeur globale de la porosité (méthode d'Archimède, pycnométrie à liquide ou à gaz) et celles qui, en plus de cette valeur, permettent de préciser la distribution de la porosité (en volume et en surface) en fonction de la taille des pores. Ce paramètre est lui-même issu d'une modélisation (méthode des isothermes d'adsorption de gaz, porosimétrie au mercure).

Les techniques de microscopie optique ou électronique également décrites permettent quant à elles une observation des espaces initialement vides grâce à une technique d'imprégnation des échantillons rocheux par une résine colorée. Ces techniques permettent donc une meilleure connaissance de la géométrie des microfissures. La quantification du réseau poreux est rendue possible dans ce cas par l'utilisation de techniques basées sur la digitalisation. En outre, diverses informations concernant l'environnement des fissures peuvent être prises en compte. Ainsi, les phases minérales adjacentes aux fissures et le caractère intra ou intergranulaire de celles-ci peuvent être précisés. De plus, la technique basée sur l'émission acoustique produite par des roches soumises à des contraintes thermiques ou mécaniques décrit les conditions dans lesquelles une microfissuration peut être générée puis se développer au sein de la roche.

2.2 Structure d'un corps poreux

2.2.1 Définition de la porosité et différents types de discontinuités

La porosité ϕ se définit comme étant le rapport entre le volume des vides (V_{por}) et le volume total de la roche (V_{tot}). Elle s'exprime le plus souvent en pourcentage. On a :

$$\phi = (V_{\text{por}} / V_{\text{tot}}) \cdot 100 \quad (1)$$

La porosité intègre deux grands types de discontinuités (LAGEAT, 1981):

- les fissures, caractérisées par une grande extension d'une des dimensions au regard des deux autres; le rapport entre l'ouverture et la longueur de ces discontinuités planes étant de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} selon les estimations de J.B. WALSCH (1966). R. PERAMI (1971) a même dressé une typologie des coupures à bords parallèles en considérant leur environnement au sein de la matrice en distinguant:

- . les microcraquelures entièrement situées à l'intérieur d'un cristal,
- . les microfissures qui affectent l'ensemble du cristal,
- . les microfractures qui recoupent plusieurs cristaux de nature quelconque et dont l'orientation d'ensemble est commandée par la direction de la sollicitation extérieure;

- les pores, présents sous forme de défauts d'un diamètre compris entre 100Å et 1 mm.

On définit d'autre part, dans un échantillon de volume et de géométrie donnés, la porosité ouverte qui est le volume de vide relié à l'extérieur. La porosité totale représente le volume de vide relié ou non à l'extérieur. La différence entre les deux définit la porosité close. Dans la plupart des milieux poreux naturels, la porosité close est rare. L'exemple le plus net pour ce type de porosité est donné par les inclusions fluides dans les cristaux. Dans le cas des roches cristallines de très faible porosité, les inclusions fluides peuvent représenter une fraction non négligeable de la porosité totale. T.J. KATSUBE et al. (1985) précisent qu'une structure poreuse peut être définie par quatre paramètres principaux qui sont : la porosité effective ϕ_e , la porosité de poche ϕ_p , la porosité connectée ϕ_c et la tortuosité τ (figure 4). La porosité connectée ϕ_c est définie par:

$$\phi_c = n \cdot d \quad (2)$$

avec n = nombre de fissures par unité de longueur,

d = ouverture moyenne des microfractures.

La porosité effective ϕ_e est définie par :

$$\phi_e = \phi_p + \tau \cdot \phi_c \quad (3)$$

avec ϕ_p = porosité de poche. La tortuosité τ est définie par :

$$\tau = \text{tortuosité} = l_p / l$$

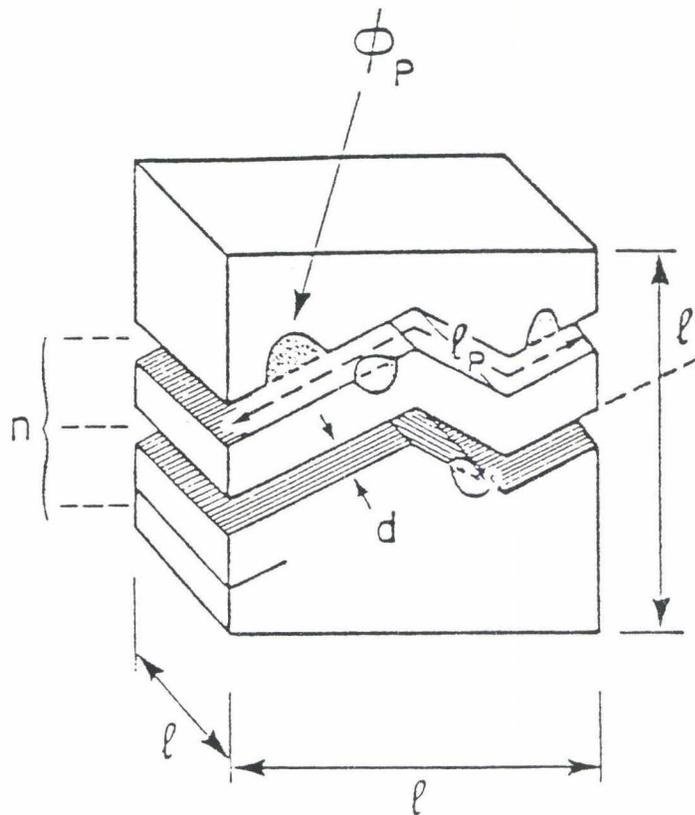
avec l_p = longueur réelle de la fissure

l = longueur projetée de la fissure suivant son orientation principale.

2.2.2 Origine de la porosité

On définit la porosité primaire qui décrit les volumes de vides issus de la mise en place initiale de la roche et dépend essentiellement des processus géologiques de formation. La création de nouvelles discontinuités à un stade plus avancé de l'existence de la roche va contribuer à introduire une porosité secondaire qui va s'ajouter à la porosité primaire. La porosité secondaire résulte principalement de processus de dissolution des grains ou de destruction de matière organique piégée dans la matrice rocheuse.

La création d'une porosité intergranulaire se rapportant au volume des vides délimités par les grains constitutifs de la roche est un processus d'origine primaire.



avec : d = ouverture de la microfissure
 n = nombre de fissures par unité de longueur
 ϕ_p = porosité de poche
 l = longueur projetée de la fissure suivant sa direction principale
 l_p = longueur réelle de la fissure

Figure 4 - Différents paramètres descriptifs de la fissuration d'une roche (KATSUBE et al., 1985)

Par contre, la formation d'une porosité intragranulaire concernant les volumes de vides contenus dans les grains est souvent un processus secondaire.

Dans le cas des roches cristallines, on peut admettre que la porosité de fissure a deux origines différentes : une origine thermique qui se traduit par une dilatation ou une contraction anisotrope de l'assemblage sous l'effet d'un gradient de température ou une origine mécanique induisant une fissuration par relâchement des contraintes. Les discontinuités ainsi formées peuvent s'agrandir sous l'effet de processus mécaniques ou chimiques et engendrer des fractures.

Une classification plus complète a été proposée en fonction des différents processus susceptibles d'entraîner la formation de fissures (SIMMONS et RICHTER, 1976) :

- fissures "dPdT". Ces fissures dépendent étroitement de l'orientation relative de grains minéraux voisins et de leurs propriétés physiques respectives. La majorité de ces fissures se trouve d'ailleurs aux joints de grains des minéraux. Un processus de formation de ces fissures a été avancé prenant en compte les propriétés mécaniques et thermiques linéaires du grain (SIMMONS et al., 1973). D'après ce modèle, les fissures se créent lorsque la contrainte au voisinage d'un joint de grain dépasse la contrainte moyenne au sein de la roche. Ce type de fissures apparaît notamment lors d'une remontée de la roche vers la surface terrestre;

- fissures créées sous l'effet d'une contrainte mécanique. Ces fissures sont indépendantes de l'orientation cristallographique relative des différents minéraux. Elles traversent fréquemment plusieurs grains. Ces fissures peuvent être reproduites en laboratoire en soumettant un échantillon rocheux à une contrainte uniaxiale (par exemple, une compression). L'observation microscopique de ces fissures est réalisée sur des lames pétrographiques perpendiculaires à l'axe de la contrainte;

- fissures associées à la présence d'inclusions cristallines dans un grain "hôte". La compétition entre les propriétés d'un grain "hôte" et de son inclusion est à l'origine d'un processus de fissuration particulier. Si la contrainte totale du grain inclus est moindre que la contrainte du grain "hôte", des fissures concentriques se développent à l'intérieur du grain "hôte" ou au joint de grain;

- fissures en tube. Ces fissures présentent deux dimensions comprises entre 1 et 3 microns et la troisième entre 100 et 1000 microns. Seules certaines de ces fissures peuvent suivre une orientation cristallographique. Elles sont parfois colmatées par une phase solide et se caractérisent par des sections circulaires, elliptiques ou rectangulaires. Différentes origines peuvent être avancées : ces fissures peuvent d'abord être initiées par des fluides magmatiques tardifs ou par des eaux souterraines susceptibles de développer des dislocations;

- fissures produites sous l'effet de cycles thermiques. Les cycles thermiques ont été utilisés en laboratoire pour la création de fissures afin d'en étudier l'effet sur les propriétés physiques d'une roche (WANG et al., 1971 - TODD et al., 1973);

- fissures produites sous l'effet d'un gradient thermique. Si le changement de température est lent, peu de fissures seront créées alors qu'une évolution rapide de la température entraînera la formation de nombreuses fissures (TODD et al., 1973 - RICHTER et SIMMONS, 1974 - WARREN et LATHAM, 1970);

- fissures produites sous l'effet d'une onde de choc. La densité de fissures créées dans une roche soumise à une onde de choc est fonction de l'intensité du phénomène (SIMMONS et al., 1974 - SIEGFRIED et al., 1974). Les caractéristiques pétrographiques des roches ayant subi une onde de choc ont été décrites par différents auteurs (FRENCH et SHORT, 1968);

- fissures de clivage. Ces fissures sont parallèles aux plans de clivage des minéraux;

- fissures créées lors de la réalisation de lames pétrographiques. Elles constituent des fissures parasites pouvant fausser une quantification des fissures contenues dans une roche;

- fissures d'origine non connue. Ces fissures n'appartiennent à aucun des types de fissures énumérés précédemment.

2.3 Méthodes d'étude en laboratoire de la porosité des roches

2.3.1 Méthode d'Archimède

Cette méthode utilise trois mesures de masses sur un échantillon rocheux :

- la masse m_1 , mesurée sur l'échantillon à sec;

- la masse m_2 , mesurée sur l'échantillon entièrement saturé par un liquide;

- la masse m_3 , masse apparente de l'échantillon plongé dans le même liquide.

La porosité ϕ est alors :

$$\phi = (m_2 - m_1) \cdot 100 / (m_2 - m_3) \quad (4)$$

Cette méthode présente certains inconvénients : les difficultés de mise en oeuvre en font une méthode peu fiable qu'il est préférable de ne pas utiliser dans le cas de roches granitiques très faiblement poreuses.

2.3.2 Pycnométrie à liquide ou à gaz

Cette méthode, de mise en oeuvre aisée, permet de déterminer le volume massique total (volume total par unité de masse) des pores V_p d'un solide à partir de la détermination du volume massique apparent (volume apparent de l'échantillon par unité de masse) V_a et du volume massique réel (volume réel de l'échantillon par unité de masse) V_r :

$$V_p = V_a - V_r = 1 / \rho_a - 1 / \rho_r \quad (5)$$

V_p étant exprimé par unité de masse, ρ_{ra} et ρ_{rr} sont respectivement les masses volumiques apparente et réelle du solide. V_a est déterminé à l'aide d'un fluide tel que le mercure qui, en général, ne pénètre pas les pores sous pression atmosphérique (fluide non mouillant). V_r est déterminé en plaçant l'échantillon solide dans un liquide ou un gaz (hélium, benzène, méthanol...) qui, à température ambiante pénètre les pores accessibles.

Sur un plan pratique, la technique de pycnométrie à gaz présente de nombreux avantages de précision et de maniabilité sur la pycnométrie à liquide. Le principe consiste à mesurer la course d'un piston en commandant un volume variable relié à une cellule-échantillon. Un système permet de faire les mesures à pression constante dans la cellule vide, puis contenant l'échantillon. La stabilité de température est également nécessaire pendant le cycle de la mesure.

Cette technique nécessitant la pénétration de molécules à l'intérieur de l'échantillon, seuls les pores ouverts ou les interstices ayant une ouverture minimale d'environ 10\AA de diamètre sont détectés. Néanmoins, cette technique ne fournit aucune information sur le spectre de dimensions des pores présents dans le matériau étudié (FAUDOT, 1980).

2.3.3 Etude des isothermes d'adsorption de gaz. Méthode de Brunauer - Emmet - Teller (B.E.T.)

Les mesures d'adsorption d'un gaz à une température proche de sa liquéfaction sont largement utilisées pour la détermination des surfaces spécifiques et de la distribution de la taille des pores des substances solides.

Une molécule venant d'une phase gazeuse heurte la surface d'un solide et reste un certain temps "captée" par le champ attractif émanant du solide (figure 5). La molécule est donc adsorbée. Sous l'effet de l'agitation thermique, cette molécule quitte ensuite la surface du solide pour rejoindre la phase gazeuse. Les molécules adsorbées sont perpétuellement échangées avec celles de la phase gazeuse. A l'équilibre, lorsque les vitesses d'adsorption et de désorption sont égales, la surface du corps est, sous une pression donnée de gaz, partiellement ou complètement recouverte de molécules adsorbées (FAUDOT, 1980).

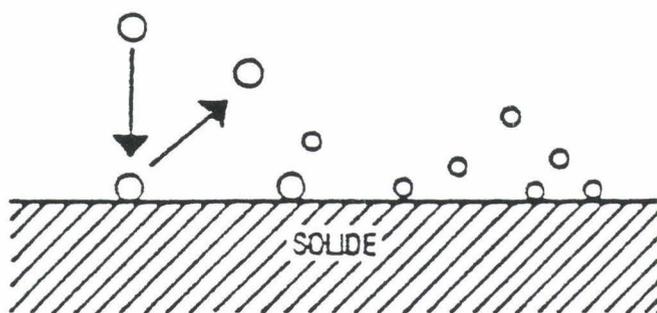


Figure 5 - Adsorption de molécules gazeuses à la surface d'un solide(FAUDOT, 1980)

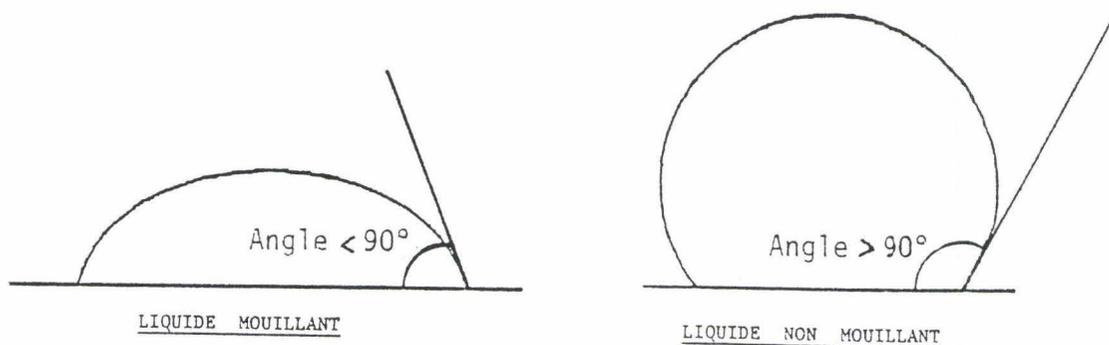


Figure 6 - Angle de contact entre un solide et un liquide mouillant et non mouillant (FAUDOT, 1980)

La technique B.E.T. fait intervenir un recouvrement de la première couche par d'autres couches successives. L'équation, dite équation transformée B.E.T., faisant intervenir la notion de volume de gaz adsorbé sous forme de monocouche V_m est :

$$P / (V (P_0 - P)) = 1 / (V_m \cdot C) + ((C - 1) \cdot P) / (V_m \cdot C \cdot P_0) \quad (6)$$

avec V = volume adsorbé à la pression partielle relative P / P_0
 P_0 = pression saturante du gaz à la température d'adsorption
 V_m = volume de gaz correspondant au recouvrement total de

la surface par une couche monomoléculaire

P = pression à l'équilibre

C = constante qui dépend des interactions adsorbat-adsorbant.

Elle est d'autant plus grande que les interactions sont fortes.

La technique B.E.T. conduit à déterminer V_m , le volume de gaz adsorbé sous forme de monocouche. Il est donc aisé de déterminer le nombre de molécules N_m contenues dans V_m . Si V_m est exprimé en cm^3 T.P.N., c'est-à-dire en nombre de cm^3 occupé par l'adsorbat gazeux dans les conditions normales de température et de pression (273,15 K et 760 Torr), il suffit de multiplier le rapport de V_m sur le volume occupé par une mole d'adsorbat v dans les conditions T.P.N. par le nombre de molécules comprises dans une mole :

$$N_m = (V_m / v) \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \quad (7)$$

La détermination de la surface de l'échantillon sera effectuée en multipliant l'aire d'encombrement d'une molécule de gaz (a) par le nombre de molécules (N_m) formant la monocouche :

$$S = N_m \cdot a \quad (8)$$

$$S = (V_m / v) \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot a$$

Dans le cas de l'azote où $a = 16,2 \text{ \AA}^2$:

$$S = 4,35 \cdot V_m \quad (\text{avec } S \text{ exprimée en } \text{m}^2 \text{ et } V_m \text{ en } \text{cm}^3).$$

La théorie de l'adsorption multimoléculaire ne tient pas compte du phénomène de condensation capillaire. Sachant que la pression de vapeur au-dessus d'une surface liquide

concave est inférieure à celle correspondant à la surface plane, un liquide qui s'adsorbe en multicouches sur les parois d'un capillaire aura une interface liquide-vapeur concave et donc une pression de vapeur inférieure à l'intérieur du capillaire. Tous les pores dans lesquels le ménisque liquide possède un rayon de courbure inférieur ou égal à une valeur critique "r" se trouveront complètement remplis, prématurément sous la pression relative P / P_0 bien inférieure à l'unité et donnée par l'équation de Kelvin :

$$\ln (P / P_0) = (- 2 \cdot \gamma \cdot V_m \cdot \cos \theta) / (r \cdot R \cdot T) \quad (9)$$

avec V_m = volume molaire de l'adsorbat liquide
 γ = tension superficielle de l'adsorbat liquide
 θ = angle de contact entre le liquide et la paroi du capillaire
 R = constante des gaz parfaits
 T = température absolue à laquelle se trouve l'adsorbat
 r = rayon du capillaire ou rayon de Kelvin.

Si les pores sont considérés comme cylindriques et sans intersection entre eux, on montre que la surface des pores S_S est égale à $2 \cdot V_P / r$ où V_P est le volume poreux avec r (Å), S_S (m^2 / g), V_P (ml / g). Il ressort de cette équation que la pression P à laquelle un gaz se condense en liquide dans un pore de rayon donné sera d'autant plus faible que ce rayon est lui-même petit.

L'application de la loi de Kelvin permet de faire une étude quantitative de la répartition de la taille des pores. La méthode la plus utilisée est celle de E.P. BARRETT, L.G. JOYNER et P.P. HALENDA (1951). Elle considère que le gaz provient de deux origines:

- la désorption de l'azote condensé par capillarité (à chaque pression relative cette désorption ne concerne qu'une seule catégorie de pores de rayon d'autant plus petit que la pression est plus basse);

- la diminution d'épaisseur de la couche multimoléculaire constituée par l'adsorbat. Cette dernière concerne tous les pores précédemment vidés de leur condensat (de rayon supérieur ou égal au rayon de Kelvin).

Cette méthode a toutefois été sujette à critique à cause de la complexité de la forme des pores qui n'a qu'un rapport lointain avec le modèle de Kelvin (EVERETT et STONE, 1957).

2.3.4 Porosimétrie au mercure

Le principe de la porosimétrie au mercure consiste à mesurer sous pression croissante le volume de mercure qui pénètre à l'intérieur d'un échantillon déshydraté et dégazé. Le mercure présente en effet la particularité d'être non mouillant (angle de contact mercure-matériau supérieur à 90°) et doit donc être soumis à une force de pression afin de pénétrer à l'intérieur du réseau poreux d'un échantillon (figure 6). Ainsi, les pores de faibles dimensions sont pénétrés par le mercure aux pressions les plus élevées.

C'est en 1921 que E.W. WASHBURN présente dans une note à l'Académie des Sciences des Etats-Unis l'équation reliant la pression à la dimension des pores:

$$P = (-4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta) / D \quad (10)$$

avec D = diamètre minimal de pore rempli par le mercure

σ = tension superficielle du mercure

P = pression appliquée

θ = angle de contact entre le mercure et le matériau

Cette équation repose sur l'hypothèse de cylindricité des pores (cônes d'angle au sommet faible ou nul).

La figure 7 permet de reprendre le raisonnement ayant conduit à l'équation de Washburn. En A, le cercle de contact de rayon R entre le mercure et la paroi du pore est dans un plan perpendiculaire à l'axe $\langle \Delta \rangle$ du cône. La force pressante exercée sur la surface de ce cercle est égale à :

$$F_p = \pi \cdot R^2 \cdot P \quad (11)$$

Cette force est colinéaire à l'axe $\langle \Delta \rangle$.

La force due à la tension superficielle qui s'exerce sur le périmètre du cercle est égale à :

$$F_t = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma \quad (12)$$

La projection de cette force sur la direction de l'axe $\langle \Delta \rangle$ est égale à :

$$F'_t = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \cos \beta \quad (13)$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \cos (\pi - \theta + \alpha)$$

Pour un cône d'angle au sommet faible, on peut estimer $\alpha \ll \theta$, d'où :

$$F'_t = -2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \cos \theta \quad (14)$$

A l'équilibre $F_p = F'_t$, c'est-à-dire :

$$\pi \cdot R^2 \cdot P = -2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \cos \theta \quad (15)$$

On obtient ainsi l'équation :

$$R = (-2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta) / P$$

Cette équation est équivalente à celle précédemment indiquée. Suivant cette modélisation, pour une pression P donnée, les pores de rayon supérieur ou égal à celui calculé par l'équation de Washburn sont remplis de mercure.

La figure 9 décrit trois résultats typiques de distribution poreuse. La courbe n°1 est obtenue avec une poudre composée de gros grains qui induisent une porosité intergranulaire importante (première partie ascendante pour de grands diamètres de pores). Ces gros grains possèdent eux-mêmes une porosité intragranulaire (seconde partie ascendante). Théoriquement, la pénétration du mercure sous pression est réversible. Il peut cependant se produire un phénomène d'hystérèse lors du retour à la pression atmosphérique (partie de la courbe en pointillés). Ce phénomène peut être dû à:

- une rétention du mercure dans des pores en forme d'"encriers" (figure 8a). Dans ce cas, le diamètre d'ouverture du pore est très inférieur au diamètre intérieur. Le mercure reste piégé dans le pore lorsque la pression décroît;

- une ouverture définitive exercée par le mercure (figure 8b).

La courbe n°2 est obtenue avec une poudre sans porosité intragranulaire (pas de seconde partie ascendante).

La courbe n°3 correspond à la mesure de la porosité d'un catalyseur où le volume des micropores est prépondérant.

Les résultats sont généralement exprimés sur papier semi-logarithmique avec en ordonnées linéaires les volumes de pénétration et en abscisse sur l'échelle logarithmique les pressions appliquées et les correspondances en diamètres de pores.

Dans l'hypothèse de cylindricité des pores, on peut déterminer la surface de l'échantillon comme suit : considérons N pores cylindriques de profondeur h et de rayon R. Quand la pression est suffisante, ces N pores sont pénétrés et la variation de volume ΔV_p est égale à:

$$\Delta V_p = N \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \quad (16)$$

La variation de surface ΔS est alors égale à :

$$\Delta S = 2 \cdot N \cdot \pi \cdot R \cdot h \quad (17)$$

d'où $\Delta S = (2 \cdot \Delta V_p) / R$

On peut calculer la surface poreuse totale de l'échantillon en considérant le problème par classes successives de rayon donné de pores, chaque classe ayant un rayon moyen R. La surface S est obtenue après sommation de chaque ΔV_p :

$$S = \Sigma [(2 / R) \cdot \Delta V_p] \quad (18)$$

En 1967, H.M. ROOTARE et C.F. PRENZLOW et en 1960, M.M. DUBININ préconisent une méthode particulièrement intéressante. Ils abordent le problème en considérant que l'immersion d'une aire de surface dS dans le mercure implique un travail :

$$dW = - \sigma \cdot \cos \theta \cdot dS \quad (19)$$

Puisque ce travail est fourni quand la pression externe P force un volume de mercure dV à entrer dans des pores, l'équation devient :

$$\sigma \cdot \cos \theta \cdot dS = - P \cdot dV \quad (20)$$

On obtient :

$$S = - \int (P \cdot dV) / (\sigma \cdot \cos \theta) \quad (21)$$

La quantité P dV devra être déterminée graphiquement .

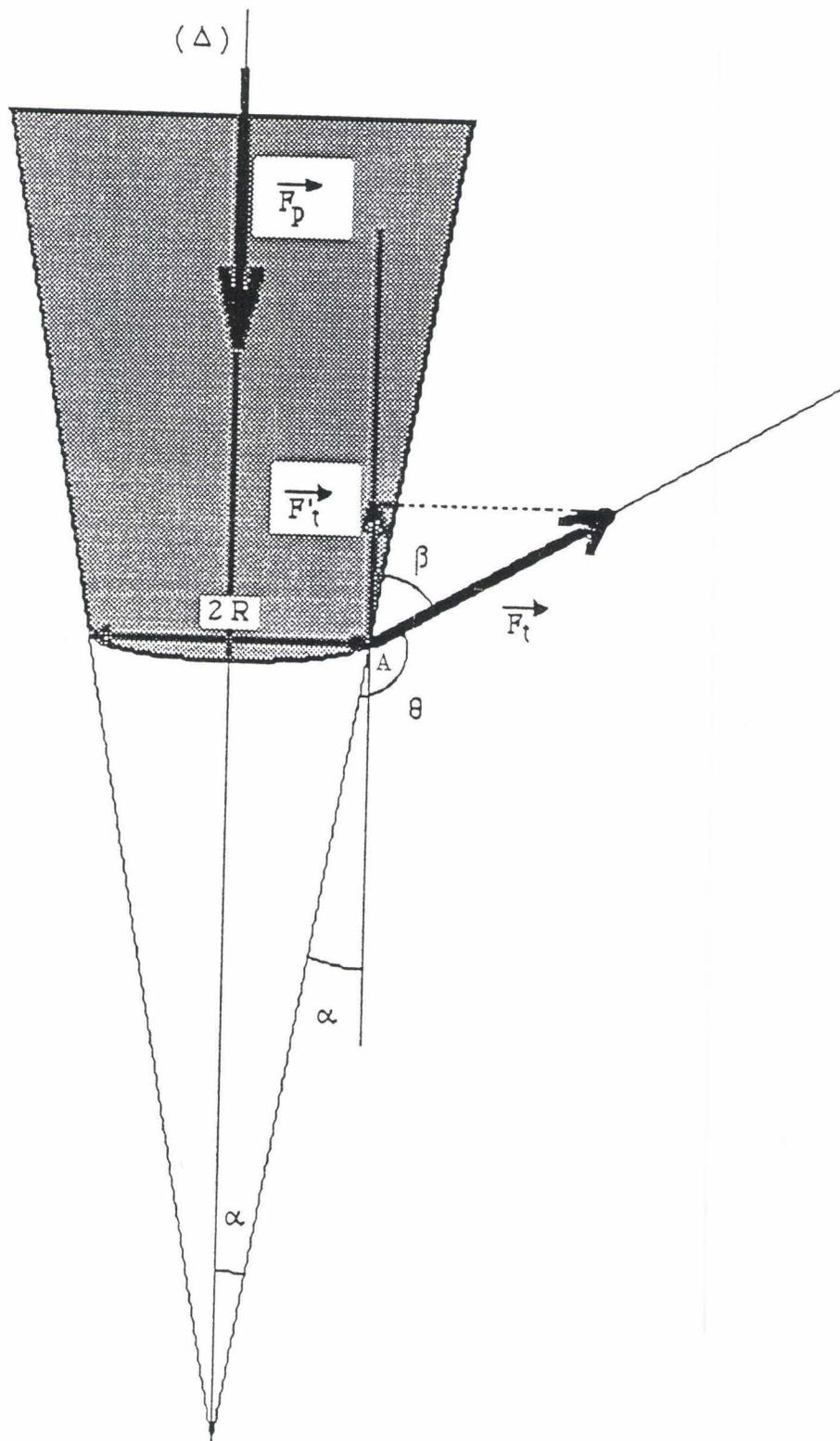
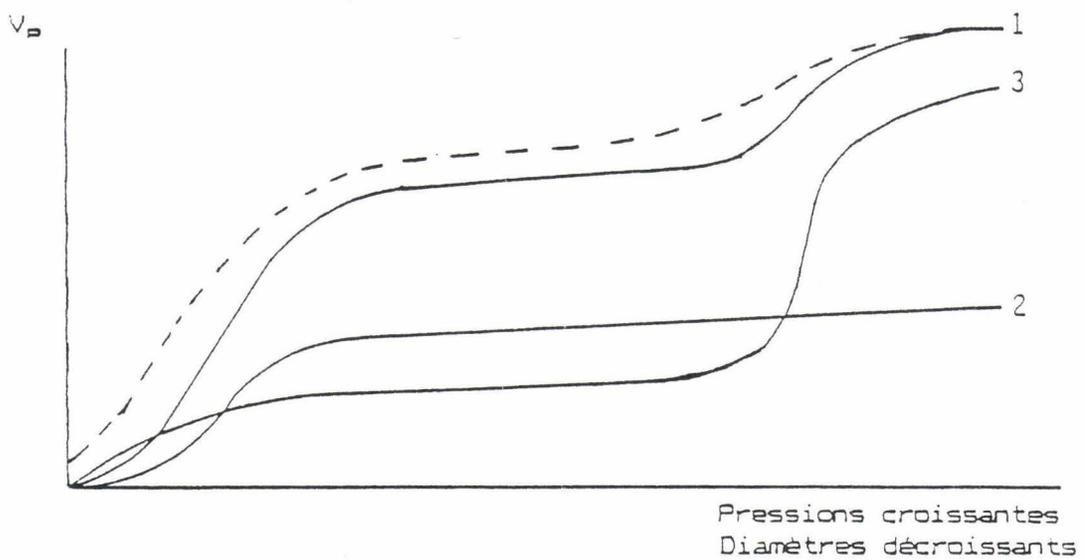


Figure 7 - Pénétration du mercure dans un pore conique (BOEGLIN, 1989)



Figure 8 - a) Pore en forme d' "encrier" - b) Ouverture définitive d'un pore par le mercure sous l'effet de la pression (BOEGLIN, 1988)



- Courbe 1: poudre à gros grains à porosité intragranulaire
- Courbe 2: Poudre sans porosité intragranulaire
- Courbe 3: Catalyseur (volume de micropores prépondérant)

Figure 9 - Différents types de courbes de distribution poreuse (FAUDOT, 1980)

2.3.5 Méthodes de quantification de la porosité close

Les différentes techniques précédentes permettent la détermination du volume des pores ouverts. A l'inverse, les pores n'ayant aucun accès vers l'extérieur seront détectés par des méthodes basées sur des techniques de diffusion aux petits angles de rayons X. Ces techniques permettent de déterminer le volume poreux total (pores ouverts et fermés).

Néanmoins, dans le cas où la masse volumique théorique de la matière est connue et que l'on peut déterminer comme précédemment la masse volumique réelle par pycnométrie à gaz, le volume des pores non accessibles, c'est-à-dire des pores fermés sera :

$$V_{\text{pf}} = 1 / \rho_{\text{r}} - 1 / \rho_{\text{th}} \quad (22)$$

avec

ρ_{r} = masse volumique réelle de l'échantillon

ρ_{th} = masse volumique théorique de l'échantillon.

2.4 Méthodes d'étude de la microfissuration d'une roche

Les différentes méthodes présentées dans le paragraphe précédent permettent d'obtenir une valeur globale de la porosité et quelquefois, suivant la méthode employée, la distribution de cette porosité en fonction de la taille des pores selon une modélisation donnée. Nous présentons maintenant des techniques qui permettent de préciser la géométrie des espaces vides contenus dans la roche (observations par microscopie optique et électronique) ou encore les conditions dans lesquelles sont générées des fissures sous contrainte mécanique ou thermique (émission acoustique). Les méthodes d'observation par microscopie permettent de plus une quantification du réseau fissuré par des techniques de digitalisation.

2.4.1 Microscopie optique

L'étude par microscopie optique est réalisée sur des lames pétrographiques d'environ 30 microns d'épaisseur. L'observation microscopique est effectuée par lumière transmise au moyen d'un microscope polarisant. L'observation de la microfissuration de la roche nécessite l'imprégnation préalable de celle-ci par une substance qui permette de différencier lors de l'étude microscopique les fissures de la matrice rocheuse. On peut utiliser pour cela des substances fluorescentes ou contenant des particules de carbone ou encore des résines de type Epoxy (GARDNER et PINCUS, 1968; SIMMONS et al., 1975; CAVALETTI et al., 1985; BALDRIDGE et SIMMONS, 1971). Cette technique d'imprégnation permet l'observation des fissures contenues dans la roche avant la réalisation des lames. En effet, cette dernière est susceptible d'engendrer une fissuration parasite qui n'est pas imprégnée et qui n'est donc pas visualisée (SIMMONS et RICHTER, 1976).

Cette méthode d'observation permet en outre de préciser les phases minérales adjacentes aux fissures et le caractère intra ou intergranulaire de celles-ci. La largeur minimale des fissures que l'on peut mesurer par cette technique est de l'ordre du micron.

2.4.2 Microscopie électronique

L'observation des fissures peut également être effectuée par microscopie électronique sur une surface de roche polie ou sur une surface brute. D'après les observations réalisées par cette technique sur des roches cristallines par G. SIMMONS et L. CARUSO (1983), il semble que dès qu'une fissure se développe, il apparaît simultanément des minéraux à l'intérieur même de la fissure qui aura ainsi tendance à se colmater progressivement. Les auteurs de cette étude notent d'autre part que le développement d'une microfissure peut engendrer une altération importante des minéraux adjacents à celle-ci.

Le site de recherche de Stripa (Suède) dans le cadre d'étude sur le stockage de déchets nucléaires en profondeur a fait l'objet d'une étude du réseau de microfissures par des techniques de microscopie optique et électronique (MONTOTO et al., 1981). L'objectif de cette étude était de mesurer les microfissures d'échantillons rocheux soumis ou non à des cycles thermiques. D'après les auteurs, l'observation d'une surface brute d'un échantillon ne permet pas une bonne visualisation des pores et des fissures pouvant être masqués par la topographie. Ils ont donc opté pour une étude des surfaces polies sur lesquelles apparaissent nettement toutes les discontinuités. La technique employée nécessite l'imprégnation des roches étudiées par une substance fluorescente puis la métallisation par dépôt d'or (200 Å d'épaisseur) des lames pétrographiques réalisées à partir des échantillons étudiés. Cette préparation pourra être observée successivement par microscopie optique en lumière transmise pour une analyse minéralogique (état d'altération, texture, minéralogie), en lumière réfléchie pour une analyse de la fractographie et enfin par microscopie électronique permettant une étude de la minéralogie, de la porosité et de la fractographie de la roche. Ce procédé permet la réalisation des différentes études sur une même surface d'un échantillon.

La quantification des fissures par microscopie optique ou électronique pourra être effectuée par des techniques de digitalisation utilisées par un certain nombre d'auteurs (MONTOTO, 1978 - GATEAU et al., 1975).

2.4.3 Emission acoustique

L'émission acoustique se définit comme un phénomène de création d'ondes élastiques transitoires résultant de microdéplacements locaux internes à un matériau. Par extension, ce terme désigne en fait la technique qui lui est associée. Dans le cas d'une roche mise sous contrainte thermique ou mécanique, la création de ces ondes aura pour origine le développement d'une microfissuration à l'intérieur de la structure.

L'enregistrement du phénomène nécessite l'emploi de capteurs dont le rôle est de convertir la grandeur vibratoire caractéristique de l'onde d'émission acoustique en un signal électrique (ROGET, 1988).

Cette technique permet en outre de déterminer le seuil de microfissuration thermique d'une roche correspondant à la température minimale induisant dans la roche un accroissement de la porosité. On définit de même le seuil de microfissuration mécanique lorsque la roche est soumise à un type de contrainte mécanique.

La figure 10 présente des résultats obtenus sur une roche granitique (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984). On peut observer que lors du chauffage de la roche à 130°C, 230°C, 330°C et 430°C, l'émission acoustique commence à se manifester aux environs de 110°C. Cette température correspond, pour la roche étudiée, au seuil de microfissuration thermique. On enregistre une valeur maximale de l'émission acoustique lorsque la température atteint son maximum. L'émission décroît ensuite lorsque la température est stationnaire.

La figure 11 représente les valeurs maximales d'émission acoustique enregistrées en fonction de la température. La mesure de la porosité a ensuite été effectuée sur ces échantillons soumis aux différentes températures. La figure 12 présente la variation de cette porosité en fonction de la température appliquée. Il apparaît qu'après avoir d'abord diminué lorsque la température était inférieure au seuil de microfissuration (ceci pouvant être dû à des réajustements au sein de la roche), la porosité augmente ensuite régulièrement lorsque la température dépasse ce seuil. Ces observations confirment les résultats obtenus par R. PERAMI (1971) également sur des roches granitiques. Enfin, à partir de ces différents résultats, on représente la variation du maximum d'émission acoustique en fonction de la porosité des échantillons rocheux (figure 13). Ce graphe constitue en fait un étalonnage de la méthode appliquée à une roche donnée. Une étude similaire a été menée par V.G. RUIZ DE ARGANDONA et al. (1985) sur trois types de roches cristallines.

2.5 Influence de l'altération sur la porosité des roches cristallines

Le processus d'altération physico-chimique se développe en fonction de l'environnement d'un massif et affecte sélectivement les différents minéraux présents dans la roche. Nous citerons dans ce chapitre les méthodes habituellement employées pour établir une classification d'échantillons rocheux en fonction de leur altération.

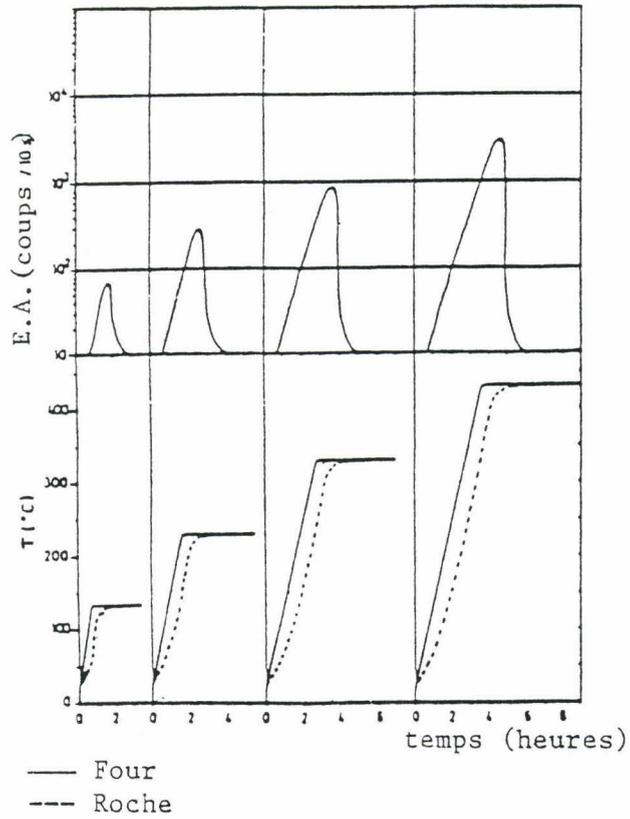


Figure 10 -Emission acoustique enregistrée sur une roche granitique soumise à différentes températures (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984)

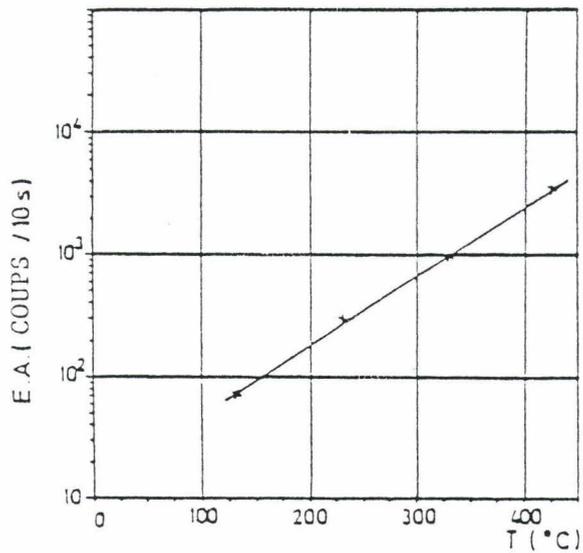
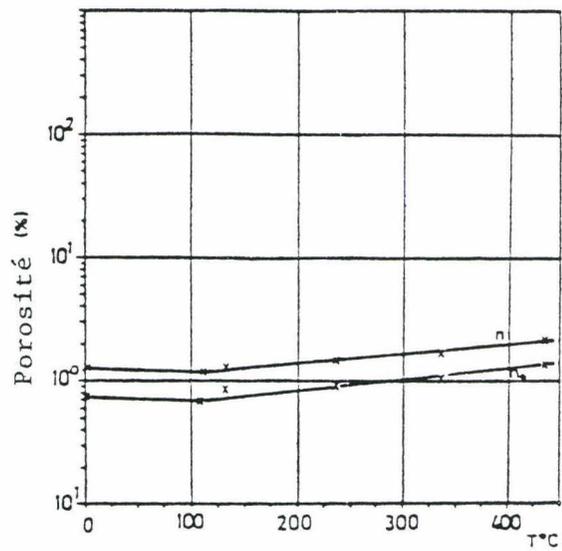


Figure 11 -Valeurs maximales d'émission acoustique enregistrées en fonction de la température (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984)



n = porosité totale
n_o = porosité ouverte

Figure 12 - Variation de la porosité ouverte et totale en fonction de la température (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984)

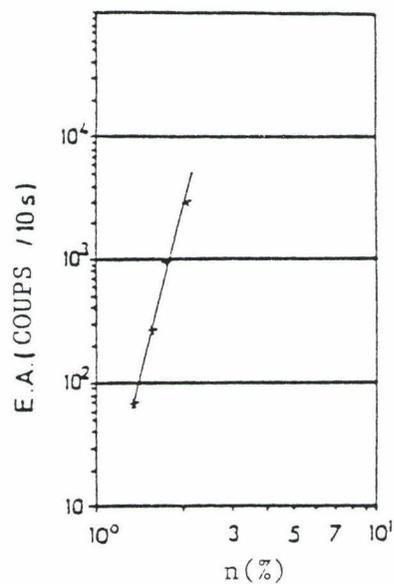


Figure 13 - Variation du maximum d'émission acoustique en fonction de la porosité (RUIZ DE ARGANDONA et CALLEJA, 1984)

Différents travaux portant sur des roches cristallines ont montré que le phénomène d'altération a globalement pour effet le développement du réseau poreux. Cependant, d'autres études menées sur d'autres sites cristallins ont indiqué au contraire une régression de la porosité avec l'accroissement de l'altération.

Une classification des roches en fonction de leur altération a été proposée par différents auteurs ; certains prônant l'observation de la roche entière (RUXTON et BERRY, 1957 - CHANDLER, 1969 - FOOKES et HORSWILL, 1969), d'autres préférant l'estimation visuelle de l'altération des constituants minéraux de la roche (MOYE, 1955). L'emploi de l'une ou l'autre de ces méthodes sur des roches plus ou moins altérées conduit généralement à des résultats cohérents. J. ORDAZ et al. (1978) proposent le calcul d'un indice dans le but de définir la détérioration minérale de roches granitiques. Une méthode ultrasonique a également été proposée par L. CALLEJA et al. (1989) pour évaluer le degré d'altération des roches. Cette altération peut se produire selon un processus chimique ou physique (OLLIER, 1969). Dans les zones humides et chaudes, l'altération chimique pourra se développer assez rapidement alors que dans les zones sèches et selon la température, l'altération chimique sera plus lente que l'altération physique. Lorsque le processus chimique est prépondérant, la surface est soumise à différentes réactions qui tendent à transformer les constituants de la roche. Le plus souvent, les feldspaths et les micas sont altérés les premiers, entraînant la formation d'argiles, de séricite dans un environnement alcalin et de kaolinite en milieu acide. Pour les silicates, l'hydrolyse est le principal processus d'altération. Ce processus correspond à une altération de type météorique dont l'intensité est fonction des conditions thermodynamiques superficielles. Ce type d'altération se produit à faible température. Les deux exemples qui suivent illustrent ce cas de figure. Les travaux de K.D. KRANK et R.J. WATTERS (1983) portent sur les propriétés géotechniques de granodiorites de la Sierra Nevada (Californie). Dans ce type de roches, les cristaux de hornblende et de plagioclase seront les premiers à être altérés, suivis par la biotite, le feldspath potassique et enfin le quartz. Ainsi, l'altération de la roche peut être complète en s'appliquant à toutes les phases minérales constitutives de la roche. Dans le cas du granite sain (niveau d'altération 1 d'après les méthodes de classification précédemment citées), la biotite n'est pas altérée. De plus il n'y a pas de microfracture. Il faut noter que dans le cas du site étudié, le principal processus d'altération consiste en une expansion de la biotite au contact de l'eau souterraine. Cette expansion génère des microfractures qui progressivement transforment la roche originelle en sable. A mesure que l'expansion de la biotite se développe à l'intérieur de la roche, le niveau d'altération évolue vers le niveau 5 correspondant à une structure très fracturée. Le tableau 1 donne les différentes valeurs de la porosité, des masses volumiques réelles et apparentes d'échantillons de la Sierra Nevada correspondant à six degrés d'altération croissante. On remarque que la porosité tend à

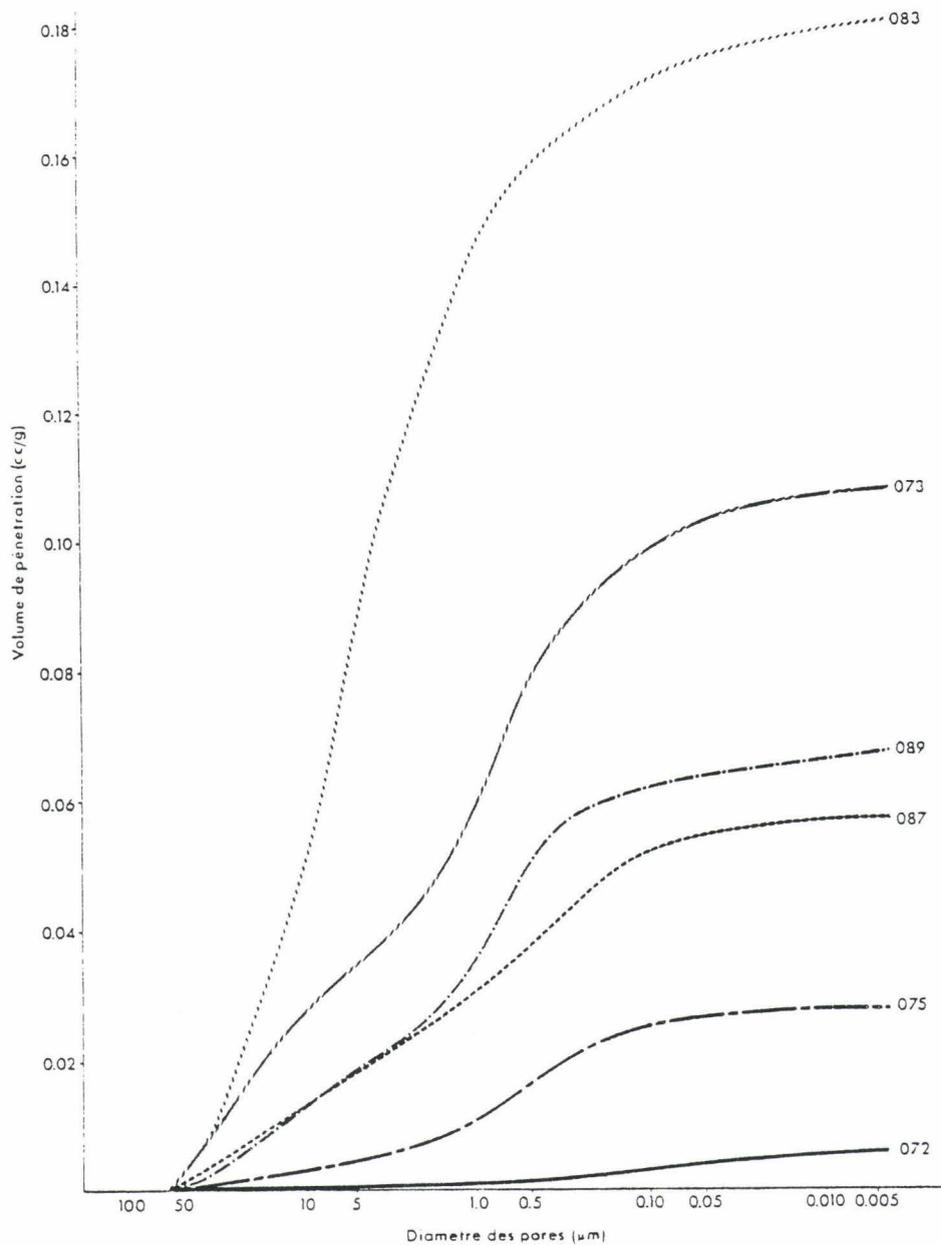
augmenter du niveau 1 au niveau 2 pour ensuite diminuer au niveau d'altération 3. La porosité s'accroît alors de façon importante jusqu'au niveau 6 d'altération maximale.

Tableau 1 - Caractéristiques des échantillons de granodiorite provenant de la Sierra Nevada (KRANK et WATTERS, 1983)

NIVEAU D'ALTERATION	masse volumique réelle (g/cm ³)	masse volumique apparente (g/cm ³)	POROSITE (%)
I	2,69 - 2,77	2,62 - 2,75	2,6 - 0,4
II	2,70 - 2,72	2,62 - 2,65	3,3 - 5,9
III	2,66	2,56 - 2,62	1,5 - 2,3
IV	2,62 - 2,79	2,34 - 2,56	5,2 - 6,1
V	2,61 - 2,66	2,02	24,0
VI	2,66	1,50	44,0

De même, dans une étude visant à montrer l'importance du site dans la genèse de minéraux secondaires issus des altérations superficielles, J. DEJOU, P. CLEMENT et C. de KIMPE (1982) ont suivi l'évolution de la porosité d'échantillons de granite à divers stades d'altération. Les résultats obtenus par porosimétrie au mercure sont exposés dans la figure 14. Il apparaît que le granite non altéré (n° 072) est peu poreux. Le diamètre moyen des pores calculé à partir de la dérivée de la courbe de pénétration du mercure est de l'ordre de 0,20 μm . Le passage aux formes d'altération en boules et ensuite aux arènes s'accompagne d'une diminution marquée de la densité apparente (2,40 à 1,65 g / cm³) et corrélativement d'une augmentation remarquable du volume poreux ainsi que du diamètre des pores qui s'élève de façon progressive de 0,2 à 7,8 microns.

L'altération hydrothermale quant à elle est engendrée par des eaux chaudes. Le développement de ce processus est fonction des conditions thermodynamiques des zones profondes de la croûte terrestre. C'est ainsi que les travaux de T.J. KATSUBE et D.C. KAMINENI (1983) sur des roches granitiques provenant du site d'étude d'Atikokan (Canada) montrent que la porosité dans ce cas décroît avec le degré d'altération des roches étudiées.



avec : 072 = granite relativement frais
 073 = arène sous le till
 075 = granite fortement désagrégé
 083 = arène avec réseau important de diaclases à
 2,5 mètres sous le till
 087 = arène hors diaclases à 1 mètres sous le till
 089 = boule de granite désagrégée

Figure 14 - Distribution du volume poreux en fonction du diamètre des pores dans des échantillons de granite (DEJOU et al., 1982)

Tableau 2 - Caractéristiques des pores et degré d'altération des échantillons de granite provenant d'Atikokan (Ontario, Canada) (KATSUBE et KAMINENI, 1983)

Profondeur de prélèvement (m)	Porosité effective Φ_e (%)	Porosité connectée Φ_c (%)	Tortuosité τ	Altération
13	0,27	0,085	3,2	4
39	0,20	0,071	2,9	3
79	0,21	0,060	3,4	3
94	0,34	0,096	3,5	3
128	0,21	0,062	3,7	3
163	0,26	0,088	3,0	3
174	0,28	0,077	3,6	3
237	0,22	0,075	2,9	3
283	0,19	0,055	3,5	2
319	0,34	0,141	2,4	2
361	0,25	0,078	3,2	2
400	0,26	0,068	3,9	3
433	0,28	0,099	2,9	2
475	0,32	0,111	2,8	1
505	0,31	0,147	2,1	1
539	0,43	-	-	1
593	0,45	0,267	1,7	1
630	0,49	0,286	1,7	1
670	0,43	0,204	2,1	1
714	0,24	0,055	4,4	3
746	0,39	0,187	2,1	2
787	0,47	0,253	1,9	1
812	0,35	0,208	1,7	1
848	0,24	0,121	2,0	1
901	0,34	0,172	2,0	1
923	0,29	0,066	4,3	3
979	0,29	0,141	2,1	1
1021	0,46	0,247	1,8	1
1034	0,34	0,095	3,6	4
1063	0,49	0,225	2,3	1
1078	0,25	0,111	2,2	3
1096	0,29	0,065	4,4	4
1120	0,46	0,102	4,5	4
1140	0,64	0,344	1,9	1

Les auteurs précisent qu'une roche altérée se caractérise par une couleur rosée dont l'intensité varie avec le degré d'altération allant du rose foncé pour les zones les plus altérées au gris dans les niveaux sains.

Ils observent également que les roches altérées contiennent un certain nombre de minéraux secondaires créés à partir des minéraux primaires par un processus hydrothermal (KAMINENI et DUGAL, 1982). Les minéraux les plus atteints sont les hornblendes, les biotites et les plagioclases. La porosité effective ϕ_e est déterminée en mesurant la différence de masses entre les échantillons bruts puis déshydratés et dégazés. La porosité ϕ_c est déduite de ϕ_e et du facteur de formation introduit par G.E. ARCHIE (1942) et défini par :

$$F = \rho_p / \rho_{pw} \quad (23)$$

avec ρ_p = résistivité électrique d'une roche saturée d'eau

ρ_{pw} = résistivité électrique de l'eau contenue dans les pores.

La méthode permettant la mesure de ρ_e et F est décrite dans (KATSUBE, 1981) et (AGTERBERG et al., 1985). Les différents paramètres sont reliés entre eux par l'équation suivante :

$$\rho_c = [(\rho_e - \rho_p) / F]^{0,5} \quad (24)$$

où ρ_p est la porosité des pores en poche.

Le tableau 2 présente les résultats obtenus au cours de cette étude. Il comporte les cotes de prélèvement des différents échantillons, les valeurs de ρ_e , ρ_c et τ ainsi que le degré d'altération correspondant. Il apparaît que le paramètre ρ_c décroît avec le degré d'altération. Une évolution comparable à celle de ρ_c est obtenue pour ρ_e dans une moindre mesure. Les résultats confirment d'ailleurs ceux obtenus sur des échantillons prélevés sur le site de Piwawa (URL-AECL Canada) par T.J. KATSUBE (1981).

3. MISE AU POINT DE DEUX TECHNIQUES POUR L'ETUDE DE LA POROSITE ET DE LA MICROFISSURATION DE ROCHES GRANITIQUES FAIBLEMENT POREUSES

3.1 Adaptation d'un porosimètre au mercure pour la mesure de la porosité de roches faiblement poreuses

3.1.1 Introduction

Le porosimètre au mercure permet la caractérisation du volume poreux d'un matériau et le calcul de sa surface poreuse développée, en mesurant la pénétration du matériau par du mercure soumis à une pression croissante. Or, l'utilisation de cette technique pour l'analyse de matériaux très peu poreux, tel le granite (porosité inférieure à 1%) nécessite une adaptation du matériel actuellement commercialisé; par ailleurs, une amélioration du traitement des données est nécessaire.

En effet, la faible porosité du granite implique que le porosimètre puisse enregistrer des variations très faibles du volume de mercure dans la cellule de mesure. Les cellules standard ne sont pas suffisamment sensibles. La conception et la réalisation d'une nouvelle cellule, adaptée au matériau étudié, se sont donc imposées.

Par ailleurs, le traitement des données réalisé par le logiciel livré avec l'appareil ne prend pas en compte un certain nombre de paramètres tels que les valeurs de compressibilité du matériau (granite) et du mercure, ainsi que le bruit de fond de l'appareil. Or, dans le cas des milieux très peu poreux, ces facteurs ont une influence non négligeable sur le résultat final en affectant notablement les mesures de volume pénétré et de surface développée. Il a donc fallu impérativement les prendre en compte et élaborer un autre logiciel de traitement des données brutes.

Ce paragraphe s'articule en conséquence de la façon suivante : après une description du matériel du commerce, nous présentons les résultats d'une expérience réalisée avec celui-ci sur un matériau peu poreux (granite). Ceux-ci nous guident pour l'amélioration de l'appareil et dans la recherche des facteurs à prendre en compte pour la réécriture d'un logiciel de traitement des données. Suit l'exposé des différentes améliorations effectivement apportées à l'appareil lui-même et la présentation du nouveau logiciel de traitement des données.

3.1.2 Présentation du porosimètre au mercure

3.1.2.1 Description de l'appareil et de ses composants

Le porosimètre MICROMERITICS 9310 utilisé pour notre étude fournit des résultats exprimés en Psi (pound per square inch). Nous utiliserons donc cette unité tout au long de ce travail, en sachant que $1 \text{ atm} = 14,70 \text{ Psi}$. Le porosimètre est composé des éléments suivants :

- deux postes basse pression reliés à une pompe à vide permettant le dégazage des échantillons, le remplissage de la cellule par le mercure et une première partie de la mesure allant d'environ 1,5 Psi (0,1 atm) à 22 Psi (1,5 atm), soit une pénétration des pores de $90 \mu\text{m}$ à $6 \mu\text{m}$ de rayon selon le modèle de Washburn;

- un poste haute pression, couplé à une presse hydraulique, permettant d'atteindre une pression maximale de 30000 Psi, soit environ 2000 atm (rayon minimal des pores pénétrés : 30 \AA);

- une cellule porte-échantillon ou pénétrromètre. Cette cellule présente un réservoir accueillant l'échantillon et se prolonge par un capillaire. Celui-ci est recouvert extérieurement d'un dépôt métallique. La variation du volume de mercure dans le capillaire détermine le volume de pénétration du mercure dans l'échantillon. Cette variation du volume est proportionnelle à la variation de hauteur du mercure dans le capillaire. Les dimensions du réservoir et du capillaire doivent être choisies en fonction de l'échantillon étudié. La mesure sur un échantillon très poreux nécessite un petit réservoir (faible volume de matériau) et un fort diamètre de capillaire. Au contraire, un matériau peu poreux exige un réservoir de grande taille et un capillaire de faible diamètre. La figure 41 présente la structure d'un pénétrromètre;

- une configuration informatique composée d'un microordinateur BULL MICRAL 30. Elle permet le pilotage automatique du porosimètre, le recueil et l'impression des mesures.

3.1.2.2 Principe des mesures de volume

Le volume de mercure qui pénètre dans l'échantillon pour chaque variation de pression est lié à la variation de hauteur de mercure dans le capillaire. Le capillaire constitue en fait un condensateur cylindrique dans lequel le mercure joue le rôle de l'armature interne, le verre celui du diélectrique et le dépôt métallique sur le verre celui de l'armature externe. Le bouchon métallique assure la contact électrique avec le mercure contenu dans le réservoir et le capillaire (armature interne du condensateur). La capacité du condensateur cylindrique est proportionnelle à la hauteur de mercure dans le capillaire. Ainsi, chaque pénétrromètre se caractérise par un facteur de calibrage en microlitres par picofarad (figure 16).

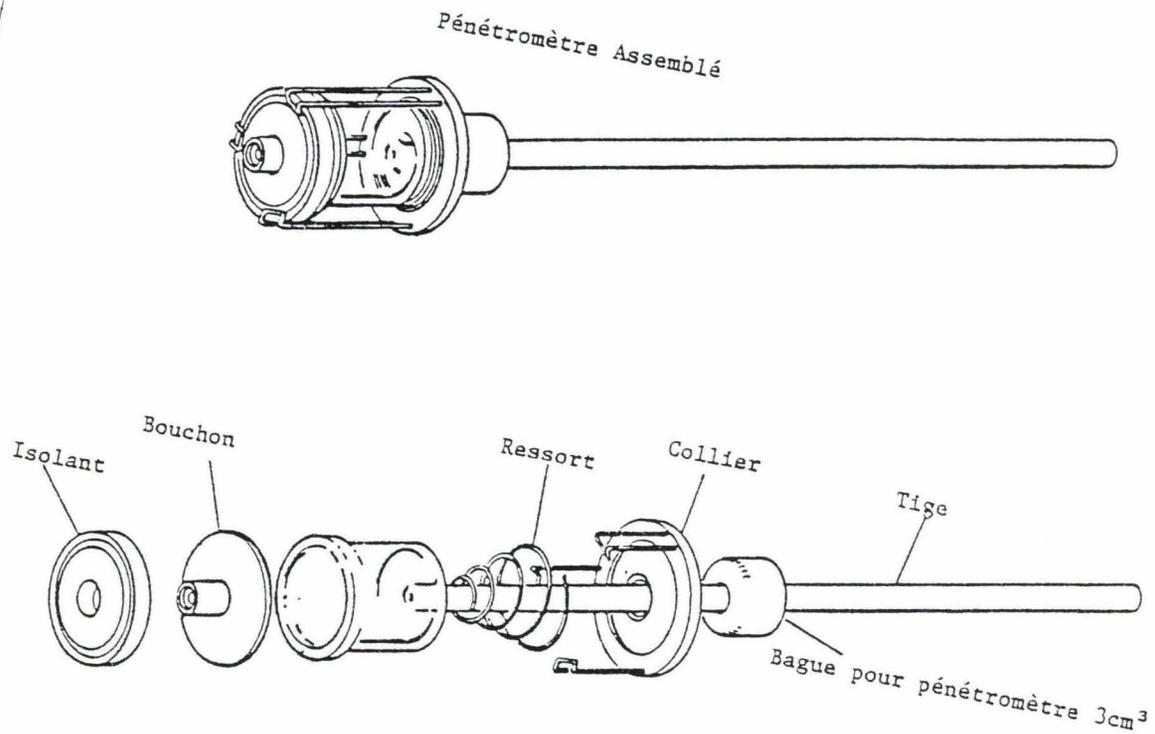


Figure 15 - Pénétrromètre : schéma d'ensemble et vue éclatée

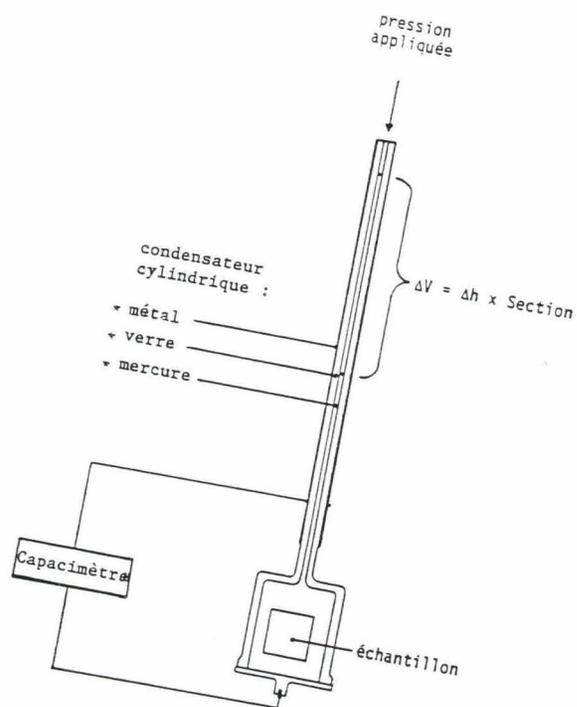


Figure 16 -Schéma de principe des mesures de volume

3.1.2.3 Conduite d'une expérience

L'échantillon à étudier est préalablement dégraissé à l'acétone puis déshydraté dans une étuve à 80°C pendant 48 heures. Après pesée, l'échantillon est introduit dans le réservoir. Un joint de graisse est réalisé à la base du réservoir du pénétromètre afin d'assurer l'étanchéité entre le réservoir et son bouchon métallique. Le bouchon est alors mis en place.

Le pénétromètre ainsi monté est placé horizontalement dans l'un des postes dit "basse pression" de l'appareil. L'extrémité du capillaire est reliée à une pompe à vide. Le dégazage de l'échantillon est alors effectué jusqu'à ce que la pression à l'intérieur du pénétromètre soit inférieure à 15 μm de mercure. Le pénétromètre est alors rempli de mercure. Après un remplissage complet de la cellule et du capillaire, la pression à l'intérieur du pénétromètre est amenée à 1,5 Psi.

Les mesures dans le domaine de la basse pression sont réalisées à partir de cette valeur de la pression de 1,5 Psi dans le pénétromètre jusqu'à une pression de 22 Psi, supérieure à la pression atmosphérique (14 Psi), afin d'assurer la continuité des mesures avec le domaine haute pression. Les points de mesure de la basse pression sont choisis par l'opérateur et stockés par l'ordinateur au fur et à mesure de la montée en pression. Une fois les mesures terminées, la pression atmosphérique est rétablie dans la cellule de façon à permettre l'extraction du pénétromètre du poste basse pression. Le pénétromètre est alors placé verticalement dans le poste dit "haute pression" rempli d'huile. La pression exercée par la pompe hydraulique se communique isostatiquement au pénétromètre.

La mesure haute pression peut être effectuée manuellement ou automatiquement. En mode manuel, l'opérateur déclenche lui-même la pompe hydraulique, choisit la vitesse de montée en pression et décide de l'enregistrement d'un couple de mesures (pression et capacité) comme lors de la manipulation en basse pression. Le mode automatique suit une table de pressions préalablement établie par l'opérateur. Les mesures peuvent alors être effectuées de deux manières différentes:

- atteindre à vitesse déterminée les pressions indiquées sur la table et procéder à un équilibrage pendant un temps choisi par l'opérateur avant de prendre les mesures de pression et de capacité;

- prendre les points de mesure "à la volée", sans équilibrage mais avec une table de vitesses à suivre entre chaque pression.

Les pressions de la table de mesure peuvent aller de 22 Psi (1,5 atm) à 30000 Psi (2040 atm). Cette table peut également comporter des points de mesure lors du retour à pression atmosphérique (mesure du volume d'extrusion). Le programme commercial procède donc au relevé des points pour les pressions déterminées et au retour à pression atmosphérique en fin de manipulation. Il permet également l'impression des résultats de mesure.

Les données numériques demandées par le programme pour tout traitement ultérieur des mesures sont les suivantes:

- la masse de l'échantillon, de l'ensemble échantillon + pénétromètre et de l'ensemble échantillon + pénétromètre + mercure;
- le volume de la cellule, le volume du capillaire et la masse volumique du mercure;
- le facteur de calibrage du pénétromètre (en $\mu\text{l/pF}$), la tension superficielle du mercure et l'angle de contact du mercure avec le matériau étudié.

Après traitement des données, le programme commercial restitue les résultats sous la forme suivante:

- un tableau général donnant les résultats pour chaque pression de mesure :
 - . la pression de mesure brute (en Psi) donnée par la pompe hydraulique;
 - . la pression de mesure "corrigée", c'est-à-dire augmentée de la hauteur de mercure présent dans le capillaire lorsque le pénétromètre est placé verticalement dans la cuve haute pression (en Psi);
 - . le diamètre minimal (en μm) des pores pénétrés calculé à partir de l'équation de Washburn;
 - . le volume d'intrusion cumulé (en cm^3/g) obtenu à partir de la mesure de la capacité;
 - . la surface cumulée des pores pénétrés (en m^2/g);
 - . le volume différentiel d'intrusion, soit la dérivée du volume d'intrusion par rapport au diamètre des pores, dV/dD (en $\text{cm}^3/\text{g}.\mu\text{m}$);
 - . le volume d'intrusion incrémenté (en cm^3/g);
- un récapitulatif des données introduites en début de manipulation;
- les résultats généraux de l'expérience :
 - . le volume total d'intrusion dans l'échantillon
 - . la surface totale des pores
 - . le diamètre médian des pores de l'échantillon (diamètre minimal pour lequel 50% du volume total d'intrusion ont pénétré)
 - . le diamètre moyen des pores D_{moyen} , soit, dans l'hypothèse de cylindricité :
$$D_{\text{moyen}} = 4 \cdot \text{Volume total des pores} / \text{Surface totale des pores}$$
 - . la masse volumique apparente μ_0 de l'échantillon
$$\mu_0 = \text{Masse de l'échantillon} / \text{Volume de l'échantillon}$$
 - . la masse volumique réelle μ_r de l'échantillon :
$$\mu_r = \text{Masse de l'échantillon} / (\text{Volume échantillon} - \text{Volume total des pores})$$
 - . le pourcentage de capillarité p_c :
$$p_c = \text{Volume total pénétré} \cdot 100 / \text{Volume du capillaire}$$

Ce pourcentage donne une indication sur le bon choix du pénétromètre par rapport à la porosité de l'échantillon. Le constructeur préconise une diminution du volume de mercure dans le capillaire au minimum de 20% de la hauteur totale et au maximum de 90% (c'est dans ce domaine qu'il y a linéarité entre la variation de volume et la variation de capacité du condensateur cylindrique);

- cinq graphes au choix représentant, en fonction des diamètres de pores, les pourcentages par rapport à la valeur maximale des quantités suivantes :

- . le volume cumulé d'intrusion
- . la surface poreuse cumulée
- . la distribution du volume poreux (volume d'intrusion incrémenté);
- . la distribution de la surface poreuse (surface poreuse incrémentée)
- . le volume poreux différentiel.

Ces graphes sont restitués à l'aide d'une imprimante à jet d'encre. En raison du pas de cette dernière, les graphes sont issus d'une interpolation.

3.1.3 Premières mesures de porosité sur une roche granitique

3.1.3.1 Présentation des résultats

Un échantillon de granite issu d'un carottage d'une profondeur de 500 mètres dans le massif granitique du site d'Auriat (Creuse) a fait l'objet d'une première étude par porosimétrie au mercure.

Le matériau étant a priori peu poreux, le pénétromètre possédant le plus grand réservoir (15 cm^3) avec le capillaire le plus fin (diamètre intérieur de 1,473 mm) a été sélectionné. L'échantillon analysé se présente sous la forme d'un cube de 14 mm de côté. Sa masse est de 8,817 g. La table de pressions utilisée comporte quatre points en basse pression et dix-huit points en haute pression.

Les différents résultats obtenus sont présentés dans le tableau n°3 et les figures n°17 à 21.

Il apparaît que la variation relative du volume de mercure dans le capillaire du pénétromètre (10,42%) est nettement inférieure à la valeur minimale préconisée par le constructeur. De plus, l'échelle de l'ordonnée des courbes est variable: l'ordonnée la plus forte correspond toujours à la valeur maximale mesurée dans un essai. Ainsi, une telle présentation ne permet pas une comparaison aisée entre les résultats de différents essais. Il est de plus impossible d'effectuer un traitement des résultats en choisissant l'origine des grandeurs représentées en un point quelconque de l'essai ou d'effectuer un zoom sur une partie des graphes.

Rappelons enfin que les courbes tracées à l'imprimante pas à pas sont constituées de points recalculés par interpolation à partir des points expérimentaux.

D'autre part, un autre essai a été réalisé sur un échantillon de granite de même nature que le précédent mais sectionné en cylindre de 24 mm de diamètre et 26 mm de hauteur (volume maximum occupable dans la cellule de mesure), multipliant ainsi le volume de l'échantillon par 4. De cet essai, nous ne retiendrons que la valeur de la variation relative de volume de mercure dans le capillaire du pénétromètre égale à 14%. Celle-ci est toujours inférieure au seuil de 20% préconisé par le constructeur.

Tableau 3 - Résultats de mesures par porosimétrie au mercure obtenus avec un pénétromètre standard

Poids de l'échantillon = 8,8171 g
 Poids du pénétromètre = 78,2929 g
 Poids pénétromètre + échantillon = 87,11 g
 Poids pénétromètre + échantillon + mercure = 258,3900 g
 Volume du pénétromètre = 15 cm³
 Volume du capillaire = 0,3920 cm³

Constante du pénétromètre = 10,79 µl/pF
 Angle de contact = 130°
 Tension superficielle = 485 dyne/cm
 Densité du mercure = 13,53 g/cm³
 Facteur de correction = 4,45

Volume d'intrusion total = 0,0046 cm³/g
 Surface poreuse totale = 0,4648 m²/g
 Diamètre de pore médian (d'après le volume) = 0,0799 µm
 Diamètre de pore moyen (4V/A) = 0,0399 µm
 Densité réelle = 3,7616 g/cm³
 Densité apparente = 3,8283 g/cm³
 Pourcentage de capillarité = 10,4187.

Pression (psi)	Pression corrigée (psi)	diamètre de pore (µm)	Volume d'intrusion cumulé (cm ³ /g)	Surface poreuse cumulée (m ² /g)	Volume d'intrusion différentiel (cm ³ /g.µm)	Volume d'intrusion incrémenté (cm ³ /g)
6,8	6,8	26,4071	0,0002	0,0000	0,0000	0,0002
13,2	13,2	13,6892	0,0004	0,0000	0,0000	0,0001
14,2	14,2	12,7512	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000
22,3	22,3	8,1032	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000
21,0	25,4	7,1212	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000
25,0	29,4	6,1523	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000
56,0	60,4	2,9945	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000
86,0	90,4	2,0007	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000
117,0	121,4	1,4899	0,0006	0,0003	0,0001	0,0001
176,0	180,4	1,0026	0,0006	0,0003	0,0000	0,0000
252,0	256,4	0,7055	0,0008	0,0013	0,0008	0,0002
563,0	567,4	0,3188	0,0010	0,0025	0,0004	0,0001
864,0	868,3	0,2083	0,0013	0,0082	0,0034	0,0004
1155,0	1159,3	0,1560	0,0015	0,0114	0,0029	0,0001
1743,0	1747,3	0,1035	0,0019	0,0253	0,0085	0,0004
2400,0	2404,2	0,0752	0,0024	0,0453	0,0158	0,0004
5584,0	5588,1	0,0324	0,0036	0,1342	0,0279	0,0012
8584,0	8588,1	0,0211	0,0039	0,1790	0,0264	0,0003
11456,0	11460,0	0,0158	0,0041	0,2276	0,0425	0,0002
17432,0	17436,0	0,0104	0,0043	0,2733	0,0276	0,0001
24904,0	24908,0	0,0073	0,0045	0,3750	0,0720	0,0002
29880,0	29884,0	0,0061	0,0046	0,4648	0,1236	0,0001

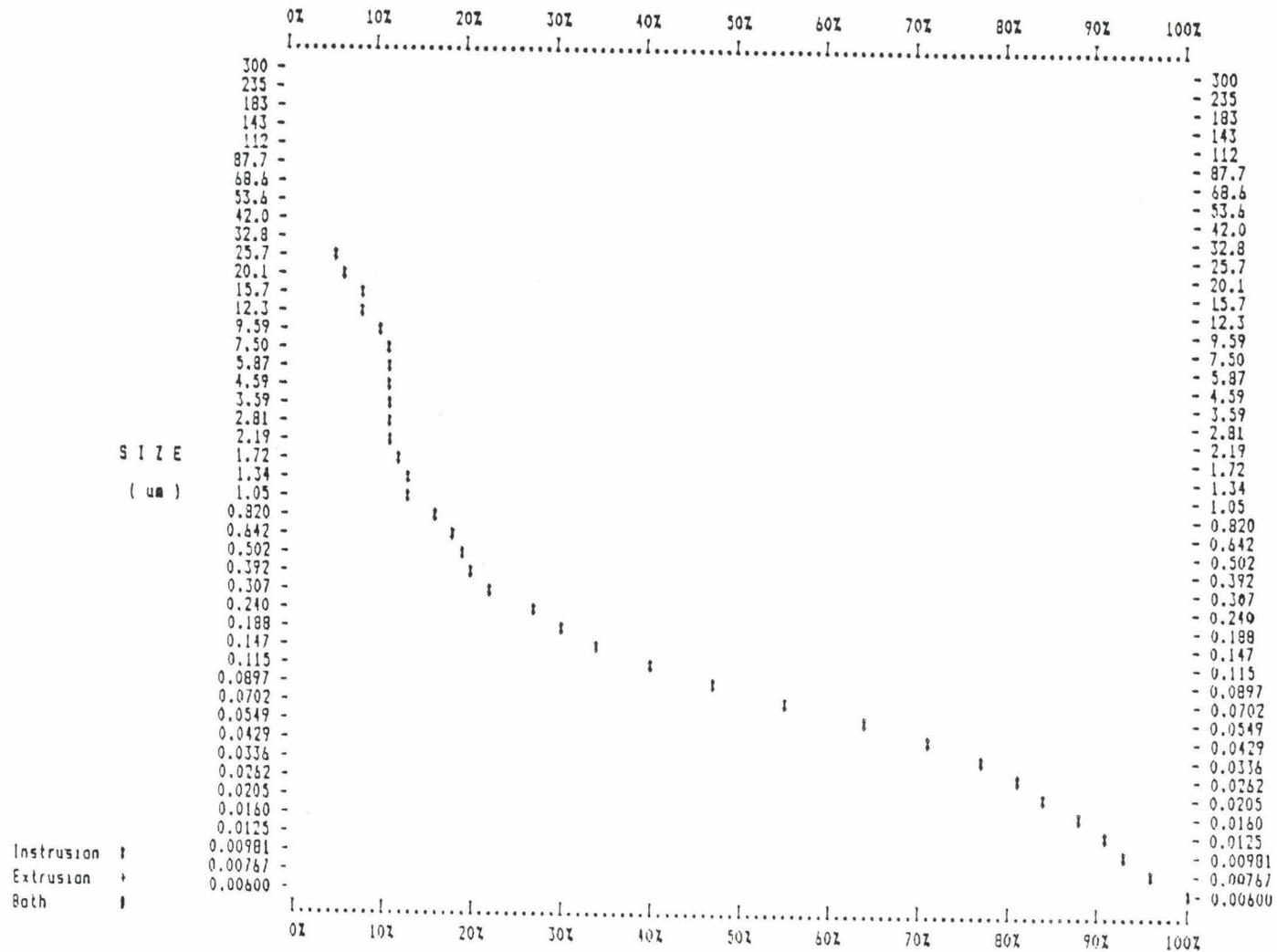


Figure 17 - Courbe du pourcentage du volume cumulé en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétrömètre standard

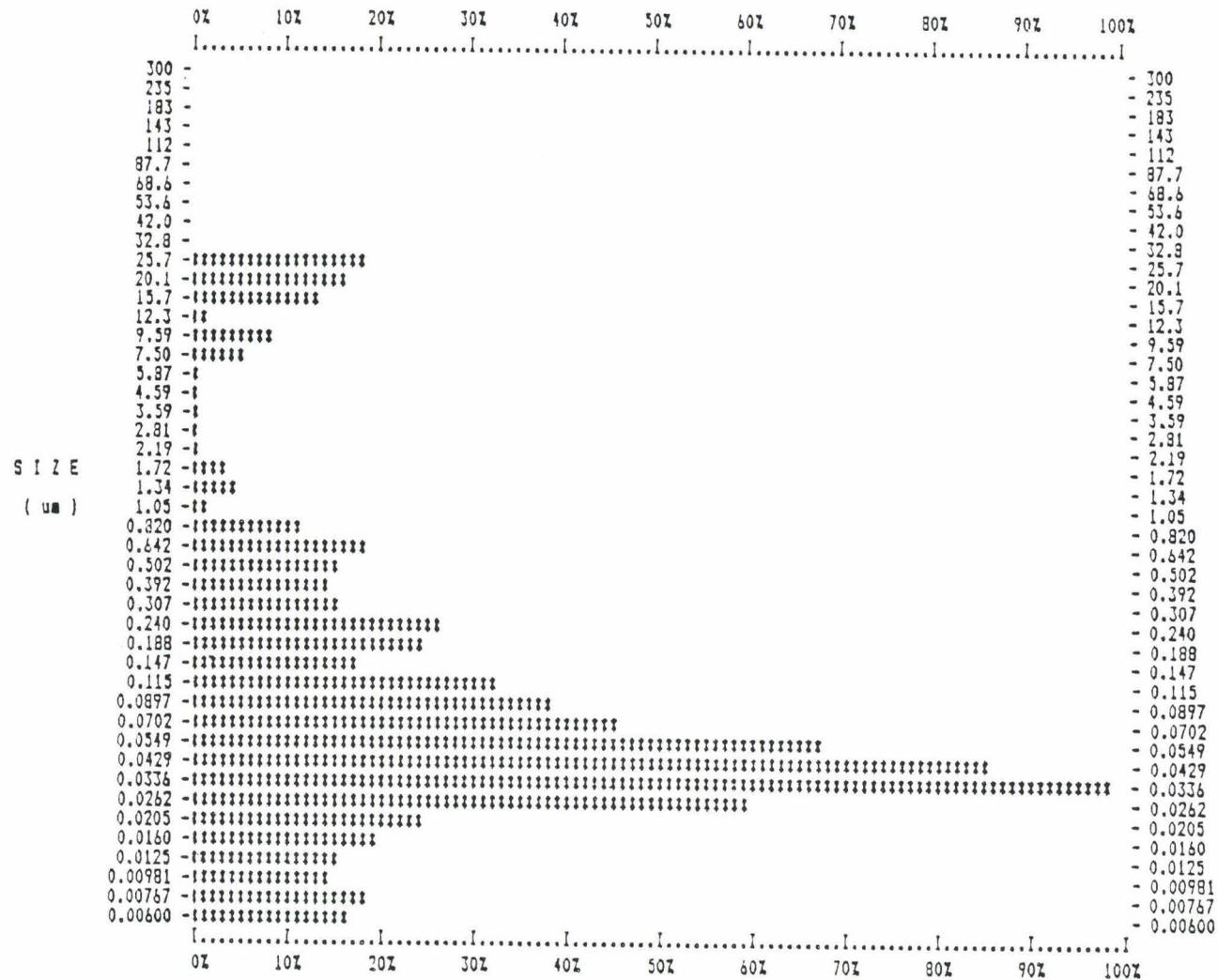


Figure 18 - Courbe du pourcentage du volume incrémenté en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard

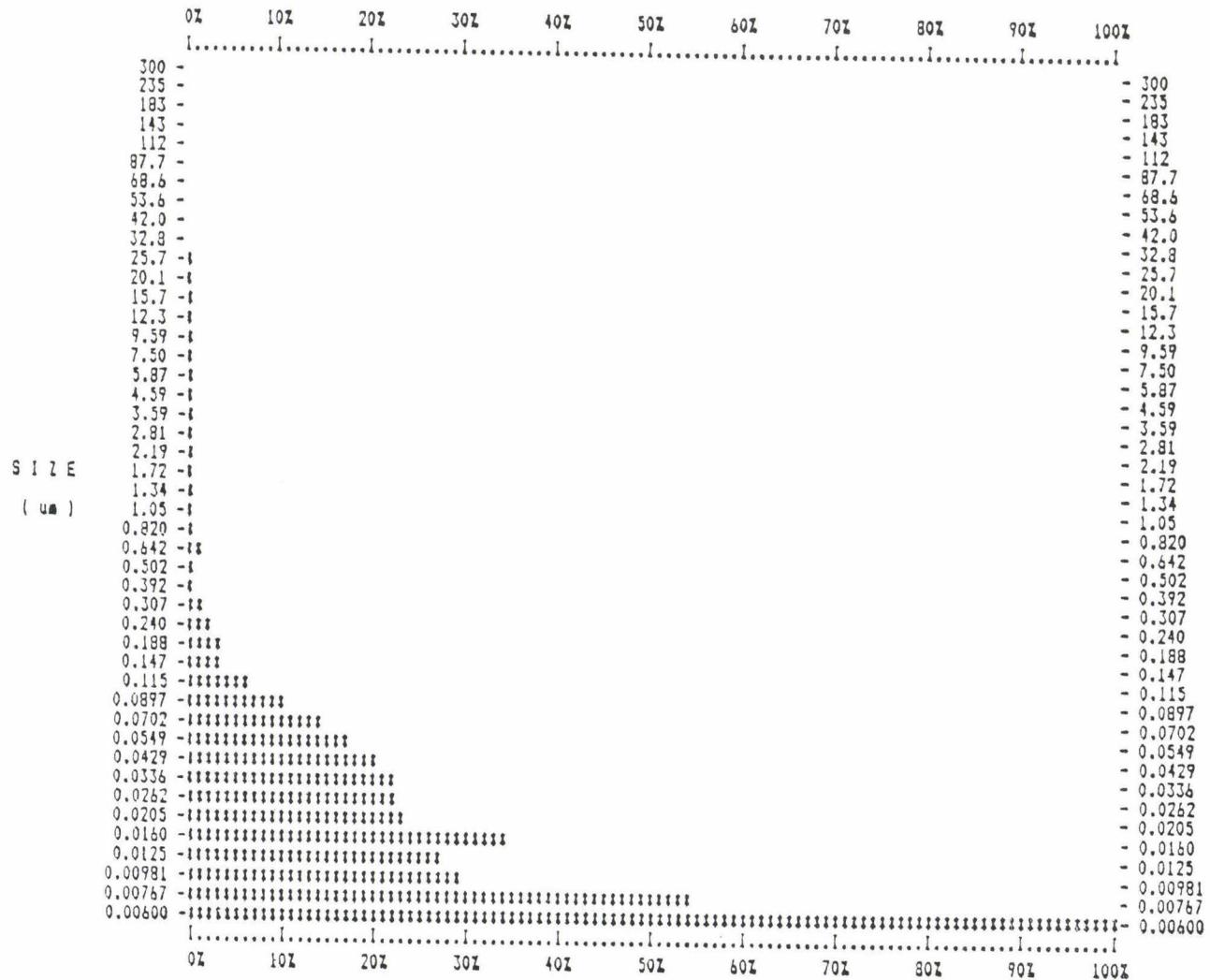


Figure 19 - Courbe du pourcentage du volume différentiel en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard

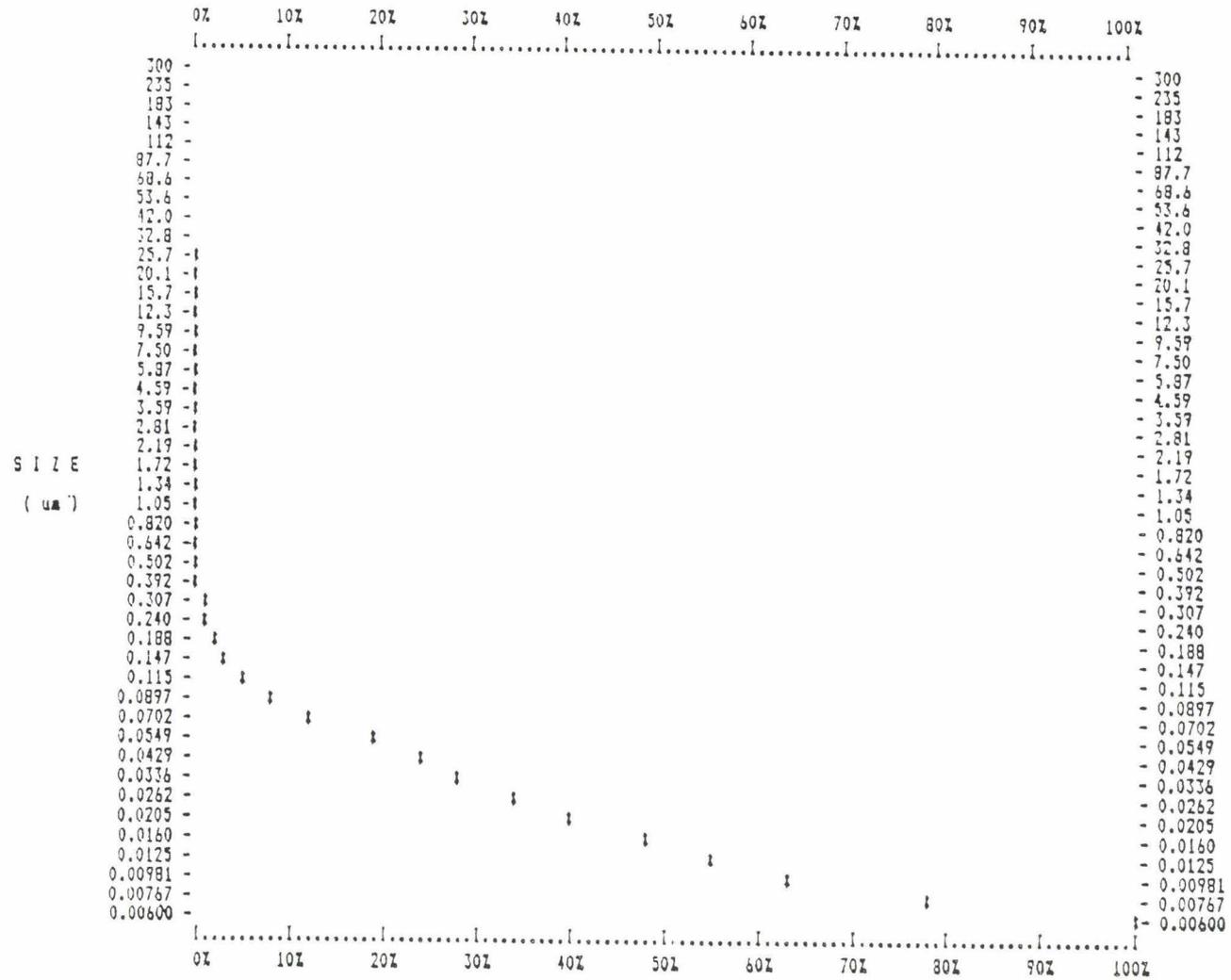


Figure 20 - Courbe du pourcentage de la surface cumulée en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard

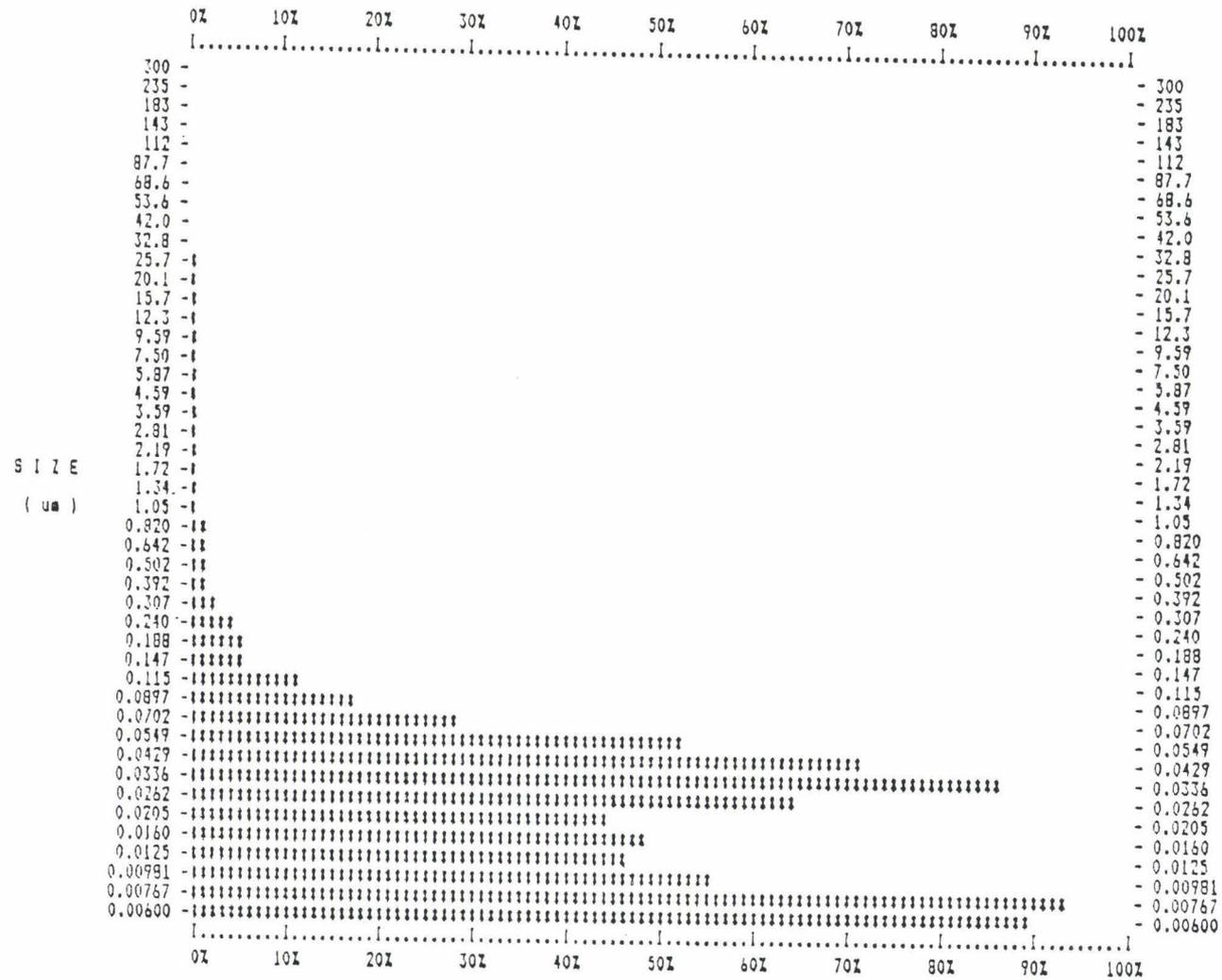


Figure 21 - Courbe du pourcentage de la surface incrémentée en fonction du diamètre des pores obtenue avec le pénétromètre standard

3.1.3.2 Améliorations envisagées

Nous ne pouvons pas augmenter le volume de l'échantillon sans accroître le volume intérieur et extérieur de la cellule du pénétromètre. Cela entraînerait la fabrication d'une autre cuve haute pression. Avant d'envisager cette ultime éventualité, nous avons décidé de fabriquer un nouveau pénétromètre de mêmes dimensions externes que le pénétromètre commercial (15 cm^3), mais muni d'un capillaire plus fin dans le but d'augmenter sa sensibilité.

3.1.4 Conception d'un nouveau pénétromètre

3.1.4.1 Critères de choix

Le choix du diamètre du capillaire est un compromis entre la nécessité d'une nette augmentation de la sensibilité qui se traduit par une diminution du diamètre intérieur du capillaire et les contraintes liées à la pénétration sous vide du mercure dans le tube lors du remplissage de la cellule. De plus, le nettoyage après manipulation doit rester aisé.

3.1.4.2 Caractéristiques du nouveau pénétromètre

Le choix d'un diamètre intérieur de la tige du capillaire de 0,8 mm s'est imposé :

- la sensibilité est augmentée;
- le mercure peut pénétrer dans le capillaire sous moins de 9.10^{-3} atm et le nettoyage par jet d'alcool et balayage gazeux reste efficace.

A l'occasion de l'essai préliminaire réalisé sur la carotte de 24 mm de diamètre, il est apparu que lors du remplissage de la cellule, la carotte de granite flottant sur le mercure venait se coller à la paroi du réservoir. De plus, le remplissage étant fait à très faible pression, le mercure ne parvenait pas à combler l'espace vide entre la carotte et la paroi. Cet espace pouvait alors être considéré comme un pore créé artificiellement entraînant des erreurs de mesure. Pour remédier à cet inconvénient, six ergots ont été disposés par 3 à 120° l'un de l'autre sur deux cercles à l'intérieur de la cellule cylindrique.

Les établissements GARNIER (Dijon) ont réalisé d'après nos plans la partie en verre qualité Pyrex, du pénétromètre. La partie délicate de cette réalisation est :

- le calibrage interne du capillaire à 0,8 mm;
- le centrage parfait de ce capillaire par usinage de la partie externe de telle sorte qu'on obtienne un condensateur cylindrique parfait.

Le revêtement métallique disposé sur la partie externe rectiligne du capillaire est composé d'un dépôt de nickel de 0,07 mm d'épaisseur. Il a été réalisé par voie catalytique par la Société ACRODUR (Dijon). Les différents plans et spécifications transmis aux fournisseurs sont illustrés par les documents de la figure 22 (BOEGLIN, 1989).

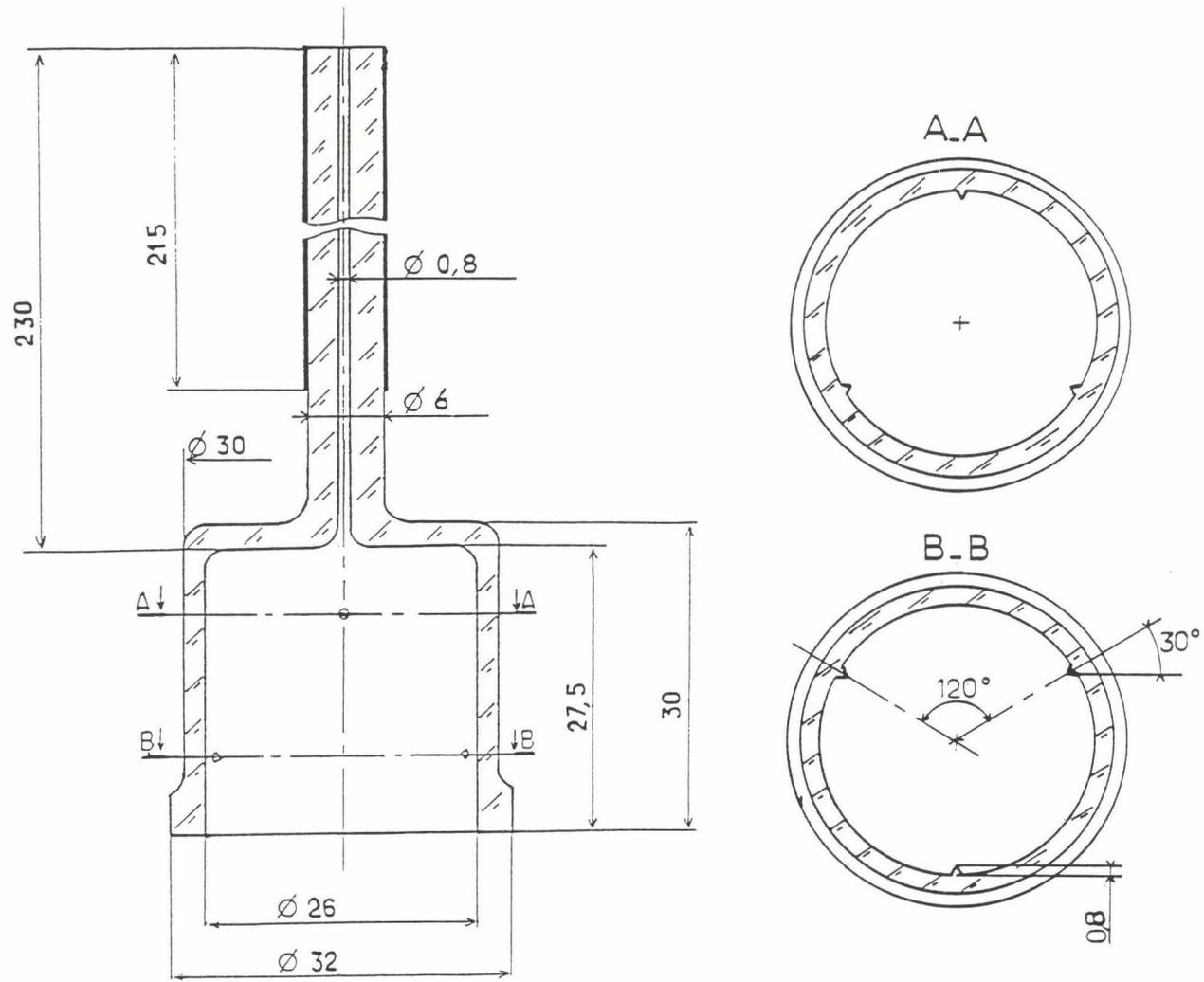


Figure 22 -Plans du nouveau pénétromètre

3.1.5 Détermination du facteur de calibrage

Lors d'une manipulation, la mesure du volume pénétré à l'intérieur de l'échantillon se fait par l'intermédiaire d'une mesure de capacité ΔC , variant proportionnellement avec le volume ΔV pénétré.

La détermination de la constante de proportionnalité $\Delta V / \Delta C$ peut se faire de deux manières : l'une par le calcul, à partir de l'équation relative à un condensateur cylindrique, l'autre expérimentalement, en mesurant la capacité créée par le volume de mercure en regard de l'armature externe. Dans le cas de la détermination expérimentale, la méthode utilisée a d'abord été testée sur un pénétromètre de constante connue. Nous avons donc déterminé la constante de calibrage suivant les deux méthodes citées et comparé les résultats obtenus.

3.1.5.1 Description du banc de mesure et mode opératoire

Le banc de calibrage du pénétromètre est représenté sur la figure 23. Il comporte :

- - un tube en U dont la partie verticale gauche est un capillaire de 1 mm de diamètre intérieur. A droite du tube en U se trouve un support sur lequel vient se fixer le pénétromètre à calibrer. Le capillaire de celui-ci forme la partie verticale droite du tube en U;
- un capacimètre permettant la mesure de la capacité du pénétromètre;
- une lunette de visée se déplaçant sur une règle graduée verticale. Celle-ci permettra de repérer le niveau de mercure dans la partie gauche du tube en U et d'en déduire la position du niveau de mercure dans le capillaire. En effet, sa position ne peut être repérée directement du fait du dépôt métallique de l'armature externe.

Le mercure est introduit par l'orifice de remplissage dans le tube en U jusqu'à ce qu'il affleure l'extrémité supérieure du pénétromètre. A l'aide de la lunette, le niveau de mercure est repéré sur la partie gauche du tube.

A l'aide du robinet de vidange, le tube en U est vidé par étapes. A chaque étape, le niveau de mercure est repéré sur le capillaire gauche et la capacité du pénétromètre est mesurée. Les différences de niveau correspondent à des variations de hauteur de mercure qui sont les mêmes pour les deux capillaires. Il est alors possible de déterminer les variations de volume de mercure dans le capillaire du pénétromètre et de corrélérer celles-ci avec les variations de capacités. Le facteur de calibrage K (en $\mu\text{l/pF}$) est ainsi déterminé.

3.1.5.2 Résultats

La constante de calibrage est calculée comme le rapport de la variation de volume à la variation de capacité ($\Delta V/\Delta C$).

Pour tester la fiabilité du matériel et le bien fondé de la méthode, une série de mesures a été effectuée sur le pénétromètre commercial présentant le capillaire le plus fin.

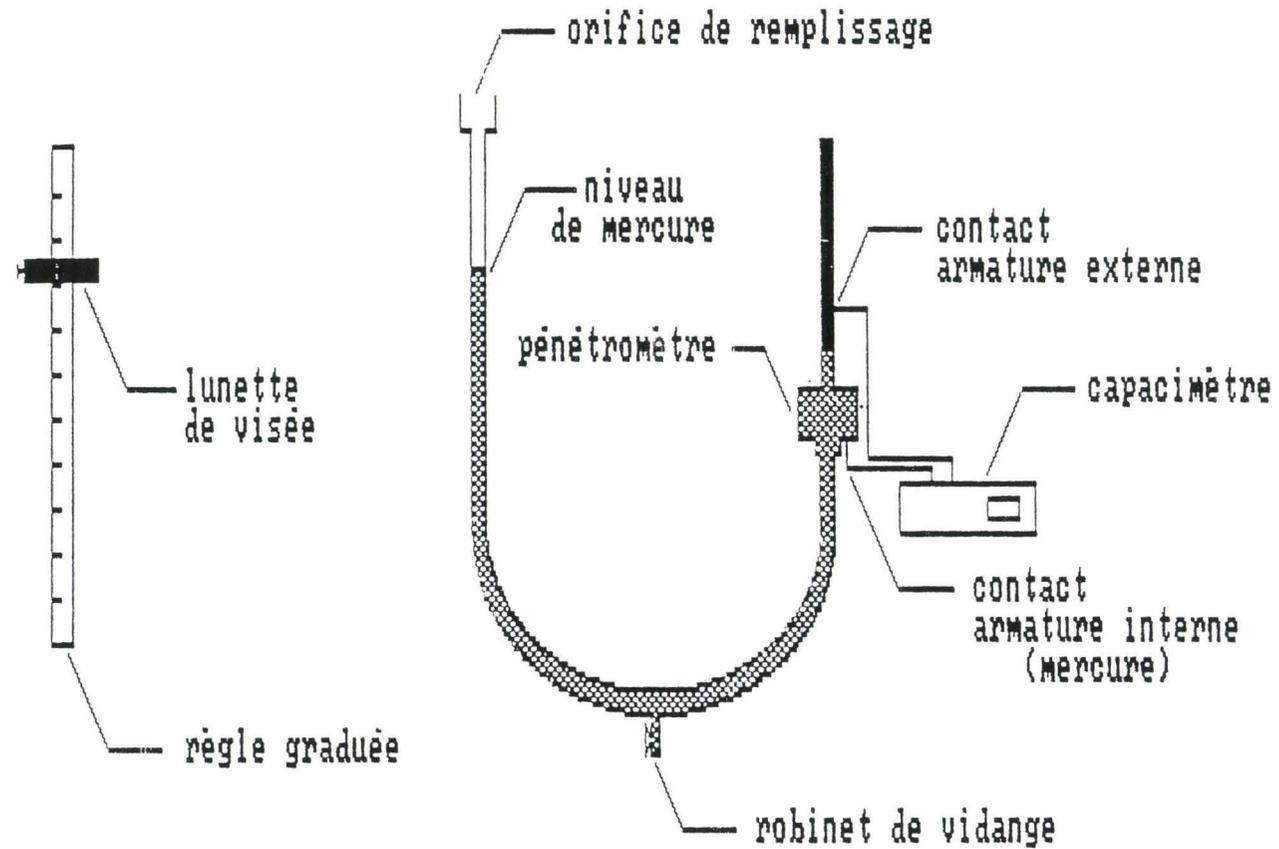


Figure 23 - Schéma du banc de calibrage

Les variations de volume de mercure, les capacités et les valeurs de la constante de calibrage correspondantes sont consignées dans le tableau 4. Seuls ont été pris en compte les niveaux correspondant à un remplissage du capillaire compris entre 20 et 80% du volume total. En effet, en-dehors de cette fourchette, le condensateur crée ne peut plus être considéré comme cylindrique (effets de bords) et la proportionnalité entre ΔV et ΔC n'est certainement plus vérifiée.

La valeur moyenne du facteur de calibrage est de $10,74 \mu\text{l/pF}$ avec un écart-type de $0,40$. Le constructeur donne pour ce pénétromètre une constante de $10,79 \mu\text{l/pF}$. Le bon accord entre ces deux valeurs vérifie la fiabilité des mesures.

Afin de calibrer le nouveau pénétromètre (diamètre intérieur de $0,8 \text{ mm}$), une nouvelle série de mesures a été effectuée. Les variations de volume et de capacité correspondantes sont données dans le tableau 5 ainsi que les valeurs de la constante de calibrage K .

Le facteur de calibrage moyen est de $3,89 \mu\text{l/pF}$ avec un écart-type de $0,19 \mu\text{l/pF}$.

3.1.5.3 Détermination théorique du facteur de calibrage

Dans le cas d'un condensateur cylindrique, la constante théorique K est donnée par la relation :

$$K = D_1^2 \cdot \text{Ln} (D_2/D_1) / (8 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r) \quad (25)$$

avec D_1 = diamètre intérieur du condensateur

D_2 = diamètre extérieur

ϵ_0 = permittivité diélectrique du vide

ϵ_r = permittivité relative du verre

La valeur de la permittivité diélectrique relative du verre ϵ_r utilisée a été estimée d'après les données fournies pour une série de pénétromètres commerciaux par la Société MICROMERITICS. Le tableau 6 présente les différentes valeurs calculées de ϵ_r à partir des données : $D_2 = 7,982 \text{ mm}$ et $\epsilon_0 = 1/(36 \cdot \pi \cdot 10^9)$. La valeur moyenne de la permittivité diélectrique obtenue est : $\epsilon_r = 4,791$

A partir de ces résultats, le facteur de calibrage a été calculé pour le nouveau pénétromètre. Pour $D_1 = 0,8 \text{ mm}$ et $D_2 = 6,5 \text{ mm}$, on obtient :

$$K = 3,956 \mu\text{l/pF}$$

Rappelons que la valeur expérimentale du coefficient de calibrage était : $K = 3,89 \mu\text{l/pF}$ avec un écart-type de $0,19$. Ces deux valeurs sont donc en très bon accord. Notons que le coefficient de calibrage de la nouvelle cellule est beaucoup plus faible que celui de la cellule standard.

Tableau 4 - Détermination du facteur de calibrage d'un pénétromètre standard

δV (μl)	δC (pF)	K ($\mu\text{l} / \text{pF}$)
177,141	17,10	10,359
242,664	23,37	10,384
256,467	24,66	10,400
277,649	27,15	10,226
319,945	30,32	10,552
169,217	15,67	10,799
183,020	16,96	10,791
204,202	19,45	10,499
246,498	22,32	11,044
79,326	7,56	10,493
100,508	10,05	10,001
142,804	12,92	11,053

$$K_{\text{moyen}} = 10,74 \mu\text{l/pF} \pm 0,40$$

Tableau 5 - Détermination du facteur de calibrage du nouveau pénétromètre

δV (μl)	δC (pF)	K ($\mu\text{l/pF}$)
13,310	3,56	3,739
61,364	15,24	4,027
99,938	25,01	3,996
38,574	9,77	3,948
25,872	6,75	3,833
30,813	7,99	3,856
34,532	8,93	3,867
45,897	12,28	3,738
48,677	12,88	3,779
17,065	4,19	4,073
20,785	5,13	4,052
32,150	8,48	3,791
34,929	9,08	3,847
8,661	2,18	3,973
24,540	6,24	3,933
20,820	5,30	3,928

$$K_{\text{moyen}} = 3,89 \mu\text{l/pF} \pm 0,19$$

Tableau 6 -Calcul de la permittivité diélectrique relative du verre pour différentes valeurs du diamètre intérieur du condensateur.

D1 (mm)	K($\mu\text{l/pF}$)	ϵ_r
1,473	10,79	4,804
2,503	21,63	4,749
3,188	27,82	4,740
4,250	33,13	4,858
4,813	34,48	4,805

Pour D2 = diamètre extérieur = 7,982 mm : ϵ_r moyen = 4,791

QUANTIFICATION DU BRUIT DE FOND

Volume Cumule = f(Pression)

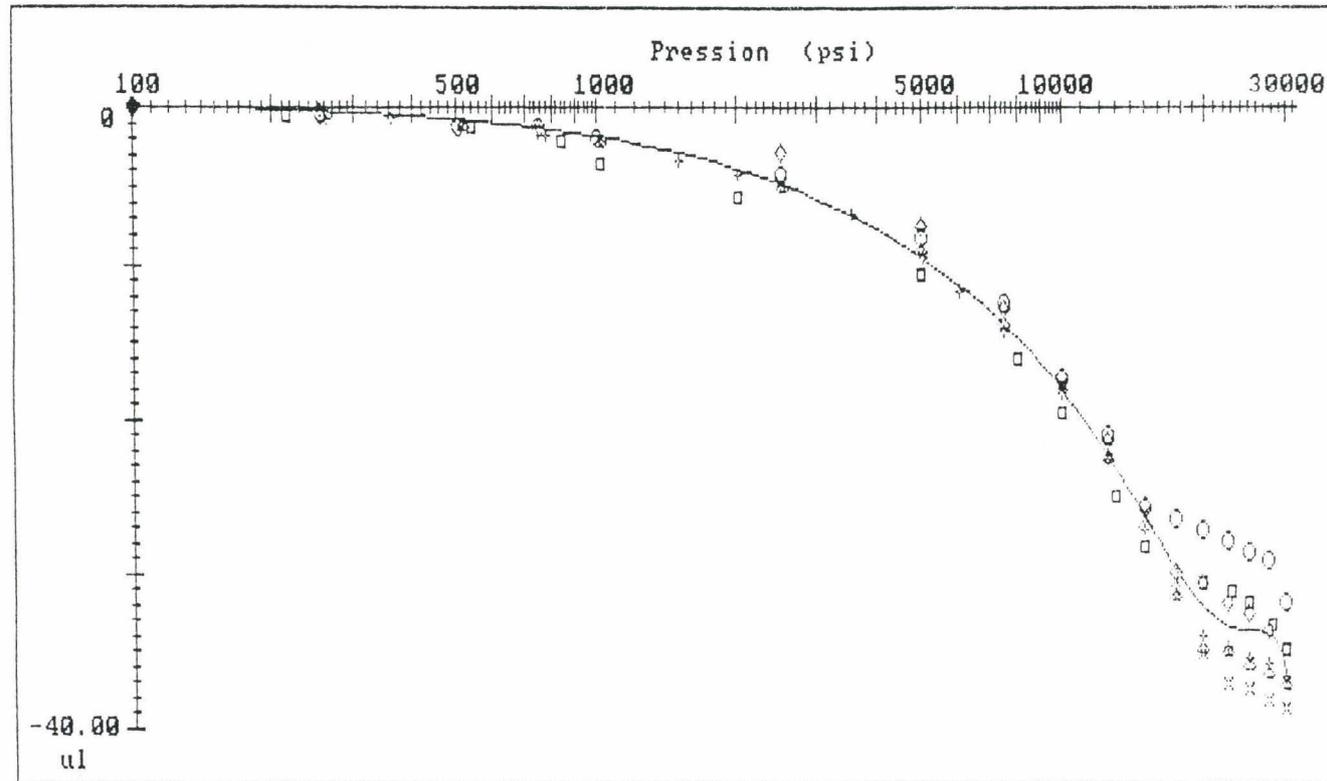


Figure 24 - Courbe de bruit de fond du nouveau pénétrömètre

Ainsi, la sensibilité a été augmentée d'autant, c'est à dire qu'elle a été multipliée par environ 2,8.

Pour la suite de ce travail, nous utiliserons le facteur de calibrage déterminé expérimentalement.

3.1.6 Mise au point de la nouvelle configuration

3.1.6.1 Choix du domaine d'étude

Les premières manipulations effectuées sur des granites avec le nouveau pénétrromètre ont confirmé une nette augmentation de la sensibilité: le pourcentage de capillarité se situe désormais autour de 35%. Néanmoins, lors du remplissage de la cellule par le mercure, la carotte maintenue éloignée de la paroi de la cellule par des ergots de centrage vient se coller au bouchon métallique, créant ainsi artificiellement un "macropore", préjudiciable aux premières mesures (basse pression). Malheureusement, ce dernier ne peut être éliminé grâce à un système d'ergots sur le bouchon (à l'exemple du réservoir) pour des raisons techniques (polissage). C'est pourquoi, le domaine d'étude a été défini sur l'intervalle de pressions allant de 100 à 30000 Psi, correspondant au domaine des mesures "haute-pression", soit de $1,81 \mu\text{m}$ à 60 \AA de diamètre de pores.

3.1.6.2 Quantification du bruit de fond

L'augmentation de sensibilité de l'appareil entraîne une contribution plus importante du bruit de fond qu'il faut donc quantifier.

Pour ce faire, nous avons utilisé une carotte d'acier supposée non poreuse de mêmes dimensions que celles des échantillons de granite (cylindre de 24 mm de diamètre et 26 mm de hauteur). Entre chaque mesure de pression, un temps d'équilibre de 10 minutes est observé. Il permet une répartition homogène de la température dans la cuve haute pression. Les résultats de six essais sont représentés sur la figure 24. Ils appellent un commentaire important : les volumes cumulés représentés en fonction de la pression correspondent à une augmentation du volume de mercure dans la cellule au fur et à mesure que la pression augmente ($\Delta V < 0$). Notons d'ailleurs que lors des premiers essais, cette augmentation de volume a engendré un débordement du mercure hors du pénétrromètre (ce qui rendait la mesure impossible). Nous avons en effet retrouvé des gouttelettes de mercure dans la chambre haute pression. Par la suite, lors des expériences menées avec la carotte d'acier exclusivement, nous avons rempli le pénétrromètre avec du mercure en laissant un petit espace qui permette l'augmentation du volume de mercure dans le capillaire lorsque la pression croît.

Le phénomène observé peut être dû à:

- un effet de température dû à la compression de l'huile et du mercure dans l'enceinte quasi adiabatique que constitue la cuve haute pression. La dilatation du mercure ainsi produite prédominerait sur sa compression;

- un effet de déformation du pénétromètre, en fonction de la pression, entraînant une légère diminution de son volume et une montée du niveau de mercure dans le capillaire.

La mise en équation du bruit de fond a été effectuée par régression polynomiale de degré 6. L'équation suivante correspond donc à la mesure d'un échantillon non poreux et compressible (npc):

$$V_{npc}(P) = 0,18 - (2,12 \cdot 10^{-3} \cdot P) + (1,07 \cdot 10^{-7} \cdot P^2) - (1,44 \cdot 10^{-11} \cdot P^3) + (8,36 \cdot 10^{-16} \cdot P^4) - (1,78 \cdot 10^{-20} \cdot P^5) + (1,03 \cdot 10^{-25} \cdot P^6) \quad (26)$$

avec P = pression appliquée (en Psi).

La courbe correspondant à cette équation a été représentée également sur la figure 24. L'équation finale du bruit de fond est obtenue en tenant compte des compressibilités de l'acier et du granite. Dans un premier temps, le volume de bruit de fond pour une carotte d'un échantillon non poreux et non compressible (npnc) est donnée par :

$$V_{npnc}(P) = V_{npc}(P) - V_0 \cdot (1 - \exp(\beta_a \cdot (P - P_{atm}))) \quad (27)$$

avec V_0 = Volume de la carotte = 11762 μ l

β_a = coefficient de compressibilité de l'acier = $39,37 \cdot 10^{-9}$ Psi⁻¹

P_{atm} = pression atmosphérique = 14 Psi.

L'équation utilisée pour traiter les résultats de mesure des granites tient compte du bruit fourni par une carotte d'un matériau non poreux et non compressible et de la compressibilité du granite étudié:

$$V_{por} = V_{mes} - V_{npnc}(P) - V_0 \cdot (1 - \exp(\beta_g \cdot (P - P_{atm}))) \quad (28)$$

avec V_{por} = Volume poreux réel de l'échantillon (en μ l)

V_{mes} = Volume poreux mesuré (en μ l)

β_g = coefficient de compressibilité du granite = $16 \cdot 10^{-8}$ Psi⁻¹

La valeur du coefficient de compressibilité du granite provient d'une étude réalisée sur le comportement mécanique du granite d'Auriat au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique de Palaiseau (CHARPENTIER, 1983).

3.1.6.3 Logiciels

Un premier logiciel de traitement des données a été élaboré : "PROGRAMME DE TRAITEMENT DES MANIPS POROSIMETRIE SUR LES GRANITES" (VUILLEUMIER C., 1989, 1990). Il prend en compte les mesures du fichier de manipulation créé par le programme de pilotage du porosimètre. Le bruit de fond est systématiquement soustrait des mesures. On obtient ainsi en fonction de la pression appliquée et des diamètres de pores :

- le volume poreux cumulé par gramme d'échantillon (μ l/g);

- les incréments de volume poreux par gramme ($\mu\text{l/g}$);
- la surface poreuse cumulée par gramme (m^2/g);
- les incréments de surface poreuse par gramme (m^2/g);
- la porosité (en %).

Ce logiciel fournit également des informations générales sur l'échantillon telles que: le volume massique apparent, le volume massique de la matrice (en cm^3/g) et la porosité totale de l'échantillon (en %).

Un second logiciel intitulé "PROGRAMME DE TRAITEMENT GRAPHIQUE POROSIMETRIE AU MERCURE SUR GRANITES" (VUILLEUMIER C., 1989, 1990), permet la représentation des courbes correspondant aux différents paramètres calculés par le premier logiciel, soit en fonction de la pression, soit en fonction du diamètre de pores (calculé par l'équation de Washburn). Il permet d'obtenir le tracé des courbes correspondant à une ou plusieurs mesures. De plus, il permet d'obtenir pour chaque paramètre représenté le tracé d'une courbe moyenne sur la base de plusieurs expériences.

3.2. Conception et mise au point d'une méthode de quantification de la microfissuration d'une roche

3.2.1 Introduction

Le système microfissural d'une roche peut être visualisé par l'imprégnation sous pression de son réseau poreux par une résine. L'analyse par microscopie optique de lames minces réalisées à partir de l'échantillon imprégné permet de localiser les fissures d'une largeur supérieure à 1 micron. Rappelons que le système de mesure par porosimétrie au mercure utilisé précédemment permet la prise en compte des pores d'un diamètre inférieur à 1,81 micron. Ces deux techniques apparaissent donc comme étant complémentaires: les domaines de mesures se recouvrent à leurs limites. La mise au point d'un système d'analyse basé sur l'utilisation d'une tablette à numériser reliée à un microscope optique par un tube à dessiner, permet l'acquisition par un ordinateur des coordonnées des points formant le contour des fissures. Un traitement mathématique de ces données fournira les différents paramètres dimensionnels d'une fissure, l'orientation de la fissure dans le repère de la lame et les caractéristiques liées à l'environnement de celle-ci (phases minérales - parcours intra ou intergranulaire).

Deux logiciels ont été élaborés :

- le premier permet l'analyse d'un cm^2 de lame mince et l'acquisition des caractéristiques de chaque fissure observée;

- le second permet la sortie des résultats de chaque analyse et le cumul des données de plusieurs analyses effectuées par exemple sur des échantillons de même nature. Il réalise le calcul des valeurs cumulées et des moyennes, des écarts-types correspondants et représente les histogrammes des différents paramètres quantitatifs.

Nous terminerons ce paragraphe décrivant la conduite d'une expérience sur un échantillon de granite. Nous analyserons les résultats obtenus à l'aide des deux logiciels élaborés. A cette occasion, nous testerons la reproductibilité des mesures en comparant les résultats obtenus pour chaque cm^2 de surface analysée.

3.2.2 Mise en oeuvre de l'imprégnation sous pression d'échantillons rocheux par une résine colorée

3.2.2.1 Choix d'une résine

Pour visualiser le système microfissural d'une roche, il est nécessaire d'imprégner cette dernière par une résine liquide colorée. La résine durcit en polymérisant à l'intérieur du système. A l'examen microscopique, seront ainsi visualisées les fissures qui seront remplies par cette résine colorée. La résine injectée doit se caractériser par :

- une viscosité suffisamment faible pour remplir au maximum le système microfissural;
- une polymérisation lente, sans retrait ni distorsion, permettant d'obtenir une image fidèle de la structure poreuse;
- une résistance mécanique satisfaisante permettant la réalisation de lames minces.

De nombreux essais d'imprégnation des granites à la pression atmosphérique après dégazage du granite sous vide, ou par aspiration sous vide de la résine au travers du granite se sont révélés infructueux : l'examen des lames minces montre que la résine n'a pas imprégné le coeur de l'échantillon (des fissures d'un diamètre de 0, 1 mm n'ont pas été atteintes).

Il est donc apparu nécessaire d'imprégner le granite par de la résine sous une pression relativement forte, supérieure à la pression atmosphérique. Nous nous sommes inspirés d'un système déjà existant, mis au point et utilisé par la Société TOTAL (Laboratoire Exploration) que nous avons miniaturisé pour les besoins spécifiques de l'étude. Le matériau polymère utilisé comporte une résine epoxy de base à laquelle s'ajoutent un durcisseur et un accélérateur. Les meilleures imprégnations sous pression ont été obtenues à partir des composants suivants:

- résine de base : ARALDITE CY 205
- durcisseur : HY 905
- accélérateur de polymérisation : DY 062
- colorant : ORASOL bleu.

3.2.2.2 Appareillage

Les imprégnations se pratiquent sur un prototype construit par la Société SEPRO-TEC. Cet appareil (voir schéma de la figure n°25) se compose des éléments suivants:

- un autoclave, entièrement en acier inoxydable, qui contient un panier à plateaux dans lequel sont introduits les échantillons. Ce panier évite le contact de la résine avec les parois de l'autoclave inclus dans un système chauffant régulé;

- une enceinte de préchauffage. Egalement en acier inoxydable et incluse dans un système chauffant, cette enceinte a pour fonction d'amener le mélange résine + durcisseur + accélérateur + colorant à la température de travail de 75 à 80°C correspondant au minimum de viscosité du mélange. Un agitateur à pales permet le brassage des produits lors de l'élaboration du mélange;

- une centrale de vide. Elle comporte une pompe à vide à double étage protégée par un piège cryogénique (azote liquide) permettant l'obtention d'un vide de l'ordre de 10^{-3} mm de mercure;

- un ensemble de mise sous pression de gaz. Le gaz utilisé est l'azote d'une bouteille dont la pression est mesurée.

3.2.2.3 Préparation des échantillons

Dans un premier temps, les échantillons sont sectionnés en parallélépipèdes de 5 cm x 3 cm x 1 cm. Ils sont ensuite déshydratés en étuve à 80°C pendant 3 jours. Chaque échantillon est affecté d'un numéro permettant son repérage tout au long des diverses manipulations.

Les granites sont alors placés sur des plateaux métalliques successivement introduits dans un panier en inox prenant place dans l'autoclave. Le nombre de plateaux utilisés détermine le volume de résine nécessaire (figure 26).

3.2.2.4 Mise en oeuvre de l'imprégnation

Le panier en inox contenant les échantillons rocheux à imprégner ayant été placé à l'intérieur de l'autoclave, celui-ci est connecté à la pompe à vide. L'opération de dégazage est alors effectuée. Dans le même temps, les systèmes de chauffage sont mis en route. Compte tenu de l'inertie de ces systèmes, la montée en température doit être progressive jusqu'à 80°C.

La préparation du mélange d'imprégnation est effectuée dans l'enceinte de préchauffage en introduisant successivement le colorant, le durcisseur, la résine puis l'accélérateur en respectant la pondération entre les différents produits.

Lorsqu'un vide de 8 à 6.10^{-2} Torr est atteint dans l'autoclave, on procède par siphonage à l'injection de la résine dans l'autoclave.

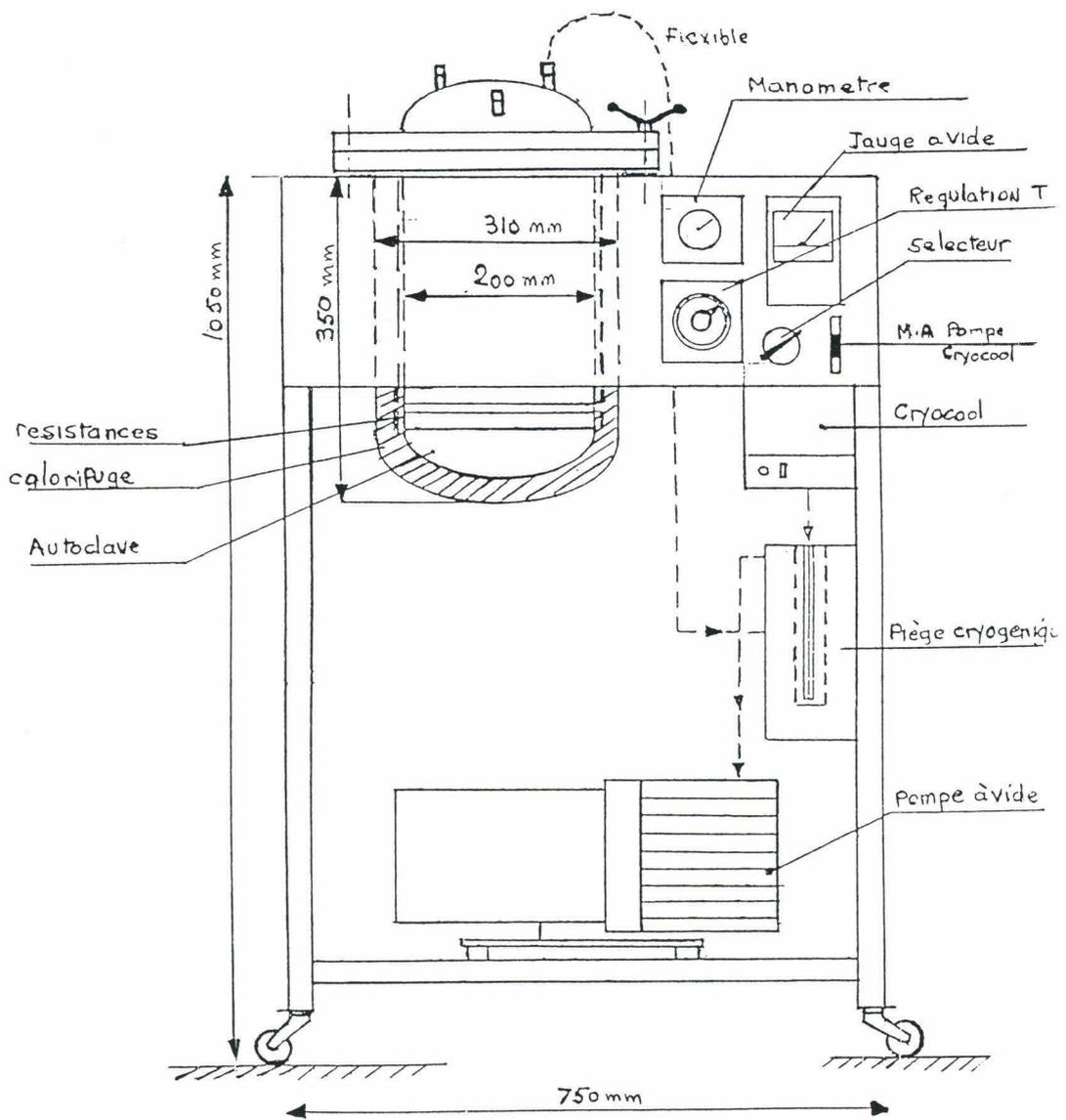


Figure 25 -Dispositif d'imprégnation à la résine

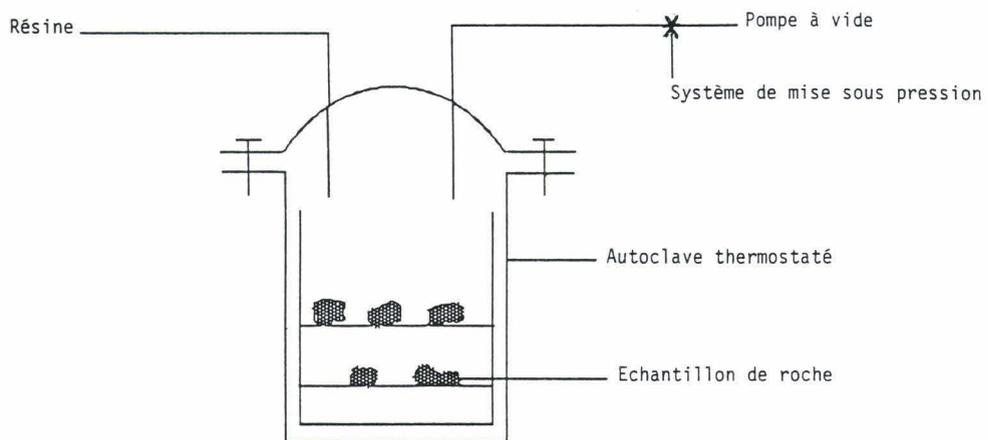


Figure 26 -Schéma de principe du dispositif d'imprégnation

Celui-ci est alors mis sous une pression d'azote de 20 bars pendant trente minutes. Une fois l'opération terminée, les échantillons sont récupérés et placés en étuve à 100°C pendant 36 heures de façon à obtenir la polymérisation complète de la résine.

3.2.3 Conception d'un poste d'analyse en vue de la quantification de la microfissuration d'une roche granitique

3.2.3.1 Préparation des échantillons

Suite à l'opération d'imprégnation des échantillons de granite par la résine, des lames pétrographiques de 30 μm d'épaisseur sont réalisées. Le parcours de la résine dans le système microfissural peut ainsi être observé en transmission par microscopie optique. L'utilisation d'un microscope polarisant permet la reconnaissance des phases minérales adjacentes aux fissures.

3.2.3.2 Appareillage

Le poste d'analyse utilisé pour la quantification de la microfissuration est composé des éléments suivants :

- une tablette à numériser de type BENSON 6440 munie d'un curseur à 4 boutons sur lequel a été fixée une diode lumineuse de couleur rouge;

- un microscope optique polarisant de type OLYMPUS BH-2 relié à la tablette à numériser au moyen d'un tube à dessiner. Ce dernier permet la visualisation de la diode sur l'image observée. L'observation des microfissures par microscopie optique est réalisée au grossissement 125 (objectif X10, oculaire X10 et tube X1,25);

- un microordinateur de type ZENITH. La figure 27 représente le schéma synoptique explicitant les relations entre les différents éléments du système utilisé.

Le déplacement du curseur suivant le contour d'une fissure imprégnée permet l'acquisition des coordonnées des points de ce contour par l'ordinateur. Un traitement mathématique de ces données permet d'obtenir les différents paramètres dimensionnels des fissures et leurs valeurs moyennes.

3.2.3.3 Observation de la microfissuration

La technique de coloration présentée ici permet de visualiser le système fissural connecté d'un échantillon rocheux. Il importe donc, dans le cadre d'une étude comparative, que les dimensions des échantillons imprégnés soient constantes. Nous avons choisi de colorer des éléments de 1 cm x 2,5 cm x 3,5 cm.

Cette première étude a porté sur des échantillons de granite à différents états d'altération issus du forage de 500 m d'Auriat.

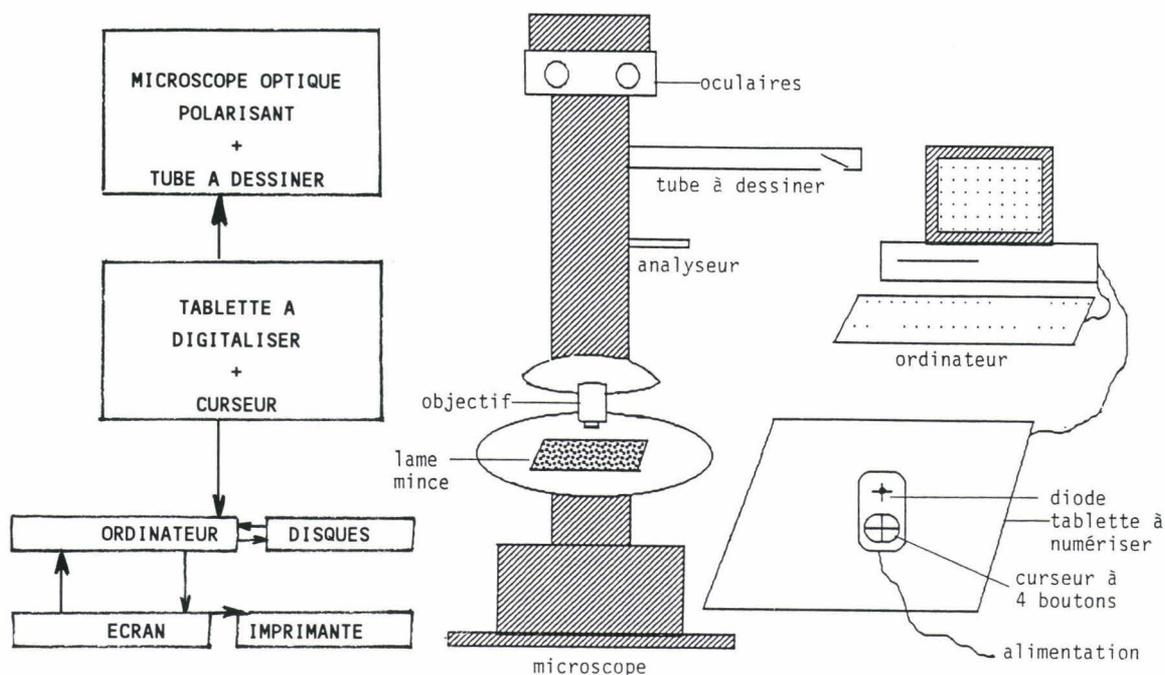


Figure 27 - Schéma synoptique du poste d'analyse de la microfissuration sur lames minces

L'observation des lames pétrographiques au microscope polarisant fait apparaître que l'ensemble des principales phases minérales présentent une fissuration inter- ou intra-granulaires.

Les photographies des figures n° 28, 29, 30 et 31 mettent en évidence la fissuration intra-granulaire dans les différents minéraux : quartz, plagioclases, feldspaths potassiques biotite.

Les photographies des figures n° 32 et 33 illustrent la fissuration inter-granulaire.

Parmi les fissures observées, il apparaît qu'un certain nombre d'entre elles ont des largeurs bien supérieures au parcours de la résine. Ceci provient d'un colmatage de ces fissures empêchant le passage du fluide. Le colmatage a pour origine la recristallisation de certains minéraux ou le dépôt minéral consécutif au passage d'un fluide.

Les photographies des figures n°34, 35, 36 et 37 montrent des exemples de ces fissures. Dans chaque cas, une évaluation du diamètre de la fissure est indiquée sur le cliché lui même.

L'ensemble de ces observations permet de constater une très grande diversité morphologique des zones imprégnées. Il est donc intéressant d'envisager une quantification de la microfissuration afin de comparer les divers échantillons provenant du forage d'Auriat.

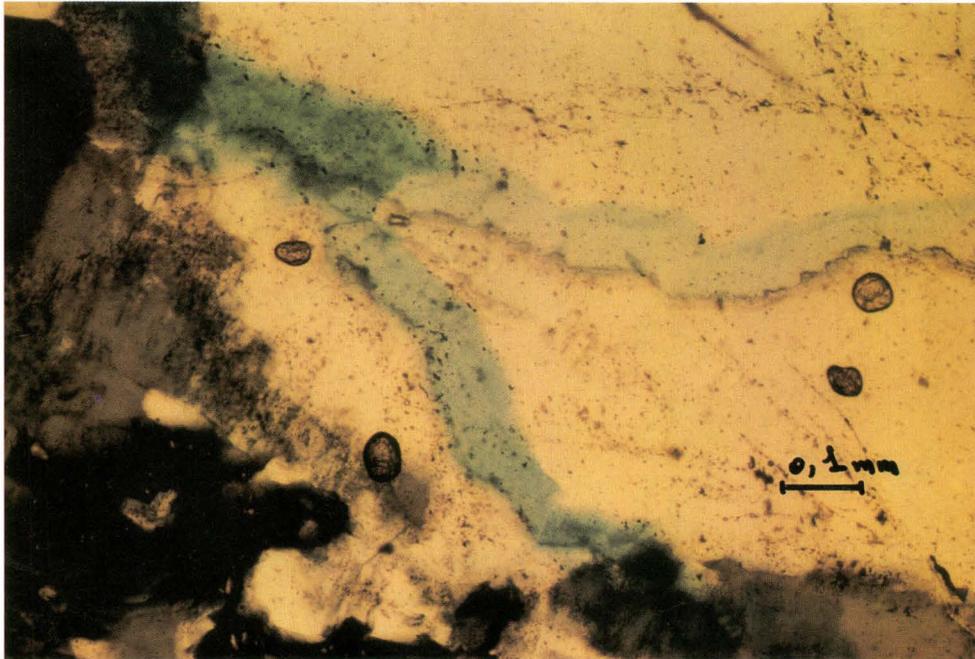


Figure 28 - Fissuration intragranulaire dans un quartz (380,50 m)



Figure 29 - Fissuration intragranulaire dans un plagioclase (380,50 m)

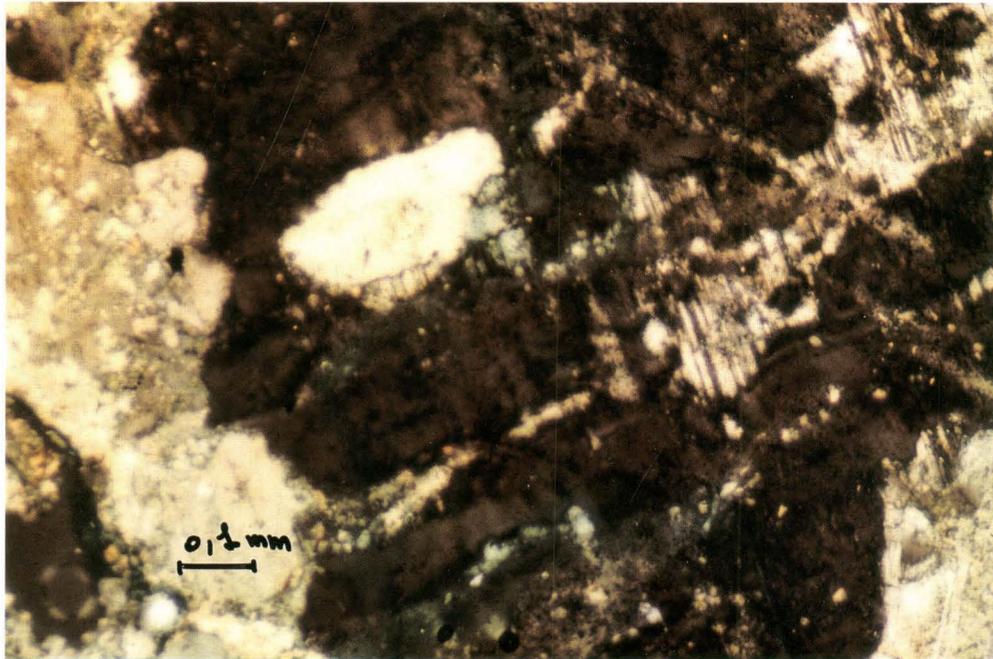


Figure 30 - Fissuration intragranulaire dans un feldspath potassique (249 m)

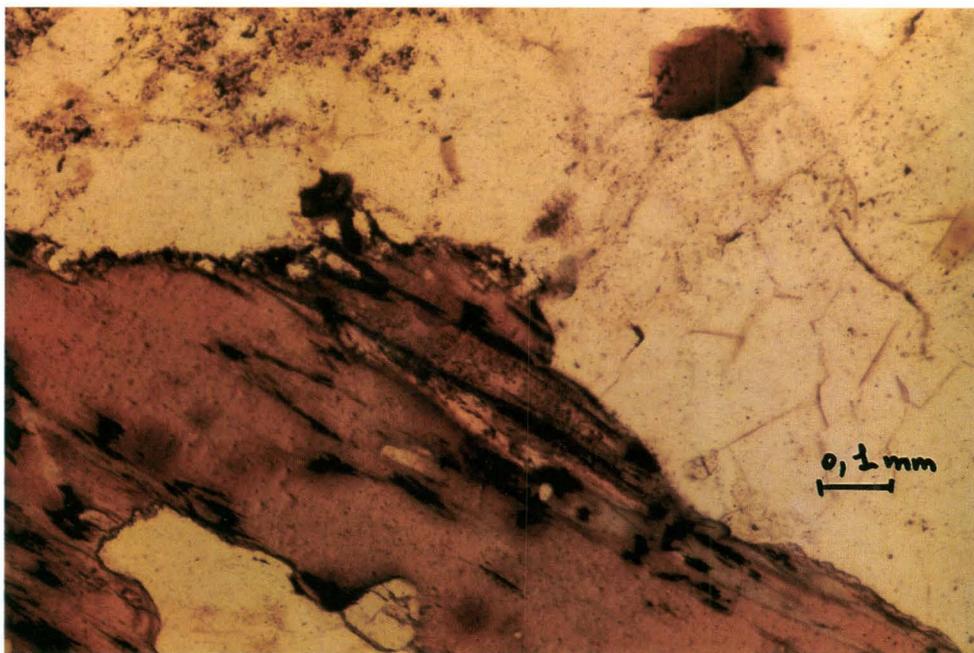


Figure 31 - Fissuration intragranulaire dans une biotite (100 m)

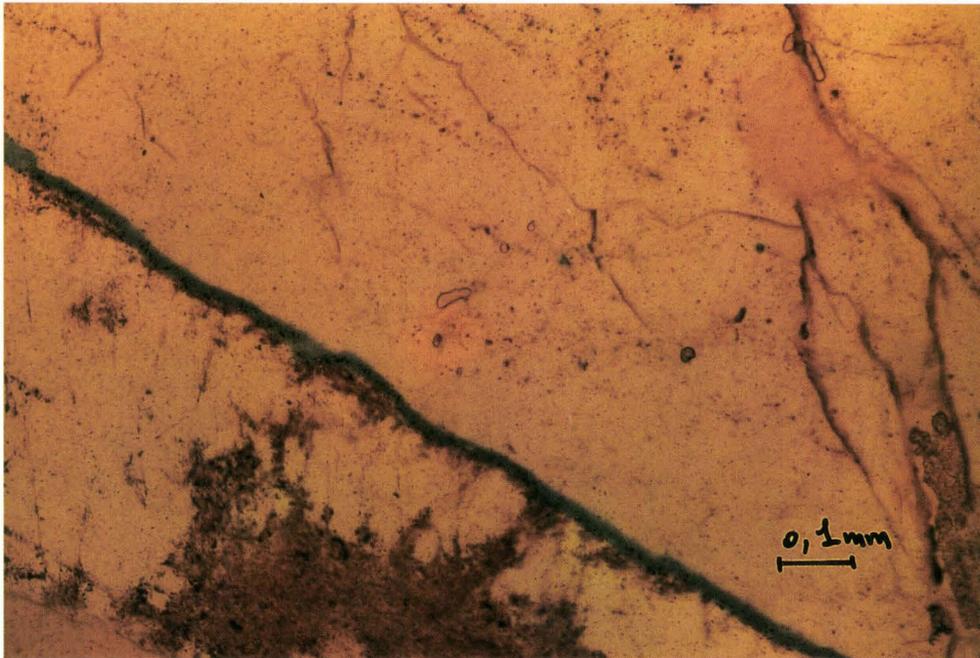


Figure 32 - Fissuration intergranulaire entre un plagioclase et un quartz (100 m)

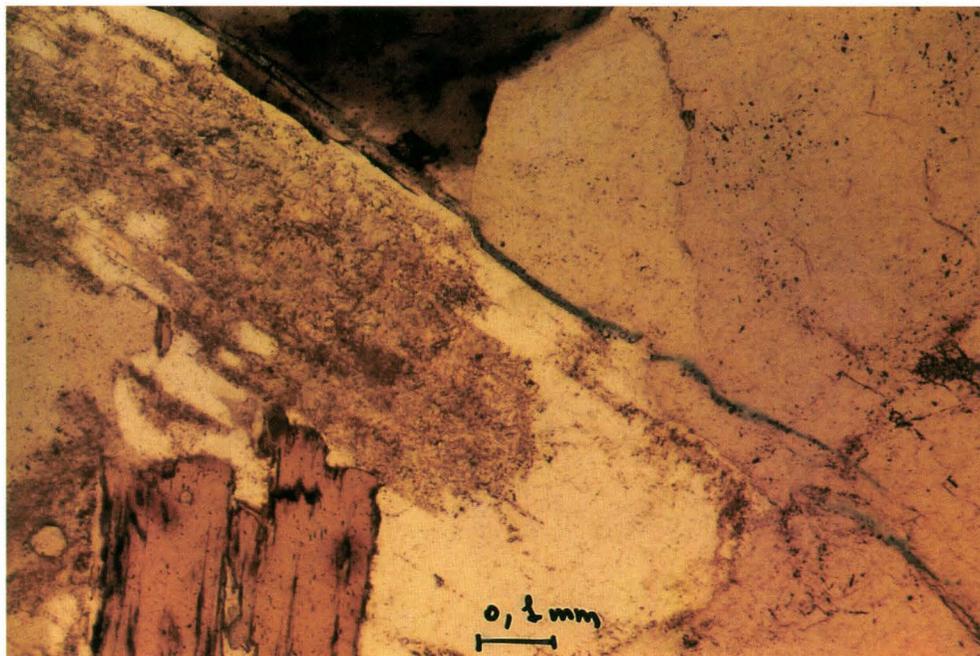


Figure 33- Fissuration intergranulaire entre un plagioclase et un quartz (100 m)

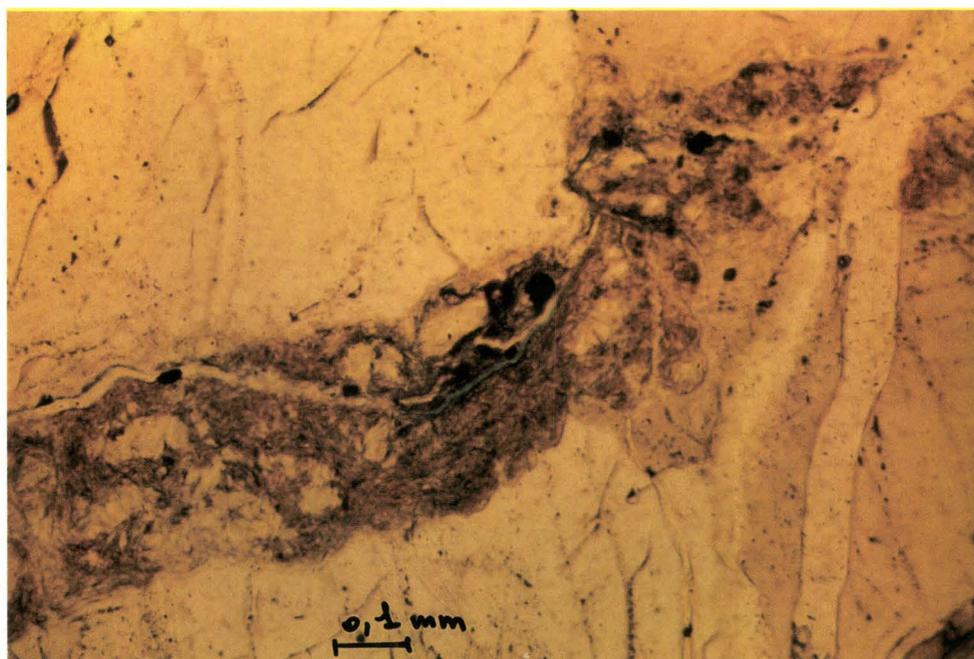


Figure 34 - Fissures colmatées (100 m)

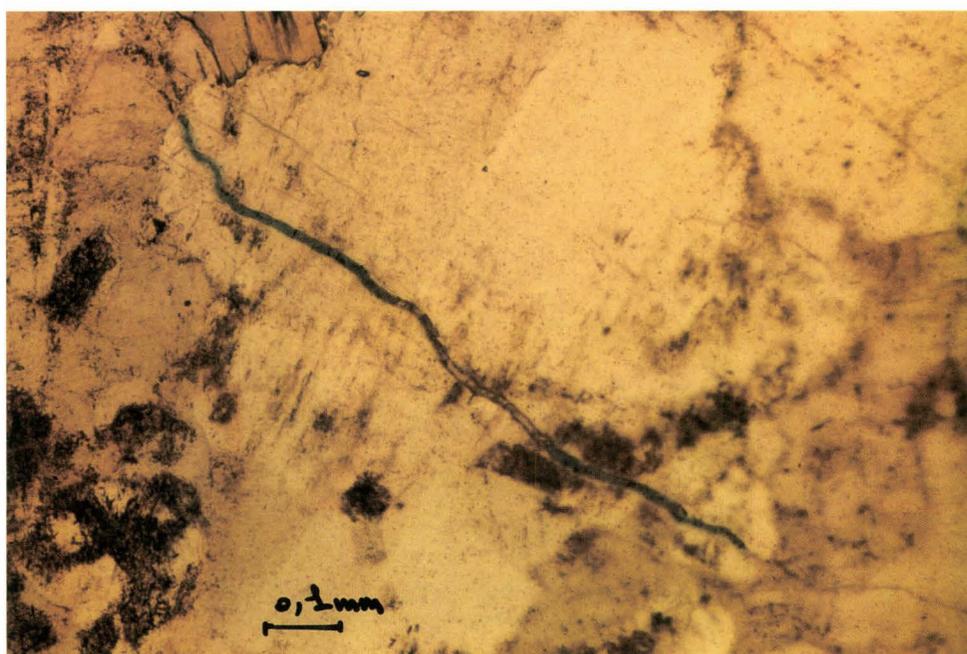


Figure 35 - Fissures colmatées (100 m)

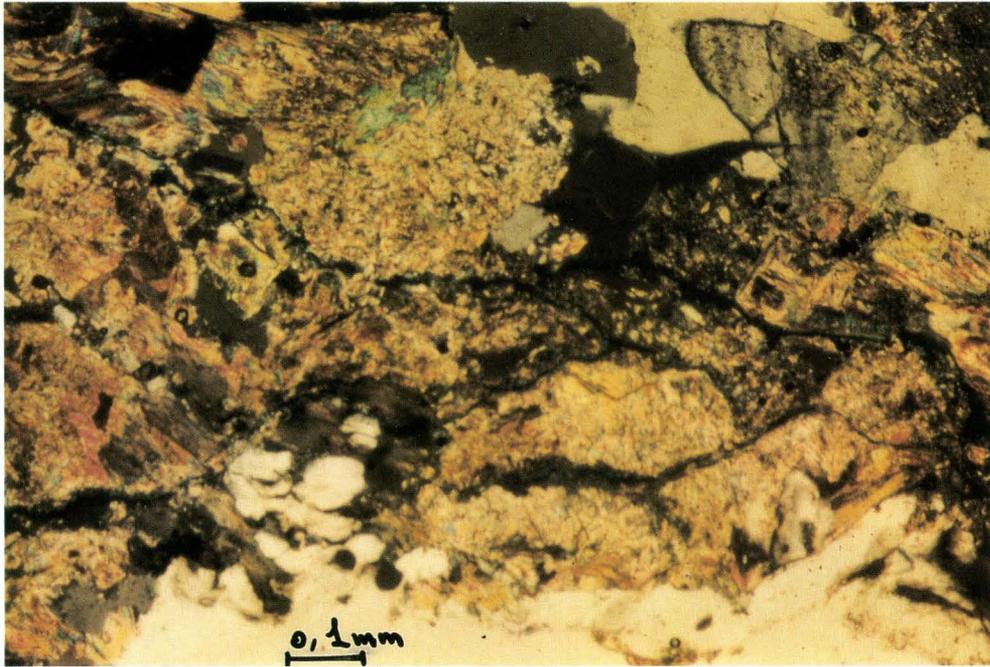


Figure 36 - Fissures colmatées (100 m)

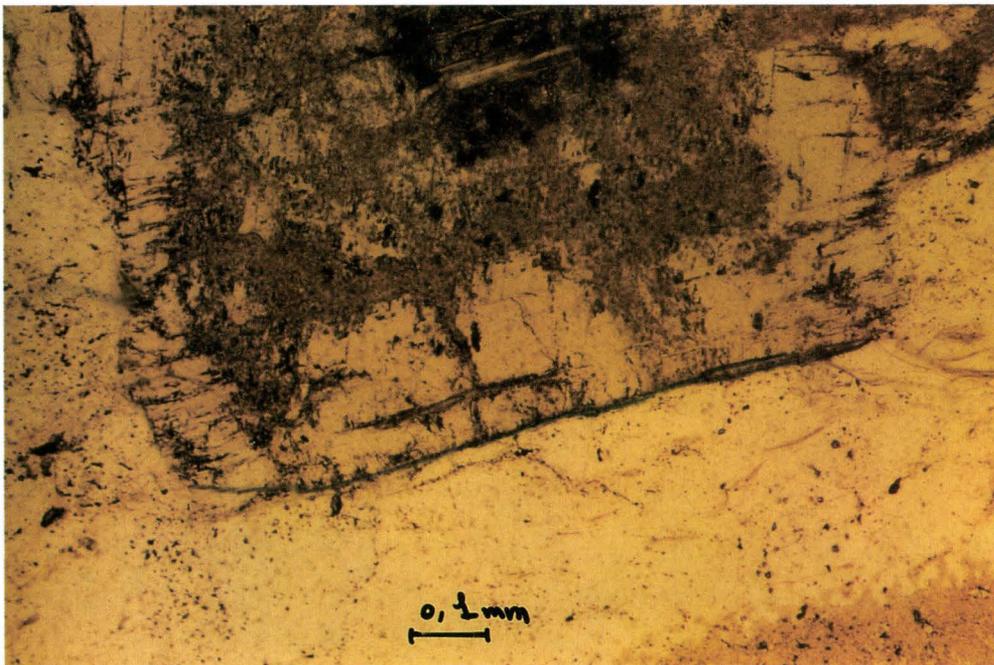


Figure 37 - Fissures colmatées (486,05 m)

3.2.4 Calcul des différents paramètres de quantification

Le logiciel de quantification utilisant les couples de coordonnées transmises par la tablette doit permettre le calcul d'un certain nombre de paramètres dimensionnels des fissures observées.

3.2.4.1 Calcul du périmètre d'une fissure

Soit une fissure F représentée sur la figure 38. On connaît $n + 1$ couples de coordonnées de points (x_i, y_i) situés sur le contour de cette fissure. L'ensemble des segments reliant les points constitue une ligne polygonale inscrite dans la fissure. Le périmètre de la fissure est approximé par le périmètre du contour polygonal :

$$P_F = \sum (\text{pour } i=0 \text{ à } n) [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]^{0,5} \quad (29)$$

avec $x_{n+1} = x_0$, $y_{n+1} = y_0$ et O (x_0, y_0) le point d'origine du contour.

3.2.4.2 Calcul de la surface d'une fissure

On rappelle qu'étant donnée une fonction f définie continue sur un intervalle fermé $[a, b]$ de \mathbb{R} . Le nombre :

$$S = (x_1 - x_0) f(E_1) + (x_2 - x_1) f(E_2) + \dots + (x_n - x_{n-1}) f(E_n) \quad (30)$$

est appelé "somme de Riemann" de la fonction f sur l'intervalle $[a, b]$. Les nombres réels E_1, E_2, \dots, E_n appartiennent respectivement aux intervalles $[x_0, x_1]$, $[x_1, x_2]$, \dots , $[x_{n-1}, x_n]$. La somme S peut être rendue aussi proche de l'intégrale de la courbe pourvu que la suite $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n$ soit choisie avec une différence entre deux termes consécutifs suffisamment petite.

On applique la méthode de calcul dite des trapèzes pour calculer l'aire décrite par une courbe. On a :

$$f(E_1) = [f(x_0) + f(x_1)] / 2$$

$$f(E_2) = [f(x_1) + f(x_2)] / 2$$

$$f(E_n) = [f(x_{n-1}) + f(x_n)] / 2$$

On obtient :

$$S_F = \sum [(f(x_i) + f(x_{i+1})) / 2] \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad (31)$$

avec $x_{n+1} = x_0$ et $f(x_{n+1}) = f(x_0)$

Dans le cas d'une fissure (voir figure 38) où les coordonnées des points sont toujours positives:

- tant que $x_{i+1} > x_i$, le terme $(x_{i+1} - x_i)$ est positif. L'aire est alors comptée positive;

- tant que $x_{i+1} < x_i$, le terme $(x_{i+1} - x_i)$ est négatif. L'aire est comptée négative;

De cette façon, quel que soit le sens avec lequel la fissure est contournée la surface de la fissure sera la valeur absolue de S_F .

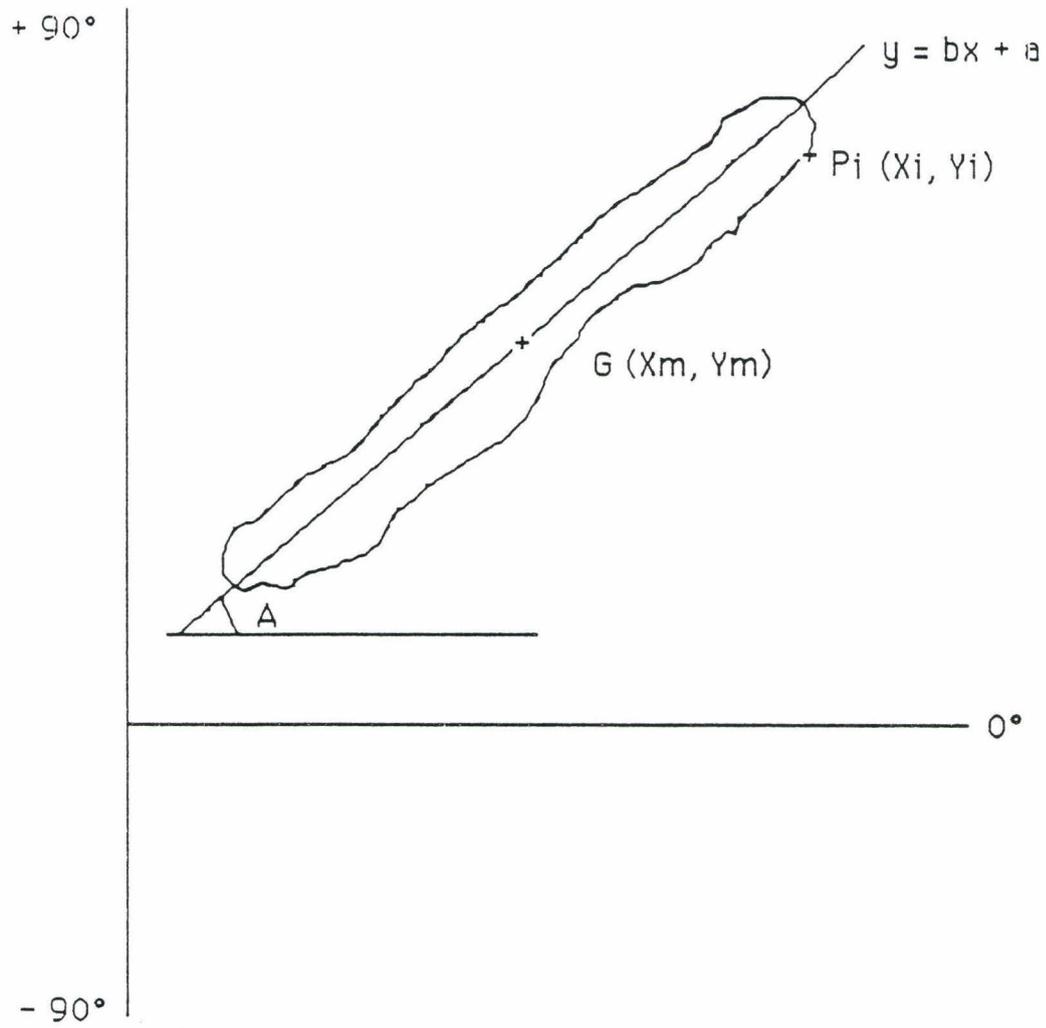


Figure 38 - Schéma d'une fissure représentée dans un repère de coordonnées cartésiennes

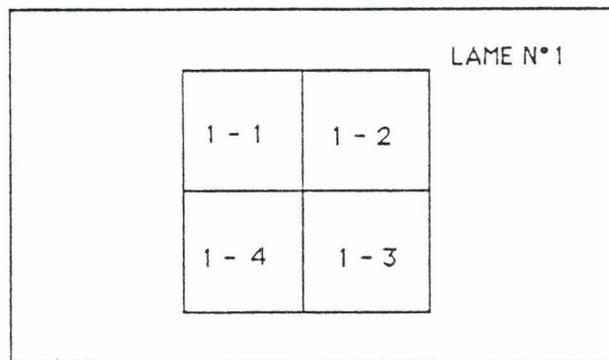


Figure 39 - Schéma d'une lame mince et des zones étudiées

3.2.4.3 Calcul de l'orientation d'une fissure

Ce calcul est réalisé par la détermination du coefficient directeur de la droite de régression prenant en compte les $n + 1$ points de coordonnées (x_i, y_i) du contour de la fissure.

Soit l'équation de la droite de régression $y = bx + a$ avec:

$$b = \frac{\sum(x_i - x_m) \cdot (y_i - y_m)}{\sum(x_i - x_m)^2} \quad (32)$$

et

$a = y_m - b x_m$ où le couple (x_m, y_m) correspond au centre de gravité du système de points.

L'angle A que forme la fissure avec le repère du plan d'observation est donné par la relation :

$$A(^{\circ}) = (180/\pi) \cdot \text{Arctg } b \quad (33)$$

3.2.4.4 Calcul de la longueur et de la largeur d'une fissure

On assimile la fissure de périmètre P_F et de surface IS_F à un rectangle de longueur L et de largeur l . On détermine ainsi les valeurs de la largeur et de la longueur de la fissure par les équations :

$$l = [P/2 - (P^2 / 4 - 4.S)^{0,5}] / 2 \quad (34)$$

et

$$L = [P/2 + (P^2 / 4 - 4.S)^{0,5}] / 2 \quad (35)$$

3.2.5 Prise en compte des différents paramètres qualitatifs des fissures

3.2.5.1 Phase(s) minérale(s) adjacente(s) à une fissure

Le logiciel de quantification doit permettre la prise en compte des paramètres qualitatifs relatifs à l'environnement de la fissure observée. Les phases minérales traversées ou contournées par la fissure doivent être identifiées.

L'opérateur pourra donc sélectionner une ou plusieurs phases parmi les quatre phases minérales principales: biotite, feldspath potassique, plagioclase et quartz. En effet, l'observation préalable d'un certain nombre de lames minces a révélé que les fissures ne se trouvent pas au voisinage de phases minérales accessoires. La faible densité des fissures d'une part et le faible pourcentage des phases accessoires dans la composition modale d'autre part constituent une justification à cette observation.

3.2.5.2 Type de fissure

La fissure observée peut selon les cas traverser un ou plusieurs grains minéraux, suivre le contour d'un ou de plusieurs grains ou combiner ces deux caractères.

Lors de la quantification d'une fissure, le logiciel doit donc offrir à l'opérateur le choix entre fissure intragranulaire, fissure intergranulaire et fissure à la fois intra et intergranulaire.

3.2.6 Calcul des valeurs statistiques et représentations graphiques

Un calcul statistique des valeurs est effectué pour les différents paramètres dimensionnels des fissures ainsi que pour les paramètres qualitatifs. On détermine sur un ensemble de fissures observées les valeurs de:

- Périmètre cumulé - Périmètre moyen et écart-type;
- Surface cumulée - Surface moyenne et écart-type;
- Longueur moyenne et écart-type;
- Largeur moyenne et écart-type;
- Orientation moyenne et écart-type;
- Pourcentage des fissures adjacentes à chacune des phases minérales;
- Pourcentage des fissures des différents types.

On peut obtenir les représentations sous forme d'histogrammes de tous les paramètres dimensionnels. Ces représentations peuvent également être obtenues en fonction de la phase minérale adjacente. Par exemple, il sera possible de visualiser l'histogramme des largeurs des fissures adjacentes au quartz. Dans ce cas, la largeur moyenne de ces fissures et l'écart-type correspondant seront portés sur l'histogramme. Enfin, un cumul des données de plusieurs analyses pourra être effectué.

3.2.7 Logiciels

3.2.7.1 Logiciel de quantification "ANAGRAN"

Ce logiciel appelé "QUANTIFICATION DES FISSURES DU GRANITE IMPREGNE" (VUILLEUMIER C., 1989 et 1990) comprend:

- le calibrage de la tablette à digitaliser,
- l'acquisition des coordonnées des points du contour d'une fissure,
- le calcul des paramètres dimensionnels,
- la prise en compte des phases minérales et du caractère intra ou intergranulaire.

L'analyse est effectuée sur 1 cm² de lame mince.

Le calibrage est réalisé par l'enregistrement des coordonnées des extrémités d'une mire d'une longueur de 1 mm observée au grossissement 100. La distance correspondante sur la tablette fournit le facteur multiplicatif reliant l'observation microscopique et le déplacement de la diode sur la tablette.

3.2.7.2 Logiciel de traitement statistique "STATGRAN"

Ce logiciel de traitement statistique STATGRAN (VUILLIEUMIER C., 1989 et 1990) effectue le calcul des variables statistiques et les représentations graphiques des différents paramètres. Il permet la sortie des caractéristiques des fissures comptabilisées sur 1 cm² de lame mince. Il permet d'autre part le cumul de plusieurs fichiers de mesures correspondant à la mesure de plusieurs cm², la sortie des résultats globaux et des histogrammes.

3.2.8 Conduite d'une expérience de quantification et appréciation de la reproductibilité des mesures

A titre d'exemple, nous prendrons ici un échantillon issu du forage d'Auriat de 500 mètres de profondeur. Une fois l'échantillon imprégné, trois lames pétrographiques de 30 μm d'épaisseur sont réalisées. L'étude porte sur 4 cm² par lame soit au total une surface d'analyse de 12 cm². Chaque analyse effectuée sur 1 cm² est repérée par 2 chiffres. Le premier correspond au numéro de la lame et le second au numéro de la zone d'analyse comme le précise la figure 39. Les résultats du comptage des trois lames effectués au grossissement 125, cm² par cm², sont exposés dans le tableau 7.

Si on effectue une comparaison lame par lame (champ de 4 cm²), on remarque que le nombre de fissures, le périmètre moyen, la largeur moyenne, la longueur moyenne des fissures sont comparables. Par contre, on note des écarts plus importants pour la surface moyenne des fissures qui va de 85.10⁻⁵ mm² à 260 .10⁻⁵ mm².

Si par contre, pour une lame donnée, on compare les résultats obtenus cm² par cm², on constate une grande dispersion des résultats. En conclusion, un champ de 1 cm² d'étude n'est pas représentatif du granite étudié. Il faudra au minimum un champ de 4 cm² pour avoir une idée de la porosité du granite.

Le nombre de fissures comptabilisées sur un champ donné (1 cm²), sur une lame, ou encore sur un ensemble de lames, est ramené à 100. Sur ces 100 fissures, certaines (un certain pourcentage) sont adjacentes à la biotite, d'autres au feldspath potassique, au plagioclase et enfin au quartz. Notons qu'une quantité non négligeable de ces fissures cotoie des phases minérales de natures différentes et sont donc comptées deux fois. Ainsi, la somme des pourcentages des fissures adjacentes aux différents minéraux peut dépasser 100%. D'autre part, les pourcentages des fissures intragranulaires, intergranulaires, ou cumulant ces deux caractères sont indiqués. Dans ce cas, le cumul des pourcentages ne peut en aucun cas être supérieur à 100%.

Le pourcentage de fissures adjacentes à la biotite est faible mais comparable à son pourcentage dans la composition modale du granite d'Auriat. De même, les pourcentages de fissures adjacentes au feldspath potassique et au plagioclase sont également comparables à leurs proportions au sein du granite.

Tableau 7 -Résultats de la quantification de la microfissuration d'un échantillon de granite

Echantillon	Nombre de fissures	Périmètre cumulé (mm)	Périmètre moyen (mm)	Surface cumulée (mm ²)	Surface moyenne (mm)	Longueur moyenne (mm)	Largeur moyenne (µm)	Pourcentage de fissures adjacentes à la biotite	Pourcentage de fissures adjacentes au feldspath K	Pourcentage de fissures adjacentes au plagioclase	Pourcentage de fissures adjacentes au quartz	Pourcentage de fissures intragranulaires	Pourcentage de fissures intergranulaires	Pourcentage de fissures intra et intergranulaires
1-1	19	10	0,53	0,021	0,0011	0,26	5,9	0	11	11	79	89	11	0
1-2	2	1,4	0,68	0,0016	0,00081	0,34	2,5	0	50	0	50	100	0	0
1-3	-	1,2	0,25	0,0079	0,0016	0,11	10	0	0	0	100	100	0	0
1-4	15	2,7	0,18	0,0075	0,0050	0,085	5,5	0	20	7	73	80	20	0
TOTAL 1ère LAME	41	15	0,38	0,038	0,00092	0,18	6,1	0	15	7	78	88	12	0
2-1	14	6,7	0,48	0,037	0,0027	0,23	11	0	29	21	64	71	29	0
2-2	11	8,8	0,80	0,081	0,0073	0,38	15	0	18	64	18	91	9	0
2-3	14	4,3	0,30	0,021	0,0015	0,14	12	0	14	71	14	93	0	7
2-4	19	3,4	0,18	0,0092	0,00048	0,080	9,1	0	11	21	74	74	26	0
TOTAL 2e LAME	58	23	0,18	0,15	0,0026	0,19	11	0	17	41	47	81	17	2
3-1	21	6,9	0,33	0,017	0,00082	0,16	6	5	43	48	19	71	29	0
3-2	24	4,7	0,19	0,014	0,00060	0,089	7,7	0	4	17	83	54	38	8
3-3	14	3,4	0,26	0,0078	0,00055	0,12	5,6	0	71	14	15	86	14	0
3-4	4	1,4	0,35	0,0014	0,0035	0,16	12	0	25	50	25	100	0	0
TOTAL 3e LAME	63	17	0,26	0,053	0,00085	0,12	6,9	2	33	29	43	70	27	3
TOTAL des LAMES	162	54,9	0,34	0,239	0,0015	0,16	8,2	1	23	28	53	78	20	2

On note cependant un pourcentage légèrement plus fort pour le quartz. Cela pourrait signifier que pour cet échantillon le quartz se comporte comme un minéral prépondérant dans le phénomène de fissuration des granites. Les fissures sont à 78% intragranulaires et à seulement 20% intergranulaires. Le pourcentage de fissures à la fois intra et intergranulaires est extrêmement faible (2%).

Le forage de 500 mètres n'ayant pas fait l'objet d'une orientation de ses carottes au sein de la matrice, il n'était donc pas utile de déterminer l'angle de déviation des fissures dans le repère du plan d'observation.

4. VISUALISATION ET QUANTIFICATION DU SYSTEME MICROFISSURAL DU GRANITE D'AURIAT

4.1 Présentation du granite d'Auriat

Les études déjà effectuées à partir du site d'Auriat et dont certains résultats sont rappelés ci-après, s'inscrivaient dans le programme de Recherche et de Développement de la Commission des Communautés Européennes relatif au stockage des déchets radioactifs en formations géologiques. Suite au recensement des principaux massifs cristallins de la moitié occidentale du territoire français réalisé sous la responsabilité de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (I.P.S.N.) du Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) s'est vu confier, toujours pour le compte de l'I.P.S.N., le suivi et l'étude géologique de deux forages profonds de 500 et 1000 mètres sur le site d'Auriat (Creuse) au sein d'un massif granitique à 30 km environ à l'est de Limoges (figure 40). C'est dans ce cadre qu'ont été conduites les études rappelées ci-après.

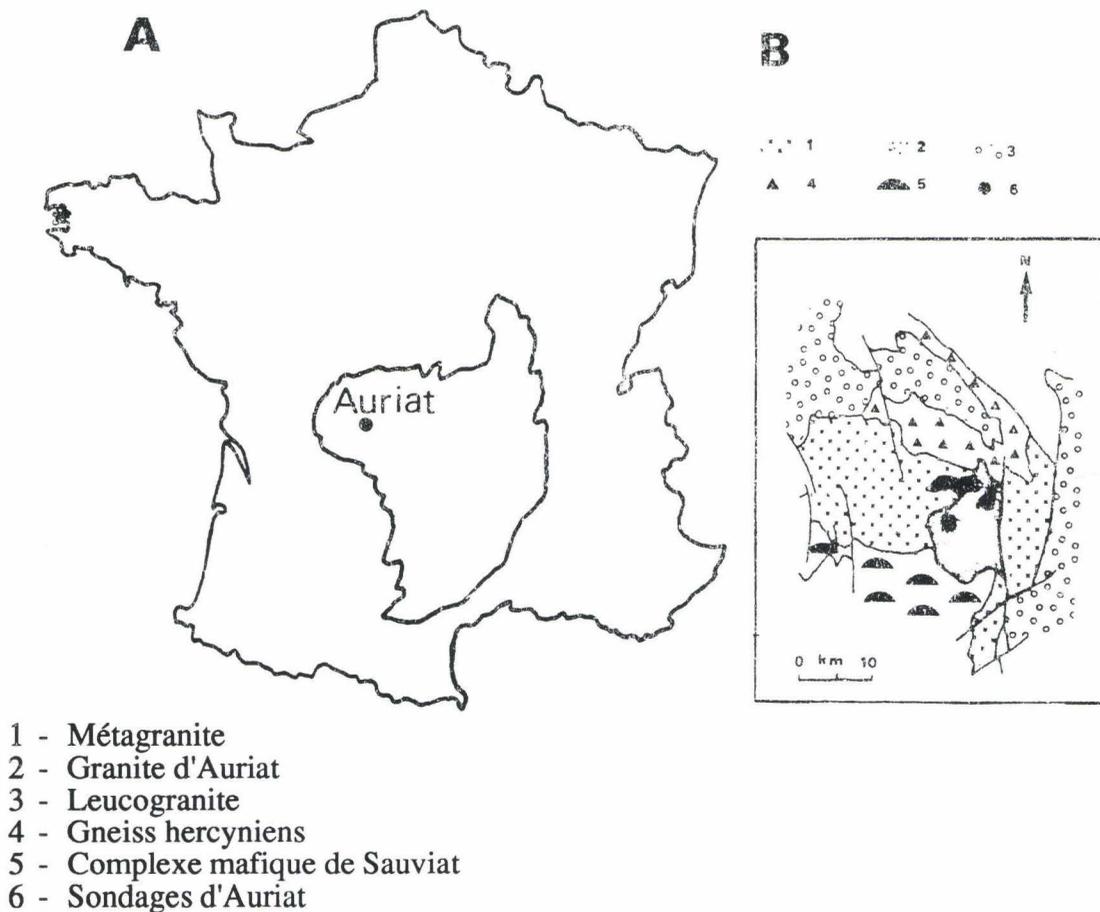


Figure 40 - Localisation du granite d'Auriat

4.1.1 Travaux antérieurs réalisés par le B.R.G.M.

4.1.1.1 Caractéristiques pétrographiques, minéralogiques et géochimiques du granite d'Auriat

L'examen macroscopique des carottes des deux forages d'Auriat donne une impression d'homogénéité du granite à grande échelle. Les principales variations concernent surtout la texture alors que la composition minéralogique, relativement constante, varie seulement par la proportion des minéraux (figure 41). Il a été distingué (BRGM, 1981):

- un faciès G1 très nettement prédominant, à grain grossier, hétérogranulaire (1 mm à 1 cm), porphyroïde à mégacristsaux de feldspath potassique pouvant atteindre 6 cm, mais le plus souvent de 2 à 4 cm. La proportion de ces mégacristsaux est variable. Il apparaît en moyenne une vingtaine de mégacristsaux au mètre linéaire avec de rares cumulats. Ce faciès devient fréquemment pegmatoïde (essentiellement mégacristsaux) sous forme de passées d'épaisseur très variable: de quelques centimètres à plusieurs mètres, mais le plus souvent pluridécimétriques;

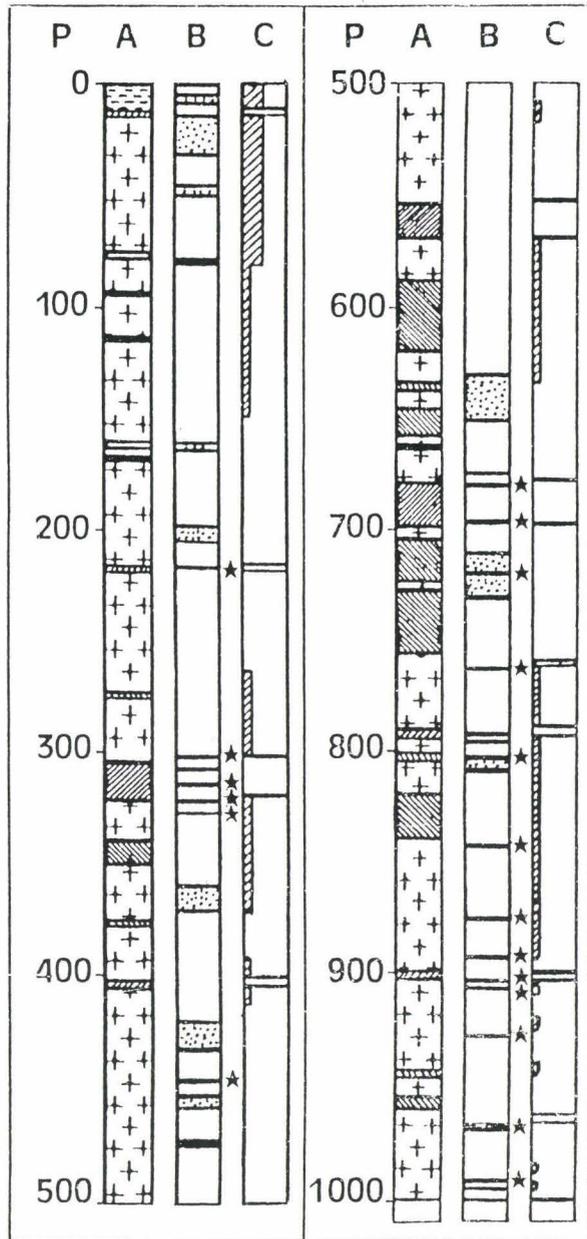
- un faciès G2, à grain fin à moyen nettement porphyrique.

Le passage d'un faciès à l'autre se fait sur de faibles épaisseurs (centimétriques à décimétriques) par l'intermédiaire d'une bordure figée riche en biotite.

Ces deux faciès sont à biotite avec muscovite à peu près toujours présente en faible quantité. Au sein de ces deux faciès se trouvent des enclaves sombres qui sont soit des petits cumulats biotitiques assez fréquents, soit des enclaves microgrenues riches en biotite. Enfin, on note la présence de filonnets de quartz et d'aplite d'épaisseurs centimétriques, exceptionnellement décimétriques.

L'étude microscopique confirme la distinction macroscopique de deux faciès principaux.

Le granite de type G1 se caractérise par une texture très largement grenue, hypidiomorphe (marquée par l'automorphisme du plagioclase et de la biotite) et porphyroïde comportant des cristaux de feldspath potassique parfois orientés (plus ou moins parallèles entre eux) dans un assemblage grenu apparemment isotrope. Le plagioclase se présente soit sous forme de cristaux isolés, inclus dans le feldspath potassique ou indépendants, soit en groupes polycristallins. La composition du plagioclase varie peu, entre les cristaux inclus et les autres ; il s'agit d'oligoclase entouré d'une frange d'albite. Contrairement au plagioclase, le feldspath potassique ne présente pas de contours rectilignes franchement automorphes. Ses contours sont moulés par les autres phases. Il passe d'un habitus de mégacristal sub-automorphe souvent maclé Carlsbad à celui de minéral de taille modérée et peu automorphe dans le "fond" de la roche. Il s'agit d'orthose, partiellement microclinisé. L'orthose renferme en inclusions quelques biotites, de nombreux plagioclases et de rares apatites. Le quartz est xénomorphe, fréquemment en plages polycristallines.



P = Profondeur (m) .

A = Pétrographie :

 Granite G1 altéré

 G2 monzogranite plus ou moins porphyrique à fond microgrenu

 G1 monzogranite porphyroïde à fond largement grenu présentant des passées de pegmatoïdes

 Granite cataclasé (épaisseur supérieure à 1 m)

B = Fractures à pendage > 60° :

 Zones très fracturées (+ de 30 fractures au mètre linéaire)

 Grandes failles

 Zones moins fracturées (- de 10 fractures au mètre linéaire)

C = Fractures à pendage < 30° :

 Plus d'une fracture au mètre linéaire

 moins d'une fracture au mètre linéaire

Figure 41 - Colonne pétrographique des deux forages du granite d'Auriat et sa fracturation (in PARNEIX, 1987 d'après BRGM, 1980)

Il comporte parfois de nombreuses inclusions d'apatite, d'opagues et de biotite. La biotite est le minéral ferro-magnésien caractéristique de ce monzogranite. Ce sont des "lattes" millimétriques, de couleur brun-rouge, plus ou moins riches en inclusions (zircons) et très étroitement liées à l'apatite. La biotite est souvent partiellement chloritisée, avec exsudation d'opagues entre les feuillets. La muscovite est présente en faible quantité, elle apparaît:

- soit en grandes lamelles associées à des groupes de cristaux de biotite, ces lamelles étant parfois teintées de verdâtre à leur périphérie (muscovite ferrifère);

- soit en produits plus tardifs, eux-mêmes de deux types, en grandes lamelles et traînées le long de microfractures dans les feldspaths ou bien en fines paillettes de séricite dans le plagioclase altéré.

Les minéraux accessoires sont:

- l'apatite, en gros grains, souvent abondants et regroupés en agrégats, plus ou moins liés aux lamelles de biotite. Elle se trouve sous forme d'inclusions dans la plupart des minéraux;

- le zircon, en gros cristaux très ténus inclus dans les biotites, et parfois en grains isolés plus gros;

- les opagues, qui sont des oxydes de fer et titane et quelques sulfures;

- la tourmaline, ferrifère (bleu-vert légèrement zonée), apparaissant dans certains niveaux G1 microfracturés, ou à tendance pegmatoïde, soit en cristaux isolés et automorphes, soit en remplissage de fractures, avec du quartz ou non.

Il peut apparaître parfois un peu d'épidote, du leucoxène et des carbonates.

Le granite de type G2 a une texture fine à microgrenue. Ce faciès se caractérise par la coexistence de phénocristaux sub-automorphes de quartz, de feldspath, de plagioclase et de biotite, et d'un fond finement cristallisé, composé de la même association minérale en assemblages xénomorphes, parfois hypidiomorphes (à petits plagioclases sub-automorphes). Le plagioclase apparaît soit sous forme de phénocristaux automorphes de quelques millimètres de longueur souvent altérés au coeur (développement de paillettes de séricite), soit sous forme de petits cristaux sub-automorphes à xénomorphes plus ou moins séricitisés. Le feldspath potassique se présente sous forme de phénocristaux (pluricentimétriques) semblables à ceux du granite G1 ; il s'agit alors d'orthose plus ou moins microclinisé et à inclusions de biotite et plagioclase. Parfois, il forme des assemblages polycristallins à aspect global sub-automorphe. Les cristaux de quartz sont plurimillimétriques à tendance sub-automorphe. On les rencontre aussi sous forme de globules en bordure des feldspaths. La biotite est un constituant important dans ce faciès et se concentre localement soit sous forme de nodules, soit sous forme de passées. Elle est parfois très transformée en chlorite, muscovite, opagues auxquels peuvent s'ajouter carbonates, épidote et feldspath potassique.

Les minéraux accessoires sont les mêmes que ceux décrits dans le premier faciès.

La texture largement porphyroïde du granite ne permettant pas d'établir avec précision (sur un nombre acceptable de sections) sa composition modale, celle-ci a été déterminée à l'aide du programme informatique établi par WRIGHT et DOHERTY (1970) et modifié par LE BEL (1979), permettant de calculer le mode d'un échantillon à partir de son analyse chimique. Ce programme a été conçu pour l'étude de granitoïdes; il utilise les analyses majeures des roches et des phases minérales (non accessoires) qui les constituent: quartz, plagioclase, feldspath potassique, biotite et muscovite. Les tableaux 8 et 9 précisent les compositions théoriques obtenues à partir des données analytiques des deux faciès observés sur le forage de 1000 mètres de profondeur.

4.1.1.2 La fracturation et ses produits d'altération

Dans les massifs granitiques, la circulation des fluides peut se faire le long des fractures. Ces dernières présentent souvent une grande continuité et ont pu, sous l'effet de sollicitations tectoniques, jouer en distension. Sur l'ensemble des deux forages, le nombre des fractures a été relevé en distinguant:

- les fractures subhorizontales des fractures obliques et subverticales;
- les fractures ouvertes des fractures fermées. Une fracture est dite ouverte si, lors du forage, elle entraîne une rupture effective de la carotte. Ceci n'implique pas nécessairement que la fracture soit également ouverte in-situ. Une fracture fermée se manifeste au contraire lors du forage par une trace sur la carotte sans rupture de celle-ci.

Dans le forage de 1000 mètres de profondeur, les carottes ont fait l'objet d'un relevé systématique des paramètres structuraux (BLES J.L., 1986). Sont précisés :

- le numéro d'identification de la structure;
- la profondeur;
- le type d'élément structural mesuré;
- les différents paramètres géométriques (orientation, ouverture libre, épaisseur, nature du remplissage, planéité et rugosité).

Les différents types de fractures répertoriées sont les suivantes:

- les diaclases. Ce terme regroupe toutes les discontinuités dont les lèvres sont jointives et qui ne présentent aucune trace de mouvement relatif des deux compartiments. En surface, les diaclases montrent une longueur comprise entre 1 et 10 mètres. Les diaclases rencontrées présentent une ouverture (écartement entre les deux lèvres de la fracture) variable, très faible et inférieure au millimètre dans la majorité des cas, mais pouvant atteindre parfois plusieurs centimètres;

- les fractures d'extension à remplissage quartzeux. Ce sont des fractures qui en coupe transversale ont une forme de fente. Leurs bordures ou épontes, jointives aux extrémités, sont ouvertes dans la partie centrale. Sur carotte, seules les fractures d'extension présentant une faible continuité (centimétrique à décimétrique) ont pu être analysées.

Tableau 8 - Composition chimique des granites G1 et G2 (B.R.G.M., 1981)

Types	G ₁							G ₂			
Echantillon n°	0	11	17	24	29	45	80	48	49	55	65
Profondeur	12 m	50 m	102 m	193 m	262 m	548 m	1003 m	604 m	655 m	708 m	847 m
SiO ₂	72,68	72,46	72,48	72,89	72,38	73,20	72,25	74,06	73,82	71,25	71,75
Al ₂ O ₃	13,62	13,80	13,76	13,38	13,55	13,46	14,10	13,40	13,43	13,87	14,49
TiO ₂	0,20	0,24	0,25	0,25	0,21	0,22	0,27	0,19	0,22	0,29	0,27
Fe ₂ O ₃ (ou Fe tot.)	1,64	1,62	1,77	1,72	1,79	1,61	1,91	1,44*	1,91	2,30	2,03
CaO	0,86	0,73	0,93	0,76	0,88	0,90	1,09	0,91	1,05	1,11	1,24
MgO	0,99	0,99	1,07	1,04	1,15	0,89	0,96	0,82	1,00	1,32	1,29
K ₂ O	4,94	4,71	4,73	4,84	4,82	4,65	4,89	4,54	4,13	4,56	4,98
Na ₂ O	3,54	3,88	3,91	4,07	3,85	3,06	3,11	3,23	3,13	3,17	3,21
P ₂ O ₅	0,20	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,21	0,17	0,20	0,21	0,22
MnO	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,07	0,08
PF	0,94	1,20	0,94	1,17	0,72	1,25	0,65	0,90	0,94	1,10	0,81
TOTAL	99,68	99,88	100,09	100,38	99,61	99,50	99,53	99,72	99,89	99,25	100,37

PF = perte au feu * = Fe total

Tableau 9 - Composition modale des granites de type G1 et G2 (B.R.G.M., 1981)

Types	G ₁							G ₂			
Echantillon n°	0	11	17	24	29	80	48	49	55	65	
Profondeur	12 m	50 m	102 m	193 m	262 m	1003 m	604 m	655 m	708 m	847 m	
Quartz	31,85	31,37	30,26	31,13	30,58	32,33	36,39	37,60	33,45	30,4	
Orthose	24,82	22,46	23,60	23,60	24,30	24,08	22,01	17,82	19,28	24,2	
Plagioclase	30,89	33	34,10	33,17	33,31	30,35	28,82	29,32	29,52	31,8	
Biotite, chlorite	9,31	9,3	10,28	9,65	9,95	10,19	6,90	9,34	11,37	10,8	
Muscovite	2,47	3	1	1,46	1,36	2,95	5,29	5,46	5,79	2,8	

Les fentes sont presque toujours remplies de cristallisations de quartz. Lorsque les fentes ne sont remplies que partiellement, elles ont l'aspect de géodes;

- les fissures en échelon. Ce sont des petites fractures (quelques centimètres jusqu'à 10 à 20 cm de long) qui sont disposées en échelon. Certains de ces échelons de fissures sont superposés à des diaclases dont le plan est matérialisé; certains sont situés dans le prolongement de diaclases et d'autres peuvent occuper l'intervalle séparant deux diaclases situées dans le prolongement l'une de l'autre;

- les failles. Ce terme regroupe les discontinuités présentant des traces ou indices d'un mouvement relatif des deux compartiments suivant une direction parallèle au plan de fractures. En conséquence, les longueurs des failles observées peuvent varier de quelques mètres pour les plus petites d'entre elles à plusieurs décimètres pour les plus grandes.

Plusieurs types de remplissage peuvent être observés, ce sont : des cataclasites et ultramytonites, des remplissages argileux, de la calcite et de la dolomite, du quartz, des minéralisations (sidérite, chalcopryrite, pyrite et galène).

4.1.1.3 Analyse de l'espace poreux

La caractérisation de l'espace poreux a porté sur cinq échantillons issus du forage de 1000 mètres de profondeur. Ils appartiennent aux deux faciès mis en évidence par l'étude pétrographique. Ils ont été notés:

- n° 0 : faciès commun G1 très altéré avec carbonates prélevé à 12,05 mètres,
- n° 43 : faciès G1 cataclaté avec carbonates prélevé à 512,55 mètres,
- n° 49 : faciès G2 prélevé à 654,0 mètres,
- n° 74 : faciès G2 prélevé à 952,20 mètres,
- n° 80 : faciès commun G1 sain prélevé à 1003,15 mètres.

Pour chacun de ces échantillons, ont été déterminées la surface spécifique par adsorption gazeuse et la porosité par porosimétrie au mercure. Les mesures de porosité sont exposées en deux classes:

- la macroporosité qui représente les pores d'un rayon supérieur à $7,5 \mu\text{m}$. Ces pores sont imprégnés par le mercure pour des pressions inférieures à 10^5 Pa ;

- la microporosité qui représente les pores de rayon compris entre $0,0075 \mu\text{m}$ et $7,5 \mu\text{m}$. Ces porés sont imprégnés par le mercure pour des pressions comprises entre 10^5 et 10^8 Pa .

Le tableau 10 présente les résultats obtenus pour les différents échantillons. Les figures 42 à 46 représentent les courbes de porosité cumulée et différentielle. Les trois échantillons les plus profonds ont une porosité totale inférieure à 1%. Les courbes de porosités cumulée présentent une allure générale identique. Les deux échantillons n° 0 et 43 ont une porosité totale plus importante. L'échantillon n° 43 est le plus poreux avec une contribution prépondérante de la microporosité due à des pores de rayon inférieur à $7,5 \mu\text{m}$. Cet

échantillon a d'ailleurs la particularité d'être cataclaté, ceci pouvant induire une augmentation de la porosité. L'échantillon n° 0 (le moins profond) présente une hétérogénéité de macroporosité (respectivement 0,39% et 1,1% pour les deux mesures).

La surface spécifique des mêmes échantillons a été déterminée par l'adsorption gazeuse du krypton. Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau 11. Les échantillons n° 74 et 80 développent une surface très faible, ce qui est en bon accord avec les résultats de mesure des porosités au mercure. De même, les échantillons n°0 et 43 les plus poreux, ont une surface qui atteint $0,4 \text{ m}^2 / \text{g}$ soit 2 à 3 fois plus que pour les échantillons profonds. L'échantillon n°49 qui présentait une faible porosité (0,9%) a cependant une surface spécifique mesurée voisine de $0,4 \text{ m}^2 / \text{g}$. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que seules les discontinuités de rayon supérieur à 75 \AA sont accessibles au mercure alors que le krypton peut atteindre des pores de plus faible ouverture.

En conclusion de cette étude, il apparaît d'après les auteurs que la porosité varie peu et est indépendante du degré d'altération. Néanmoins quelle que soit la méthode d'étude, le granite sain présente la surface spécifique et la porosité totale les plus faibles. La variation de ces grandeurs avec l'altération semble malgré tout faible mais orientée dans le sens attendu.

4.1.2 Altération hydrothermale du granite d'Auriat

4.1.2.1 Définition et causes de l'altération hydrothermale

L'altération hydrothermale peut être définie comme la somme des transformations subies par les constituants d'une roche sous l'effet d'un fluide en déséquilibre vis-à-vis de ceux-ci. Les anomalies thermiques de la croûte apparaissent comme les principaux responsables des systèmes hydrodynamiques générateurs d'altération hydrothermale. En effet, les champs géothermiques actifs sont localisés dans les zones à intense activité magmatique. La conduction thermique et la convection des fluides semblent être les vecteurs essentiels de l'énergie thermique autour d'une intrusion magmatique. De nombreux travaux ont montré qu'un système d'altération, lié à une intrusion magmatique et à son refroidissement, a une durée de vie relativement courte à l'échelle géologique, inférieure au million d'années (CATHLES, 1977 - NORTON et CATHLES, 1979).

La circulation des fluides en mode convectif nécessite la présence d'un espace poreux. Les roches, et en particulier les granites, présentent des microdiscontinuités (joints de grains et microfissures intracristallines) dont les dimensions sont généralement inférieures au micron (SIMMONS et RICHTER, 1976). Cet espace poreux détermine, dans la majorité des roches constituant l'écorce terrestre, une perméabilité intrinsèque de l'ordre de 10^{-18} m^2 (NORTON et KNAPP, 1977).

Tableau 10 - Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur le granite d'Auriat prélevé à différentes profondeurs (B.R.G.M., 1981)

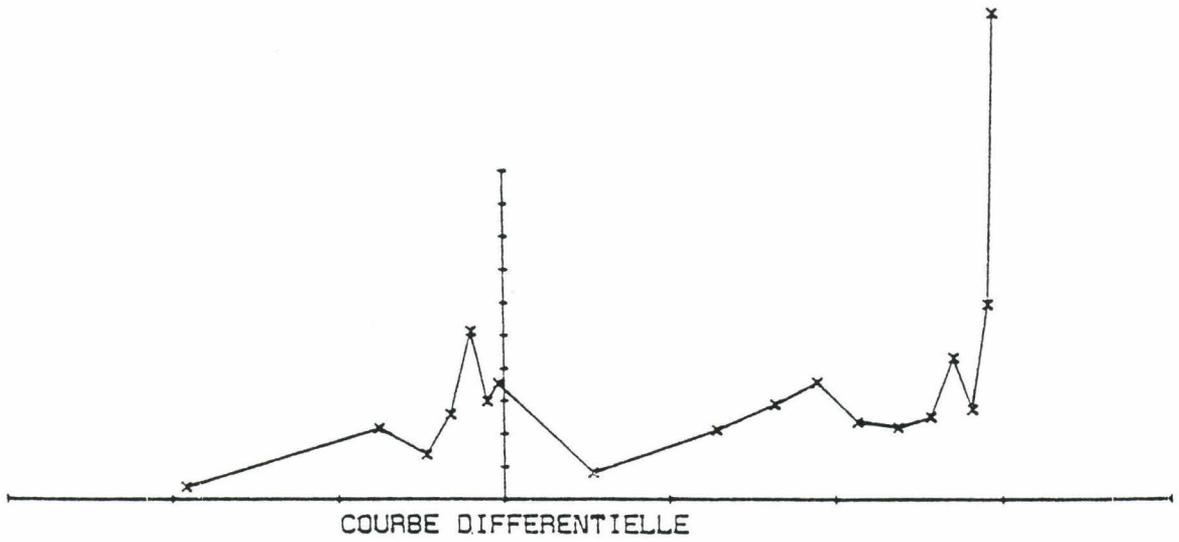
Echantillon	Profondeur	Macroporosité (%) > 7,5 μm	Microporosité (%) < 7,5 μm	Porosité totale (%)
0	12,05	(1) 0,39	0,81	1,20
		(2) 1,10	0,92	2,02
43	512,55	(1) 0,46	2,50	2,96
		(2) 0,34	2,65	2,99
49	654,00	(1) 0,30	0,60	0,90
		(2) 0,29	0,62	0,91
74	952,20	(1) 0,30	0,58	0,88
		(2) 0,33	0,53	0,86
80	1003,15	(1) 0,38	0,42	0,80
		(2) 0,37	0,43	0,80

(1) première mesure - (2) seconde mesure

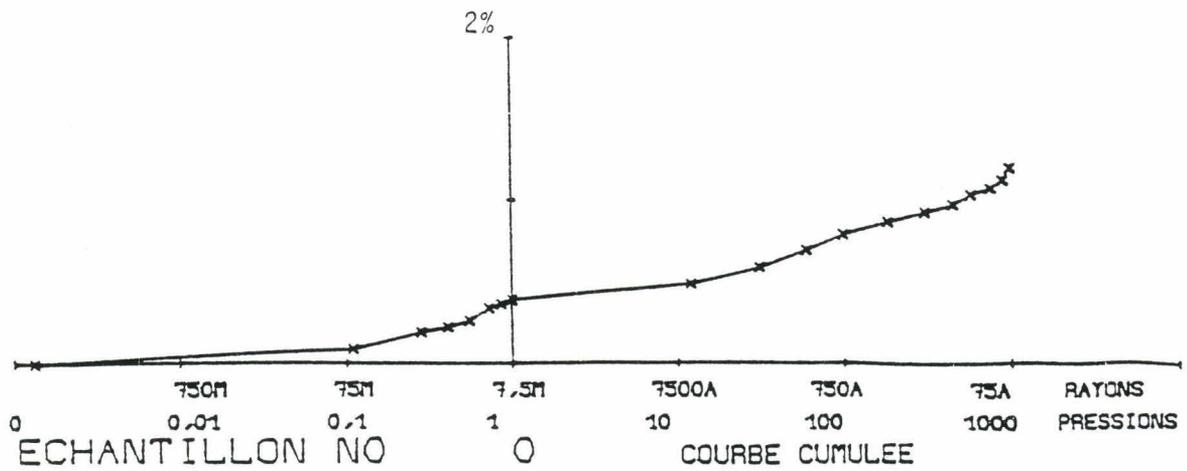
Tableau 11 - Résultats de mesure par adsorption gazeuse sur le granite d'Auriat prélevé à différentes profondeurs (B.R.G.M., 1981)

Echantillon	Profondeur (m)	Surface spécifique (m ² /g)
0	12,05	(1) 0,40 ± 0,01
		(2) 0,38
43	512,55	(1) 0,42 ± 0,01
		(2) 0,40
49	654,00	(1) 0,44 ± 0,03
		(2) 0,40
74	952,20	(1) 0,17 ± 0,01
		(2) 0,16
80	1003,15	(1) 0,11 ± 0,01
		(2) 0,13

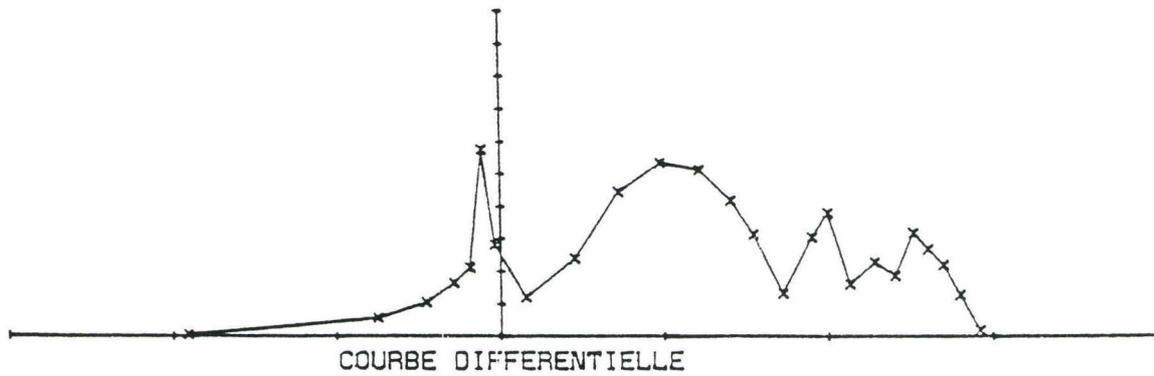
(1) première mesure - (2) seconde mesure



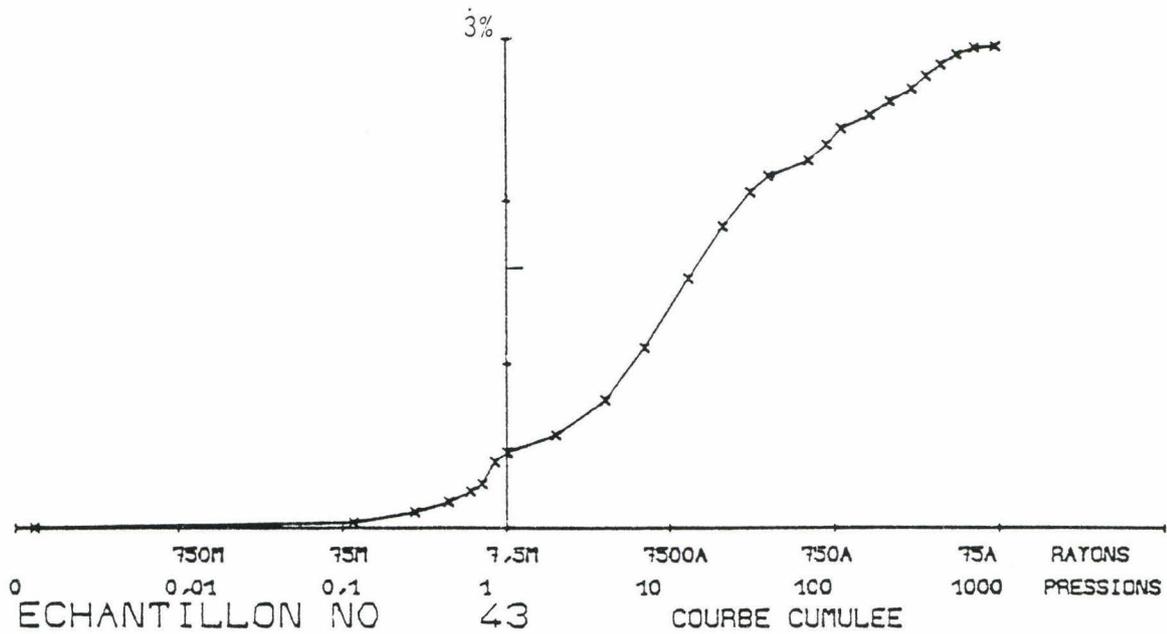
POROSITE MACRO 0.39 POROSITE MICRO 0.81 POROSITE TOTALE 1.20



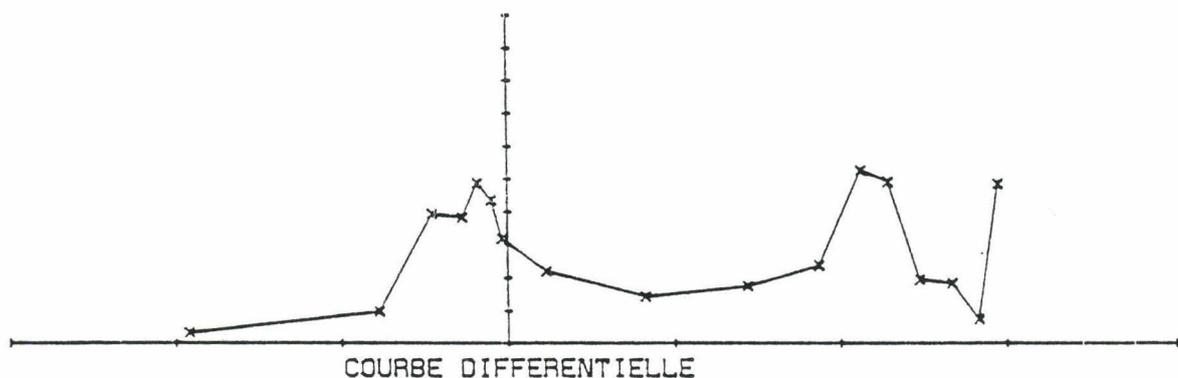
Figures 42 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 12,05 mètres (B.R.G.M., 1981)



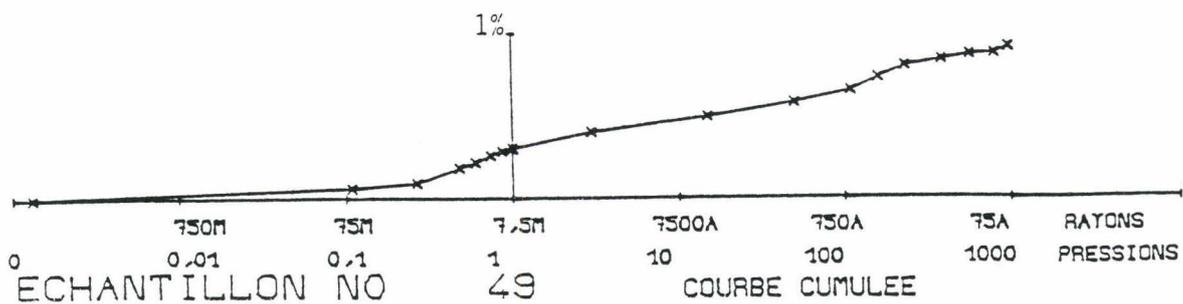
POROSITE MACRO 0.46 POROSITE MICRO 2.50 POROSITE TOTALE 2.96



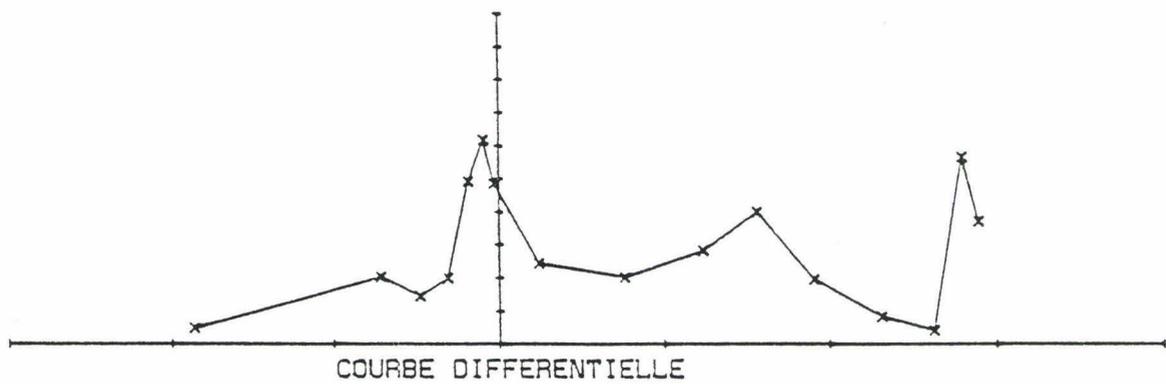
Figures 43 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 512,55 mètres (B.R.G.M., 1981)



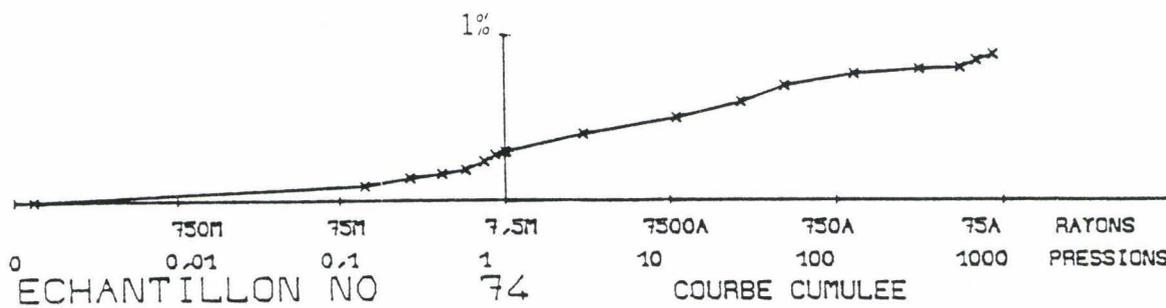
POROSITE MACRO 0.30 POROSITE MICRO 0.60 POROSITE TOTALE 0.91



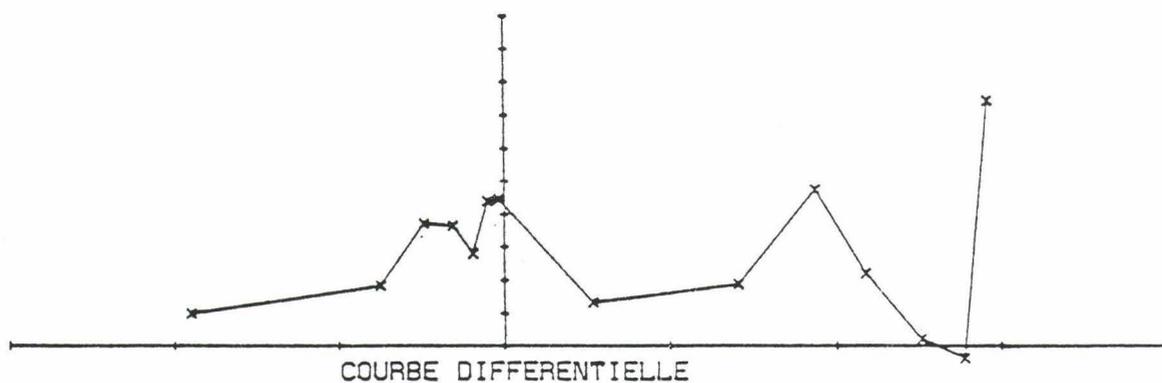
Figures 44 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 654 mètres (B.R.G.M., 1981)



POROSITE MACRO 0.30 POROSITE MICRO 0.58 POROSITE TOTALE 0.88

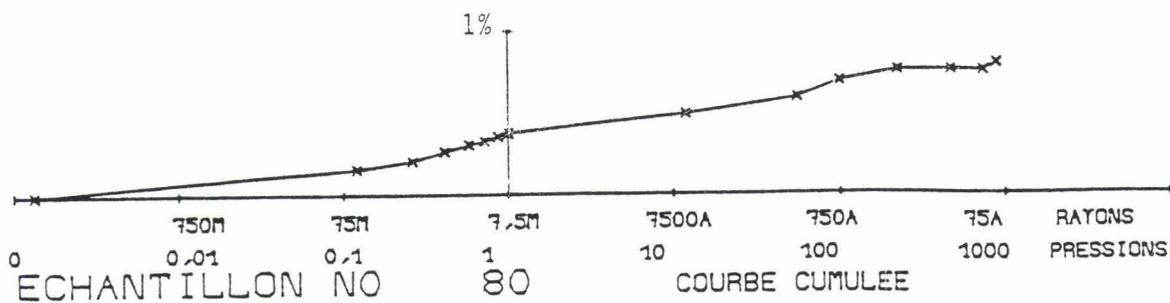


Figures 45 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 952,20 mètres (B.R.G.M., 1981)



POROSITE MACRO 0.38 POROSITE MICRO 0.42 POROSITE TOTALE 0.80

Figure 28



Figures 46 - Courbes cumulée et incrémentée obtenues par porosimétrie au mercure sur l'échantillon prélevé à 1003,15 mètres (B.R.G.M., 1981)

L'élévation de celle-ci dans les champs géothermiques, estimée à 10^{-14} ou 10^{-15} m² par les mêmes auteurs, est due à la présence d'un réseau de fractures.

L'origine de ces fractures peut être liée aux perturbations provoquées par la mise en place du magma dans les terrains encaissants. Le refroidissement du pluton conduit également à la formation de fractures subverticales dont l'origine est liée à des surpressions internes à la roche en cours de solidification (BURNHAM, 1979). Ces ouvertures sont bien entendu des lieux privilégiés de passage pour les fluides altérants.

4.1.2.2 Etude du granite d'Auriat

D'après J.C. PARNEIX (1987), l'altération hydrothermale dans le granite d'Auriat est un phénomène complexe caractérisé par les événements suivants :

- une chloritisation des biotites qui apparaît pervasive à l'échelle du sondage;
- une altération liée à un fluide circulant dans des fractures subverticales;
- une altération locale contrôlée par des fractures subhorizontales recoupant les précédentes.

La chloritisation des biotites se produit tout au long du sondage de 1000 mètres de profondeur à l'exception de trois zones (autour de 195,5 mètres, 230-290 mètres et 800-1000 mètres) pour lesquelles les échantillons prélevés montrent la présence de biotite saine. Les observations pétrographiques ont montré que la chloritisation pervasive des biotites se produit sans apport important de matière. Le fonctionnement du système s'apparente à celui du métamorphisme puisque l'eau présente dans les microfissures de la roche réagit avec les biotites sous l'effet d'un flux thermique dont l'origine est inconnue. Du potassium ainsi que de la silice sont relâchés dans le fluide par la chloritisation des biotites.

Les fractures subverticales, de taille micrométrique à centimétrique, recoupent à la fois le granite sain et le granite affecté par la chloritisation pervasive des biotites. Par conséquent, les fluides ayant circulé dans ces fractures ont en fait inter-agi avec deux types de roches que l'on peut qualifier de primaires vis-à-vis de l'altération provoquant la formation d'associations minérales secondaires différentes.

Les fractures subhorizontales recoupent les fractures subverticales et sont donc postérieures. Les fluides circulant dans ces fractures ont généré une altération qui se superpose aux autres types d'altération. Des veines se retrouvent sporadiquement tout au long du sondage. Elles se distribuent en faisceaux de fissures parallèles dont la largeur varie d'une dizaine de micromètres à un centimètre environ. Les minéraux assurant le remplissage de ces fractures sont des carbonates de type ankérite et de type sidérite. L'ankérite peut être seule, mais si elle coexiste avec la sidérite, elle apparaît comme le dernier minéral cristallisant dans la veine. Aux épontes, la chlorite est remplacée par de la kaolinite et des amandes de carbonates, d'une dimension de l'ordre de 100 à 200 μ m. Il s'agit d'ankérite souvent entourée d'un liseré de sidérite. La pyrite est transformée en sidérite.

Lorsque les cristaux de biotite sont présents, ils sont remplacés par un interstratifié désordonné illite-smectite qui contient de 60 à 90% de feuillets smectitiques. Les plagioclases gardent la paragenèse acquise lors des épisodes d'altération précédents. Ils peuvent néanmoins être faiblement altérés en kaolinite et en un interstratifié illite-smectite qui contient environ 65% de feuillets smectitiques. L'extension de l'altération reste limitée à une faible distance de quelques centaines de micromètres autour de veines de dimensions comparables ; de plus, elle est fonction de la densité de fissures.

Les observations pétrographiques concernant l'ensemble de l'altération hydrothermale du granite d'Auriat sont résumées dans le tableau 12 (PARNEIX, 1987).

Tableau 12 - Résumé des observations pétrographiques concernant l'altération hydrothermale dans le granite d'Auriat (PARNEIX, 1987)

Type d'altération	Prof. (m)	roche originelle	PARAGENESES	
chloritisation pervasive des biotites	230-300 300-660	granite sain	chlorite trioctaédrique avec MF= 0,50 rutile, orthose.	
altération liée aux veines subverticales	0-170	granite chloritisé MF = 0,50	VEINE	EPONTE
			chlorite dioctaédrique, dolomite, hématite.	chlorite dioctaédrique, kaolinite, ankérite, dolomite.
	170-230	granite chloritisé MF = 0,50	IS 20%, dolomite, hématite.	IS 20%, kaolinite, ankérite, dolomite.
	230-300	granite sain	feldspath K, pyrite, corrensite, calcite	chlorite trioctaédrique MF = 0,53, rutile, corrensite.
	300-660	granite chloritisé MF = 0,50	illite, dolomite, hématite, IS 60%. ± quartz, ± pyrite.	hématite, dolomite, IS 40%.
	660-800	non définie	épidote, chlorite trioctaédrique MF = 0,53, sphène, feldspath K.	<- idem moins feldspath K et ± saponite Ca
altération liée aux veines subhorizontales	sporadique le long du sondage	granite sain	sidérite, ankérite	kaolinite, sidérite, ankérite, IS 90%.
		granite chloritisé	sidérite, ankérite	kaolinite, sidérite, ankérite.

Notes : MF = rapport Mg/(Mg + Fe) des chlorites,

IS 20% = interstratifié illite-smectite contenant 20% de feuillets smectitiques.

4.1.2.3 Influence de l'altération hydrothermale sur la porosité du granite d'Auriat

L'observation de l'altération hydrothermale en milieu naturel montre clairement que les produits d'altération occupent les espaces antérieurement ouverts par un événement tectonique. Ceux-ci contribuent donc à colmater la porosité. L'écriture des différentes réactions chimiques permet à l'aide des volumes molaires de chacun des minéraux intervenant dans la réaction de faire le bilan des variations de volume au cours de la transformation. Le volume de produits provenant de l'altération hydrothermale d'une roche est 1,35 à 1,52 fois celui de la roche avant sa destruction.

Un calcul identique peut être fait d'une part à l'aide des mesures de la largeur des fissures qui détermine le volume de vide initial et d'autre part, à l'aide de l'épaisseur de l'altération associée qui correspond à un volume de minéraux déposés. Puisque les fissures sont colmatées par les minéraux d'altération, il est possible d'évaluer la variation de volume que cela implique par rapport au volume de minéraux déposés. Ce calcul donne des valeurs comprises entre 21 et 34% d'augmentation de volume. Cette fourchette est légèrement inférieure à celle obtenue par l'écriture des réactions mais elle reste d'un ordre de grandeur comparable. De plus, le fait que ces valeurs soient inférieures peut s'expliquer par l'existence de microfractures et la porosité initiale de la roche qui ne sont pas prises en compte. Les transformations internes à celle-ci peuvent également provoquer des microfractures qui apparaissent autour des chlorites dans un certain nombre de granites altérés et également dans le granite d'Auriat (PARNEIX et al., 1985). Il semble donc que l'altération hydrothermale dans ce cas conduit globalement à une diminution de la porosité de la roche autour d'un site de stockage. La diminution de la porosité est de nature à réduire la possibilité de circulation des fluides et donc la possibilité de migration des radioéléments.

Des études expérimentales ayant pour but de caractériser l'évolution de la perméabilité dans un granite soumis à un gradient thermique montrent également une tendance à la décroissance de la porosité par dépôt de différents minéraux siliceux ou calciques dans les microfissures.

4.1.3 Comportement mécanique du granite d'Auriat

L'étude du comportement mécanique du granite d'Auriat a été réalisée par le Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique (CHARPENTIER, 1983). Le comportement en compression simple a été étudié sur des échantillons cylindriques de 36 mm de diamètre et 80 mm de hauteur. Aux deux extrémités de l'échantillon sont disposées des rondelles d'acier d'un diamètre équivalent. Ce dispositif permet une meilleure répartition des contraintes près des bases de l'éprouvette.

Les mesures extensométriques sont réalisées au moyen de jauges de déformation longitudinale (mesure de ϵ_1) et transversale (mesure de ϵ_2). Le déplacement entre bases est mesuré au moyen d'un capteur disposé sous le plateau de la presse. Celui-ci est également utilisé pour l'asservissement de la machine. Deux modules de déformation sont déterminés : le module de Young E_j , à partir des jauges longitudinales dans le tiers central de l'éprouvette, et le module E_b à partir du capteur de déplacement. Les essais de compression simple ont été réalisés sur des lots d'échantillons, successivement sur la roche naturelle, après effet thermique et sous température.

Les résultats obtenus sur une série de quatre échantillons sont donnés dans le tableau 13. Pour un des échantillons (244,7 m), les courbes $\sigma = f(\epsilon_1)$, $\sigma = f(\epsilon_2)$ et $\sigma = f(\Delta V / V)$ sont données sur les figures 47,48 et 49.

La faible valeur de σ sur l'échantillon prélevé à 247,6 mètres est due à la présence d'un plan faible dans l'éprouvette. Les courbes effort-déformation montrent le caractère fragile du granite. Les valeurs de ϵ_1 à la rupture s'écartent très peu de la déformation élastique correspondante. La limite élastique longitudinale est élevée (125 MPa). Au cours de la compression, la variation moyenne de volume maximum enregistrée est de l'ordre de $0,71 \cdot 10^{-3}$.

La valeur moyenne du coefficient de Poisson pour les quatre échantillons est égale à 0,26. Le module de Young moyen est 65 GPa. Le calcul du coefficient de compressibilité β est donné par la relation :

$$\beta = 3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu) / E_j \quad (36)$$

On obtient une valeur de β de $22 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$. Cette valeur sera prise en compte dans les mesures effectuées par porosimétrie au mercure sur les échantillons d'Auriat dans la suite de ce travail. Elle sera utilisée en Psi^{-1} , soit $\beta = 16 \cdot 10^{-8} \text{ Psi}^{-1}$.

4.2 Quantification de la porosité et de la microfissuration en fonction de l'altération pour différents échantillons du granite du site d'Auriat (forage de 500 m)

Cette première étude a pour but de montrer que les techniques d'étude mises au point et explicitées dans les chapitres précédents permettent une différenciation des paramètres de la porosité et de la microfissuration sur des échantillons de granite différents issus d'un même forage. Nous pourrons alors, à l'aide de ces techniques, déterminer l'importance que peut avoir sur le réseau poreux d'une roche granitique les caractéristiques de celle-ci.

Tableau 13 - Résultats obtenus en compression sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983)

Cote	σ (MPa)	E_j (GPa)	ν	E_b (GPa)
239,4	165	69,8	0,28	35,2
244,7	165	64,1	0,27	32,9
246,7	160	65,3	0,26	33,5
247,6	125	61	0,24	32

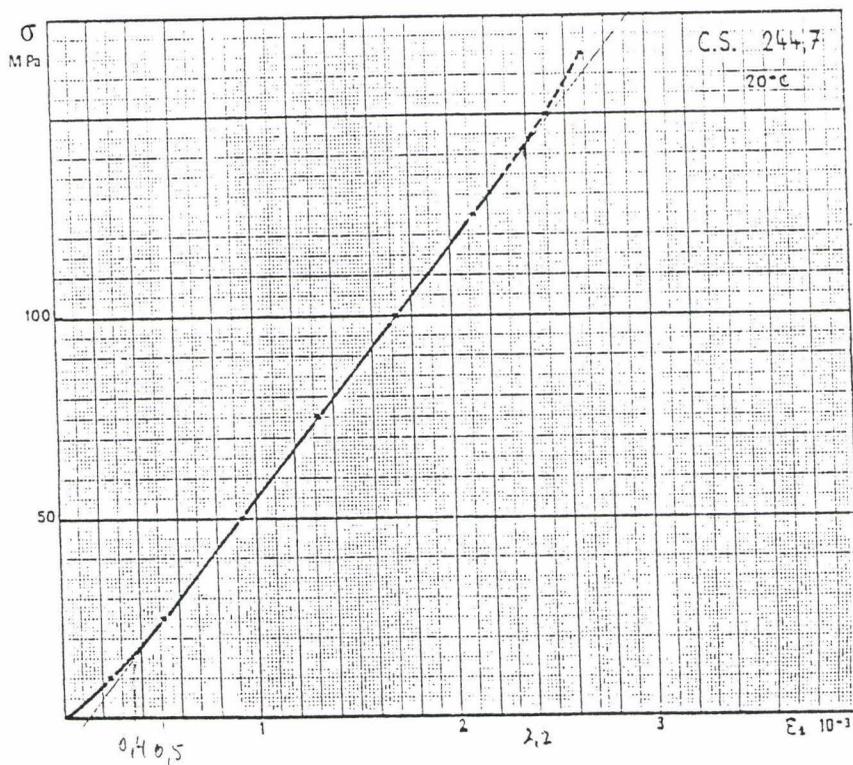


Figure 47 - Courbe effort-déformation ($\sigma = f(\epsilon_1)$) obtenue sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983)

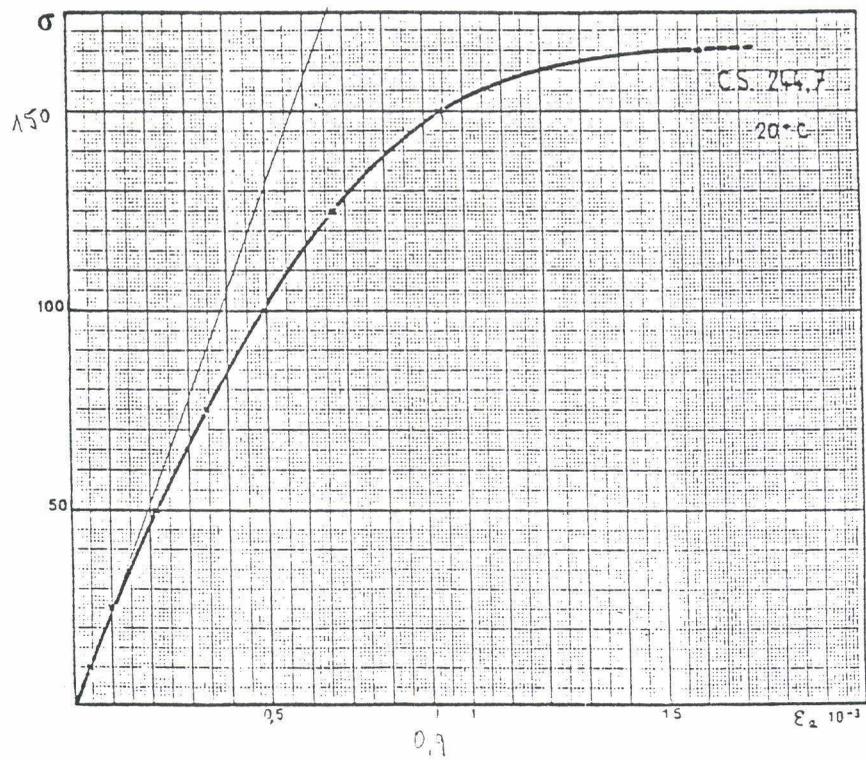


Figure 48 - Courbe effort-déformation ($\sigma = f(\epsilon_2)$) obtenue sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983)

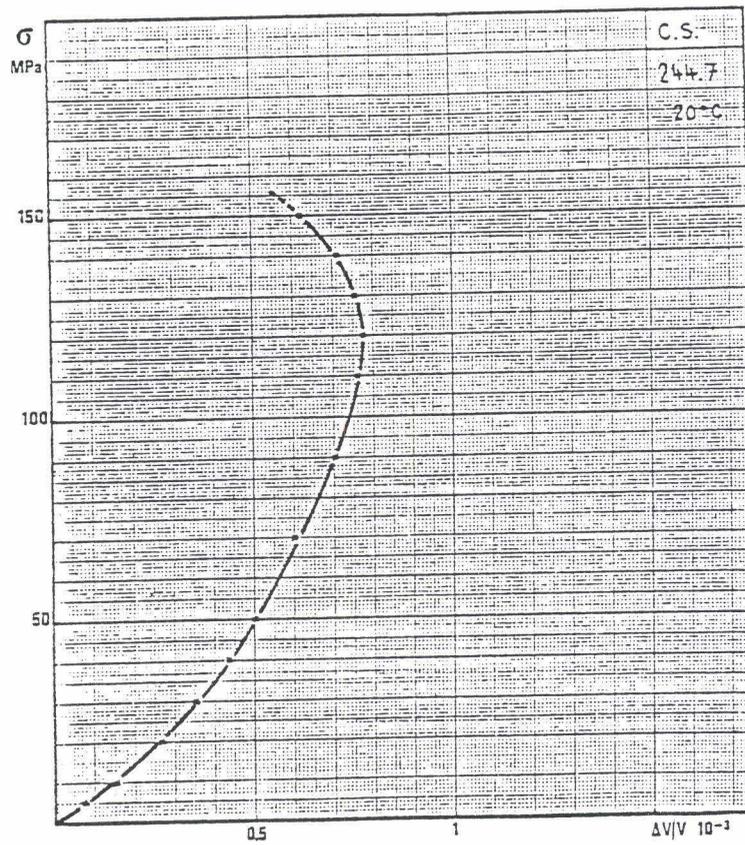


Figure 49 - Courbe $\sigma = f(\Delta V / V)$ obtenue sur le granite d'Auriat à température ambiante (CHARPENTIER, 1983)

L'étude par porosimétrie permet de mettre en évidence le développement de la porosité au sein de cinq classes de pores pour trois types de granite prélevés sur le forage d'Auriat de 500 mètres de profondeur.

L'analyse optique de la microfissuration quant à elle permet de quantifier les fissures d'une largeur supérieure au micron présentes dans les lames minces de roches préalablement imprégnées sous pression par une résine. D'autre part, elle permet d'observer l'évolution de la fissuration en rapport avec les phases minérales adjacentes et en rapport avec le caractère intra ou intergranulaire des fissures.

4.2.1 Choix des échantillons

Les échantillons proviennent du forage de 500 mètres de profondeur d'Auriat. Pour cette étude, trois échantillons de granite ont été choisis sur des critères macroscopiques (couleur et degré de fracturation):

- échantillon de type 1 (AU-1) prélevé à 245 mètres de profondeur. Il s'agit d'un granite à faciès pétrographique G1, à phénocristaux blancs, très peu fracturé;

- échantillon de type 2 (AU-2) prélevé à 380 mètres de profondeur. La roche (granite de faciès G1) est grise et présente des nuages de biotite et des plagioclases marrons aux contours blanchâtres ou roses pâles disséminés de manière homogène. La zone de prélèvement présente une fracturation subverticale avec remplissage argileux. L'examen microscopique de ce granite révèle une chloritisation de la biotite et une séricitisation des plagioclases plus marquées que pour l'échantillon AU-1;

- échantillon de type 3 (AU-3) prélevé à 100 mètres de profondeur. Il se caractérise par une grande friabilité et une teinte rose pâle. L'examen microscopique montre la présence de tourmaline en grande quantité, l'absence de biotite et une faible proportion de plagioclases apparaissant plus acides que dans les échantillons AU-1 et AU-2.

Pour cette étude, nous disposons de quatre échantillons de type AU-1, de quatre échantillons de type AU-2 et de deux échantillons de type AU-3. Les éprouvettes se présentent sous la forme de cylindres de 24 mm de diamètre et 26 mm de hauteur. Elles sont placées, après nettoyage à l'alcool, dans une étuve à 80°C pendant 48 heures.

4.2.2 Quantification de la porosité

4.2.2.1 Conditions opératoires

Les mesures ont été réalisées avec le porosimètre de type MICROMERITICS 9310 décrit précédemment et le pénétromètre conçu par notre laboratoire. Les mesures ont été effectuées selon une table de pressions appliquées prédéfinie (tableau 14). A chaque pression, la mesure est effectuée après un temps d'équilibrage de 10 minutes.

4.2.2.2 Résultats

Le tableau 15 donne les valeurs moyennes de la porosité et des masses volumiques apparente et réelle pour chaque échantillon.

On note de très forts écarts-types pour les caractéristiques du granite AU-3. Ceci s'explique en partie par le nombre réduit d'échantillons (deux seulement au lieu de quatre pour les autres cas).

Les courbes de la figure 50 présentent la variation du volume poreux cumulé en fonction de la pression appliquée pour chaque échantillon.

Les figures 51 à 53 représentent la variation des incréments de volume poreux en fonction de la pression appliquée pour chaque échantillon. Ces courbes donnent directement le volume pénétré entre deux pressions données.

Quel que soit l'échantillon étudié, on constate une bonne reproductibilité des mesures (un peu moins bonne dans le cas du granite AU-3 pour les raisons expliquées ci-dessus).

La figure 54 présente les courbes moyennes - Volume incrémenté = f(Diamètre de pore)- calculées pour chaque échantillon. Sur cette figure, il apparaît une grande différence entre les volumes poreux incrémentés obtenus pour les granites AU-1 et AU-2 d'une part et le granite AU-3 d'autre part.

Au vu de ces quatre figures, il apparaît, pour l'ensemble des trois échantillons, trois classes communes de pores centrées sur $0,117 \mu\text{m}$ (1550 Psi), $0,040 \mu\text{m}$ (4550 Psi), et $0,016 \mu\text{m}$ (11000 Psi). En plus des trois classes précédentes, le granite AU-3 présente deux classes de pores supplémentaires centrées sur $0,300 \mu\text{m}$ (600 Psi) et $1,00 \mu\text{m}$ (180 Psi).

Les figures 55 et 56 représentent la surface poreuse cumulée et les incréments de surface en fonction de la pression.

La figure 57 représente la distribution de la porosité sur cinq intervalles contenant les cinq classes précitées.

4.2.2.3 Discussion des résultats

Le granite AU-2 présente une évolution du volume poreux pénétré en fonction de la pression appliquée très comparable à celle du granite AU-1. Par contre, le granite AU-3 développe un volume poreux plus important, et cela sur toute la gamme des pores (figures 54 et 57) :

- pour les pores de diamètre inférieur à $0,2 \mu\text{m}$, la porosité est multipliée par un facteur 2 ;
- le granite AU- 3 développe des pores micrométriques pratiquement inexistant dans le granite AU-1.

Les courbes relatives à l'évolution de la surface poreuse développée (cumuls et incréments - figures 55 et 56) favorisent les plus fortes pressions correspondant aux plus

Tableau 14 - Table des pressions appliquées pour les mesures par porosimétrie au mercure

Pressions (psi)	Diamètres de Washburn (μm)
100	1,8100
250	0,7240
350	0,5171
500	0,3620
750	0,2413
1000	0,1810
1500	0,1207
2000	0,0905
2500	0,0724
3500	0,0517
5000	0,0362
6000	0,0301
7500	0,0241
10000	0,0181
12500	0,0144
15000	0,0120
17500	0,0103
20000	0,0090
22500	0,0080
25000	0,0072
27500	0,0065
30000	0,0060

Tableau 15 - Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur des échantillons de granite de types 1, 2 et 3

	Granite sain	Granite peu altéré	Granite très altéré
Porosité (%)	0,415 \pm 0,017	0,458 \pm 0,035	1,715 \pm 0,285
Masse Vol. Apparente (g/cm^3)	2,644 \pm 0,012	2,646 \pm 0,010	2,611 \pm 0,025
Masse vol. Réelle (g/cm^3)	2,655 \pm 0,012	2,658 \pm 0,010	2,657 \pm 0,033

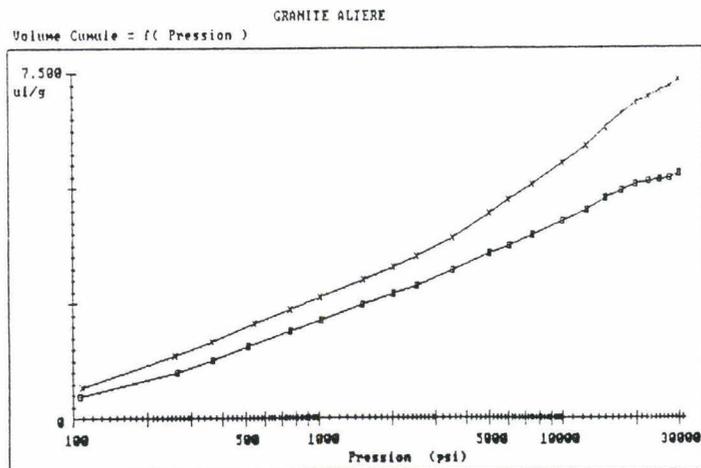
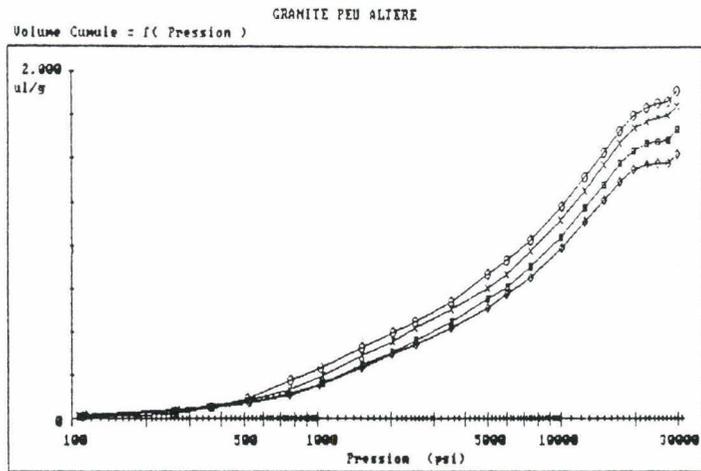
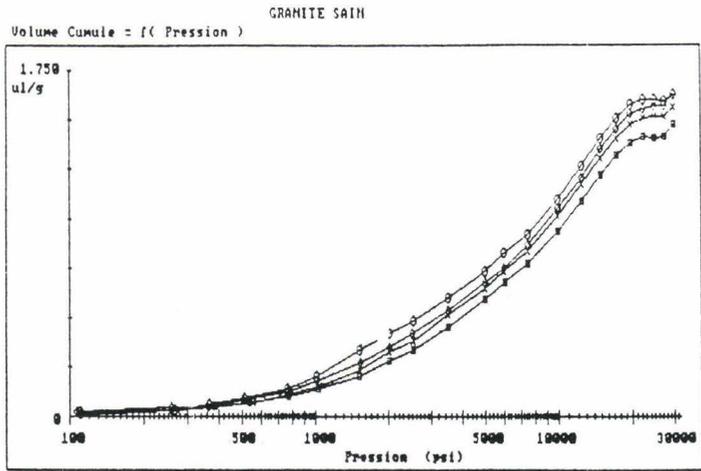


Figure 50 - Courbes de volume cumulé des échantillons de granite de types 1, 2 et 3

GRANITE SAIN

Volume Incremente = f(Pression)

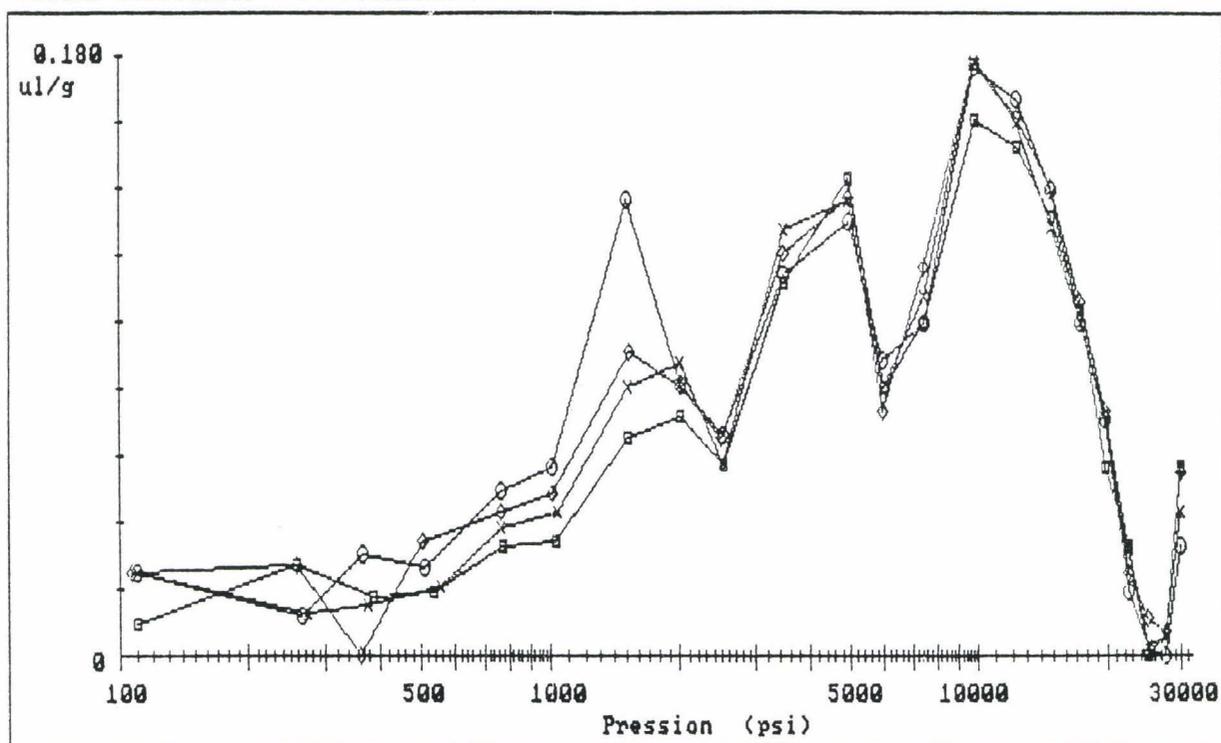


Figure 51 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite de type sain

GRANITE PEU ALIERE

Volume Incremente = f(Pression)

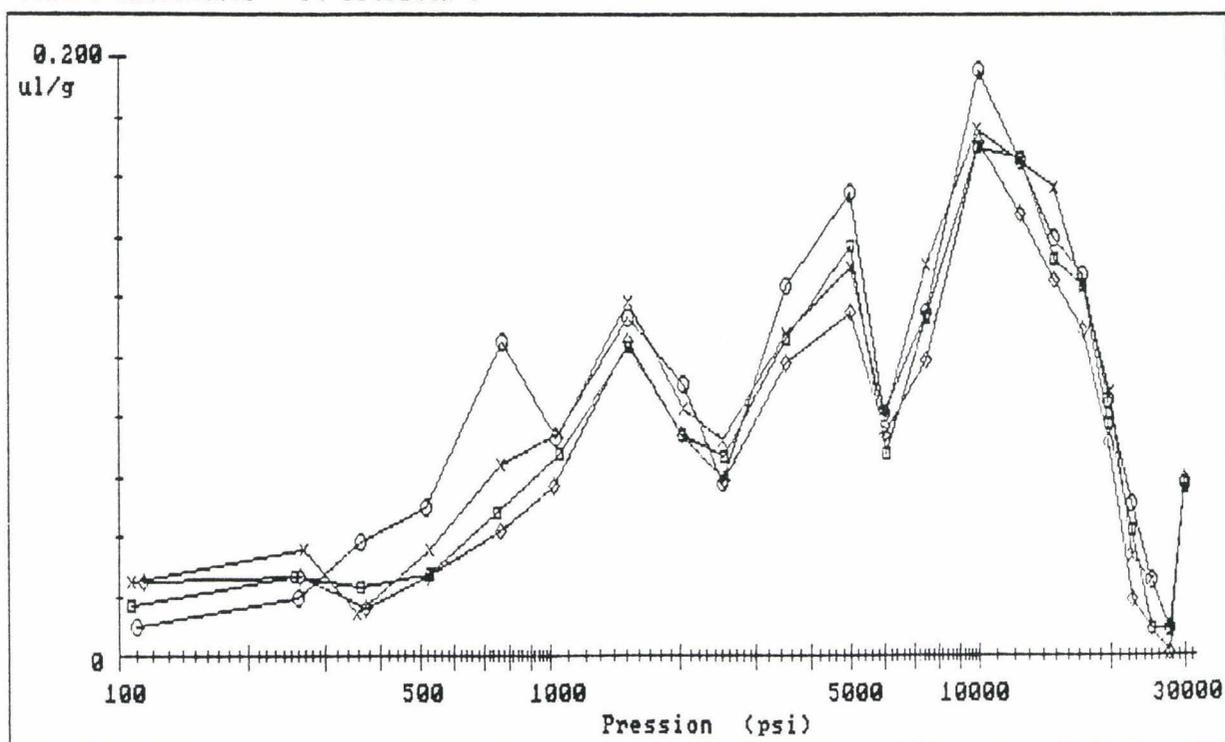


Figure 52 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite de type peu altéré

GRANITE ALIERE

Volume Incremente = f(Pression)

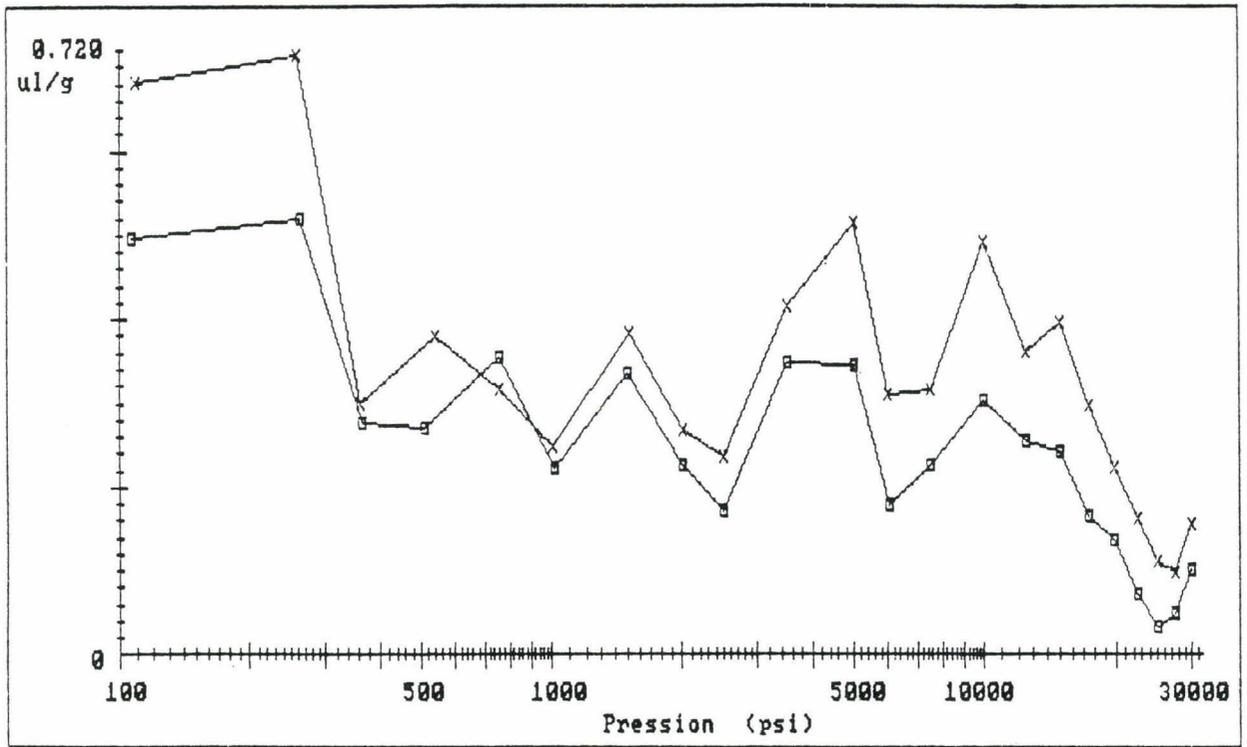


Figure 53 - Courbe de volume incrémenté de l'échantillon de granite de type 3.

GRANITES SAIN - PEU ALIERE - TRES ALIERE

Volume Incremente = f(Diametre)

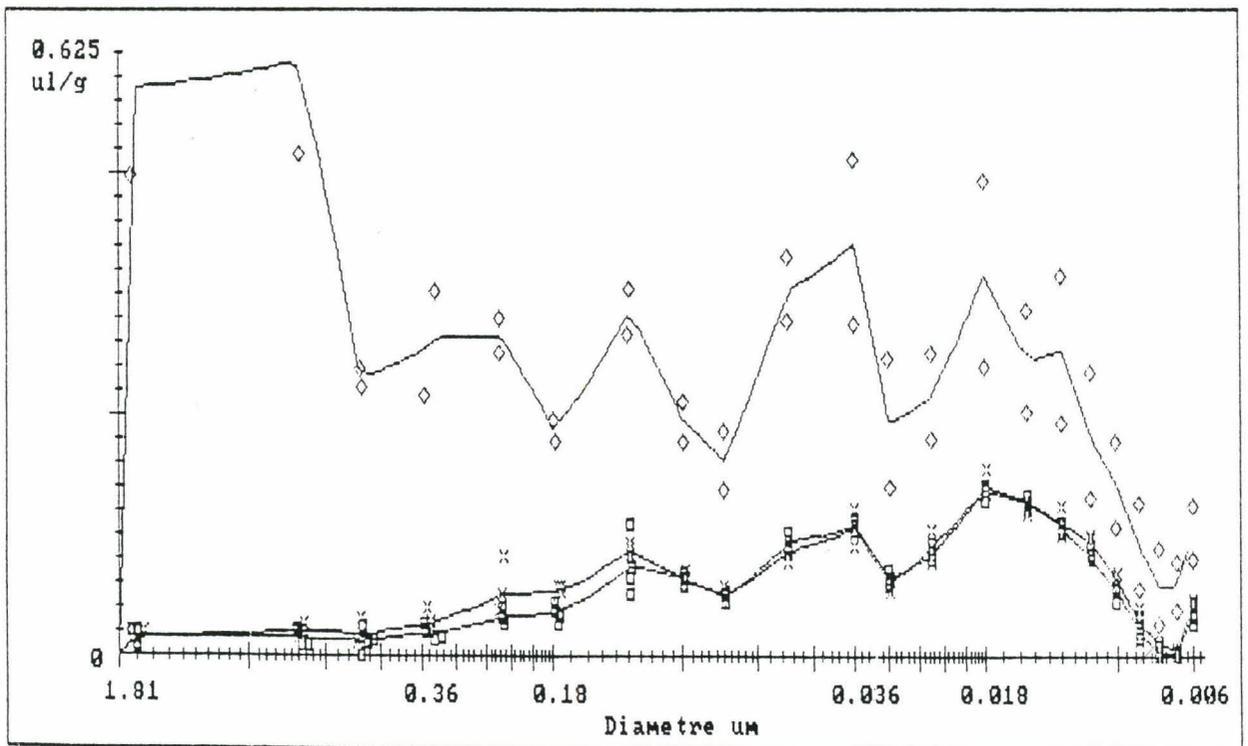


Figure 54 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite de différents types réunies sur un même graphe

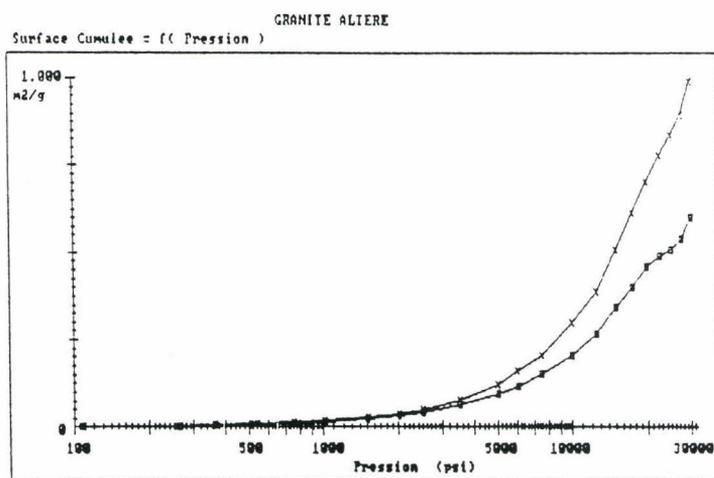
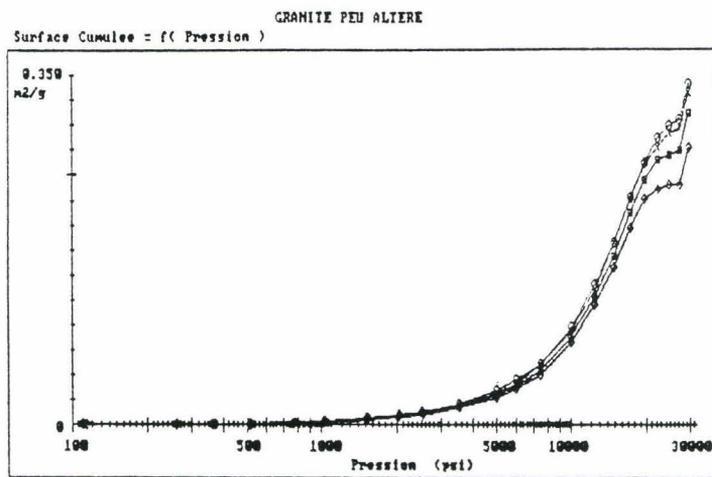
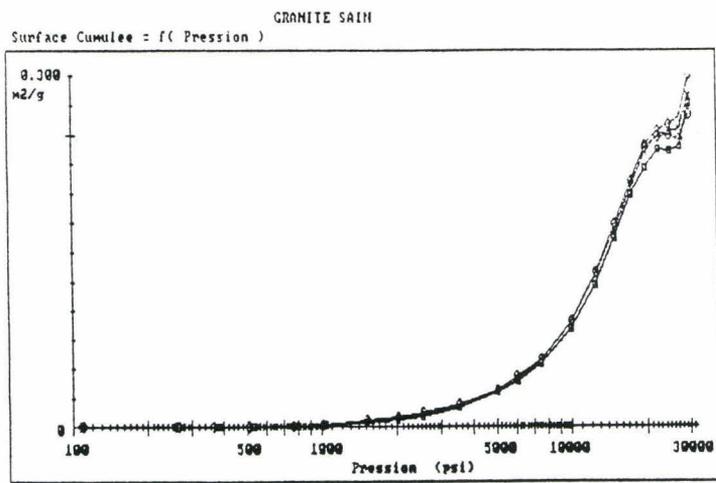


Figure 55 - Courbes de surface cumulee des echantillons de granite de types 1, 2 et 3

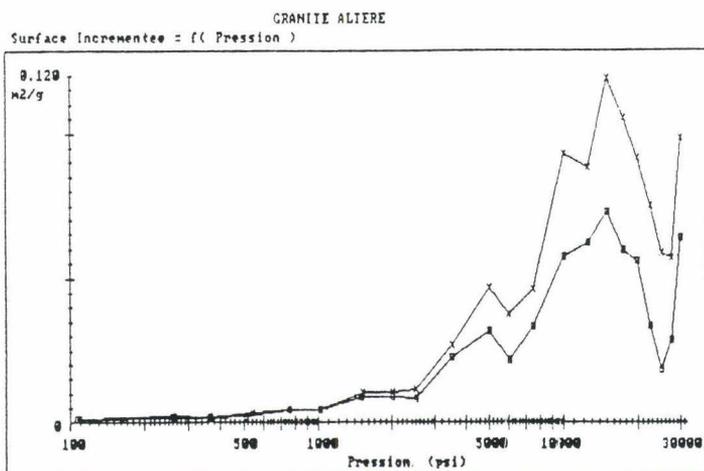
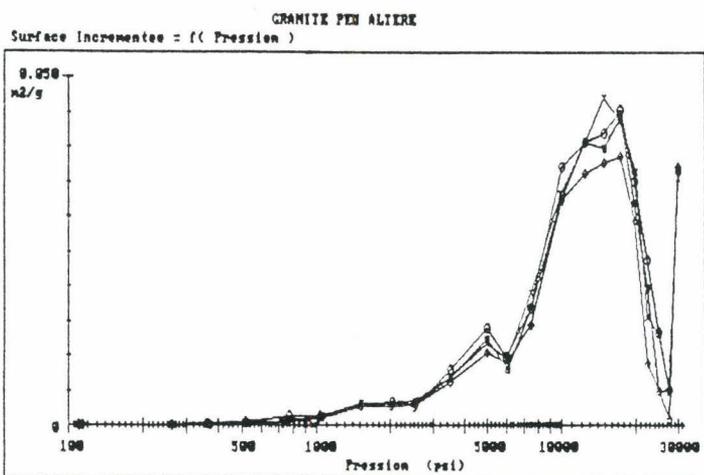
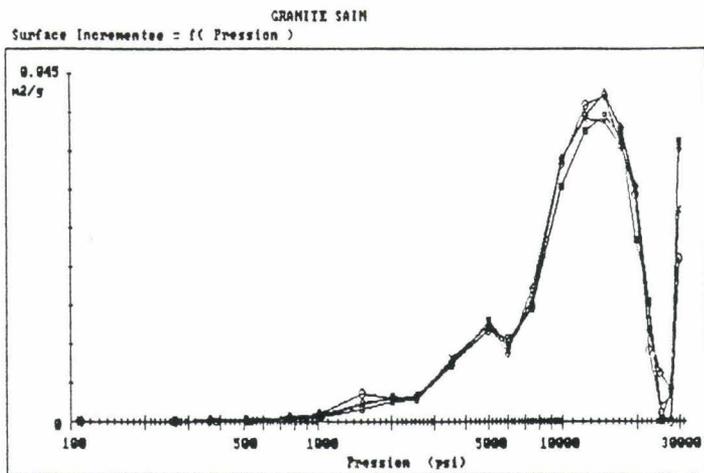


Figure 56 - Courbes de surface incrémentée des échantillons de granite de types 1, 2 et 3

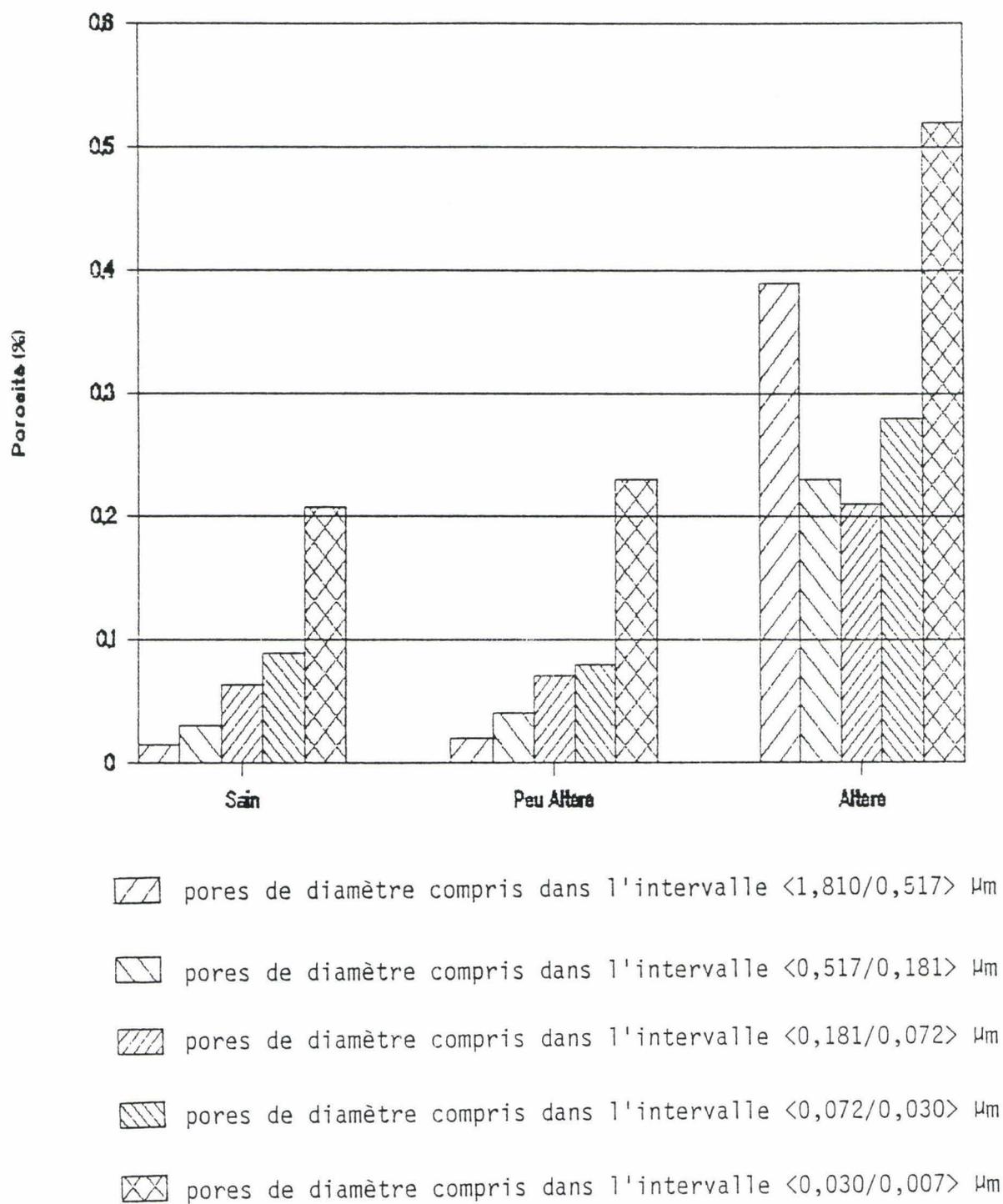


Figure 57 - Distribution de la porosité des échantillons de granite de types 1, 2 et 3

petits diamètres de pores. A volume constant, les pores de petits diamètres développent une surface beaucoup plus importante que les pores de grand diamètre. Il apparaît donc normal sur les courbes relatives à l'évolution de la surface poreuse développée (cumuls et incréments) que les surfaces relatives aux petits diamètres prédominent largement sur celles relatives aux diamètres intermédiaires et aux grands diamètres.

4.2.3 Quantification de la microfissuration

4.2.3.1 Conditions opératoires

Il s'agit de la technique mise au point et décrite précédemment (imprégnation colorée et quantification au microscope).

L'étude a porté sur des échantillons de même provenance que ceux utilisés pour l'étude de porosimétrie précédente, ceci pour les granites AU-1 et AU- 2. Le granite AU-3 prélevé à 100 mètres de profondeur, étudié par porosimétrie, s'est révélé trop fragile pour supporter une imprégnation sous pression. Nous l'avons donc remplacé par un granite moins dégradé mais de mêmes caractéristiques, prélevé à 486 mètres.

Les échantillons déshydratés en étuve à 80°C ont été dégazés puis imprégnés sous pression par la résine colorée. Quatre lames minces ont alors été réalisées perpendiculairement à l'axe de carottage.

4.2.3.2 Résultats

Les résultats de la quantification des différents paramètres : nombre, grandeurs caractéristiques moyennes des fissures, pourcentages des fissures adjacentes aux différentes phases minérales et pourcentages des fissures selon leur caractère intra ou intergranulaire sont résumés dans le tableau 16a.

Tableau 16.b - Importance relative de la porosité vis à vis de la microfissuration

	Granite sain	Granite peu altéré	Granite altéré
Porosité (%)	0,415	0,458	1,715 *
Surface de fissures (% surface totale)	0,07	0,06	0,16 **
Importance relative de la porosité par rapport à la fissuration	5,9	7,6	10,7

* Profondeur : 100 m

** Profondeur : 486 m

Tableau 16.a - Résultats de la quantification de la microfissuration des échantillons de granite de types 1 à 3

Echantillon	Granite sain (245 mètres)	Granite peu altéré (380 mètres)	Granite altéré (486 mètres)
Nombre de fissures	507	255	302
Périmètre moyen (mm)	0,62	0,62	1,30
Surface de fissures (% surface totale)	0,07	0,06	0,16
Surface moyenne (mm ²)	0,0021	0,0038	0,0087
Largeur moyenne (µm)	8,1	9,6	10,8
Longueur moyenne (mm)	0,30	0,30	0,64
Pourcentage de fissures adjacentes à la biotite	1	3	9
Pourcentage de fissures adjacentes au feldspath K	26	22	35
Pourcentage de fissures adjacentes au plagioclase	30	30	21
Pourcentage de fissures adjacentes au quartz	51	50	45
Pourcentage de fissures intra-granulaires	83	81	79
Pourcentage de fissures inter-granulaires	13	16	14
Pourcentage de fissures intra et inter-granulaires	4	3	7

4.2.3.3 Discussion des résultats

L'examen de ce tableau révèle les tendances suivantes:

- le nombre de fissures comptabilisées (de largeur supérieure à $1 \mu\text{m}$) tend globalement à diminuer lorsqu'on passe du granite AU-1 au granite AU-3. On enregistre en effet 507 fissures pour le granite AU-1 et 255 et 302 respectivement pour les granites AU-2 et AU-3;

- les paramètres périmètre moyen et surface moyenne des fissures augmentent de façon tout à fait significative du granite AU-1 au granite AU-3. Le périmètre moyen passe de $0,62 \text{ mm}$ (AU-1 et AU-2) à $1,30 \text{ mm}$ (AU-3). La surface moyenne quant à elle augmente de $21 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ (AU-1) à $87 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ (AU3). Il s'agit d'un résultat important car ce sont ces paramètres moyens qui sont représentatifs de l'état microfissural du granite;

- la largeur moyenne des fissures visualisées sur la lame augmente très faiblement. Elle passe de $8,1 \mu\text{m}$ (AU-1) à $10,8 \mu\text{m}$ (AU-3);

- la longueur moyenne de ces fissures est multipliée par un facteur 2: elle passe de $0,30 \text{ mm}$ pour les granites AU-1 et AU-2 à $0,64 \text{ mm}$ pour le granite AU-3;

- l'analyse des phases minérales adjacentes aux fissures comptabilisées fait apparaître une augmentation nette du pourcentage des fissures traversant les biotites du granite AU-1 au granite AU-3. Ce pourcentage passe en effet de 1% pour le granite AU-1 à 3% pour le granite AU-2 et 9% pour le granite AU-3;

- les pourcentages de fissures adjacentes au feldspath potassique et au plagioclase évoluent entre 22 et 35%, ce qui correspond approximativement aux compositions modales de ces minéraux au sein du granite étudié (25% pour le feldspath potassique et 32% pour le plagioclase);

- par contre, le pourcentage des fissures adjacentes au quartz (45 à 51%) se situe au-dessus du pourcentage de ce minéral dans la roche (environ 31%) pour les trois échantillons étudiés. Le quartz apparaît donc comme une phase prépondérante dans le phénomène de fissuration pour les échantillons étudiés;

- un dernier point important est que quel que soit la phase minérale, la fissuration est principalement intragranulaire pour les trois types de granite et associe rarement les caractères intra et intergranulaire.

4.2.4 Interprétation des résultats et conclusion de l'étude

Tout d'abord nous pouvons, grâce aux résultats de nos deux méthodes d'investigation, donner le poids relatif de la microfissuration et de la porosité dans un échantillon de granite donné. Si on admet que le pourcentage de la surface occupée par les fissures (mesurée par la méthode optique) est équivalent au pourcentage volumique occupé par ces mêmes

fissures, il suffit de comparer le pourcentage de porosité (tableau 15) au pourcentage de surface occupée par les fissures.

Le résultat de cette comparaison apparaît dans le tableau 16b.

Ce tableau indique clairement que la porosité l'emporte largement sur la microfissuration, quel que soit l'échantillon de granite étudié.

Il semble également que la porosité a un poids croissant vis à vis de la microfissuration à mesure que l'on passe du granite AU-1 au granite AU-3. Nous ne pouvons l'affirmer catégoriquement compte tenu que les échantillons AU-3 étudiés par la méthode optique et par la porosimétrie au mercure ne proviennent pas de la même profondeur.

Les deux méthodes d'investigation qui ont été utilisées pour l'étude de l'évolution du réseau poreux du granite pour différents échantillons de granite donnent des résultats qui vont nettement dans le même sens :

- augmentation de la microfissuration (multipliée par un facteur d'environ 3);
- augmentation de la porosité (multipliée par un facteur 4).

Ces résultats montrent, d'une part, que pour des qualités de granite voisines (granites AU-1 et AU-2), les techniques de porosimétrie et de quantification optique de la fissuration fournissent des résultats très comparables. On observe d'ailleurs une bonne reproductibilité des mesures. Il apparaît, d'autre part, que pour le granite AU-3 présentant un faciès largement fracturé, les deux techniques fournissent des grandeurs caractéristiques nettement plus fortes.

4.3 Etude du forage de 1000 mètres d'Auriat : analyse de la porosité et de la microfissuration du granite en fonction de sa profondeur et de ses caractéristiques

Nous présentons dans cette partie les résultats de la quantification du réseau poreux d'échantillons issus du forage d'Auriat de 1000 mètres de profondeur. L'étude par porosimétrie au mercure a porté sur 19 échantillons prélevés entre 297,22 mètres et 999,58 mètres. Parmi ces 19 échantillons, 11 ont fait l'objet d'une quantification des fissures par le système d'analyse optique.

Nous étudierons l'évolution du réseau poreux par rapport à la profondeur des prélèvements, puis en fonction de leurs caractéristiques pétrographiques propres. Ainsi, seront pris en compte le type de granite (G1 ou G2 définis précédemment), le degré de fracturation et de fissuration macroscopique, le degré de colmatage des fissures, l'état d'altération des minéraux constitutifs et la présence d'éléments structuraux tels que filon, joint primaire, inclusion... Les informations de type géologique sont issues des données

fournies dans les documents suivants: B.R.G.M.(1981), LECA D.(1990) et LECA D. et al.(1990).

Contrairement au forage de 500 mètres, le forage de 1000 mètres ayant fait l'objet d'un repérage des carottes, une analyse de l'orientation des fissures dans ces échantillons a été entreprise. Nous indiquerons ainsi les éventuelles directions préférentielles prises par les fissures pour les différents échantillons dans le plan d'observation des lames minces.

4.3.1 Choix des échantillons

Pour les 11 échantillons étudiés conjointement par analyse globale (porosimétrie au mercure) et par analyse individuelle (quantification par système optique après imprégnation par une résine colorée), les différentes profondeurs de prélèvement sont les suivantes :

297,22 m	404,10 m	500,95 m	600,24 m
700,20 m	799,72 m	801,55 m	899,85 m
984,80 m	998,18 m	999,40 m	

Les 8 échantillons étudiés uniquement par porosimétrie au mercure sont situés aux cotes suivantes :

598,49 m	681,61 m	699,88 m	721,05 m
801,88 m	997,25 m	998,50 m	999,58 m

Pour toutes les études par porosimètre au mercure, on dispose pour chaque cote de 2 échantillons d'un diamètre de 24 mm et de 26 mm de hauteur à l'exception des cotes 681,61 m - 721,05 m - 899,85 m - 998,50 m - 999,58 m pour lesquelles un seul échantillon a été fourni.

Pour les études de la microfissuration par système optique, pour chaque cote, 3 lames minces ont été analysées, chacune de 4 cm² de zone d'analyse, soit au total un champ de 12 cm² par niveau.

4.3.2 Quantification de la porosité du granite d'Auriat en fonction de la profondeur du prélèvement

4.3.2.1 Conditions opératoires

Les mesures ont été réalisées avec le même porosimètre au mercure (MICROMERITICS 9310) et selon le même mode opératoire utilisé lors de l'étude précédente en utilisant la même table de pressions.

4.3.2.2 Résultats et premières constatations sur les résultats de porosimétrie

Les tableaux 17 et 18 donnent les valeurs moyennes de la porosité totale et des masses volumiques apparente et réelle pour chaque profondeur de prélèvement. La figure 58 reprend les valeurs de la porosité globale en fonction de la profondeur de prélèvement. On remarque que l'évolution de la porosité en fonction de la profondeur ne paraît pas uniforme. La porosité diminue entre la cote 404,10 m et la cote 600,24 m. A 681,61 m et 721,05 m la porosité atteint des valeurs "élevées" (0,9% et 0,7%), alors que les échantillons provenant de 699,88 m et 700,20 m se distinguent par des valeurs de porosité très faibles (0,24% et 0,29% respectivement).

Entre 799,72 m et 801,88 m la valeur de la porosité s'établit entre 0,48% et 0,50%. La porosité des échantillons provenant du fond du forage (984,80 m à 999,58 m) se situe entre 0,40% et 0,70%.

Les figures 59 à 68 présentent la variation des incréments de volume poreux en fonction des diamètres de pores. Quand il y a plusieurs échantillons par cote, les courbes tracées représentent la valeur moyenne des résultats. On note la présence de trois à cinq classes de pores selon les cas. Pour toutes les profondeurs étudiées, on retrouve deux classes communes de pores centrées approximativement sur 0,036 μm et 0,018 μm .

Les figures 69 et 70 représentent la distribution de la porosité pour les différents échantillons sur les intervalles précédemment définis. Sauf cas particuliers (essentiellement : 681,61- 899,85 et 998,50 m), on constate une augmentation globale de la porosité pour des diamètres de pores décroissants.

Tableau 17 - Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur des échantillons de granite prélevés entre 297,22 et 721,05 mètres

Profondeur (m)	Porosité (%)	Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	Masse Volumique Réelle (g/cm ³)
297,22 m	0,44 ± 0,03	2,593 ± 0,009	2,605 ± 0,011
404,10 m	0,70 ± 0,04	2,555 ± 0,007	2,573 ± 0,008
500,95 m	0,64 ± 0,01	2,568 ± 0,011	2,585 ± 0,012
598,49 m	0,57 ± 0,12	2,532 ± 0,045	2,546 ± 0,042
600,24 m	0,50 ± 0,06	2,585 ± 0,007	2,598 ± 0,012
681,61 m	0,88 (1 mesure)	2,564	2,587
699,88 m	0,24 ± 0,01	2,658 ± 0,007	2,665 ± 0,008
700,20 m	0,29 ± 0,00	2,614 ± 0,002	2,622 ± 0,003
721,05 m	0,69 (1 mesure)	2,569	2,587

Tableau 18 - Résultats de mesure par porosimétrie au mercure sur des échantillons de granite prélevés entre 799,72 et 999,58 mètres

Profondeur (m)	Porosité (%)	Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	Masse Volumique Réelle (g/cm ³)
799,72 m	0,48 ± 0,02	2,587 ± 0,013	2,599 ± 0,012
801,55 m	0,50 ± 0,01	2,580 ± 0,005	2,592 ± 0,004
801,88 m	0,48 ± 0,02	2,586 ± 0,006	2,598 ± 0,006
899,85 m	0,61 (1 mes.)	2,576	2,592
984,80 m	0,67 ± 0,03	2,561 ± 0,001	2,578 ± 0,001
997,25 m	0,41 ± 0,01	2,645 ± 0,020	2,655 ± 0,020
998,18 m	0,44 ± 0,00	2,585 ± 0,002	2,597 ± 0,003
998,50 m	0,53 (1 mesure)	2,658	2,672
999,40 m	0,48 ± 0,04	2,594 ± 0,008	2,607 ± 0,009
999,58 m	0,50 (1 mesure)	2,653	2,667

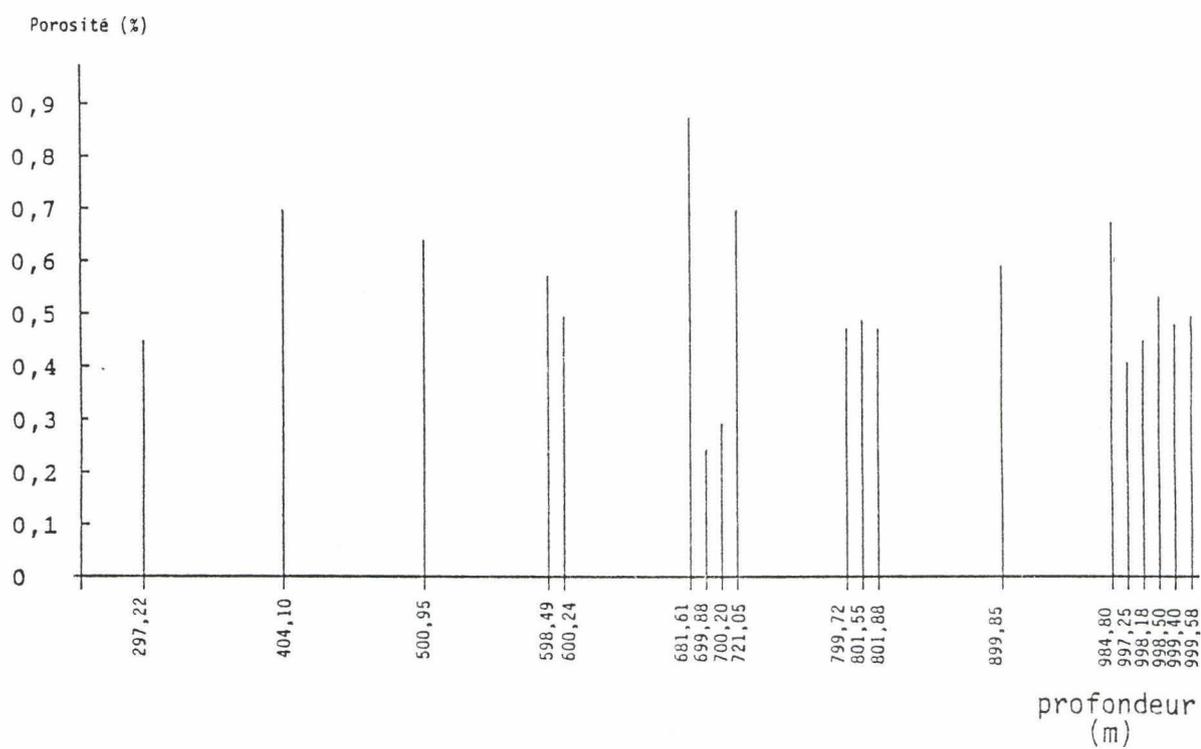


Figure 58 - Graphe représentant l'évolution de la porosité en fonction de la profondeur

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 297,22 m × 404,10 m

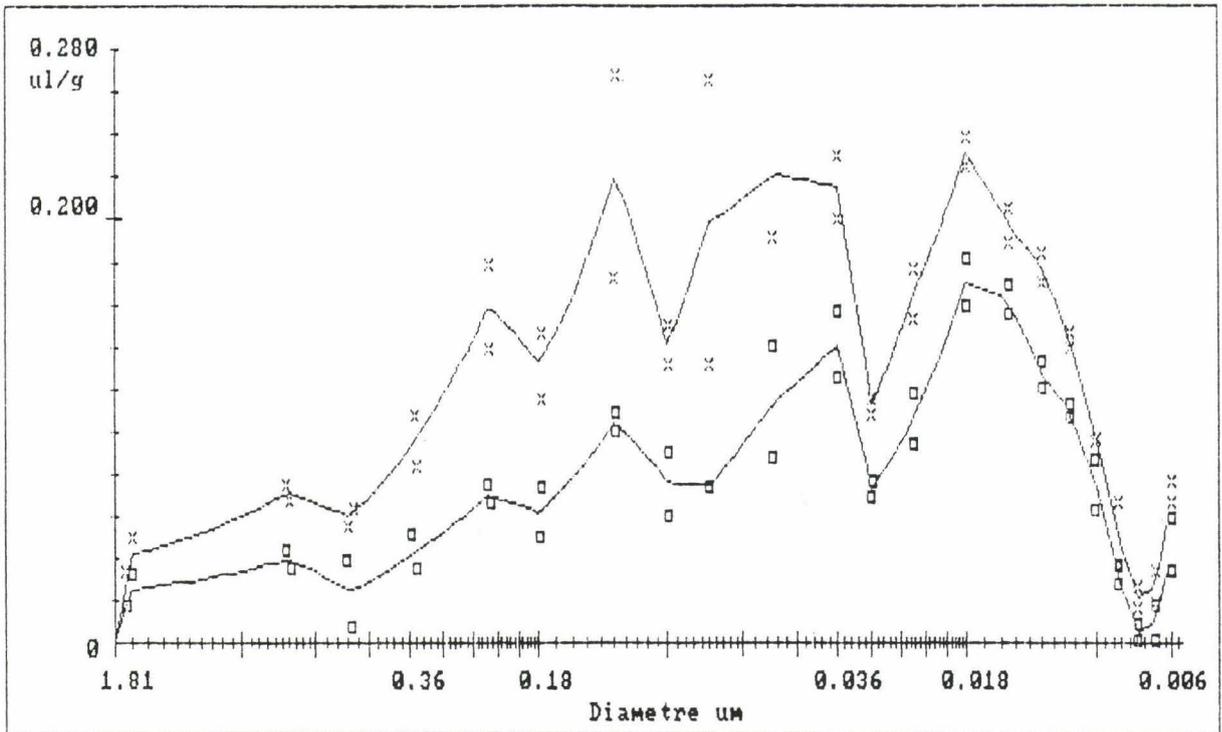


Figure 59

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 500,95 m × 598,49 m

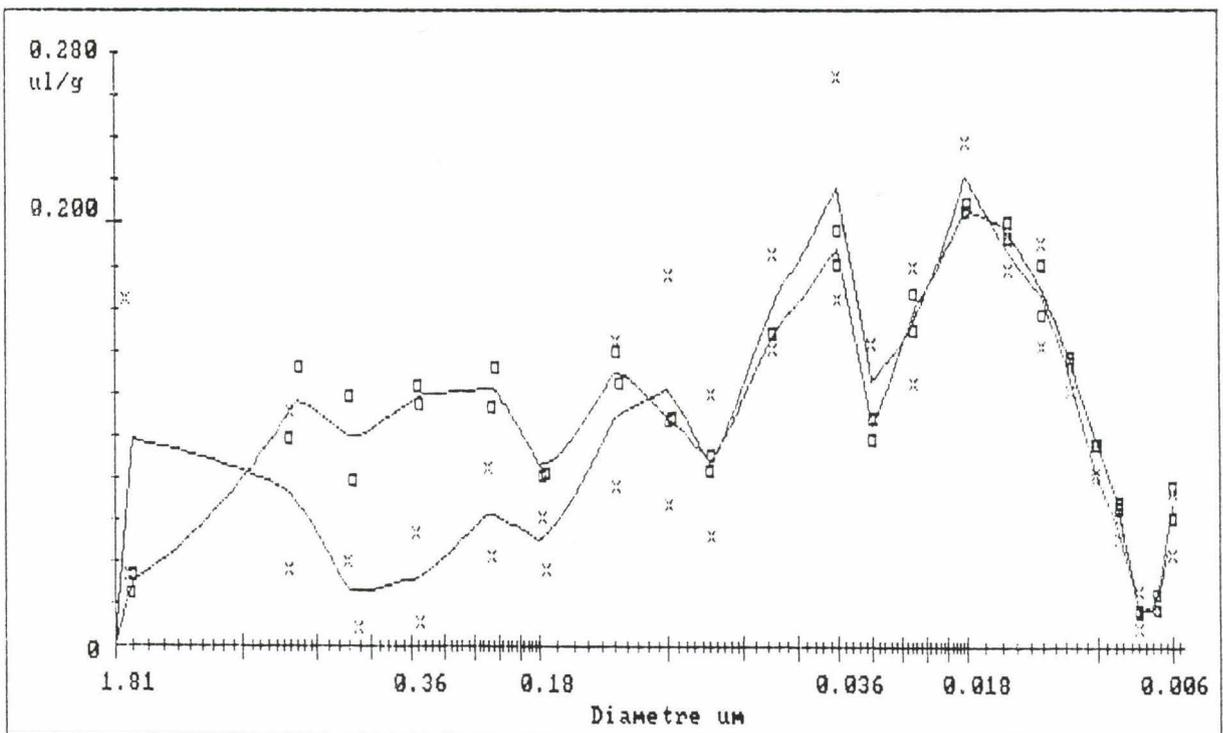


Figure 60

Figures 59 et 60 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 297,22 m et 598,49 m

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 600,24 m × 681,61 m

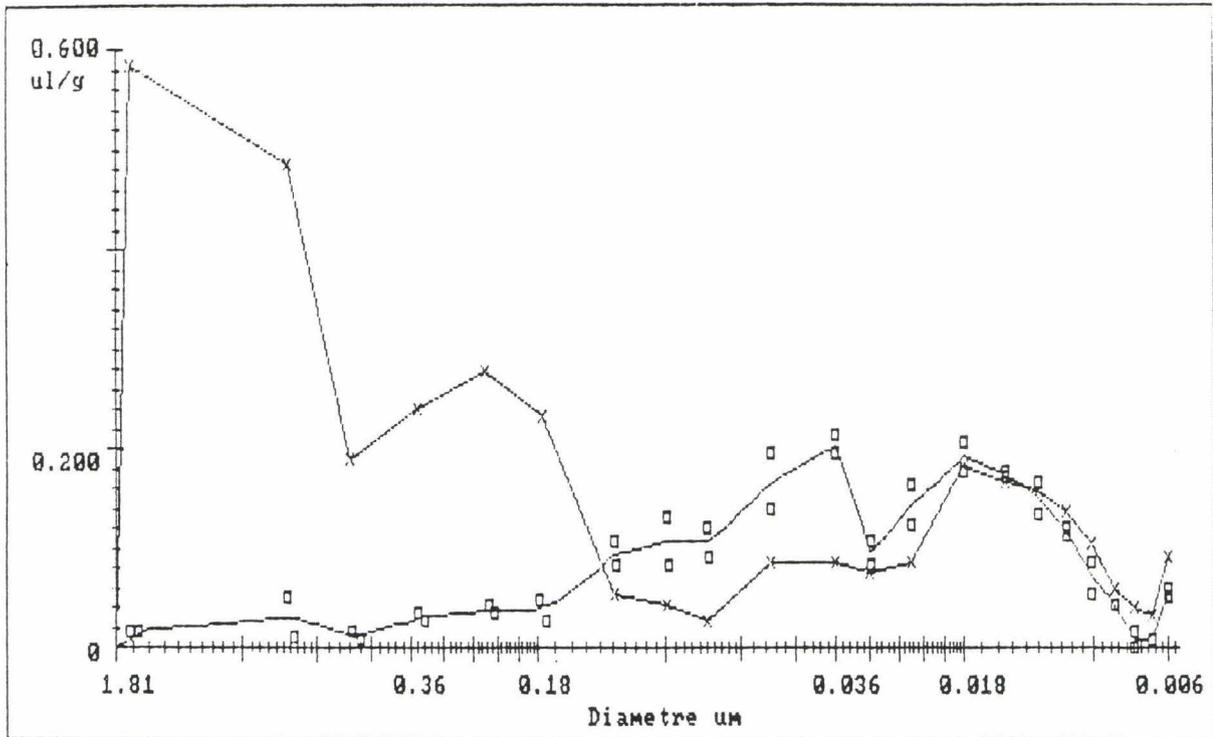


Figure 61

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 699,89 m × 700,20 m

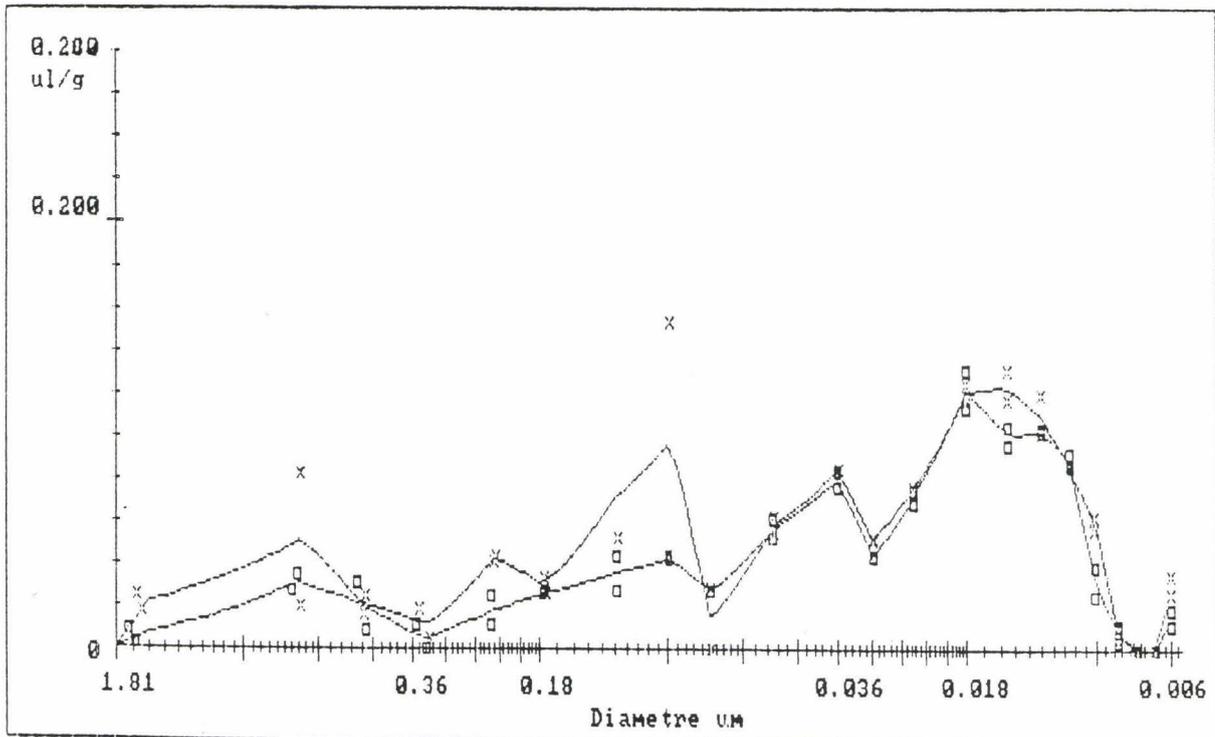


Figure 62

Figures 61 et 62 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 600,24 m et 700,20 m

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 721,05 m X 799,72 m

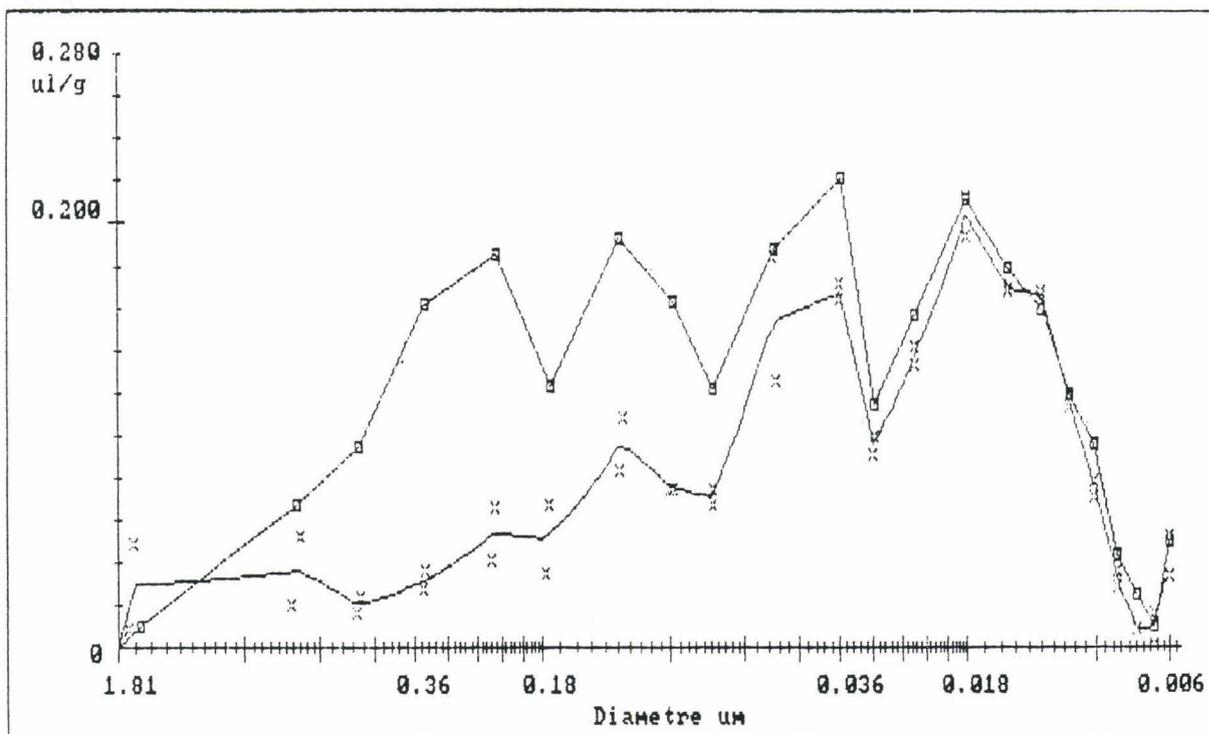


Figure 63

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 801,55 m X 801,88 m

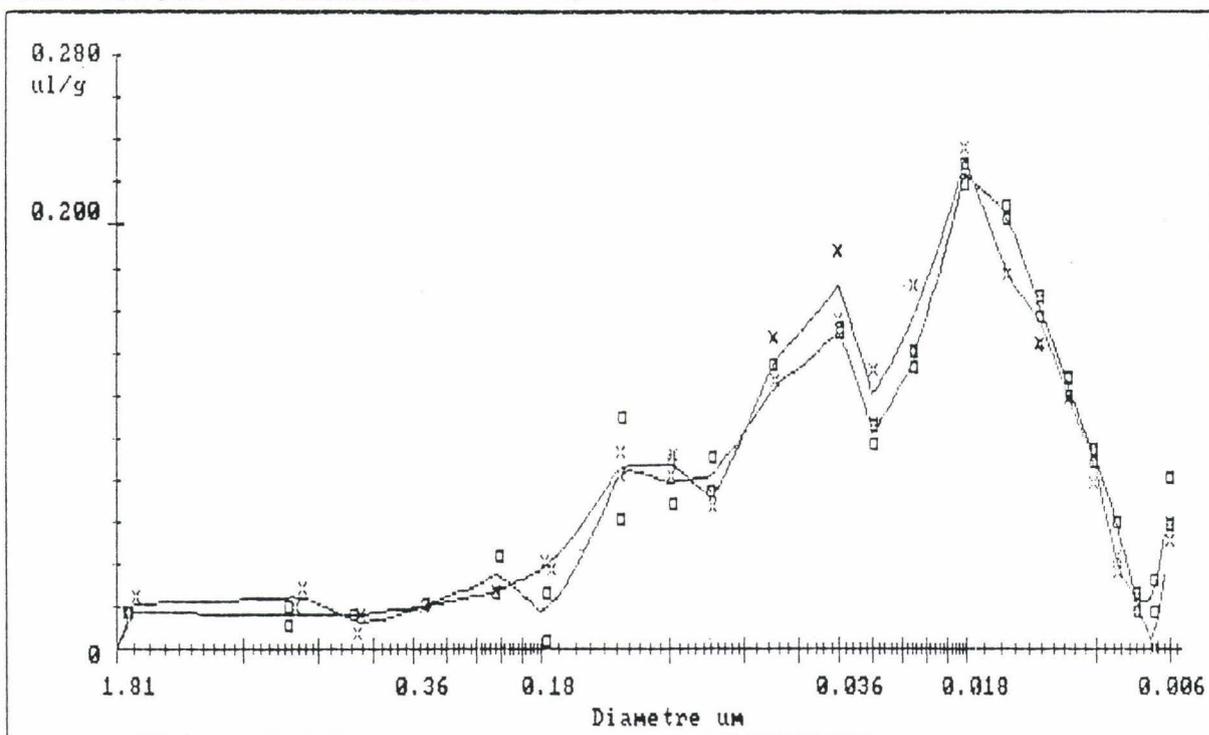


Figure 64

Figures 63 et 64 - Courbes de volume incremente des echantillons de granite preleves entre 721,05 m et 801,88 m

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 899,85 m x 984,80 m

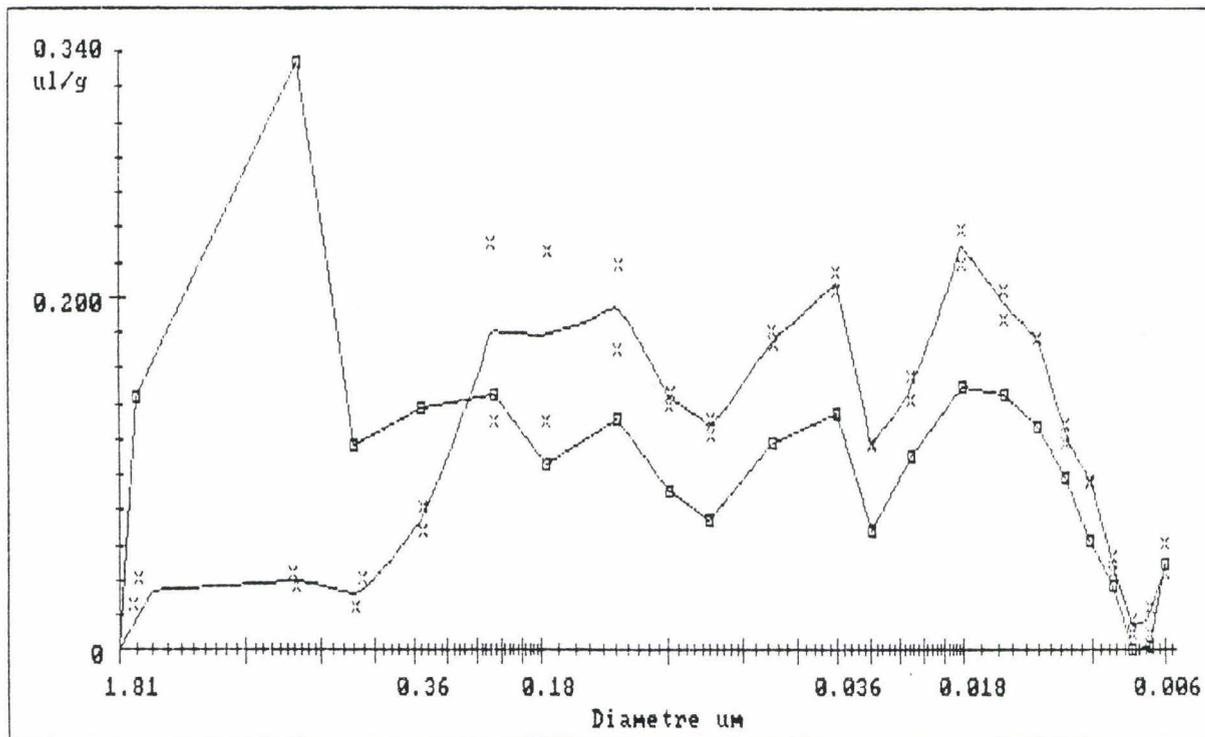


Figure 65

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 997,25 m x 998,18 m

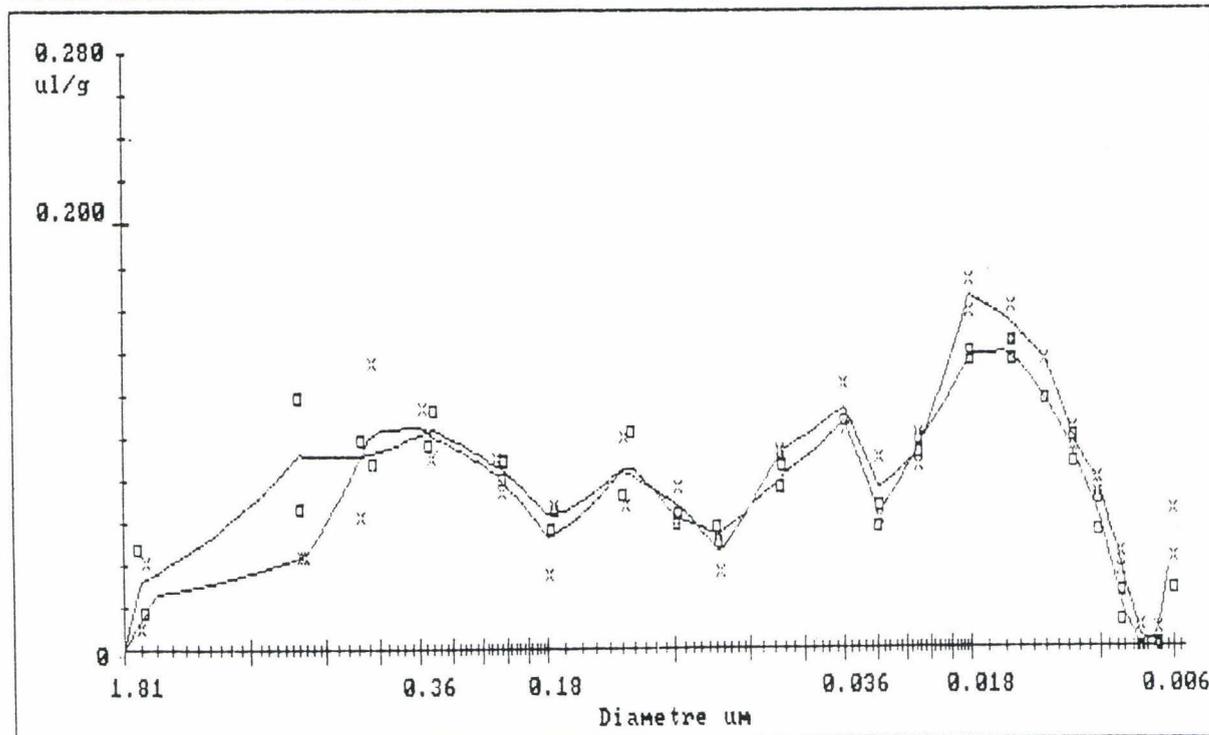


Figure 66

Figures 65 et 66 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 899,85 m et 998,18 m

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 998,50 m x 999,40 m

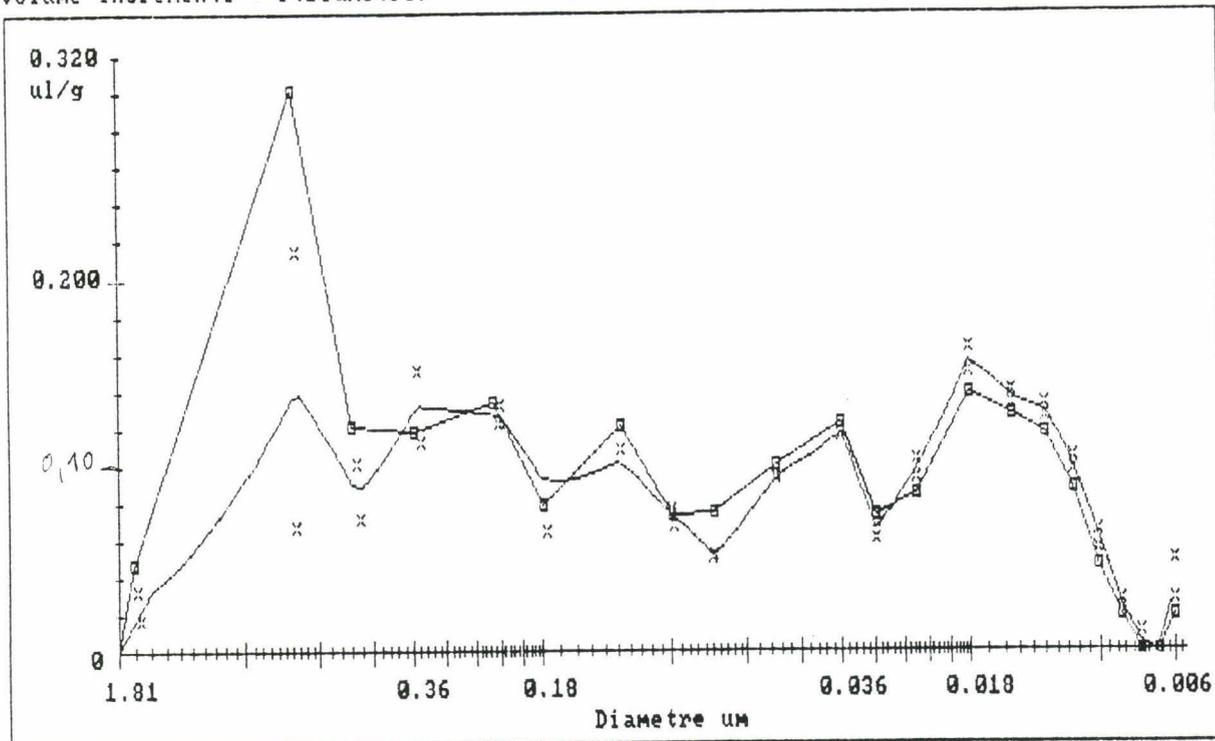


Figure 67

Volume Incremente = f(Diametre)

□ 999,58 m

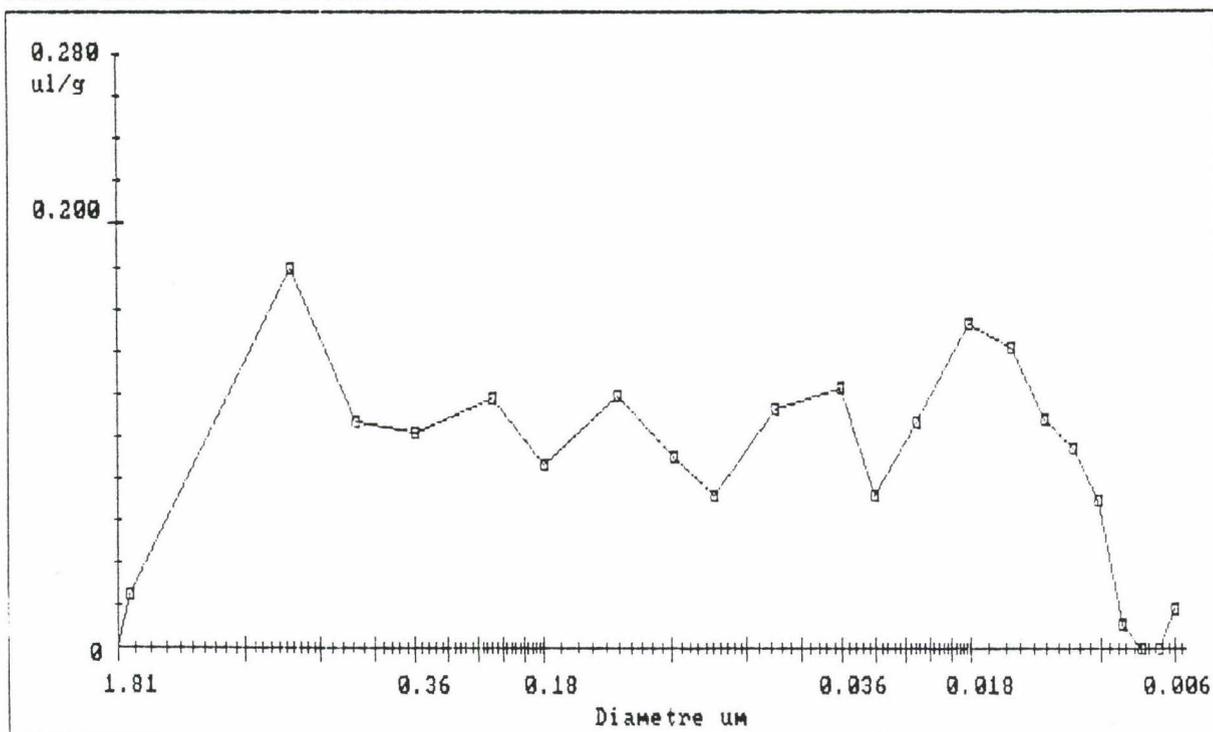


Figure 68

Figures 67 et 68 - Courbes de volume incrémenté des échantillons de granite prélevés entre 998,50 m et 999,58

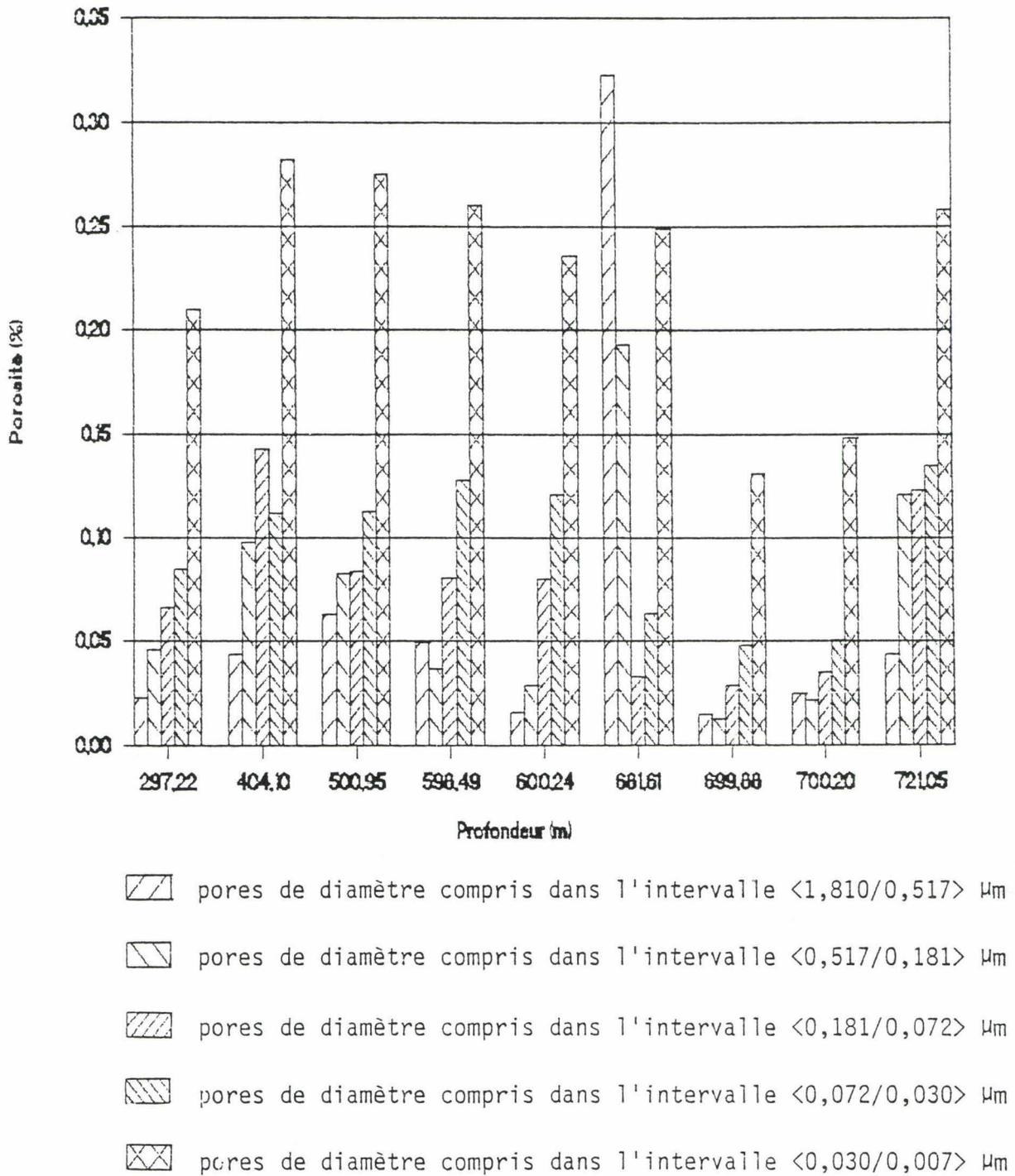


Figure 69 -Distribution de la porosité pour les échantillons de granite prélevés entre 297,22 m et 721,05 m

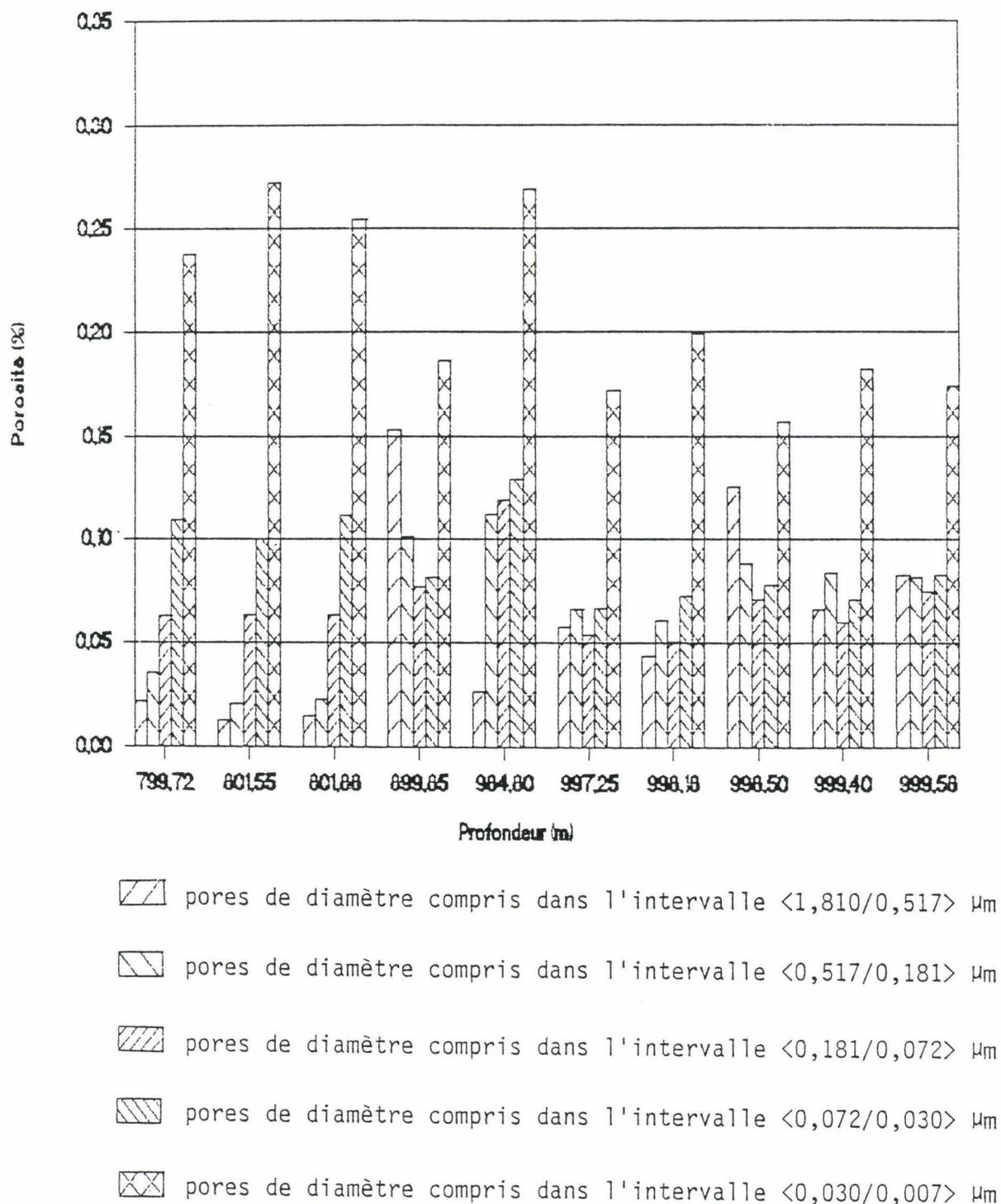


Figure 70 -Distribution de la porosité pour les échantillons de granite prélevés entre 799,72 m et 999,58 m

4.3.3 Quantification de la microfissuration du granite d'Auriat en fonction de la profondeur du prélèvement

4.3.3.1 Conditions opératoires

Le mode opératoire suivi pour l'imprégnation des échantillons de granite a déjà été décrit par ailleurs.

Le forage de 1000 mètres ayant été préalablement orienté (traits de repère sur les carottes), les lames minces ont été réalisées perpendiculairement à l'axe de carottage selon l'orientation des échantillons au sein de la matrice. Cette orientation est donnée par le tracé de deux repères sur les carottes au moment de leur prélèvement (figure 71). L'orientation des fissures dans le repère ainsi défini est comprise entre -90° et $+90^\circ$. L'analyse des lames minces a été effectuée par microscopie optique associée au système de digitalisation sus-décrit. L'étude a porté sur 3 lames (soit une surface totale de 12 cm^2) pour chaque profondeur de prélèvement.

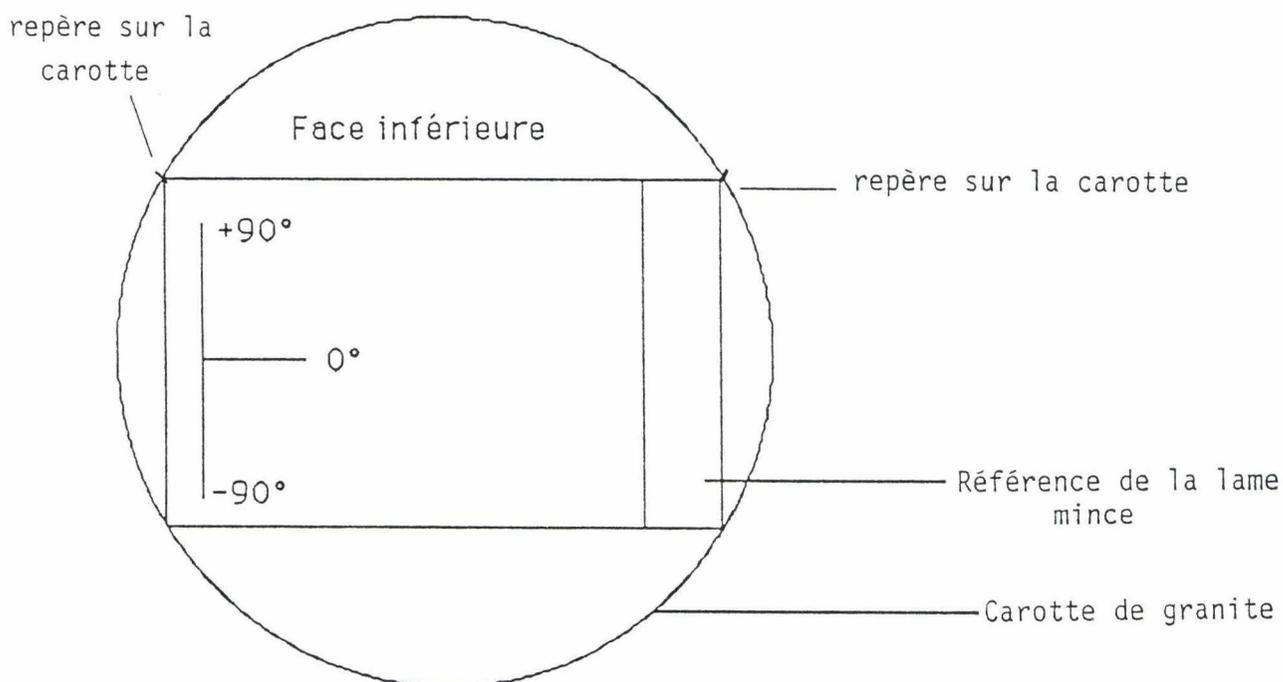


Figure 71 - Schéma d'une lame mince réalisée dans une carotte de granite issue du forage de 1000 mètres de profondeur

4.3.3.2 Premières constatations sur les résultats de l'analyse optique

Les tableaux 19 et 20 présentent les différentes valeurs des paramètres quantifiés pour chaque prélèvement et les tableaux 21 et 22 présentent les valeurs des longueurs et des largeurs moyennes des fissures pour chaque prélèvement en fonction des phases minérales adjacentes. Il apparaît à travers ce grand nombre de mesures que le phénomène de fissuration des granites n'évolue pas de façon monotone avec la profondeur de prélèvement des échantillons. On constate, en particulier sur les tableaux 21 et 22 où l'on a reporté la longueur et la largeur moyenne des fissures en fonction des phases minérales adjacentes, que:

- les fissures adjacentes à la biotite ont la largeur qui est généralement la plus forte par rapport aux autres phases, quelle que soit la profondeur de prélèvement des échantillons (cotes 404,10 m - 500,95 m - 700,20 m - 799,72 m - 801,55 m - 984,80 m - 999,40 m). On constate par ailleurs, à l'observation des lames, que les fissures ont une orientation parallèle aux feuillets de ce minéral;

- les fissures adjacentes au quartz ont la longueur la plus faible par rapport aux autres phases, quelque soit la profondeur de prélèvement;

- les fissures adjacentes au feldspath potassique et au quartz pris dans leur ensemble ont une largeur moyenne plus faible que celles adjacentes au plagioclase.

On constate enfin que pour l'échantillon prélevé à 899,85 m, les fissures ont la longueur la plus grande quelle que soit la phase minérale rencontrée. Ce résultat est en accord avec le résultat du tableau 20 où on remarque que la longueur moyenne des fissures est maximale pour ce prélèvement.

La figure 72 reprend le nombre de fissures par cm^2 pour les différents prélèvements. On remarque que celui-ci suit une évolution avec un minimum pour le prélèvement effectué à 700,20 m et un maximum pour le prélèvement effectué à 984,80 m. Les figures 73 à 84 sont les représentations graphiques de l'évolution des différents paramètres quantifiés.

L'orientation des fissures a été déterminée dans le plan d'observation de la lame mince pour chacun des prélèvements. Les figures 85 à 95 représentent les histogrammes des orientations des fissures pour les 11 échantillons étudiés. Exception faite des prélèvements effectués à 700,20 m, 799,72 m et 801,55 m, l'orientation préférentielle des fissures est sur tous nos échantillons comprise entre -10° et $+20^\circ$ dans le repère des lames, soit une déviation comprise entre 80° Nord et 110° Nord dans le repère cardinal.

**Tableau 19 - Résultats de quantification de la fissuration des échantillons de granite prélevés
entre 297,22 m et 999,40 m**

ECHANTILLON	297,22m	404,10m	500,95m	600,24m	700,20m	799,72m	801,55m	899,85m	984,80	998,18m	999,40m
nombre de fissures par cm ²	46	47	46	38	15	29	59	80	118	31	46
surface de fissures (% surface totale)	0,23	0,23	0,18	0,11	0,07	0,09	0,10	0,58	0,26	0,07	0,16
surface moyenne des fissures (mm ²)	0,0050	0,0049	0,0038	0,0029	0,0048	0,0030	0,0017	0,0072	0,0021	0,0021	0,0034
périmètre moyen des fissures (mm)	1,13	0,73	0,81	0,73	1,32	0,67	0,46	1,45	0,35	0,67	0,65
longueur moyenne des fissures (mm)	0,56	0,35	0,39	0,36	0,65	0,32	0,22	0,72	0,16	0,32	0,31
largeur moyenne des fissures (µm)	9,5	11,7	10,4	10	6,7	9,9	10,1	10,1	13,3	8,3	10,7
fissures adjacentes à la biotite (%)	3	5	1	2	3	11	7	9	7	7	5
fissures adjacentes au feldspath K (%)	28	31	31	50	73	22	29	28	19	36	24
fissures adjacentes au plagioclase (%)	45	48	37	18	18	45	25	51	24	25	50
fissures adjacentes au quartz (%)	39	30	43	48	19	46	60	50	80	49	44
fissures intra-granulaires (%)	79	80	81	71	83	77	67	62	62	76	69
fissures inter-granulaires (%)	14	16	14	25	9	15	27	16	27	18	22
fissures intra et intergranulaires (%)	7	4	5	4	8	8	6	22	11	6	9

Tableau 20 - Importance relative de la porosité vis à vis de la microfissuration dans les granites

Profondeur (m)	Porosité (%)	Surface de fissures % surface totale	Importance relative
297,22	0,44	0,23	1,9
404,10	0,70	0,23	3,0
500,95	0,64	0,18	3,5
600,24	0,50	0,11	4,5
700,20	0,29	0,07	4,1
799,72	0,48	0,09	5,3
801,55	0,50	0,10	5,0
899,85	0,61	0,58	1,1
984,80	0,67	0,26	2,6
998,18	0,44	0,07	6,3
999,40	0,48	0,16	3,0

Tableau 21 - Caractéristiques dimensionnelles des fissures adjacentes aux différentes phases des échantillons de granite prélevés entre 297,22 m et 799,72 m

ECHANTILLON		297,22 m	404,10 m	599,95 m	600,24 m	700,20 m	799,72 m
fissures adjacentes à la biotite	longueur moyenne (mm)	0,15	0,28	0,25	0,37	0,76	0,60
	largeur moyenne (μm)	9,2	14,0	15,0	9,2	9,7	14,5
fissures adjacentes au feldspath K	longueur moyenne (mm)	0,81	0,46	0,58	0,37	0,70	0,46
	largeur moyenne (μm)	6,8	11,2	10,0	9,5	7,0	8,7
fissures adjacentes au plagioclase	longueur moyenne (mm)	0,67	0,45	0,42	0,70	0,64	0,40
	largeur moyenne (μm)	10,9	12,9	10,8	9,4	6,1	10,0
fissures adjacentes au quartz	longueur moyenne (mm)	0,59	0,27	0,32	0,31	0,54	0,40
	largeur moyenne (μm)	9,4	9,8	10,3	10,3	7,4	8,8

Tableau 22 - Caractéristiques dimensionnelles des fissures adjacentes aux différentes phases des échantillons de granite prélevés entre 801,55 m et 999,40 m

ECHANTILLON		801,55 m	899,85 m	984,80 m	998,18 m	999,40 m
fissures adjacentes à la biotite	longueur moyenne (mm)	0,25	1,51	0,15	0,33	0,43
	largeur moyenne (μm)	12,1	10,0	15,8	8,2	13,0
fissures adjacentes au feldspath K	longueur moyenne (mm)	0,39	0,94	0,17	0,46	0,37
	largeur moyenne (μm)	11,1	9,7	14,2	7,5	9,9
fissures adjacentes au plagioclase	longueur moyenne (mm)	0,31	0,95	0,19	0,62	0,34
	largeur moyenne (μm)	9,4	10,4	15,1	7,6	11,2
fissures adjacentes au quartz	longueur moyenne (mm)	0,16	0,85	0,15	0,16	0,33
	largeur moyenne (μm)	9,2	10,1	12,6	9,1	9,5

4.3.4 Interprétation des résultats et conclusion

Dans un premier temps, nous rappellerons les éléments structuraux et pétrographiques issus des rapports B.R.G.M. (1981), LECA D.(1990), LECA D. et al.(1990), et les résultats des études de microfissuration et de porosité pour chaque échantillon analysé.

Dans un deuxième temps, nous tenterons de corréliser les résultats de porosités (fortes ou faibles), avec les caractéristiques des prélèvements. Nous effectuerons ensuite le même travail concernant les résultats de la microfissuration.

4.3.4.1 Caractères généraux des prélèvements et premier examen des différents résultats

- Echantillon prélevé à 297,22 mètres

Il s'agit d'un monzogranite porphyroïde à fond largement grenu et à phénocristaux blancs (granite de type G1), peu fracturé. Cet échantillon se caractérise par une porosité moyenne (0,44%). Il présente une assez forte valeur du pourcentage des surfaces cumulées des fissures (0,23%) ; celles-ci sont longues (0,56 mm en moyenne).

- Echantillon prélevé à 404,10 mètres

Granite de type G1 à filons de quartz et d'aplite. La zone de prélèvement présente d'importantes fractures subhorizontales qui ont a priori peu d'influence sur l'altération : en effet, on ne note pas d'influence sur la coloration des minéraux en présence. Cet échantillon se distingue cependant du précédent par une porosité plus élevée (0,70%) et par une augmentation systématique de la porosité correspondant aux différentes classes de pores. Il présente une forte valeur du pourcentage des surfaces cumulées des fissures (0,23%) ; celles-ci ont une largeur moyenne importante (11,7 μm).

- Echantillon prélevé à 500,95 mètres

Granite de type G1 à l'aspect "délavé". L'échantillon a été prélevé dans une zone précédant un joint primaire. Sa porosité est élevée (0,64%). On ne note pas d'évolution particulière de la porosité pour les différentes classes de pores. L'étude de la microfissuration révèle une forte largeur moyenne des fissures de 10,4 μm et une forte longueur moyenne de 0,39 mm .

- Echantillon prélevé à 598,49 mètres

Il s'agit d'un monzogranite plus ou moins porphyrique à fond microgrenu (granite de type G2). Les minéraux constitutifs sont petits mais visibles. La zone de prélèvement présente une fracturation subverticale colmatée d'une épaisseur variant de 1 à 3 mm. Cet échantillon présente une porosité de 0,57%. L'histogramme des porosités pour les différentes classes de pores fait apparaître une diminution de la porosité développée pour plusieurs classes. L'échantillon n'a pas fait l'objet d'une étude de la microfissuration.

- Echantillon prélevé à 600,24 mètres

Granite de type G1. Zone de prélèvement moyennement fracturée. La porosité est du même ordre que celle de la cote précédente. Les dimensions des fissures observées sont moyennes.

nombre de fissures
par cm²

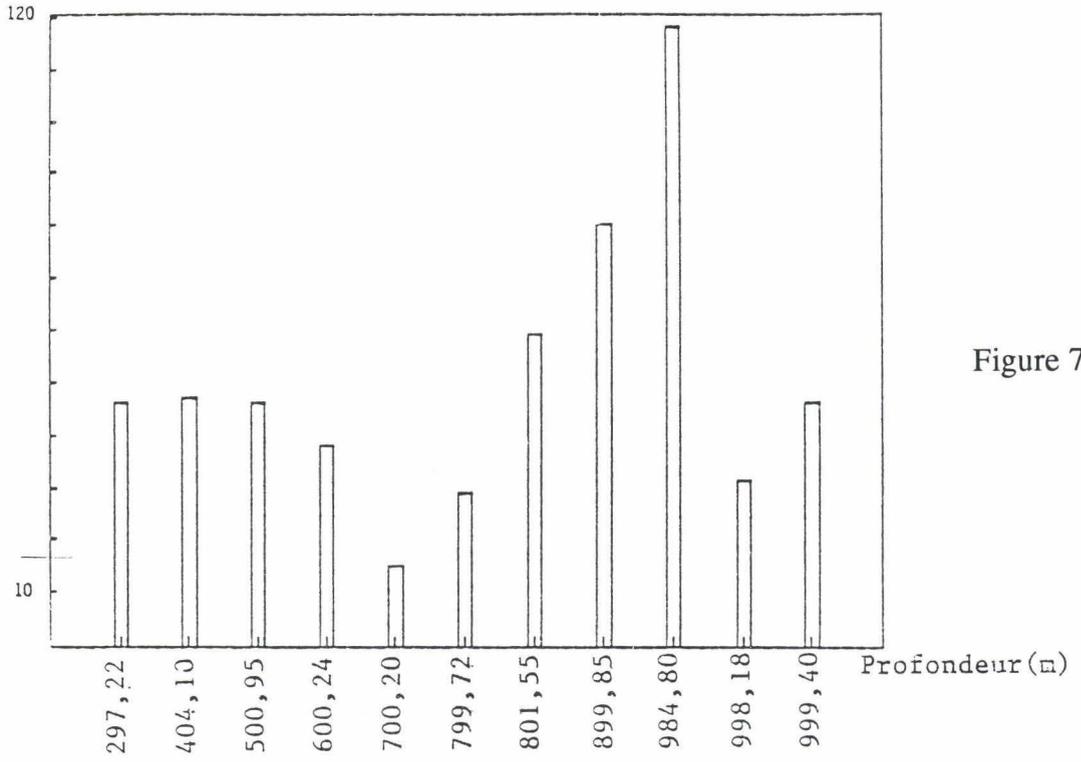


Figure 72

pourcentage de la
surface occupée
par les fissures

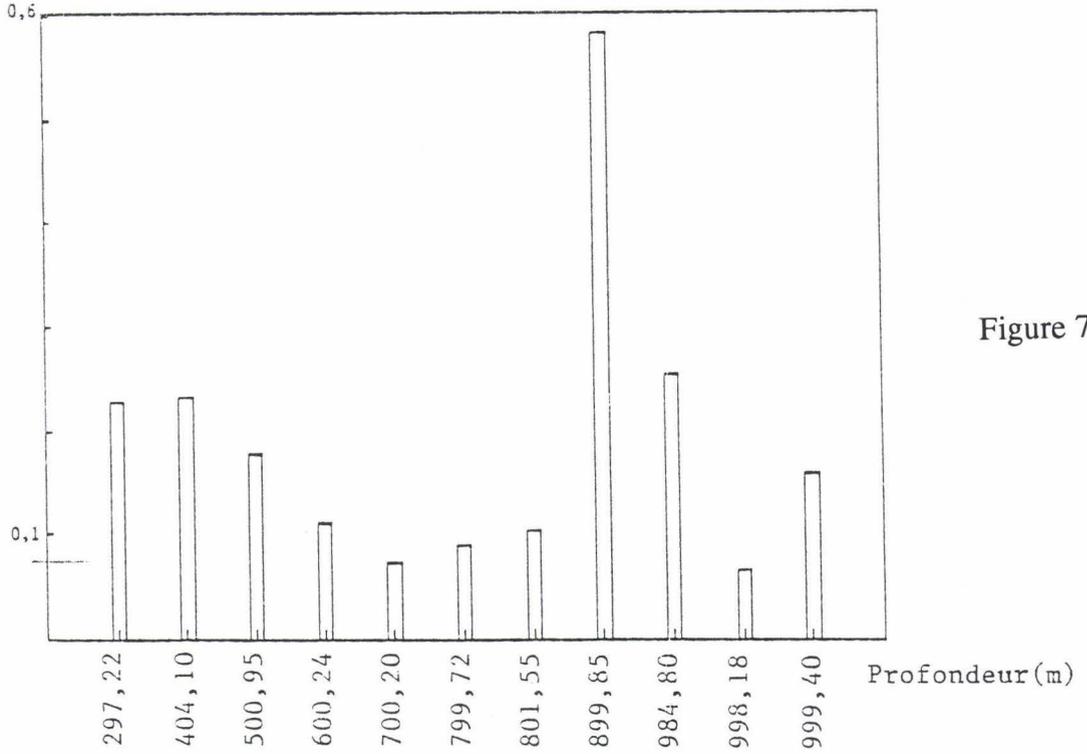


Figure 73

Figures 72 à 84 - Evolution des différents paramètres de quantification de la microfissuration des échantillons prélevés à différentes profondeurs

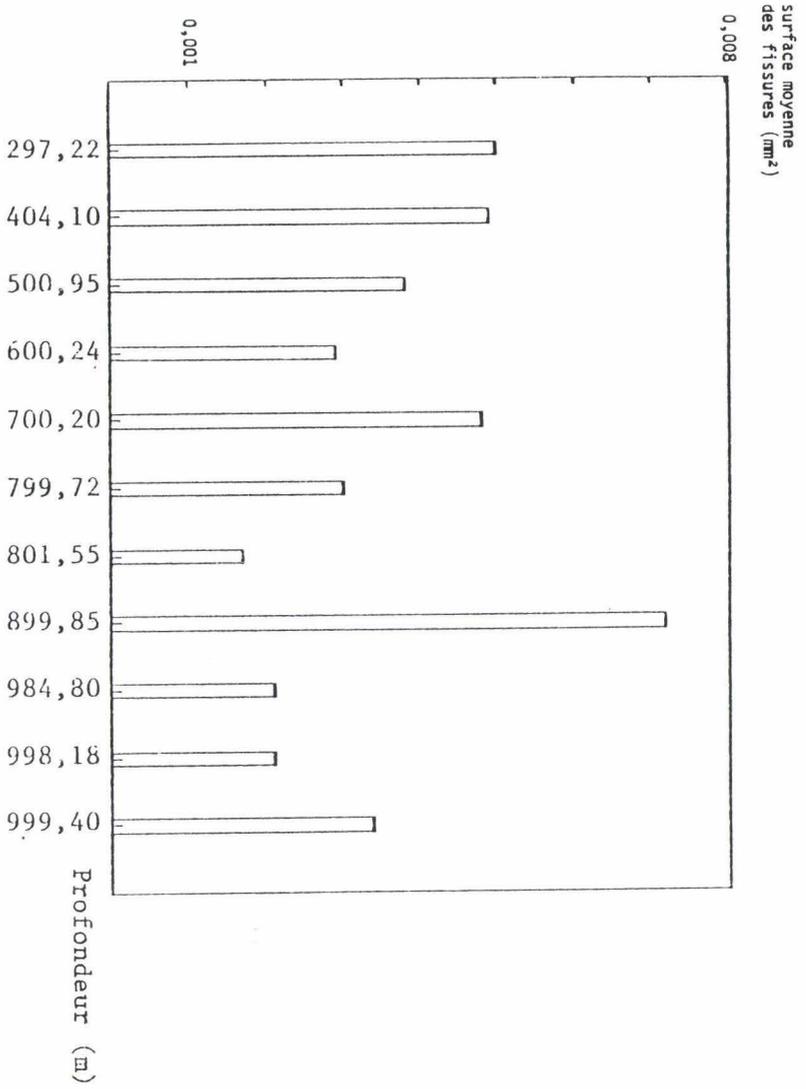


Figure 74

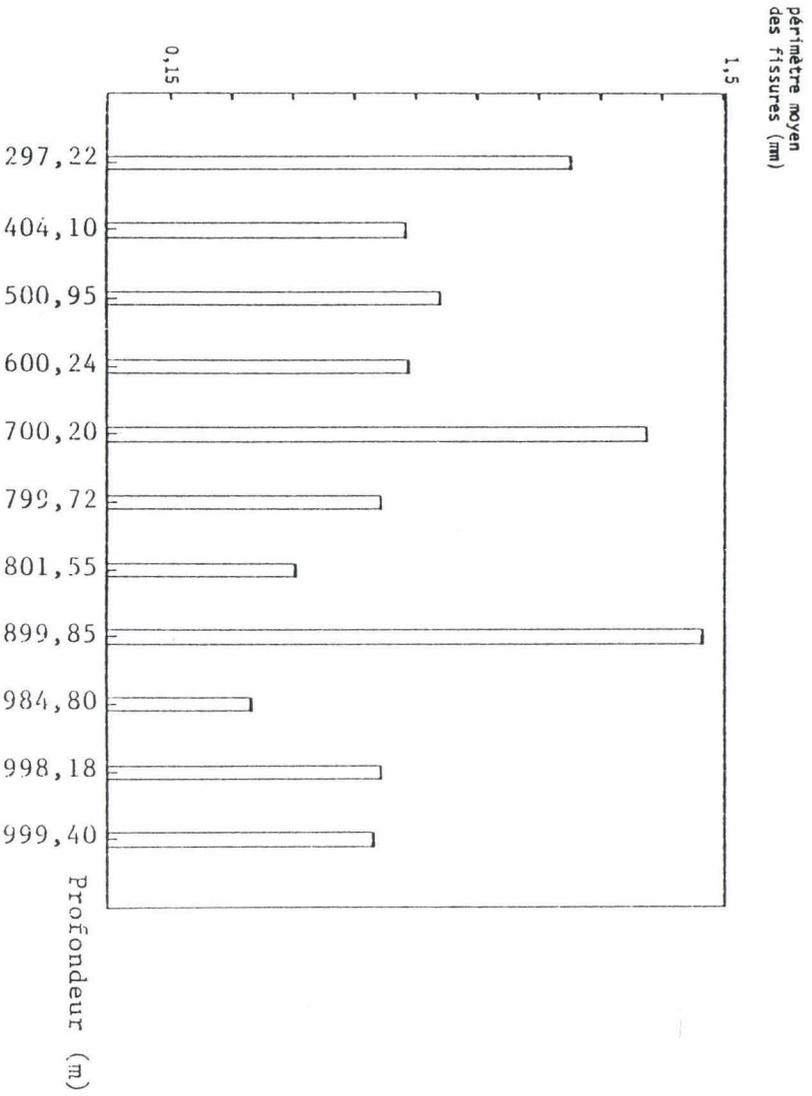


Figure 75

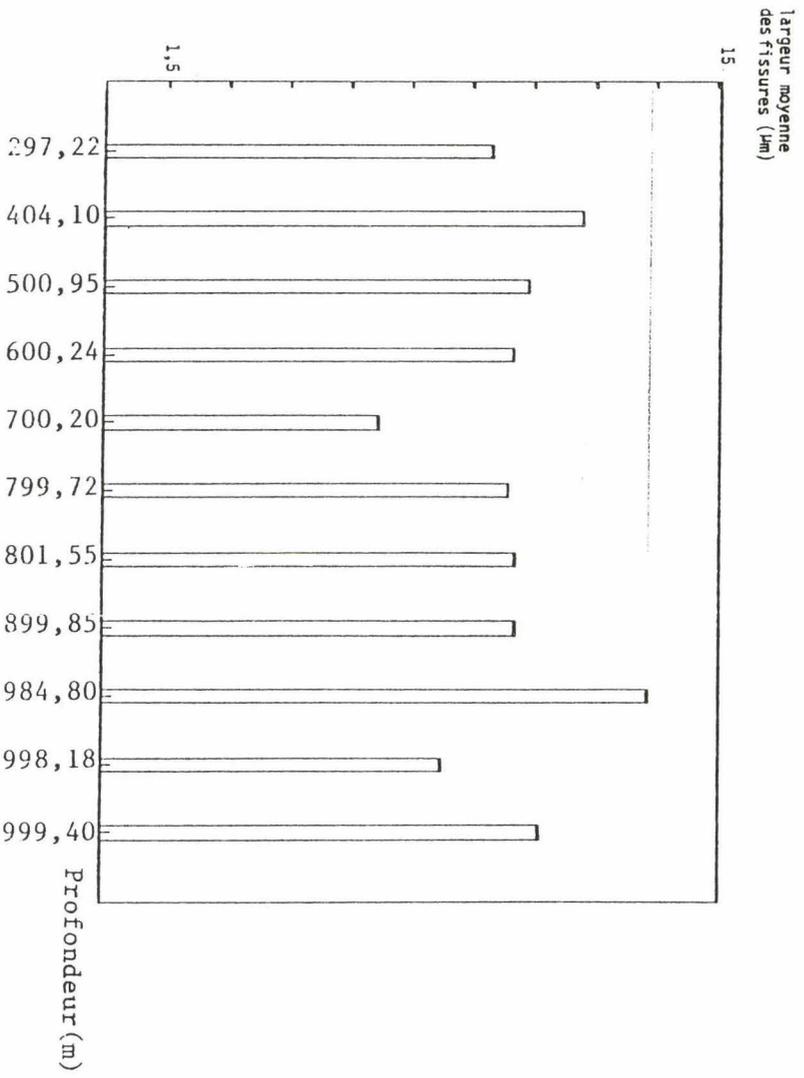


Figure 76

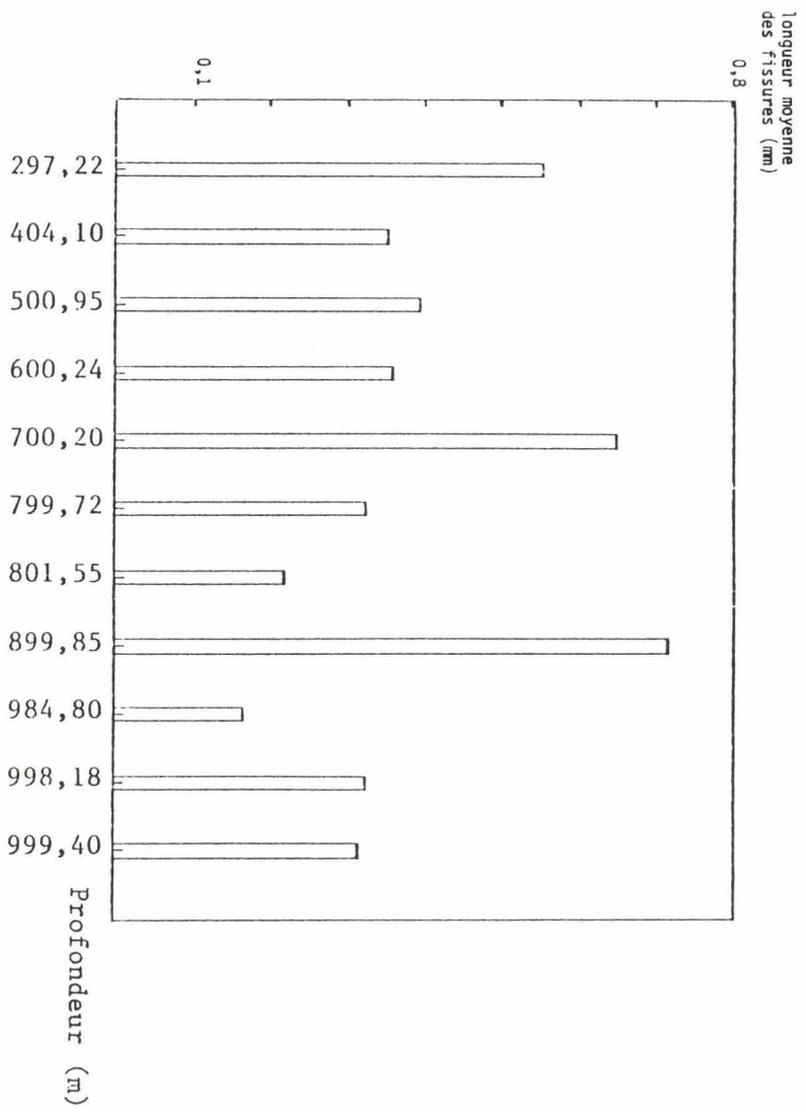


Figure 77

pourcentage des fissures adjacentes à une biotite

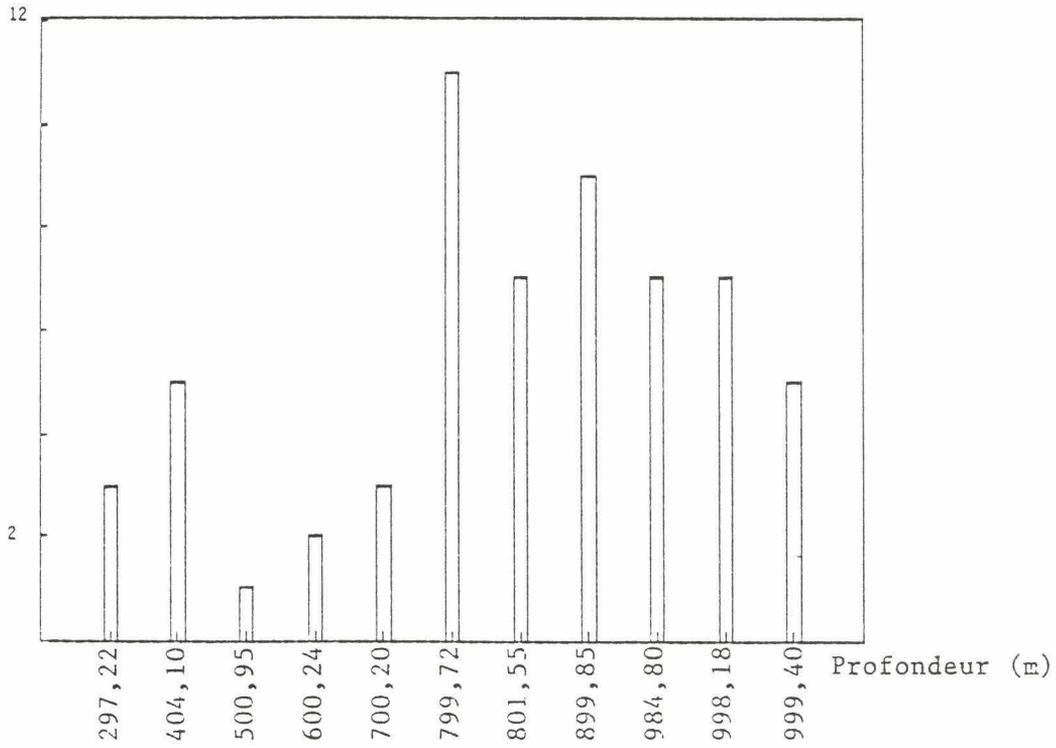


Figure 78

pourcentage des fissures adjacentes à un feldspath K

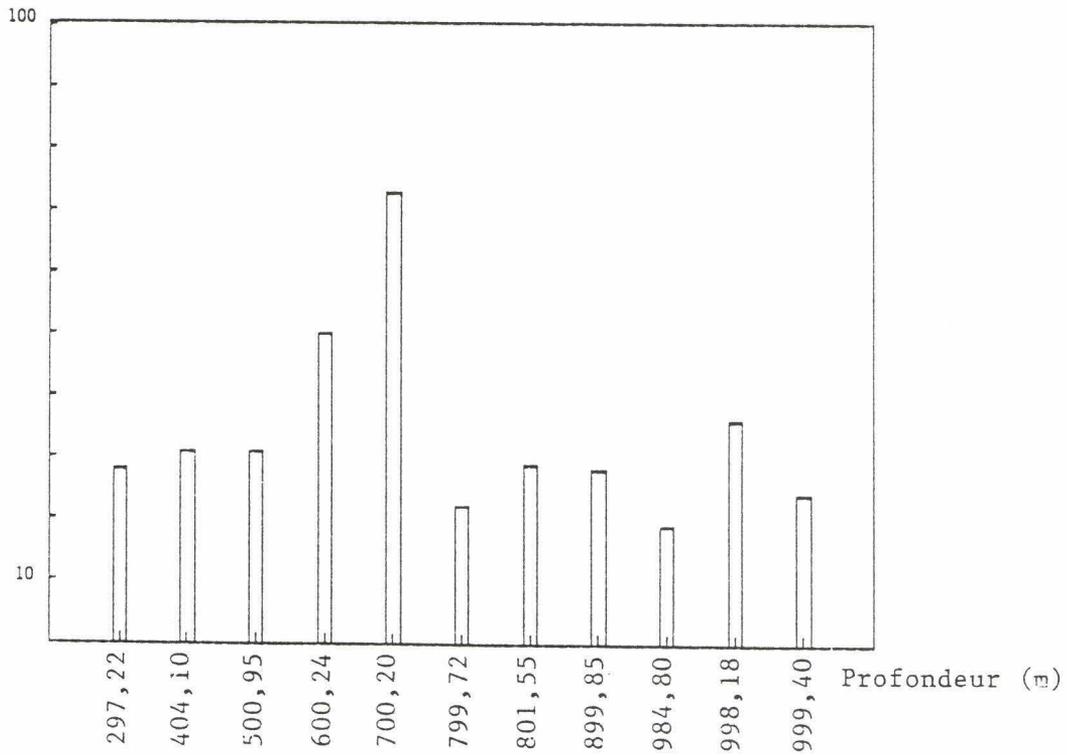


Figure 79

pourcentage des fissures
adjacentes à un plagioclase

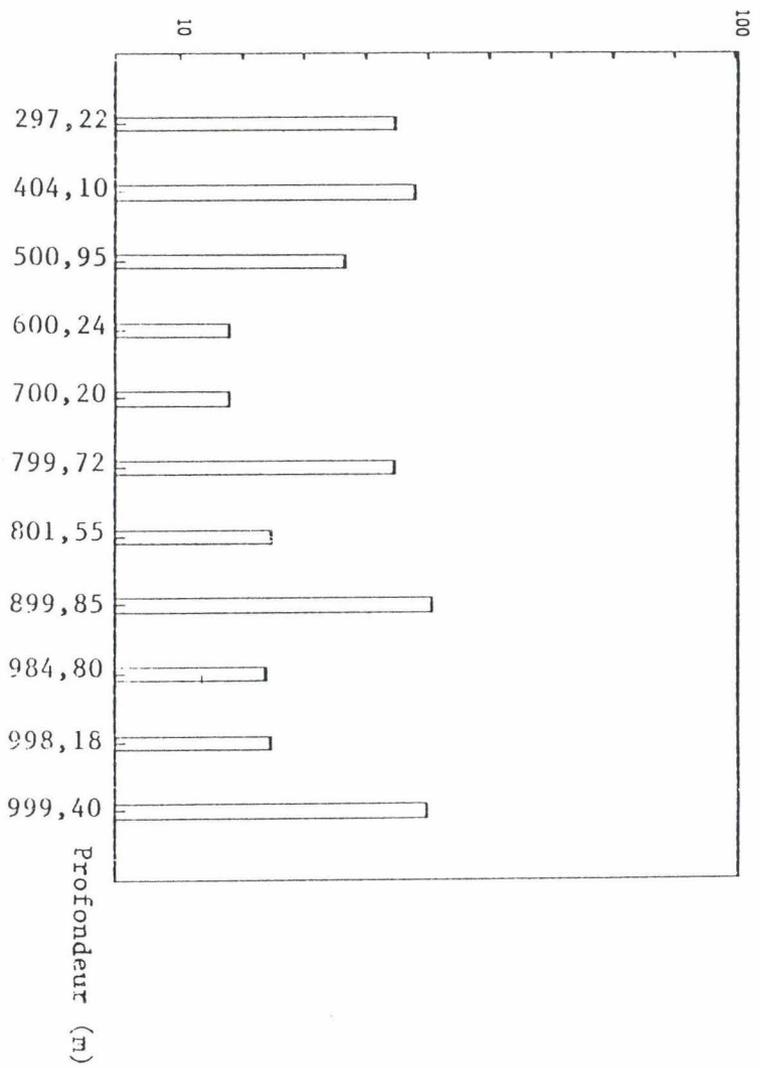


Figure 80

pourcentage des fissures
adjacentes à un quartz

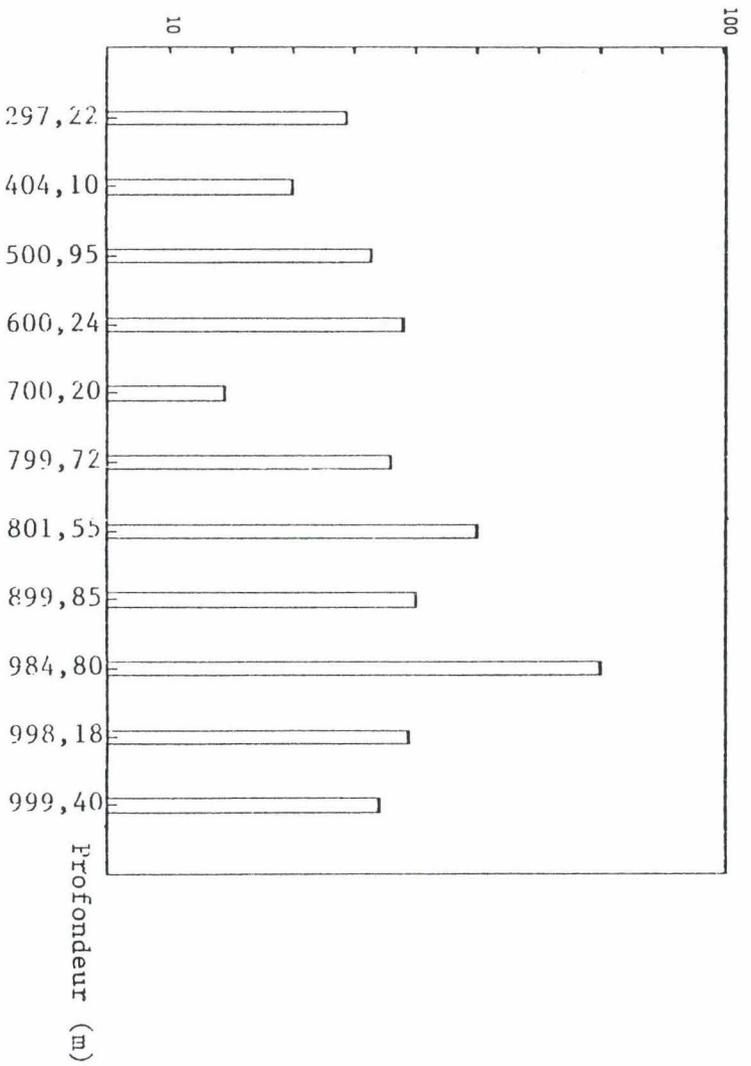


Figure 81

pourcentage des fissures
intragranulaires

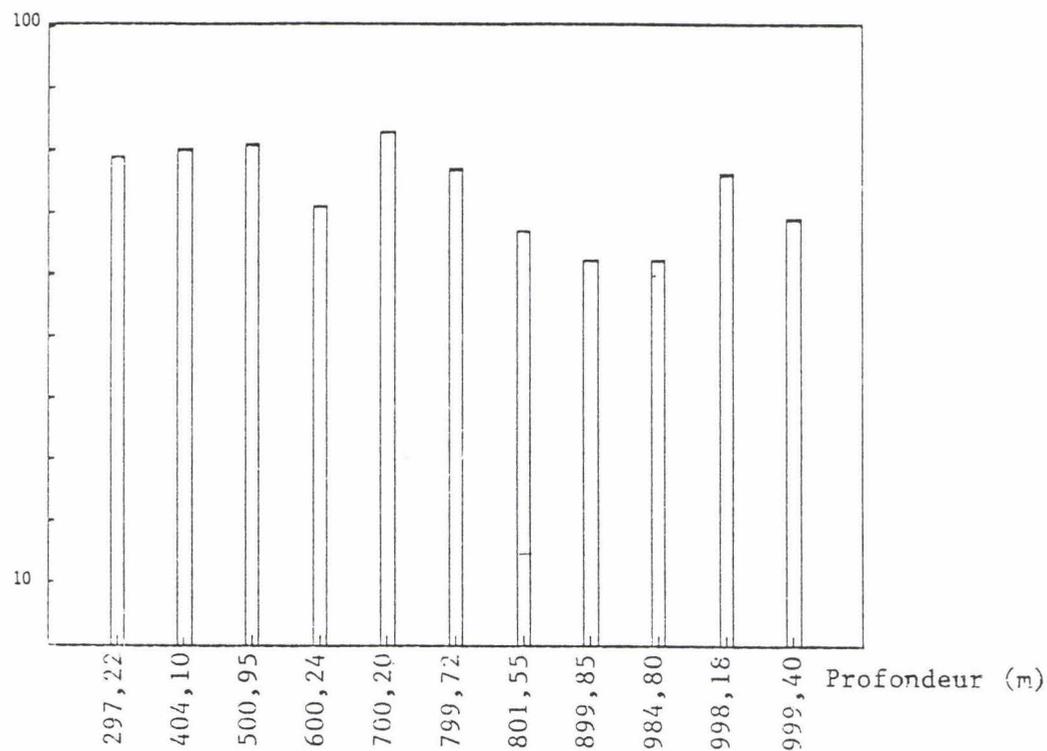


Figure 82

pourcentage des fissures
intergranulaires

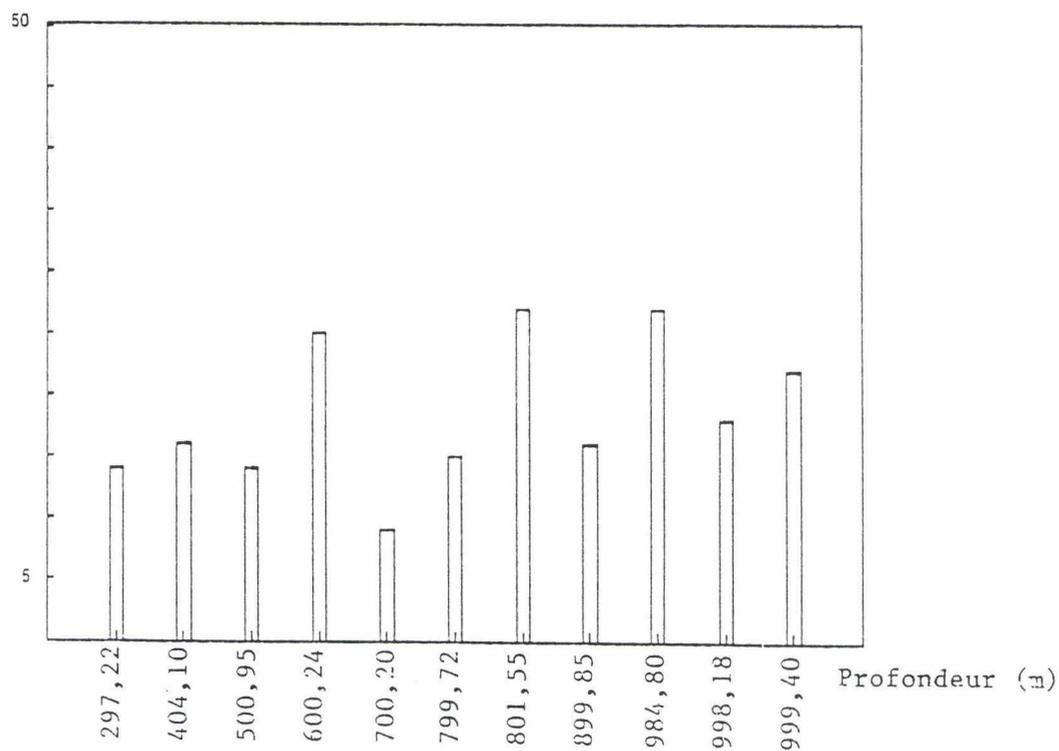


Figure 83

pourcentage des fissures
intra et intergranulaires

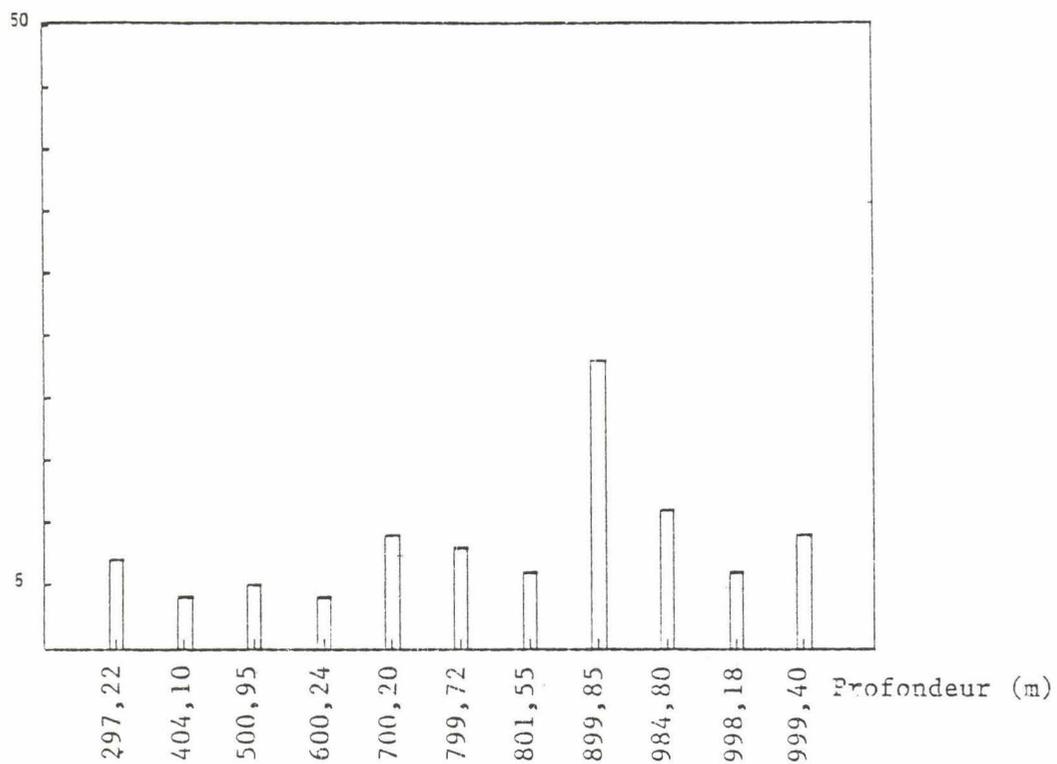


Figure 84

NOMBRE DE FISSURES 50

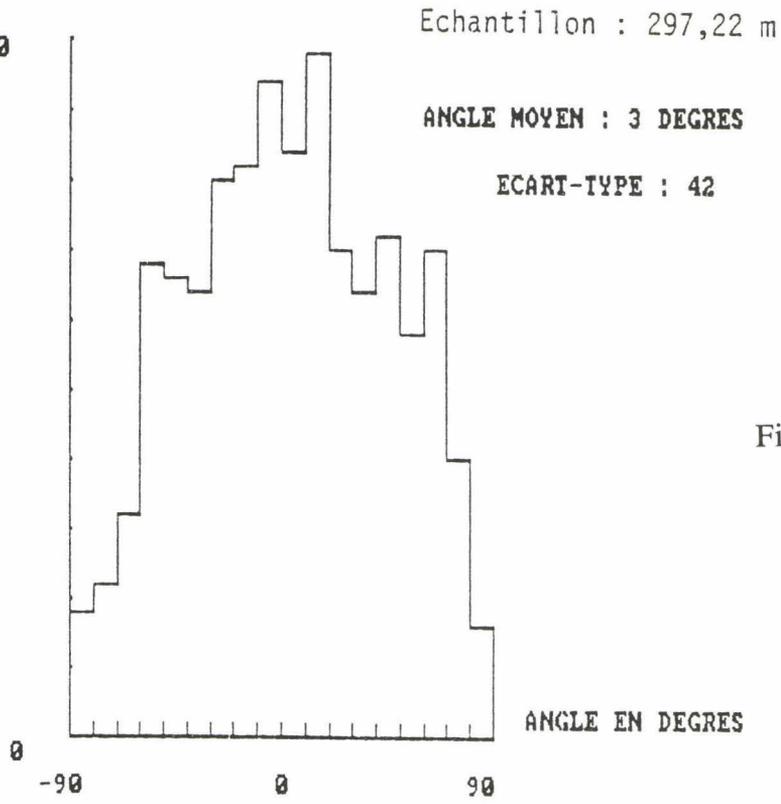


Figure 85

NOMBRE DE FISSURES 70

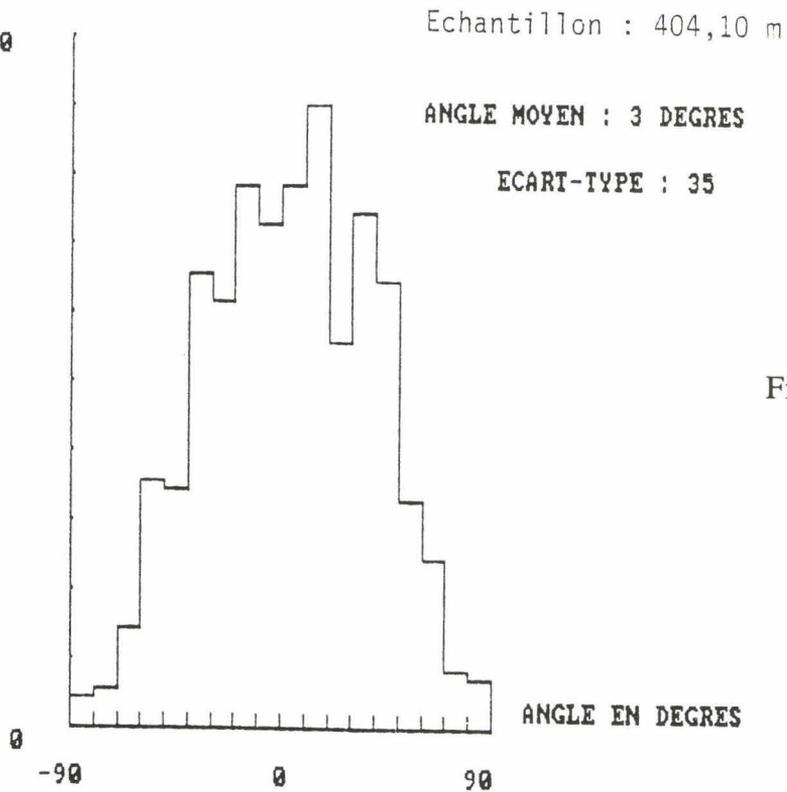


Figure 86

Figures 85 à 95 - Histogrammes des orientations des fissures dans le plan d'observation des lames minces des échantillons de granite prélevés à différentes profondeurs

NOMBRE DE FISSURES 60

Echantillon : 500,95 m

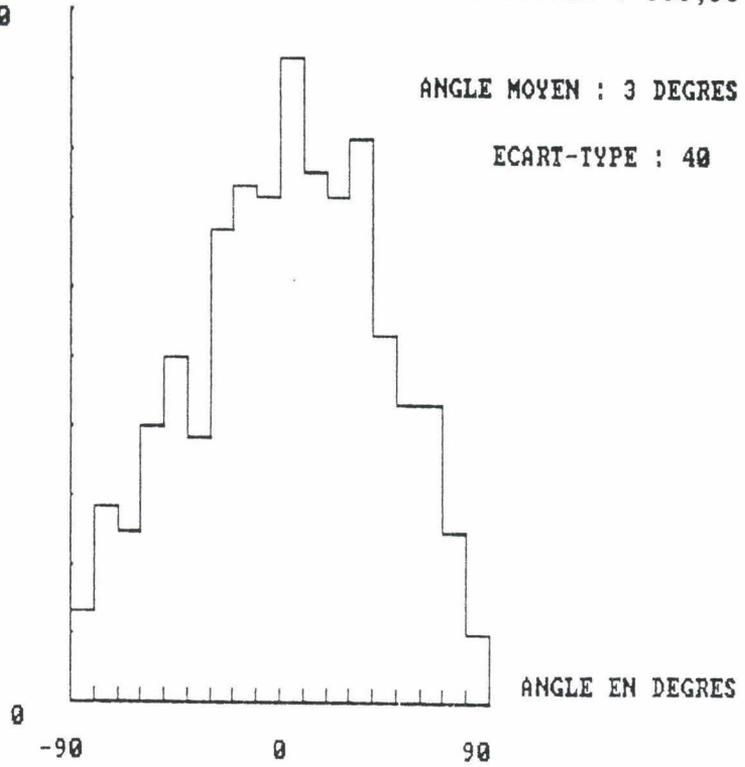


Figure 87

NOMBRE DE FISSURES 60

Echantillon : 600,24 m

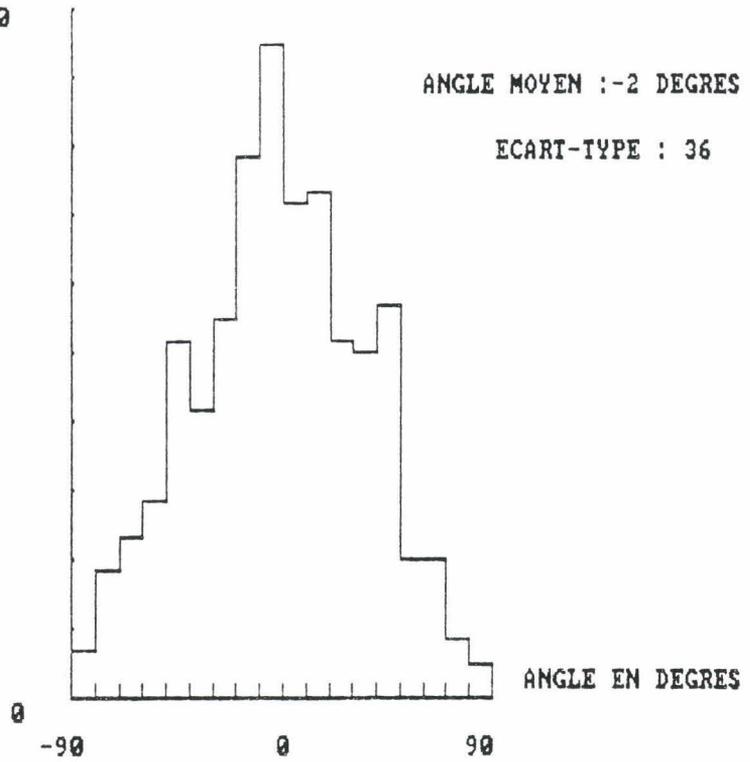


Figure 88

Echantillon : 700,20 m

NOMBRE DE FISSURES 30

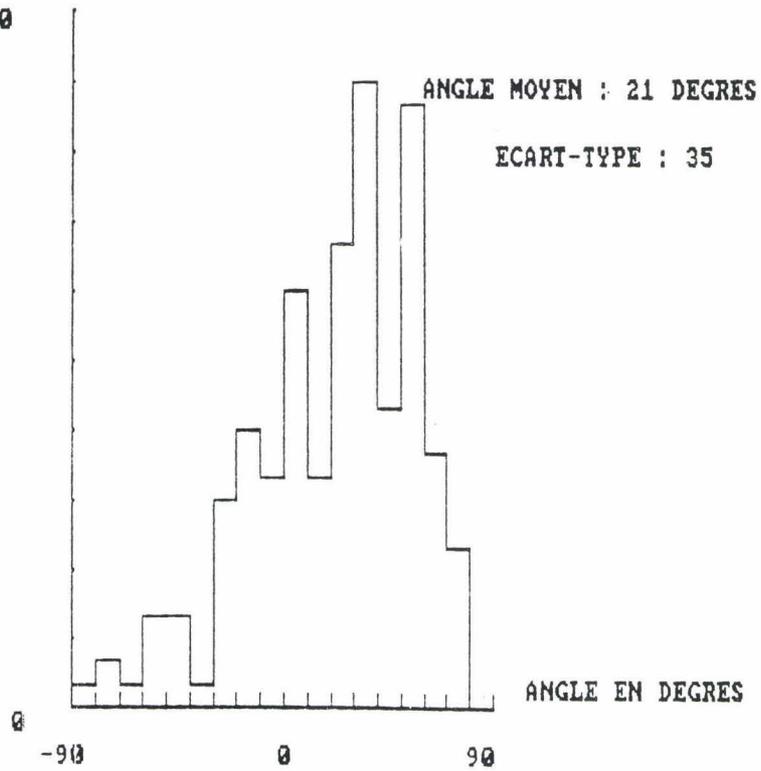


Figure 89

Echantillon : 799,72 m

NOMBRE DE FISSURES 50

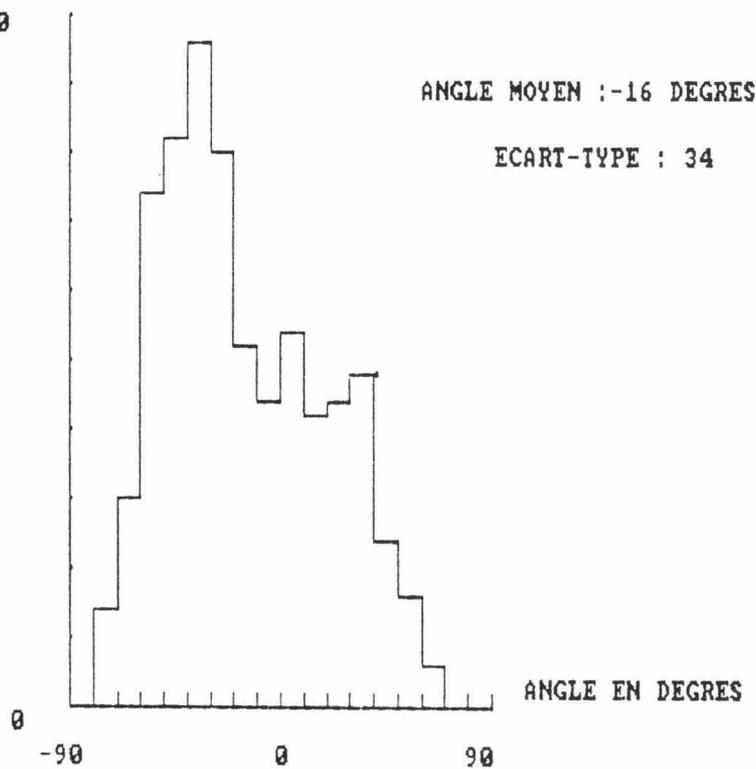


Figure 90

NOMBRE DE FISSURES 80

Echantillon : 801,55 m

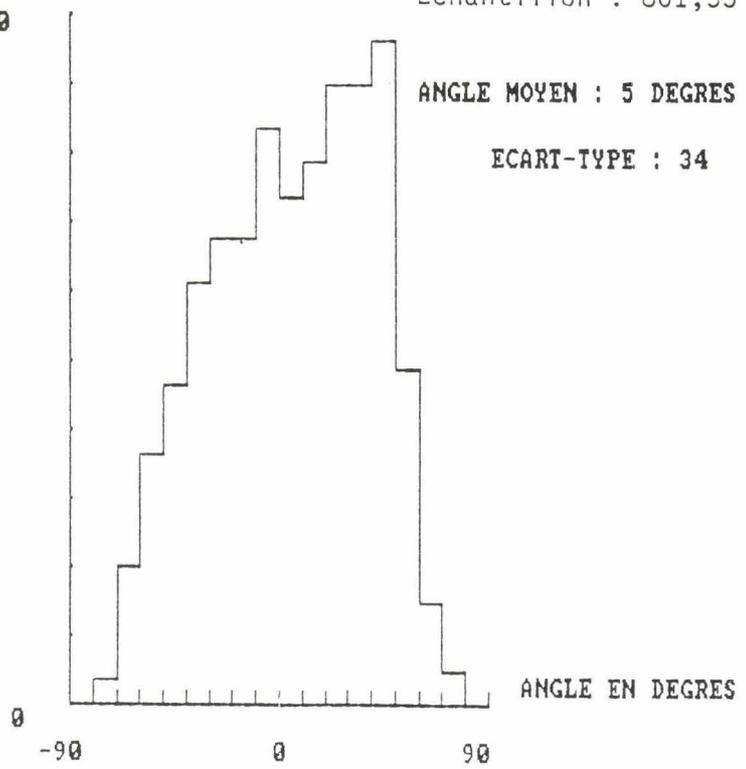


Figure 91

NOMBRE DE FISSURES 120

Echantillon : 899,85 m

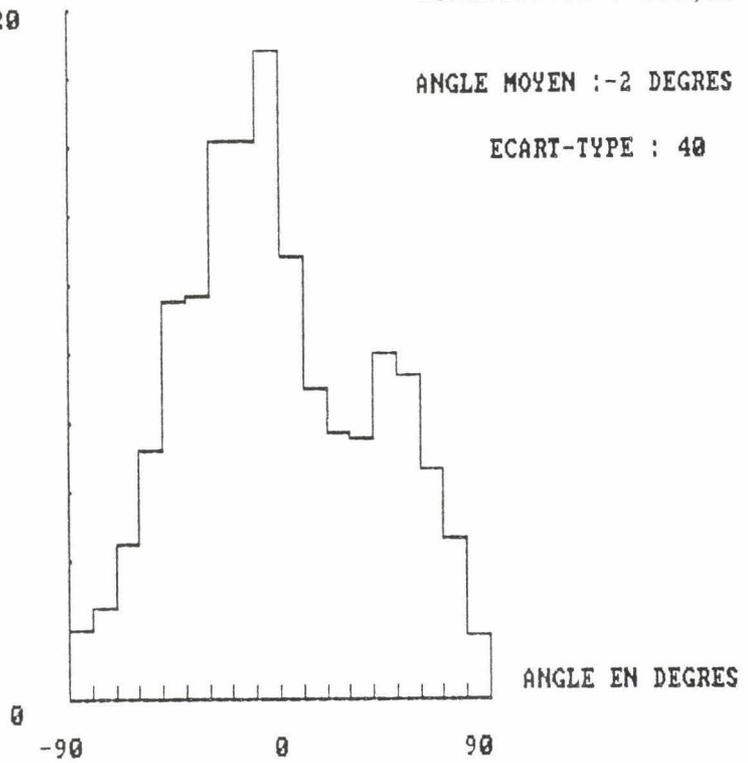


Figure 92

NOMBRE DE FISSURES 180

Echantillon : 984,80 m

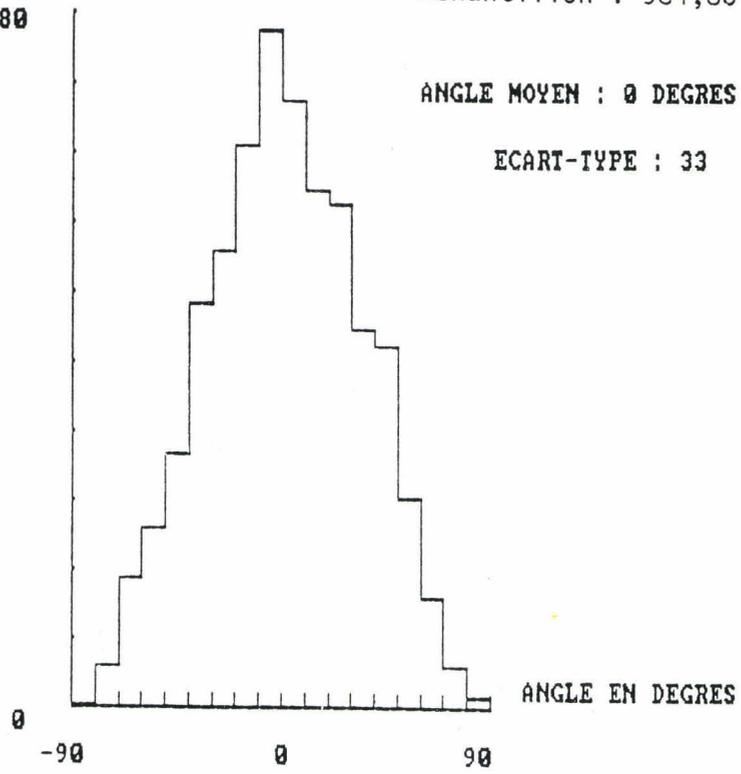


Figure 93

NOMBRE DE FISSURES 40

Echantillon : 998,18 m

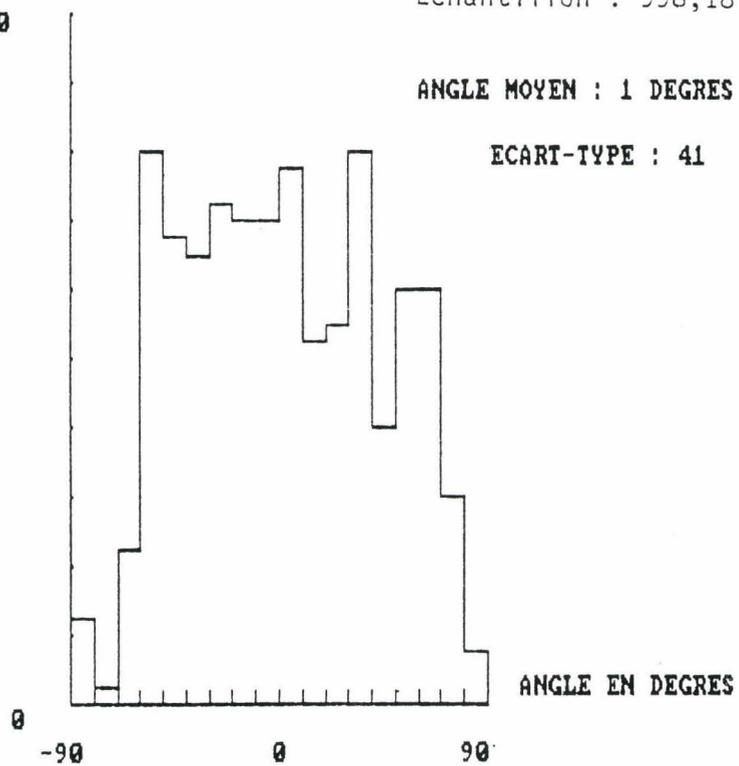


Figure 94

Echantillon : 999,40 m

NOMBRE DE FISSURES 90

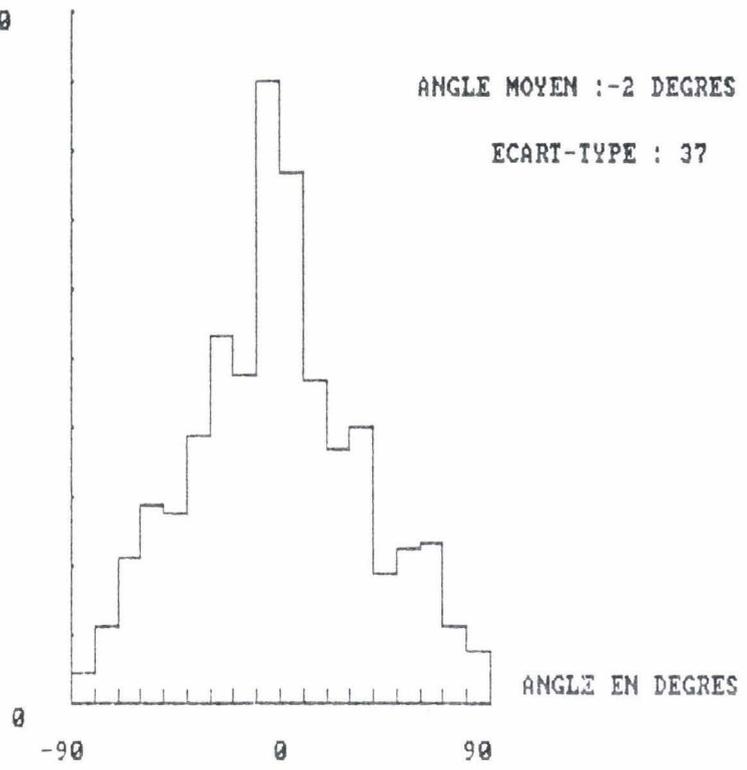


Figure 95

- Echantillon prélevé à 681,61 mètres

Granite de type G1 de teinte dominante rose orangée. La zone de prélèvement est moyennement fracturée (5 fractures par mètre) et précède de 20 cm une zone cataclasée (zone dans laquelle les grains minéraux ont subi une réduction mécanique). La porosité atteint la valeur maximale de 0,88%. On remarque que la porosité est particulièrement importante pour les pores de diamètre compris entre 1,81 μm et 0,181 μm . Cet échantillon n'a pas fait l'objet d'une étude de la microfissuration.

- Echantillons prélevés à 699,88 mètres et 700,20 mètres

Granite de type G1. Zone de prélèvement cataclasée, moyennement fracturée (4 à 5 fractures par mètre). L'observation des lames minces montre une très importante chloritisation de la biotite. L'analyse porosimétrique de l'échantillon prélevé à 700,20 mètres donne des résultats analogues à ceux de l'échantillon prélevé à 699,88 mètres. Ces échantillons se distinguent par une porosité faible (respectivement 0,24% et 0,29%). Cette diminution de la porosité par rapport aux prélèvements précédents affecte toutes les classes de pores. Aucune quantification de la microfissuration n'a été faite sur l'échantillon prélevé à 699,88 mètres. L'analyse de la microfissuration de l'échantillon prélevé à 700,20 mètres révèle une très faible valeur du pourcentage de surfaces cumulées (0,07%). Les fissures observées sont particulièrement longues, étroites et adjacentes à 73% au feldspath potassique. Contrairement aux autres échantillons, on note une double orientation préférentielle comprise entre +30° et +60°.

- Echantillon prélevé à 721,05 mètres

Granite de type G2 altéré en "bouillie". La porosité atteint la valeur de 0,69%. La porosité développée par les pores de diamètre compris entre 0,517 μm et 0,181 μm est élevée. Cet échantillon n'a pas fait l'objet d'une quantification de la microfissuration.

- Echantillon prélevé à 799,72 mètres

Granite de type G2. Zone de prélèvement à importante fracturation subverticale. L'observation des lames minces révèle une forte chloritisation de la biotite et la présence de grandes fissures comblées par des carbonates. La porosité est de 0,48%. Le pourcentage des surfaces cumulées reste faible (0,09%). La longueur et la largeur des fissures sont moyennes. On note une orientation préférentielle de ces fissures comprise entre -30° et -40°, soit une déviation comprise entre 50° Nord et 60° Nord dans un repère cardinal.

- Echantillons prélevés à 801,55 mètres et 801,88 mètres

Granite de mêmes caractéristiques pétrographiques que le prélèvement précédent. Ces deux échantillons développent une porosité globale de 0,48% et 0,50% et présentent des

distributions de la porosité par classe de pores semblables. La quantification optique de la microfissuration de l'échantillon prélevé à 801,55 mètres révèle une surface cumulée des fissures faible (0,10% de la surface d'étude). On note une orientation préférentielle des fissures entre +40° et +50°, soit une déviation comprise entre 130° Nord et 140° Nord dans un repère cardinal.

- Echantillon prélevé à 899,85 mètres

Ce granite de type G1 présentant une forte chloritisation de la biotite a été prélevé au niveau d'un joint primaire et d'une enclave de microgranodiorite. La zone présente des fissures colmatées subhorizontales et à 45°. La porosité de ce granite est relativement forte (0,61%). Contrairement à la plupart des autres échantillons, les classes de pores de diamètre compris entre 1,81 μm et 0,181 μm sont prépondérantes. De même, l'échantillon atteint le maximum du pourcentage des surfaces cumulées des fissures (0,58%). Celles-ci sont longues (0,72 mm en moyenne). Notons que cet échantillon présente le plus fort pourcentage de fissures à la fois intra et intergranulaires (23%).

- Echantillon prélevé à 984,80 mètres

Granite de type G2 prélevé dans une zone fortement fissurée avec une chloritisation massive de la biotite et une altération marquée du plagioclase. Cet échantillon présente une forte porosité (0,67%). Les pores de diamètre compris entre 0,517 μm et 0,181 μm représentent un pourcentage important de la porosité totale. L'analyse optique révèle une importante surface fissurale. Les fissures sont courtes (longueur moyenne de 0,16 mm) et larges (largeur moyenne de 13,3 μm).

- Echantillons prélevés à 997,25 mètres et 998,18 mètres

Granite de type G1 à filons d'aplite issu d'une zone faiblement fracturée dont les fractures sont remplies de carbonates et de quartz. Les porosités respectives de ces échantillons sont moyennes (0,41% et 0,44%). La quantification optique de la microfissuration de l'échantillon prélevé à 998,18 mètres révèle un très faible pourcentage des surfaces cumulées des fissures (0,07%). Celles-ci sont moyennement longues mais étroites (largeur moyenne de 8,3 μm) et ne présentent pas d'orientation préférentielle.

- Echantillons prélevés à 998,50 mètres et 999,40 mètres

Granite de mêmes caractéristiques pétrographiques que les échantillons précédents. Ils présentent des porosités moyennes (0,53% et 0,48%). L'échantillon prélevé à 998,50 mètres se distingue par une proportion élevée de la porosité correspondant aux pores de diamètre compris entre 1,80 μm et 0,517 μm .

- Echantillon prélevé à 999,58 mètres

Granite de type G1 issu d'une zone faiblement fracturée. La porosité globale est de 0,50%. Cet échantillon n'a pas fait l'objet d'une quantification de la microfissuration.

4.3.4.2 Corrélations entre les résultats de porosimétrie et de mesure de la microfissuration avec les caractéristiques des prélèvements

En résumé, les échantillons qui présentent une forte valeur de la porosité globale sont issus des cotes suivantes :

- 404,10 m (porosité de 0,70%) caractérisé par une forte fracturation subhorizontale;
- 500,95 m (porosité de 0,64%). L'aspect "délavé" de l'échantillon est le signe d'une altération marquée de la matrice;
- 681,61 m (porosité de 0,88%). Cette zone de prélèvement se trouve à quelques centimètres d'une zone de cataclase;
- 721,05 m (porosité de 0,69%). L'échantillon est altéré "en bouillie". Cette valeur montre qu'une altération importante de la matrice entraîne une augmentation de la porosité. Malheureusement, cet échantillon n'a pas fait l'objet d'une quantification par analyse optique;
- 899,85 m (porosité de 0,61%). Cet échantillon a été prélevé au niveau d'une enclave de microgranodiorite. Sa porosité est assez forte malgré un colmatage des fissures macroscopiques;
- 984,80 m (porosité de 0,67%). La zone révèle une forte fissuration avec chloritisation massive de la biotite et altération marquée des plagioclases.

De même, les échantillons qui présentent une porosité plus faible sont issus des cotes:

- 297,22 m. Caractérisé par une faible fracturation macroscopique, cet échantillon présente une valeur moyenne de la porosité (0,44%);
- 598,49 m - 799,72 m - 801,55 m - 801,88 m - 997,25 m - 998,18 m - 998,50 m - 999,40 m - 999,58 m pour lesquelles on a noté un remplissage des fractures par des carbonates ou du quartz (porosité comprise entre 0,40% et 0,57%);
- 699,88 m - 700,20 m. La très faible porosité mesurée sur ces échantillons (0,24% et 0,29%) peut être due au fait que la zone de prélèvement est cataclasée. Ce résultat n'est d'ailleurs pas en accord avec les données fournies par ailleurs (in B.R.G.M. 1981) (cf paragraphe 3.1.) où il apparaissait au contraire qu'un échantillon prélevé dans une zone de cataclase se caractérisait par une valeur forte de la porosité mesurée par porosimétrie au mercure.

D'autre part, on note que la porosité des échantillons évolue indépendamment des faciès G1 (monzogranite à fond largement grenu) et G2 (monzogranite à fond microgrenu). La différence de structure entre ces deux types de granite présents dans le forage ne semble

pas être déterminante pour la valeur de la porosité. Il semble également que la présence de filons d'aplite et de quartz n'a pas d'influence déterminante sur la valeur de la porosité. Par exemple, trois échantillons prélevés dans des zones à filons (l'un à 404,10 mètres, les deux autres à 997,25 et 999,40 mètres) ont des porosités relativement différentes : 0,70% pour le premier, 0,40% pour le second et 0,55% pour le troisième.

Les résultats obtenus par l'analyse optique de lames minces rejoignent fréquemment les résultats obtenus par porosimétrie au mercure malgré que, rappelons-le, les domaines dimensionnels d'étude se situent entre 2 μm et 60 Å pour la porosimétrie au mercure et entre 20 μm et 1 μm pour la quantification du système microfissural après imprégnation par résine colorée. Ainsi, les échantillons qui présentent une forte valeur de surface cumulée à l'échelle microscopique proviennent des profondeurs suivantes :

- 404,10 m. Cet échantillon atteint une forte valeur de fissuration (0,23%). Il possède une forte surface moyenne et une forte largeur moyenne des fissures comptabilisées. Il s'était également distingué par une valeur élevée de la porosité. C'est, rappelons-le, un échantillon à forte fracturation subhorizontale n'entraînant pas a priori d'altération;

- 899,85 m. La valeur très forte de la microfissuration (0,58%) est comparable avec celle de la porosité de 0,61%. Elle se traduit par de fortes valeurs moyennes de la surface, du périmètre et de la longueur des fissures de ce prélèvement effectué au niveau d'une enclave de microgranodiorite;

- 500,95 m - 984,80 m. Egalement très poreux lors de la mesure par porosimétrie, ces échantillons se caractérisent par une forte valeur de la surface occupée par les fissures (0,18% et 0,26% respectivement). L'échantillon prélevé à 500,95 m a de fortes valeurs moyennes de la surface, du périmètre, de la largeur et de la longueur des fissures. Cet échantillon d'aspect "délavé" est le prélèvement présentant la matrice la plus altérée;

- 297,22 m. Malgré une fracturation faible de la zone de prélèvement, l'échantillon qui paraît en outre non altéré, atteint une valeur élevée de la surface des fissures par rapport à la surface étudiée (0,23%). Elle se traduit par une importante valeur de la surface moyenne, du périmètre moyen et de la longueur moyenne des fissures. Ce résultat n'est pas en très bon accord avec les mesures de porosité (faible à moyenne) réalisées par porosimétrie au mercure.

De même, les échantillons caractérisés par une faible valeur de surface cumulée des microfissures sont issus des cotes:

- 700,20 m. Cet échantillon était déjà apparu peu poreux lors de l'analyse par porosimétrie (rappelons qu'il a été prélevé dans une zone de cataclase); il présente une surface fissurale de 0,07% de la surface d'étude;

- 799,72 m. Caractérisé par une porosité moyenne (0,48%), ce prélèvement présente une fissuration très faible (0,09%). Cet échantillon provient d'une zone à forte fracturation subverticale avec présence de grandes fissures colmatées par des carbonates;

- 801,55 m. De mêmes caractéristiques pétrographiques que le précédent, il présente une valeur faible de surface fissurale (0,10%) tout comme il présentait une valeur faible de la porosité;

- 998,18 m. Issu d'une zone faiblement fracturée, cet échantillon se caractérise par une faible fissuration (0,07%). Sa porosité est plutôt faible (0,44%).

En conclusion, ces résultats nous permettent de confirmer que l'altération de la matrice entraîne un accroissement des valeurs moyennes des paramètres dimensionnels des fissures. Il apparaît également que d'autres éléments (cataclase, enclave, fracturation ...) peuvent parfois engendrer les mêmes effets sans que soit notée une altération particulière des carottes.

Enfin, tout comme la porosité, la microfissuration semble être indépendante des faciès G1 et G2 du granite étudié. La présence de filons d'aplite ou de quartz n'a pas non plus d'influence prépondérante sur la microfissuration.

4.3.4.3 Conclusion de cette étude

Au regard des résultats obtenus sur un grand nombre d'échantillons, il est difficile d'apporter une conclusion qui prenne en compte de façon systématique l'évolution des grandeurs mesurées. On peut néanmoins dégager les grandes lignes suivantes :

- nous retrouvons certains résultats communs à ceux du forage de 500 m à savoir:
 - . les fissures de type intragranulaire restent largement prépondérantes;
 - . les fissures de type intra et intergranulaire sont très minoritaires;
 - . le pourcentage de fissures adjacentes à un minéral respecte dans le cas général la composition modale;
 - . à l'exception d'une cote (899,85 m), la porosité l'emporte largement sur la microfissuration (tableau 20).

Ces résultats que l'on retrouve dans tous les échantillons, quelque soit leur nature, leur degré d'altération ou leur profondeur semblent des caractéristiques du granite en général;

- l'orientation des fissures est comprise pour la plupart des échantillons entre -10° et $+20^\circ$ par rapport au repère des lames (soit une déviation comprise entre 80° Nord et 110° Nord dans un repère cardinal), à l'exception des cotes comprises entre 700,20 m et 801,55 m, c'est à dire dans une zone comprenant une cataclase de 20 mètres et une zone non cataclasée d'environ 90 mètres;

- la profondeur n'est pas un facteur déterminant sur la porosité et la microfissuration;
- cependant, les valeurs simultanément faibles de la microfissuration et de la porosité s'expliquent par la nature de l'échantillon: zone cataclasée à 700,20 m ou zones faiblement

fracturées (998,18 m) ou plus fortement fracturées mais colmatées par des carbonates ou du quartz (799,72 m et 801,55 m);

- les valeurs de la porosité et de la microfissuration simultanément fortes proviennent de zones fortement fracturées à l'échelle macroscopique (404,10 m) ou bien de zones d'altération marquée de la matrice (500,95 m) à l'exception d'échantillons "particuliers" prélevés à proximité d'une zone cataclasée (681,61 m) ou d'une enclave de microgranodiorite (899,85 m).

Il semble que l'altération du granite en elle-même ne produise pas une diminution de la porosité et de la microfissuration. Par contre, nous constatons bien que le colmatage des fissures aboutit à cet effet. Et ce dernier phénomène n'apparaît pas toujours de façon simultanée avec l'altération de la roche.

5. EFFETS SUR LA FISSURATION INDUITE DANS DES GRANITES PAR CAROTTAGES OU EXPLOSIFS

5.1 Introduction

Tous les échantillons sélectionnés dans le cadre de cette partie du présent travail concernent l'étude, dans différentes conditions, des effets dus à l'utilisation d'explosif pour le creusement d'une galerie ou d'une chambre expérimentale. Ces échantillons proviennent du site des Tenelles (Haute-Vienne) (figure 96) qui est une cavité souterraine en milieu granitique (située à - 100 m de profondeur environ) et ayant servi à la conduite d'une expérience thermo-hydro-mécanique (THM) in situ (DERLICH S., 1990). Deux objectifs distincts ont guidé l'échantillonnage ainsi effectué pour cette étude.

- le premier objectif concerne à l'étude des effets directs des tirs de mines sur les parois de galeries creusées à l'explosif par la technique dite du "bouchon canadien",

- le second objectif est orienté également vers l'influence de l'utilisation des explosifs en excavation minière, mais dans d'autres conditions: il s'agit de la réalisation du radier du laboratoire souterrain THM de la mine des Tenelles, obtenu au mur de la chambre expérimentale, par des forages horizontaux de prédécoupage suivis de tirs à la poudre noire (explosif à faible brisance).

De plus, l'échantillonnage réalisé dans cette seconde phase correspond à deux techniques de prélèvements tout à fait différentes:

- prélèvements par petits carottages sur les blocs issus du prédécoupage du radier de THM, soit dans la trace, soit à côté de la trace des forages de prédécoupage;

- prélèvements par petits carottages dans les carottes de très gros diamètre mises en oeuvre dans la chambre THM dans le granite des Tenelles à partir du radier expérimental.

Pour la totalité de ces échantillons pris dans le context THM on a retenu un type de notation unique grâce à un système commun de coordonnées dans un repère XYZ (précisé dans les figures ci-après 97, 98,...) à savoir OX la direction de la galerie d'accès, OY la direction des axes des forages "pré-découpage" et OZ la direction verticale au plan XOY.

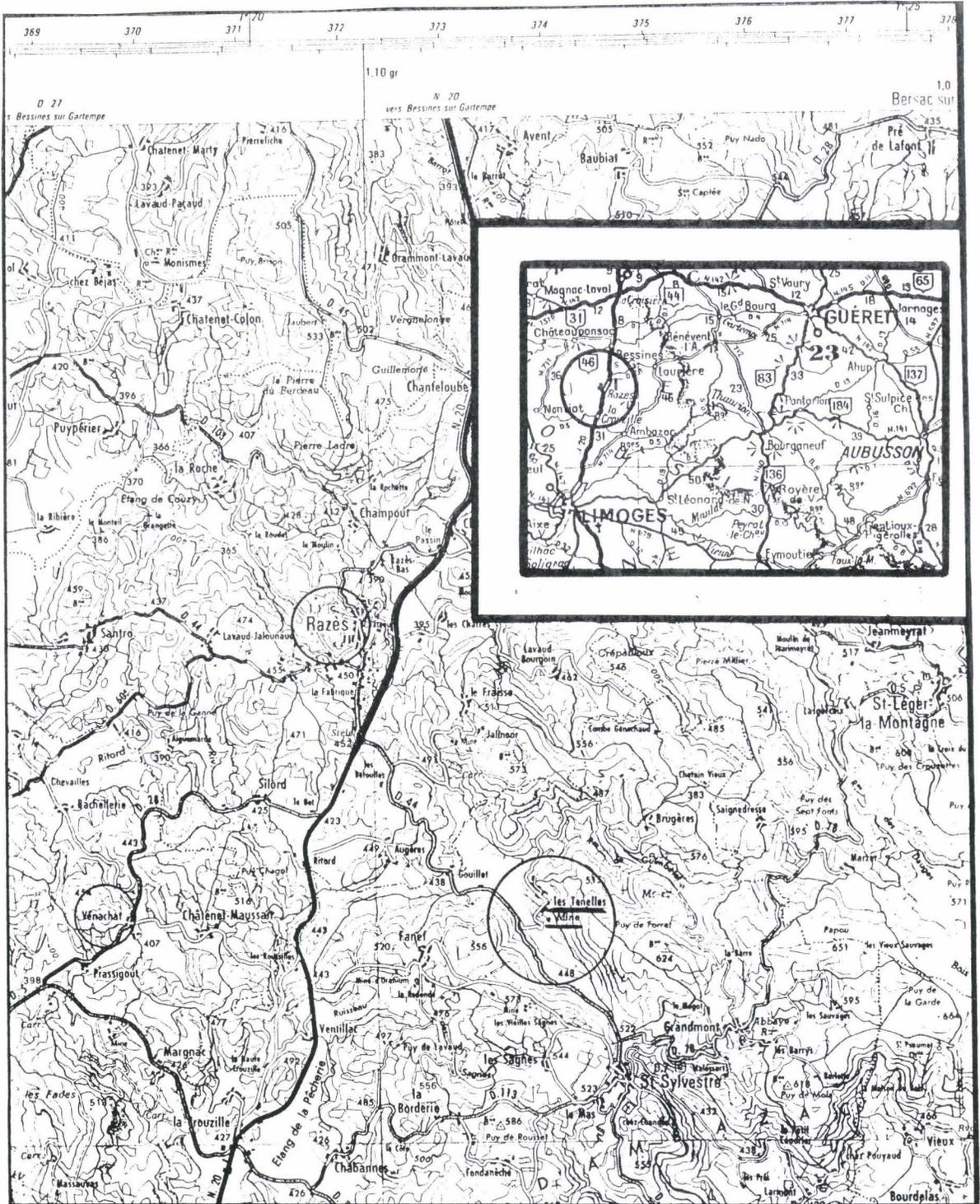


Figure 96 - Situation des mines des TENELLES et VENACHAT

5.2 Observations sur les parois de galerie de mine excavée par tirs d'explosif

5.2.1 Prélèvements par carottages

Ces études sur les effets dus à l'utilisation d'explosif pour le creusement de galeries reposent sur l'analyse d'échantillons provenant du site des Tenelles (Haute-Vienne) qui est une chambre souterraine en milieu granitique ayant servi à la réalisation d'une expérience thermo-hydro-mécanique in situ et pour laquelle on a au préalable procédé à la réalisation d'une galerie d'accès R 431 à partir de la descenderie B 401 du quartier de mine de Tenelles (figures 97a et 97b).

Le creusement de cette galerie R431 a permis d'étudier directement les effets dus aux explosifs et particulièrement le phénomène de l'anneau autour des parements, affecté d'une fissuration décroissante en fonction de l'éloignement à la paroi.

Cette galerie d'accès R 431 à la chambre expérimentale THM des Tenelles a été creusée à l'explosif par une technique d'abattage schématisée suivant la fig 98.

Les forages initiaux de prédécoupage ont été implantés suivant le périmètre final de la galerie. On y a introduit l'explosif, et on a procédé à l'abattage suivant la technique dite du "bouchon canadien".

La portion de galerie ainsi obtenue possède en paroi les traces des tirs d'explosifs au niveau de chaque forage de découpage ("fourneau de tir"). On observe donc en parement la "roche brûlée", avec écaillage et rondelles de détente de plusieurs centimètres d'épaisseur.

On se propose ainsi de reconnaître les effets directs des tirs de mine sur les parois et les effets induits par relâchement des contraintes lors de prélèvements de roches par carottage.

Pour cette étude on a donc procédé à des prélèvements par carottage dans le parement de galerie creusée à l'explosif. En parement gauche de la galerie d'accès à la chambre expérimentale THM des Tenelles, on a donc implanté deux forages horizontaux en $\phi = 250$ mm, proches l'un de l'autre et positionnés à l'endroit précis d'un "fourneau de tir". De plus, ces deux forages sont centrés sur une fracture déjà existante plus ou moins horizontale, apparente sur le parement de la galerie, et peut être créée par l'action des explosifs. Les deux carottages ont été prévus pour explorer une profondeur horizontale de plusieurs mètres et les diamètres des carottes de 250 mm devraient permettre de minimiser au maximum la nouvelle perturbation induite par ces prélèvements.

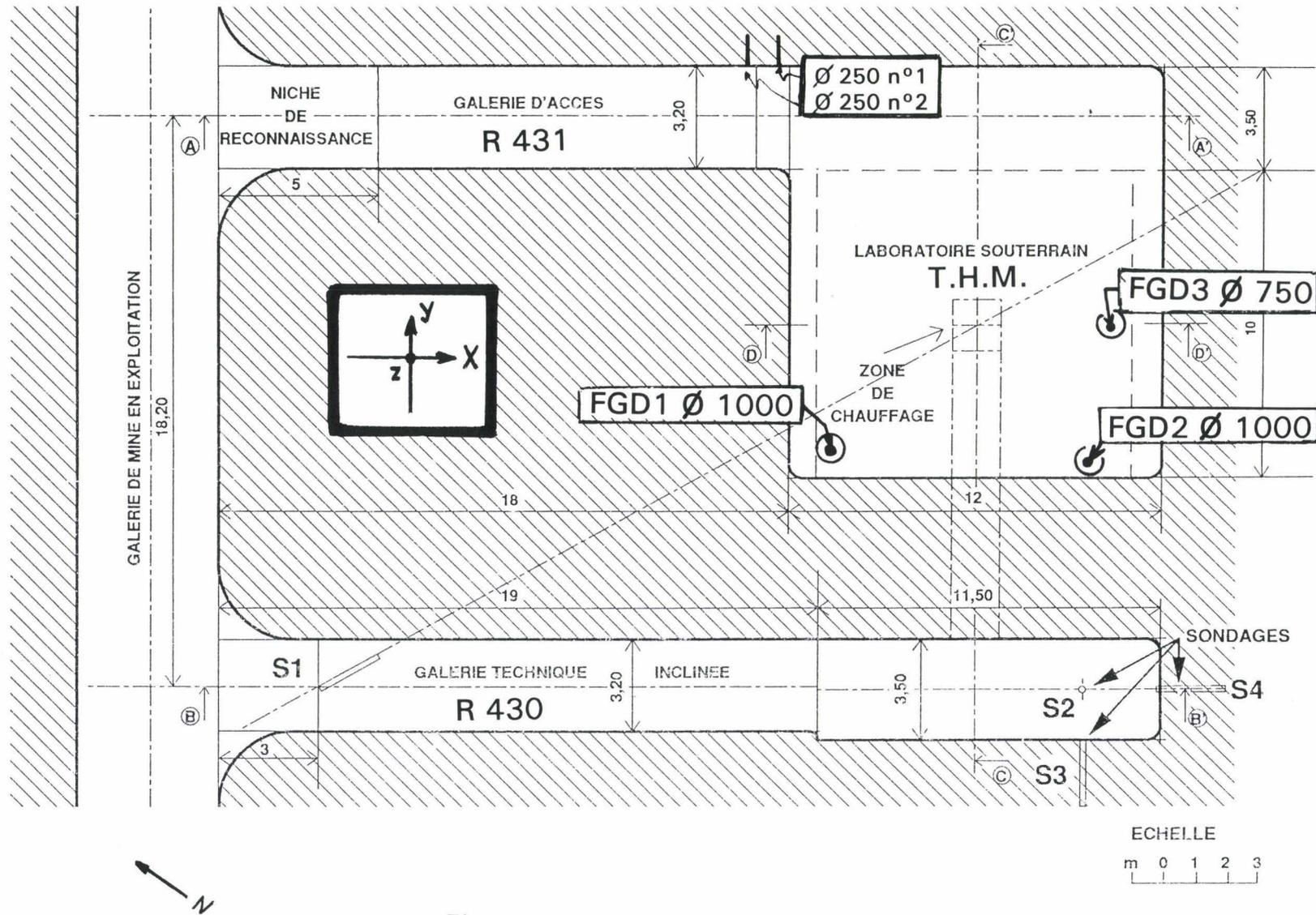


Figure 97a - Site THM des Tenelles (vue en plan)

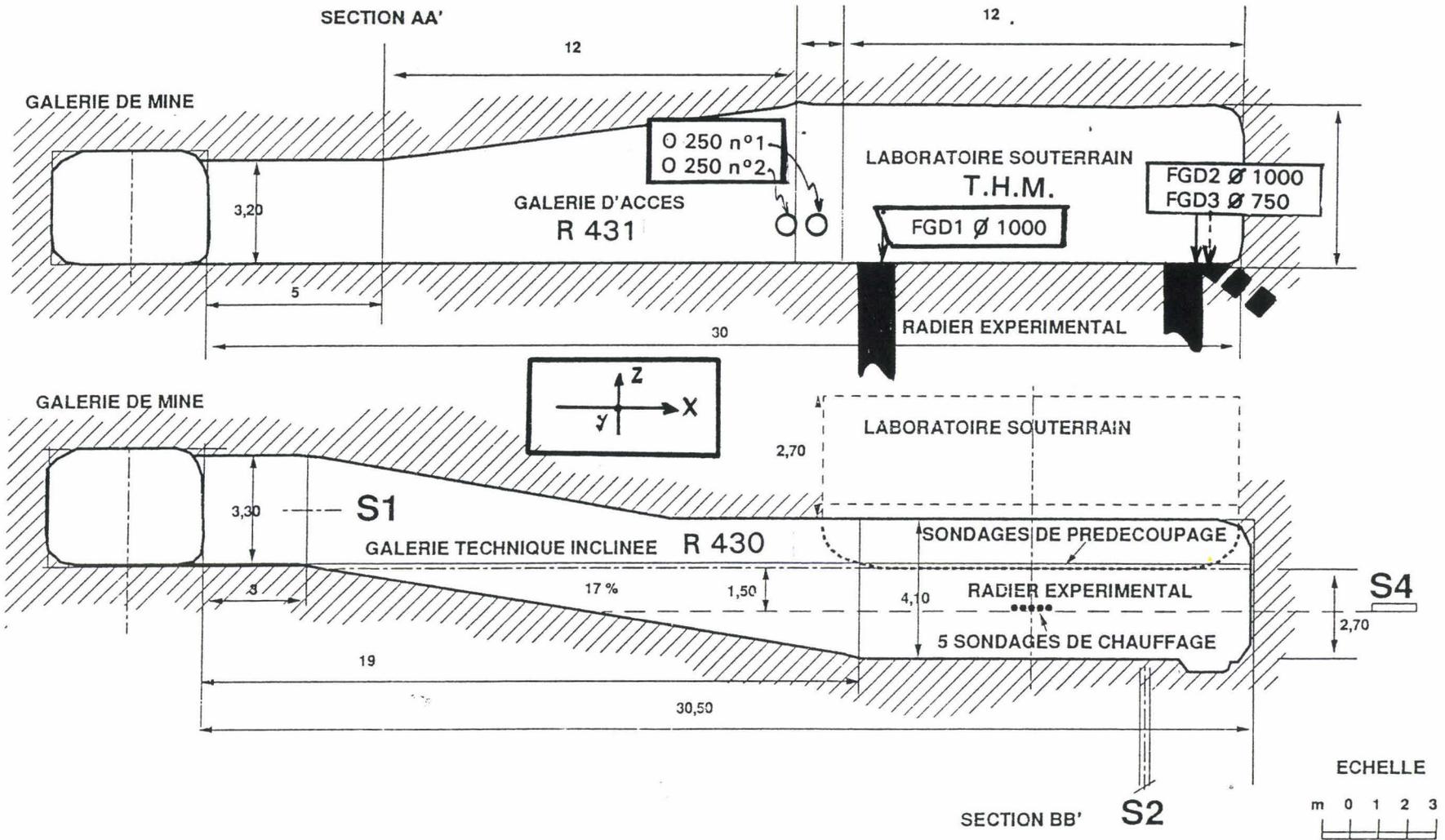


Figure 97b - Site THM des Tenelles (vue en coupe)

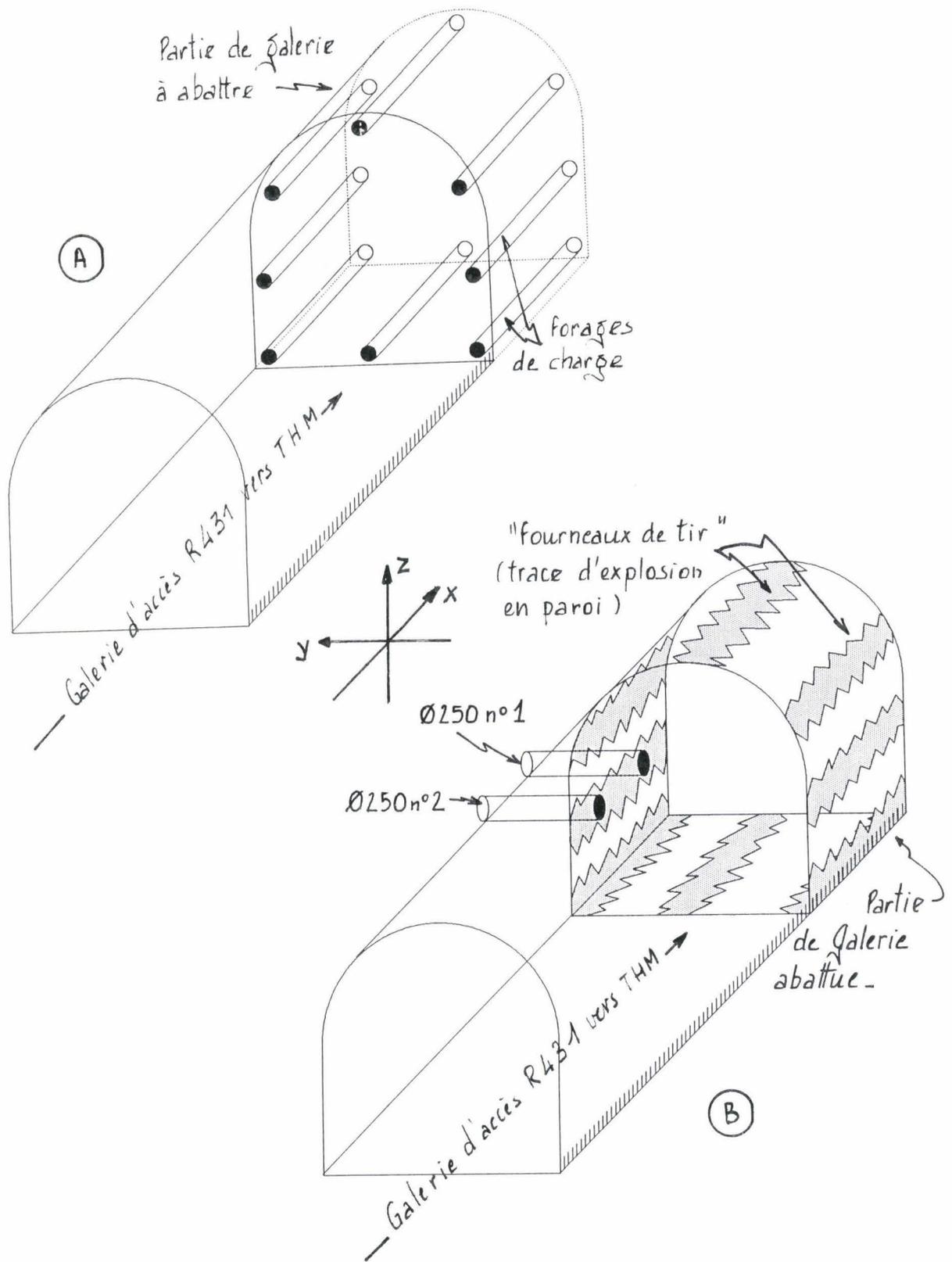


Figure 98 - Creusement d'une galerie par tirs d'explosifs

La position de ces deux forages dans le contexte de la chambre THM est indiquée dans les figures 97a et 97b, où sont précisées leurs cotes d'implantation exactes dans la galerie d'accès R 431.

Les deux carottes obtenues sont donc horizontales, de diamètre $\phi = 250\text{mm}$, et de longueur 1,50 m (figure 98). Elles sont notées $\phi 250 \text{ N}^\circ 1$ et $\phi 250 \text{ N}^\circ 2$ dans la suite de ce document.

5.2.2 Echantillonnages à partir de carottages horizontaux ($\phi = 250 \text{ mm}$) dans la galerie d'accès R 431 de THM

On a donc disposé pour cette partie de l'étude d'échantillons provenant de la paroi elle-même et des forages en $\phi 250$ effectués en parement gauche et dans lesquels on a procédé à un recarottage.

Le détail de ces prises d'échantillons est donné ci-après, ces échantillons servant eux-même de support pour la fabrication de lames minces.

5.2.2.1 Carotte $\phi 250 \text{ N}^\circ 1$

- Une ECAILLE DE PAROI notée 1.a.

C'est un morceau de paroi en partie avant de la carotte $\phi 250 \text{ N}^\circ 1$. Elle n'est pas restée solidaire de la tête de carotte. Elle est issue de l'écaillage de paroi du à un tir d'abattage en forage de prédécoupage de la galerie (cf. figure 99).

L'échantillon est en deux parties; on a prévu 2 lames, notées 1.a-XZ et 1.a-YX?Z?, respectivement perpendiculairement et dans la direction du tir d'abattage de la galerie.

- Un échantillon "TEMOIN" noté 1.b, probablement du même contexte, était prévu, mais n'a finalement pas pu être étudié ;

- 5 échantillons notés $\phi 250 \text{ N}^\circ 1-1.1$, -1.2, -1.3, -1.4, -1.5, qui sont tous des carottes de diamètre environ 50 mm pour une longueur de 250 mm prélevées à partir de la carotte $\phi 250 \text{ N}^\circ 1$ (cf. figure 100).

Ils sont situés sur la génératrice supérieure de la carotte, et la traversent de part en part, suivant le diamètre orienté verticalement de cette carotte.

Ils vont en s'éloignant (depuis le $\phi 250 \text{ N}^\circ 1-1.1$ jusqu'au $\phi 250 \text{ N}^\circ 1-1.5$) de la partie de la paroi ayant subi le tir d'abattage.

De plus, au moins pour les échantillons $\phi 250 \text{ N}^\circ 1-1.1$ et $\phi 250 \text{ N}^\circ 1-1.2$, ils sont situés sur un réseau de fractures liées en partie à l'utilisation de l'explosif, mais dont l'une d'elles est le plan plus ou moins horizontal déjà cité (cf. figure 101).

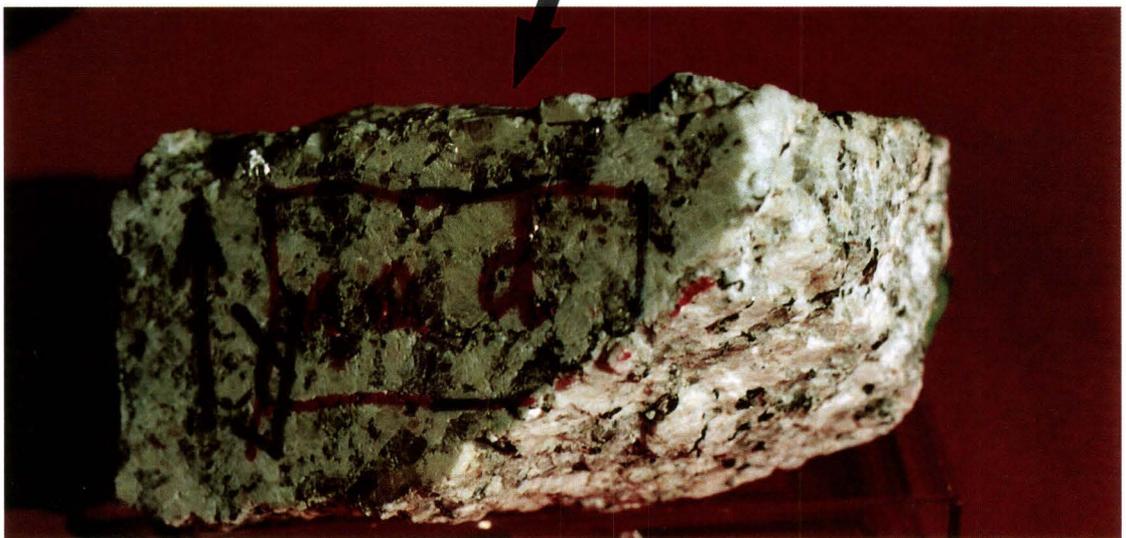
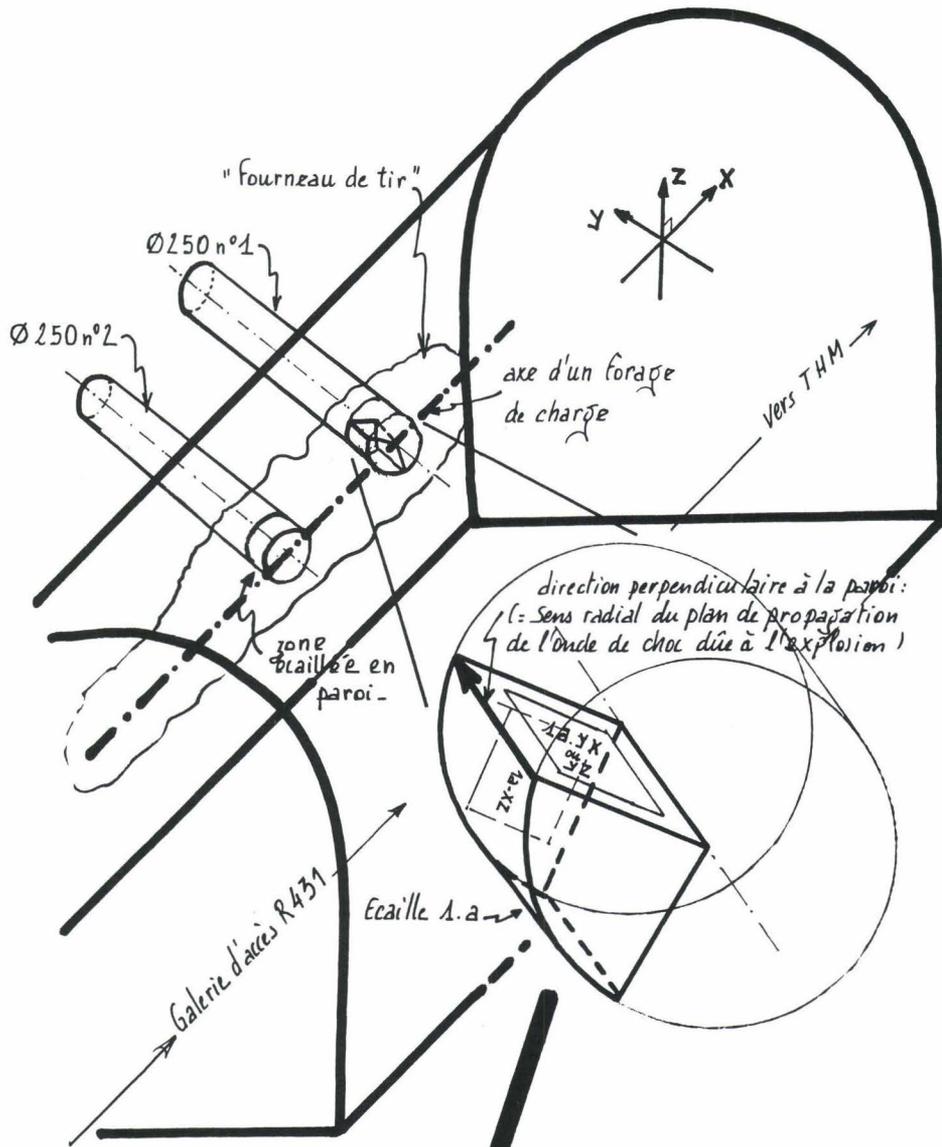
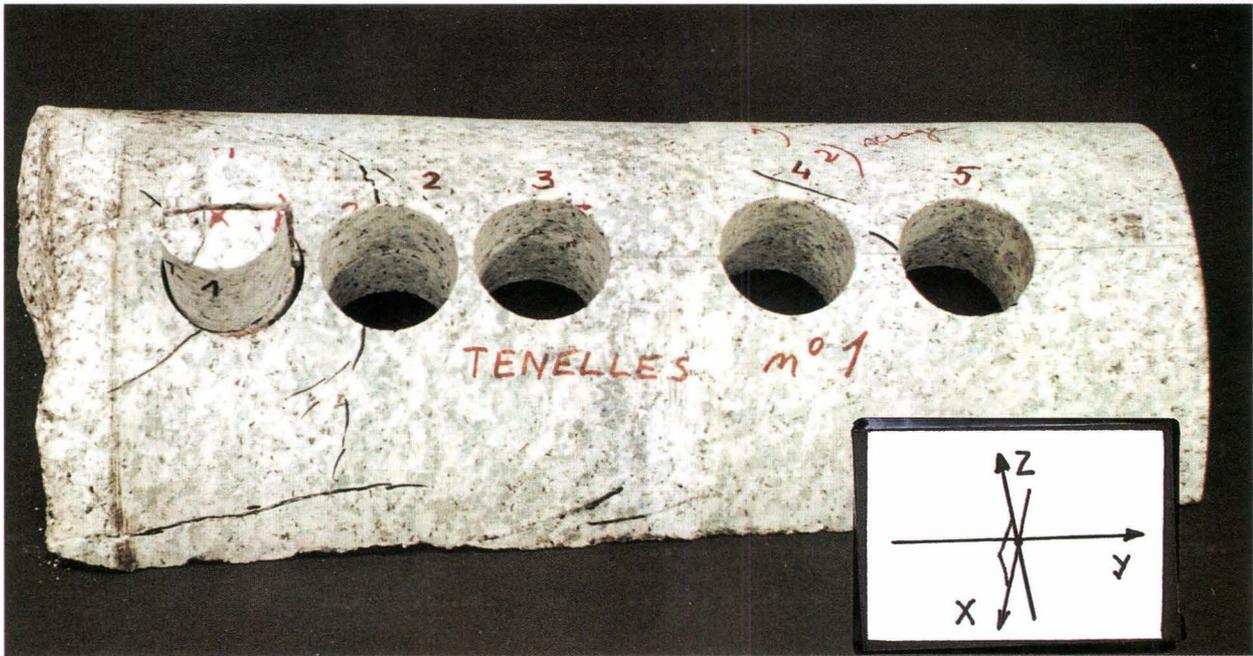
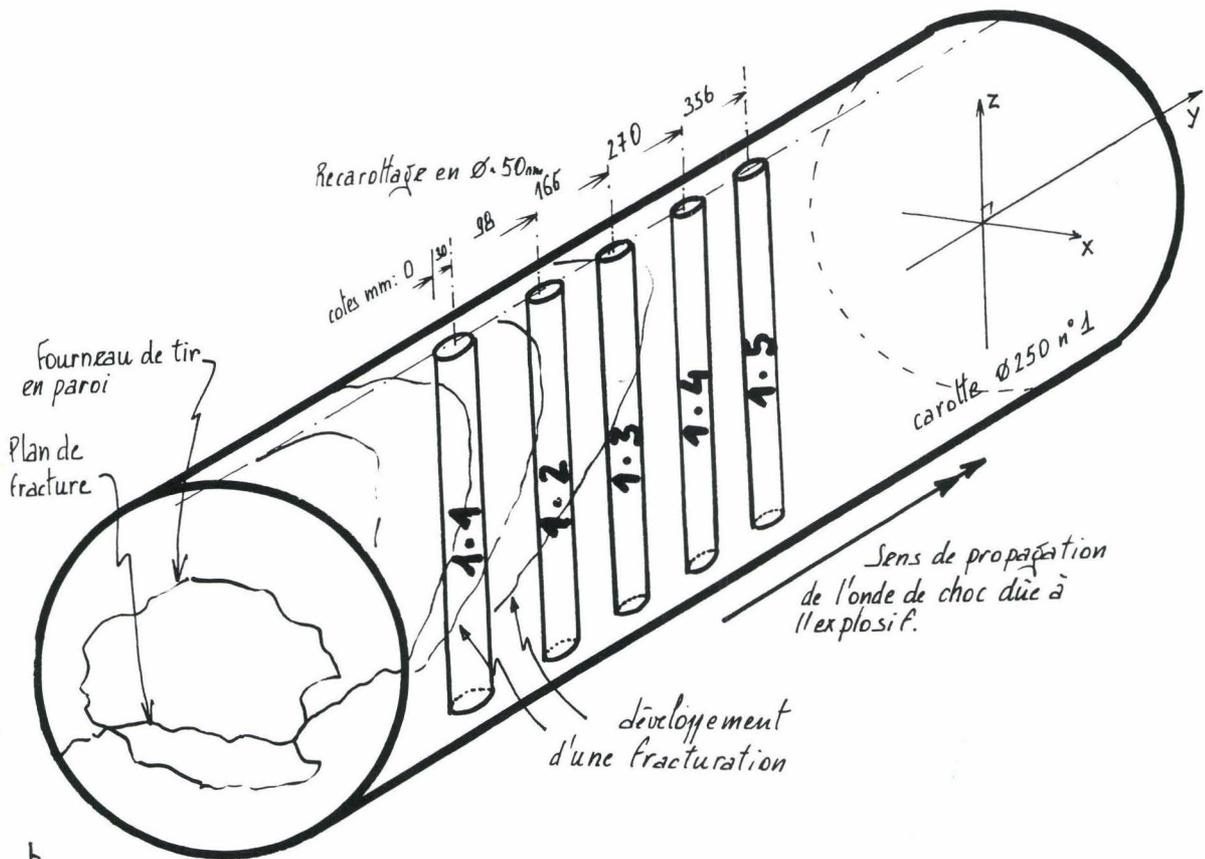


Figure 99 - Echantillon d'écaille de paroi (position et photo)

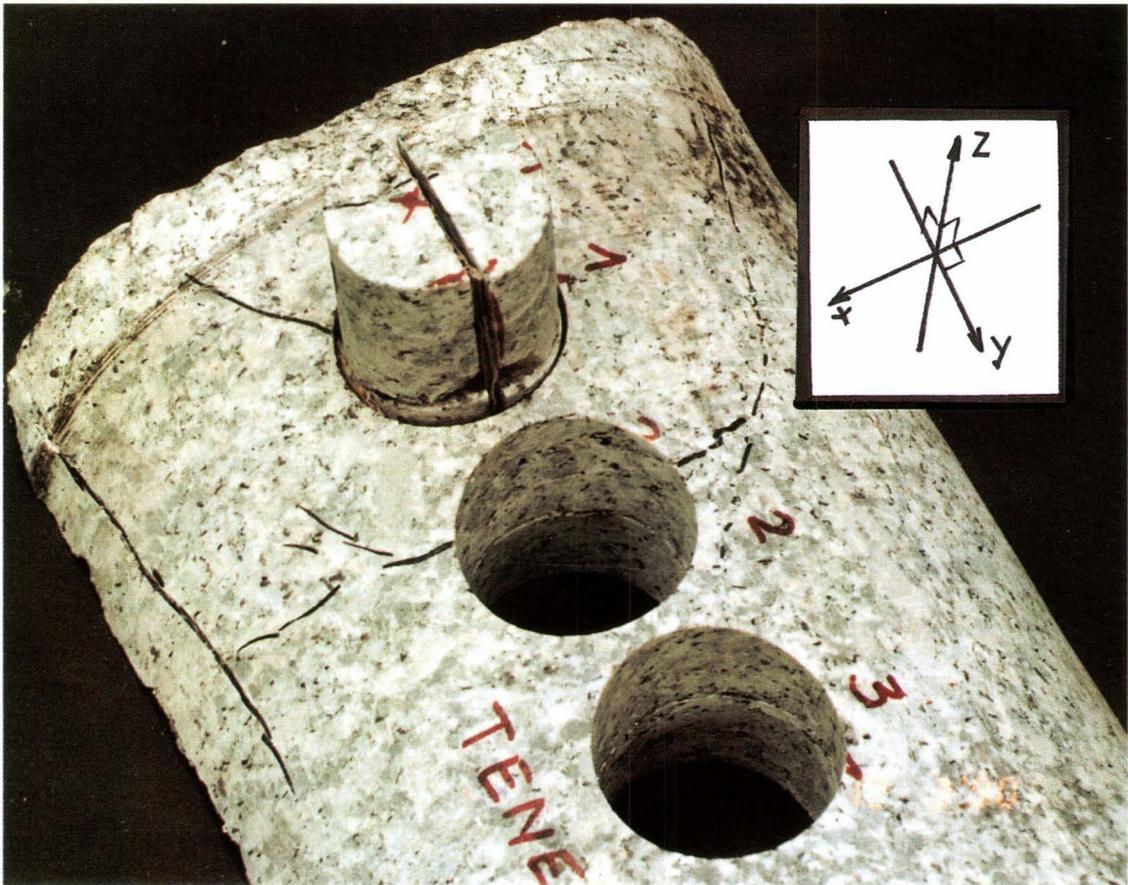


a.

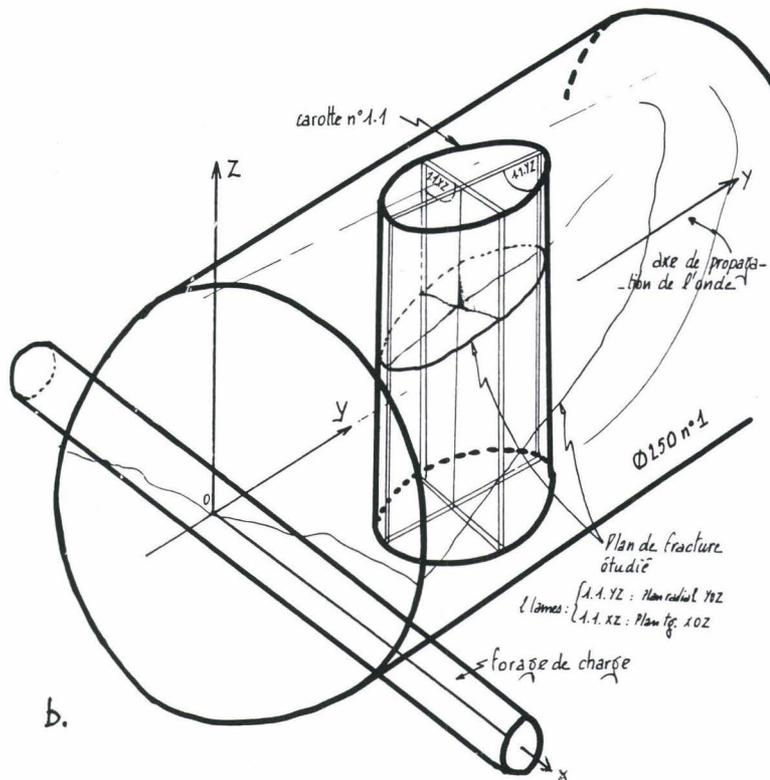


b.

Figure 100 - Carotte $\varnothing 250$ N° 1 et ses cinq échantillons carottés:
(a) photo d'ensemble, (b) vue schématique

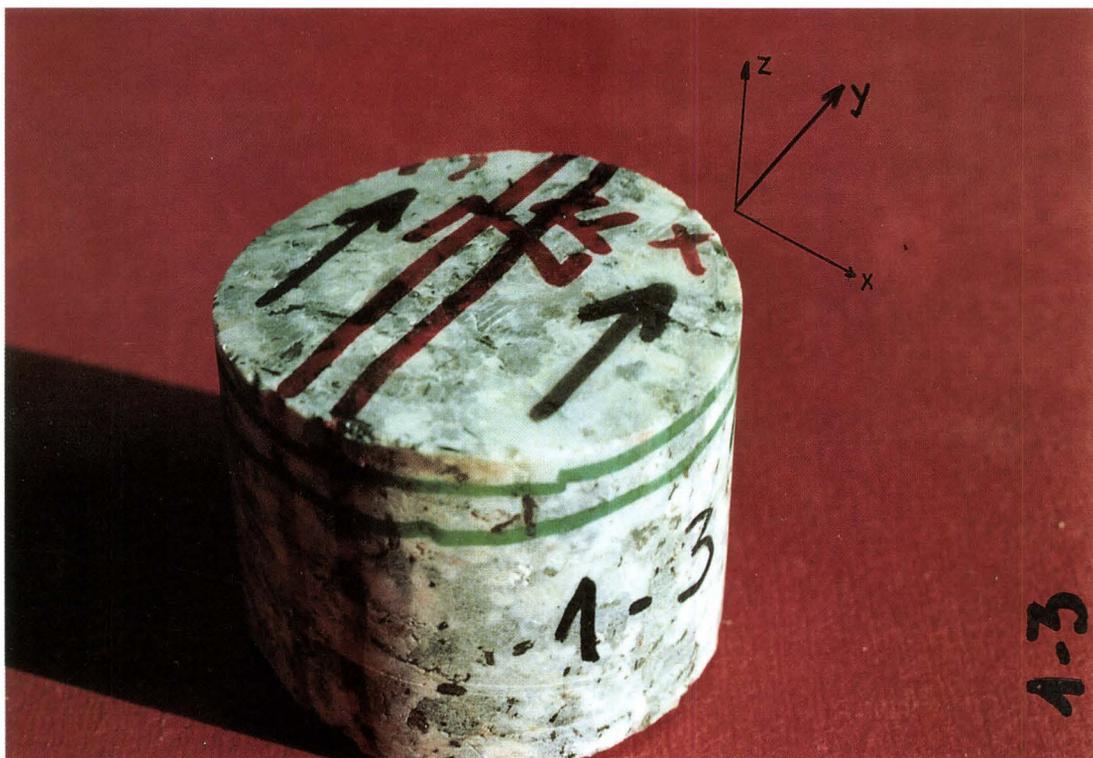


a.



b.

Figure 101 - Echantillonnage dans $\varnothing 250 \text{ N}^{\circ} 1$: (a) photo de détail, (b) schéma explicatif des positions des lames dans l'échantillon carotté 1.1



Les flèches noires (sens +Y) indiquent le sens de propagation de l'onde de choc due à l'explosion.

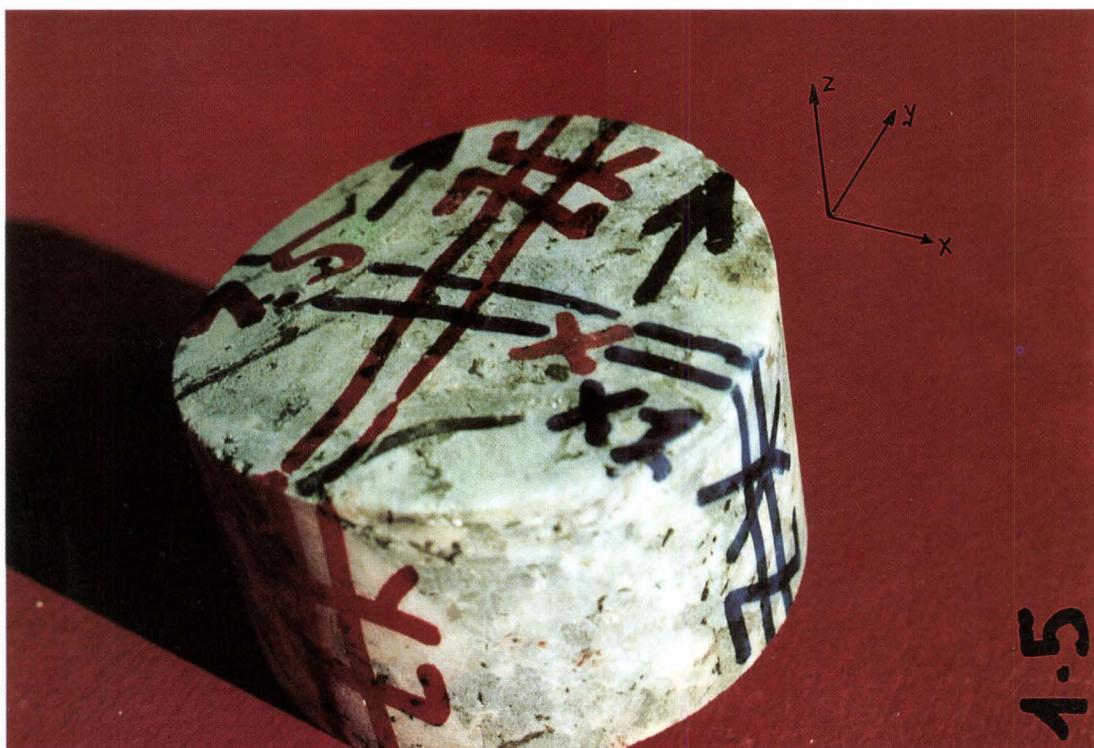


Figure 102 - Exemples d'échantillons carottés pour étude de lames de la carotte ϕ 250 N°1

L'axe de carottage de ces 5 échantillons est donc relativement perpendiculaire au plan de cette grande fracture qu'ils contiennent. La situation exacte de ces échantillons dans la carotte ϕ 250 N°1 est précisée par la figure 100, où l'on situe l'échantillon 1.1 en tête de carotte (vue sur la figure 101a), et positionné sur ces fissures probablement induites par l'explosion, lesquelles fissures se prolongent également au niveau de 1-2 et s'amortissent au delà (vers 1-3, 1-4 et 1-5, les échantillons les plus éloignés de la paroi).

Il a été prévu la confection de 2 lames par éprouvette. La notation de ces lames dans une repère lié à la carotte en place ϕ 250 N°1 est illustrée sur le schéma de la figure 101b où sont repérées à titre d'exemple les lames notées 1.1-ZY et 1.1-XZ aux alentours de la fracture étudiée, respectivement lame radiale et lame tangentielle dans l'échantillon 1.1.

Le tableau ci-après résume les échantillonnages réalisés sur la carotte ϕ 250 N°1 pour lames minces et étude de la fissuration induite par explosifs en galerie de mine (cf. exemples de la figure 102).

Tableau 23 - Echantillonnage dans la carotte ϕ 250 N°1. Liste des lames à étudier

Tenelles Galerie accès THM R 431 : Carotte ϕ 250 N°1	
Ecaille de paroi 1.a	1.a-XZ 1.a-YX?Z?
Ecaille de paroi 1.b	non retenu
Carotte 1.1 ϕ 50 L 250	1.1-ZY 1.1-XZ
Carotte 1.2 ϕ 50 L 250	1.2-ZY 1.2-XY
Carotte 1.3 ϕ 50 L 250	1.3-XY 1.3-YZ
Carotte 1.4 ϕ 50 L 250	1.4-XZ 1.4-YZ
Carotte 1.5 ϕ 50 L 250	1.5-XZ 1.5-YZ

5.2.2.2 Carotte ϕ 250 N° 2

Les échantillons sont destinés à l'étude de l'influence d'explosif en galerie de mine, sur l'extension d'une fracturation existante, ou générée par les tirs. On examinera également à partir de cette seconde carotte ϕ 250 N°2, proche de la précédente (cf. figures 97 et 98), les lames minces des échantillons afin de juger de l'influence d'un tir sur la roche en fonction de l'éloignement, en suivant le réseau de fractures.

Pour cette carotte on a choisi d'étudier les échantillons décrits ci-après. Il s'agit de 4 échantillons notés ϕ 250 N°2 - 2.1, - 2.2, - 2.3 et - 2.4, qui sont également tous des carottes de 50 mm de diamètre environ pour une longueur de 250 mm prélevées à partir de la carotte ϕ 250 N°2 (cf. figure 103).

L'axe de ces 4 petites carottes est centré sur la trace du plan de fracture déjà mentionné pour la carotte précédente.

L'orientation de ce plan au niveau de cette carotte ϕ 250 N°2 n'est pas exactement connu (différent de l'horizontale ?) car la carotte n'a pas été orientée à l'origine. Ces échantillons traversent donc radialement de part en part la carotte ϕ 250 N°2 en incluant le plan de fracture dans un plan radial.

Tout comme pour la carotte précédente, les échantillons sont prélevés en s'éloignant de la paroi soumise au tir d'abattage (l'échantillon 2.1 jusqu'au 2.5).

Ces échantillons carottés, (notamment le 2.1 et le 2.2) sont situés sur un réseau de fractures lié à l'utilisation de l'explosif.

La situation exacte de ces échantillons dans la carotte ϕ 250 N°2 est précisée par les photographies de la figure 103.

La photographie de la figure 104a représente à titre d'exemple le découpage prévu pour l'échantillon n°2.2 positionné sur une fracture existant probablement avant l'utilisation de l'explosif.

Il est prévu pour cet échantillon n° 2.2 la confection de 2 lames notées 2.2-ZX et 2.2-XY suivant le schéma de la figure 104b, tout comme c'est le cas pour les autres échantillons (cf tableau ci-après).

Tableau 24 - Echantillonnage dans la carotte ϕ 250 N°2. Liste des lames à étudier

Tenelles Galerie accès THM R 431 : Carotte ϕ 250 N°2	
Carotte 2.1 ϕ 50 L 250	2.1-XY 2.1-XZ
Carotte 2.2 ϕ 50 L 250	2.2-XY 2.2-ZX
Carotte 2.3 ϕ 50 L 250	2.3-XY 2.3-XZ
Carotte 2.4 ϕ 50 L 250	2.4-XY 2.4-XZ

L'analyse précise des lames minces issues de cet échantillonnage doit permettre de préciser l'incidence des tirs d'explosifs sur les caractéristiques fissurales de ce granite.

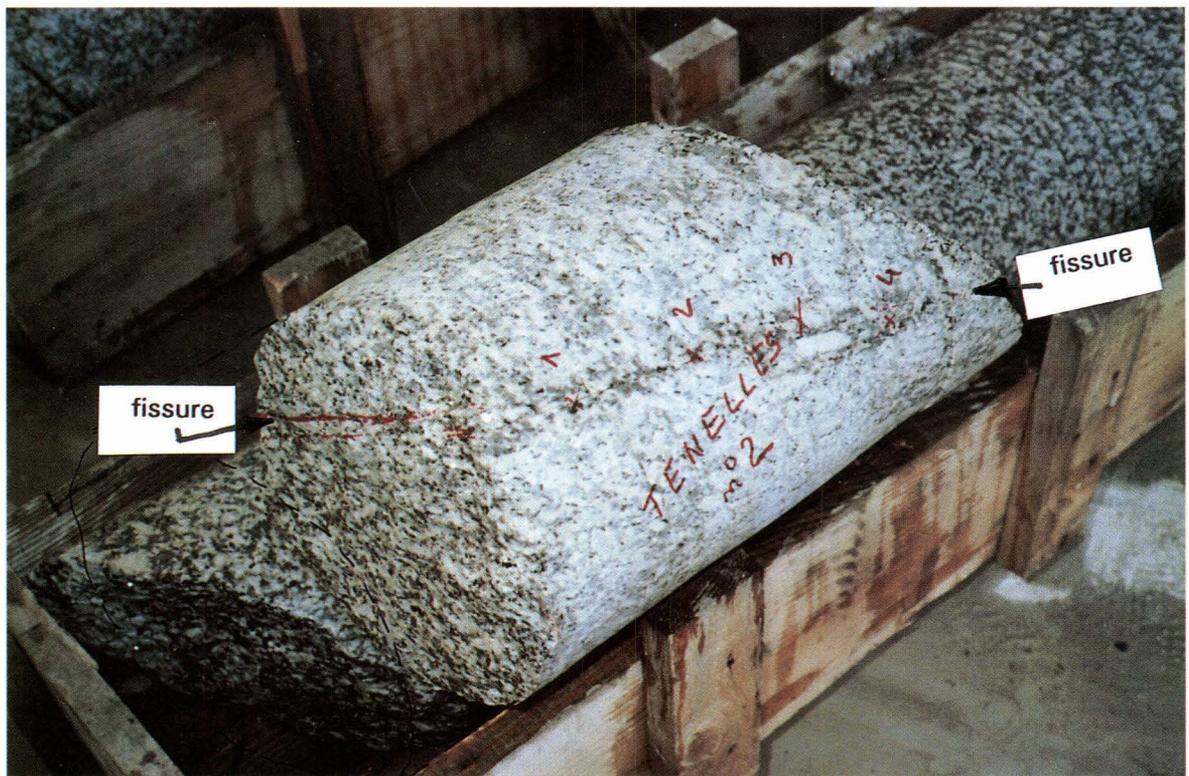
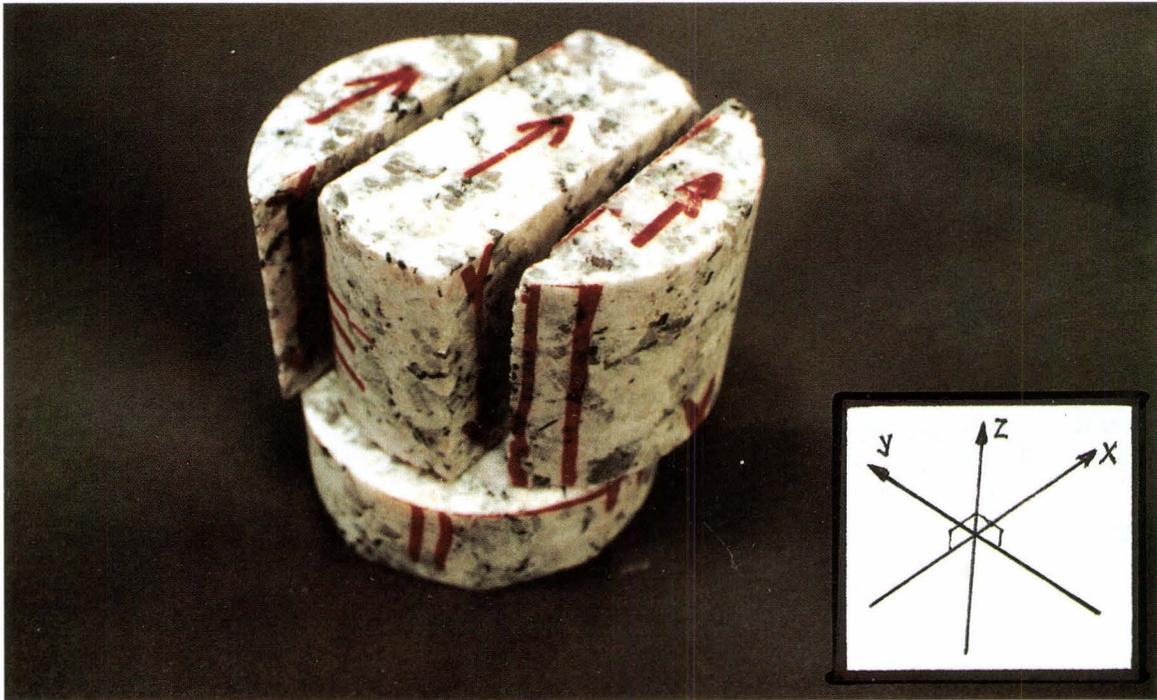
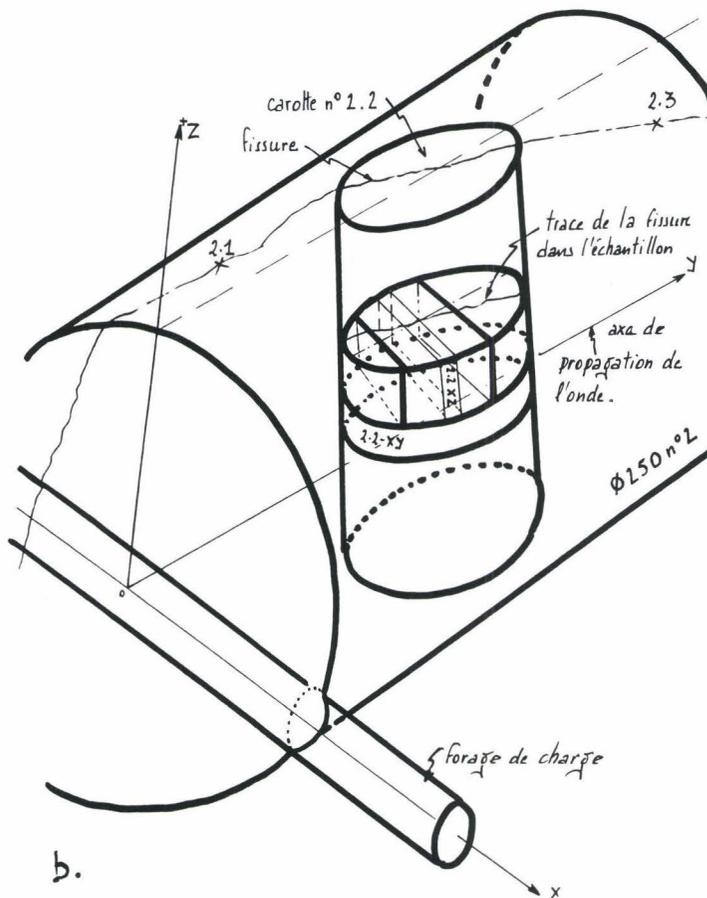


Figure 103 - Carotte ϕ 250 N°2 et position des quatre échantillons carottés pour la confection de lames minces

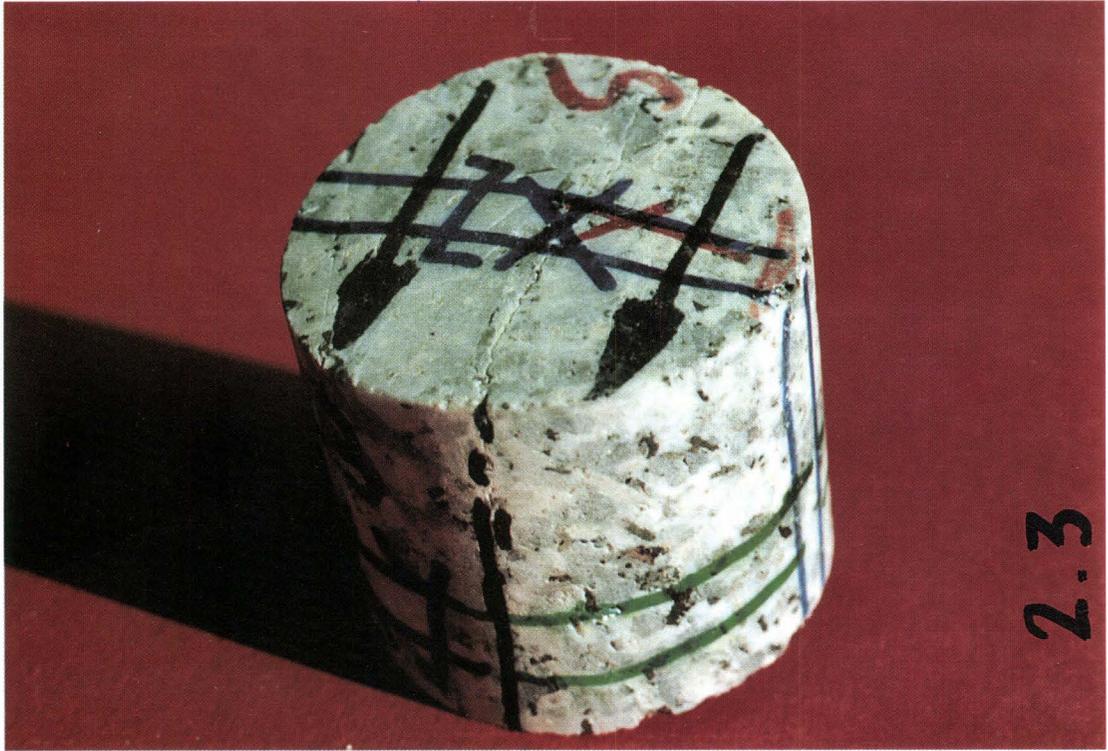


a.



b.

Figure 104 - Exemple du découpage pour lames minces de l'échantillons 2.2:
 (a) photo, (b) situation schématique des lames



Les flèches noires (sens +Y) indiquent le sens de propagation de l'onde de choc due à l'explosion

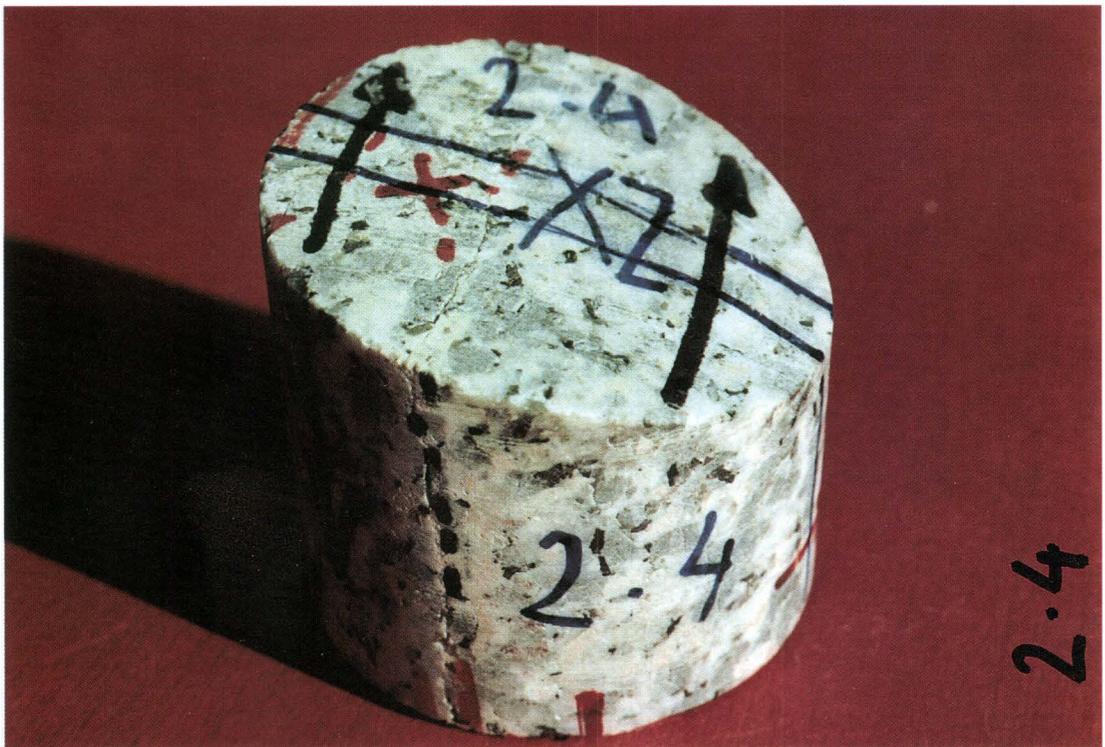


Figure 105 - Exemples d'échantillons carottés pour étude en lame mince de la carotte ϕ 250 N°2

5.3 Effets dus a la réalisation du radier THM par prédécoupages et tirs a la poudre noire

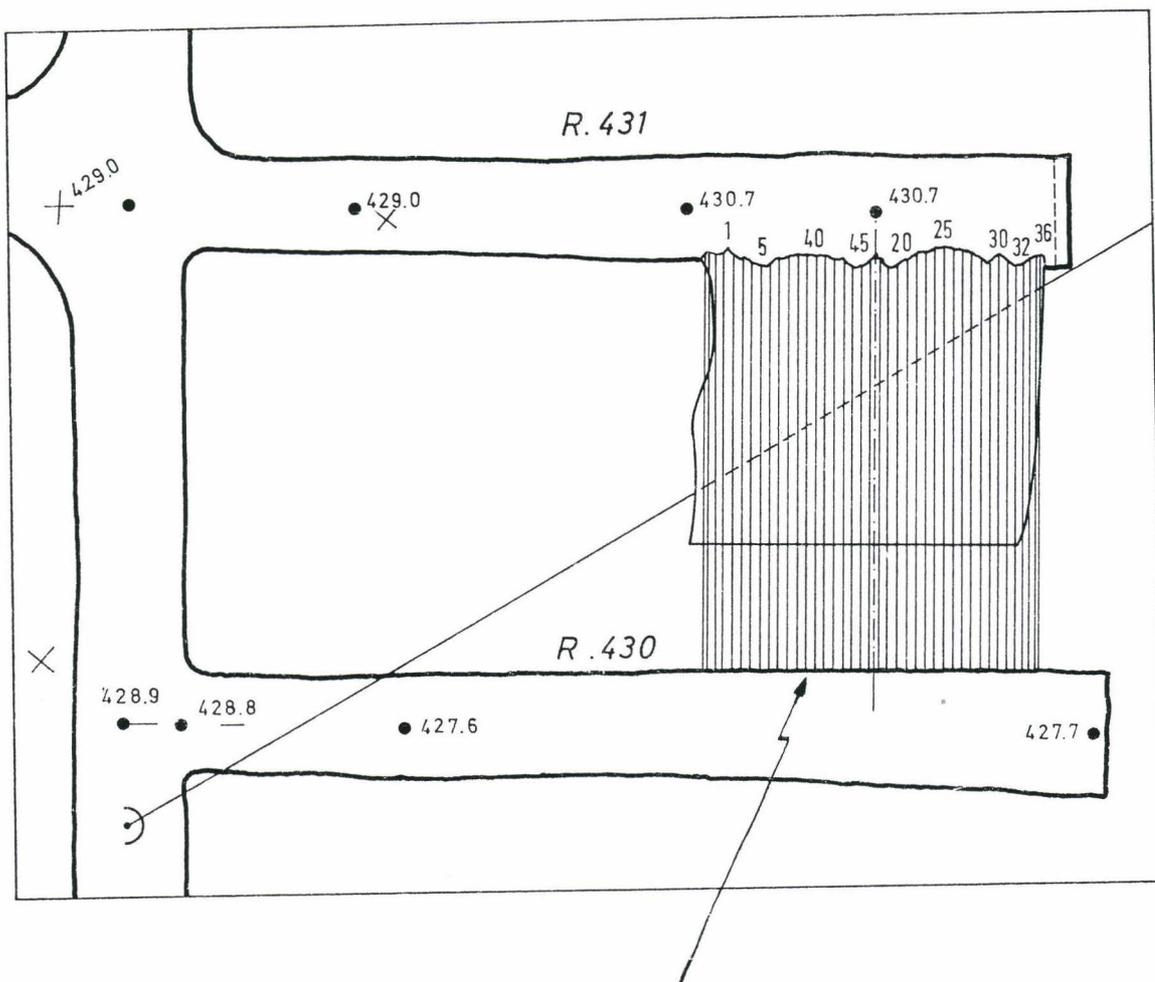
5.3.1 Introduction

Comme on l'a déjà indiqué par ailleurs, la chambre THM est une vaste excavation réalisée dans une mine COGEMA du Limousin (siège de Fanay, quartier des Tenelles, voir figures 96 et 97) pour la conduite d'un essai in situ de simulation de dégagement de chaleur et des effets mécaniques engendrés par un stockage profond de déchets radioactifs, appelé T.H.M. (Thermo-Hydro-Mécanique). Cette expérience a nécessité la réalisation d'un radier qui doit présenter une très bonne planéité, pour permettre la mise en oeuvre des capteurs de déplacement ou de déformation (DERLICH S., 1990). Sa réalisation a nécessité l'exécution de 40 forages horizontaux rigoureusement parallèles (figure 106). Ils ont permis la réalisation au niveau du radier, d'un plan le plus régulier possible, par la technique dite du prédécoupage. Elle consiste à faire exploser simultanément un nombre donné de charges parallèles allongées et de puissance faible, de façon à initier un plan imposé de rupture et à fracturer simultanément la dalle ainsi détachée. Les sondages de prédécoupage sont creusés dans le plan du radier de la chambre expérimentale. Ils sont espacés de 30 cm et ont un diamètre de 46 mm.

La qualité du prédécoupage est fonction de la structure du milieu (fracturation naturelle, anisotropie, dureté, homogénéité...) et de la précision sur la position des perforations. Dans la mine des Tenelles, le granite est sain et compact, et la zone choisie pour l'implantation de la chambre THM avait été explorée par un sondage de reconnaissance révélant une faible densité de fracturation du milieu (BLES, 1986).

Dans l'utilisation classique du prédécoupage pour débiter des blocs de granite en carrière, les directions de rupture sont généralement choisies en fonction de la texture de la roche. Dans la chambre THM la direction était évidemment imposée, et le plan à obtenir faisait un angle d'environ 45° avec deux des principales familles de fractures, orthogonales entre elles. En conséquence, la densité de perforation adoptée a été de 3 par mètre, soit des forages distants de 0,30 m en moyenne. La réalisation d'un tel plan de tir de prédécoupage a donc nécessité l'exécution de 40 forages espacés de 0,30 m et d'une longueur de 15 m chacun. Ils ont été réalisés par la méthode du carottage continu en diamètre 46 mm, afin d'assurer le meilleur contrôle possible de leur orientation.

Il a été également procédé à une étude de la nature de l'explosif de chargement des forages. La solution retenue a été la poudre noire. Cet explosif, grâce à sa faible vitesse de détonation ne fissure pas la roche en étoile, mais provoque un éclatement suivant le plan reliant les perforations.



36 forages parallèles de pré-découpage pour excavation du radier THM (cf. figure 97)

Figure 106 - Forages de prédécoupage du radier de la chambre THM

C'est un explosif à faible brisance, qui exerce sur la roche une poussée et a peu d'effet de broyage.

Le tir de 100 kg de poudre noire a provoqué le soulèvement de la dalle, ainsi que sa rupture en blocs de tailles diverses. Ces blocs ont fait l'objet de notre premier échantillonnage pour l'étude de l'influence de l'utilisation d'explosif de type poudre noire. Il a paru intéressant en effet d'inclure l'examen de la roche à proximité des forages ayant servis à la mise en place des charges. S'il existe une fissuration, elle doit être faible, et elle est caractérisée par une symétrie cylindrique autour des forages. On pourra essayer de la différencier des fissures induites éventuellement par la réalisation, des prélèvements qui sont verticaux et perpendiculaires au radier.

Par ailleurs, si on admet qu'en cours de foration il puisse apparaître des contraintes dans la zone voisine de la couronne de l'outil au moment du découpage, on peut supposer qu'au delà d'une distance de deux à trois fois l'épaisseur détruite par le carottage, le granite ne sera pas fissuré par ce mécanisme. Pour confirmer ce fait, et donc compléter le premier échantillonnage réalisé sur les blocs issus du prédécoupage, on a prévu la réalisation de carottes en très gros diamètre (750 et 1000 mm), permettant d'intercepter d'un seul coup plusieurs des forages de prédécoupage, et servant aussi à étudier l'effet de libération des contraintes naturelles.

On sait que dans certains cas particuliers (mines à grande profondeur...), on peut observer l'écaillage des parois de galerie, de même que l'on connaît bien le discage de carottes. Dans la mine des Tenelles, les travaux miniers sont situés entre 95 et 100 m de profondeur sous la surface, et la contrainte verticale calculée à partir de la pression lithostatique n'est pas très élevée. Des mesures du champ de contraintes ont été réalisées par mesures hydrauliques sur les fissures des forages S2, S3 et S4 situés dans la recoupe R 430 (figures 97a et 97b) du laboratoire THM (DERLICH S., 1990). Les valeurs moyennes sont les suivantes:

Contrainte verticale :	σ_v	=	2,42 MPa
Contrainte horizontale maximale :	σ_{Hmax}	=	3,26 MPa
Contrainte horizontale minimale ●	σ_{hmin}	=	2,23 MPa
Direction de la contrainte :	n	=	150°

horizontale majeure

Elles sont de l'ordre de grandeur de la résistance à la traction simple (entre mors) mesurée en laboratoire sur des éprouvette de granite d'Auriat (CHARPENTIER J.P., 1983).

Ces valeurs ne permettent pas de provoquer des effets macroscopiques d'écaillage en paroi. Cependant, en effectuant un forage vertical dans le radier de la chambre THM, on provoque une modification du champ naturel des contraintes. En supposant une symétrie plane, on aurait sur la paroi du puits une concentration de contraintes de l'ordre de 7 à 9

MPa le long des génératrices du plan vertical passant par le centre du puits et perpendiculaire à la direction de la contrainte principale horizontale σ_{Hmax} .

La détente mécanique due à l'excavation d'une carotte de 1 mètre de diamètre provoque une augmentation de volume qui, en milieu isotrope et homogène, conduirait à un état d'équilibre sans perturbation du milieu. Dans le cas du granite, les trois minéraux constituants principaux (quartz, feldspath et mica) sont anisotropes, et vont donc avoir des comportements mécaniques différenciés qui peuvent conduire à développer de nouvelles contraintes et essentiellement des fissures. C'est l'une des raisons pour laquelle il a été décidé de mettre en oeuvre, dans le cadre de ce contrat, des carottages de grand diamètre dans la chambre THM des Tenelles et de prélever des échantillons à différentes distances du centre et à différentes profondeurs si possible dans les carottes de grand diamètre afin de pouvoir en déterminer et comparer l'état de fissuration.

5.3.2 Echantillonnage dans les blocs de prédécoupage du radier de la chambre expérimentale THM

5.3.2.1 Situation

Il s'agit d'un ensemble de blocs de granite qui ont été sortis au jour après l'excavation de la chambre THM et disposés actuellement sur le carreau de la mine COGEMA des Tenelles.

Comme on l'a déjà indiqué, ils sont issus du prédécoupage de la chambre expérimentale THM des Tenelles. A partir d'une galerie d'accès dans la mine, on a réalisé un ensemble de forages horizontaux dans un même plan (futur plan du radier de la chambre expérimentale, figure 106), qui ont été chargés d'explosif. On a ainsi créé une cavité avec un radier horizontal pour l'expérimentation THM, et les blocs provenant de cette excavation sont ceux qui sont étudiés.

Toutes les faces inférieures de ces blocs sont donc marquées par un ensemble de cannelures parallèles, qui sont les marques des forages horizontaux ayant servi au prédécoupage et à l'introduction de l'explosif.

Sur l'ensemble des blocs ainsi récupérés, trois ont été retenus pour notre échantillonnage. Il s'agit des BLOCS N°B2, N°B3, et N°B4.

On a réalisé 5 prélèvements sous forme de carottes en diamètre d'environ 62mm pour des longueurs comprises entre 20 et 50 cm.

Les précisions concernant cet échantillonnage réalisé sur les trois blocs sont fournies ci-après.

5.3.2.2 Description de l'échantillonnage

- BLOC N°2

Les deux échantillons sélectionnés sont représentés sur la figure 107 :

- **B-2.1** : carotte prise dans une zone de pegmatite, d'axe perpendiculaire à l'axe horizontal d'une "cannelure" (trace de forage de prédécoupage du radier) et centrée sur celle-ci. On a prévu dans cette carotte, sous la cannelure de prédécoupage pour notre étude la confection de deux lames minces notées B-2.1-XZ dans le plan radial vertical au tir, et B-2.1-XY dans le plan horizontal tangentiel au tir (cf. figure 108).

- **B-2.2** : c'est une carotte prise dans la même zone de pegmatite, au voisinage de la précédente suivant la même direction verticale, mais en dehors de la trace du forage de prédécoupage. Cet échantillon peut servir de comparaison avec le précédent quant à l'influence du tir de découpage du radier. On a donc prévu la confection de 2 lames minces dans les mêmes conditions que B-2.1.

- BLOC N°3:

On a réalisé un seul échantillon carotté, qui porte le n° **B-3.1**.

L'axe de cet échantillon carotté a été pris avec la même direction horizontale que l'axe d'un forage de prédécoupage du radier, et il est proche de l'axe de cette cannelure (cf. figure 109). La carotte ainsi échantillonnée fera l'objet d'une étude de la lame B-3.1-XZ, prise perpendiculairement à l'axe de prédécoupage.

- BLOC N°4

Dans ce bloc, on a carotté deux échantillons (cf. figure 110), pris dans des conditions similaires à celles du BLOC N°2, à savoir:

- **B-4.1** : carotte d'axe vertical perpendiculaire à l'axe horizontal d'une "cannelure" et centrée sur celle-ci.

Comme pour l'échantillon B-2.1, la confection de lames dans les deux directions (suivant la direction, et perpendiculaire à l'axe d'une cannelure de prédécoupage) doit permettre d'apporter des informations sur l'influence des tirs à la poudre noire (lames B-4.1-XZ, et B-4.1-XY);

- **B-4.2** : cette carotte a été prise au voisinage de la précédente, suivant la même direction verticale mais en dehors de la trace du forage de prédécoupage. Cet échantillon peut servir de comparaison avec le précédent quant à l'influence du tir de découpage du radier. On y a sélectionné deux lames B-4.2-XZ, et B-4.2-XY.

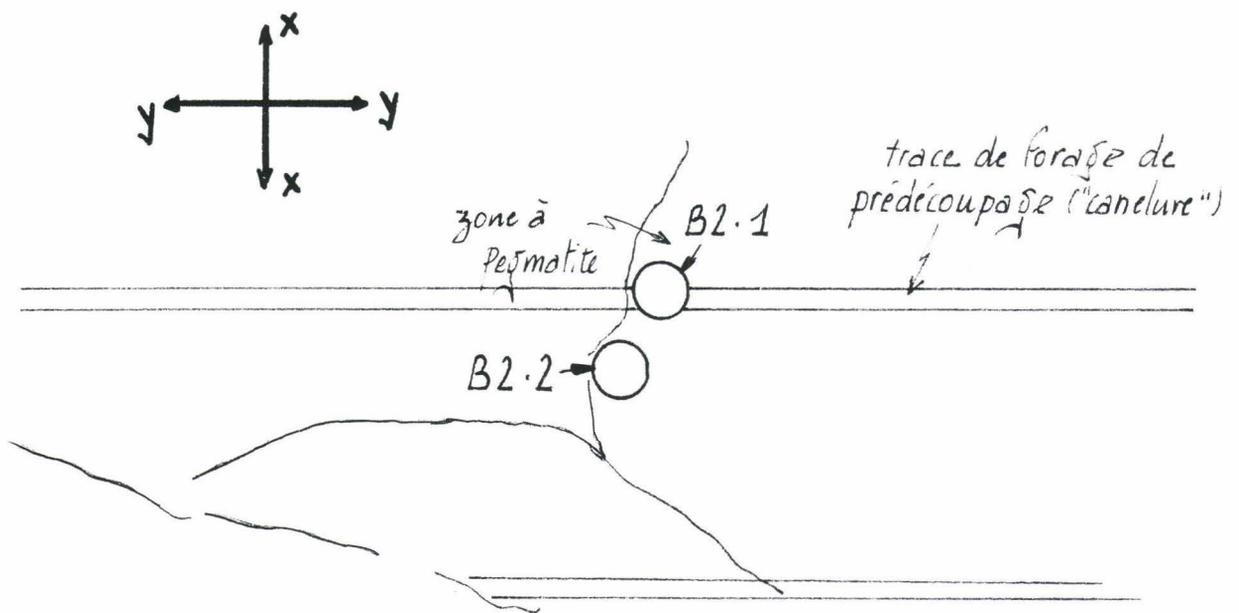
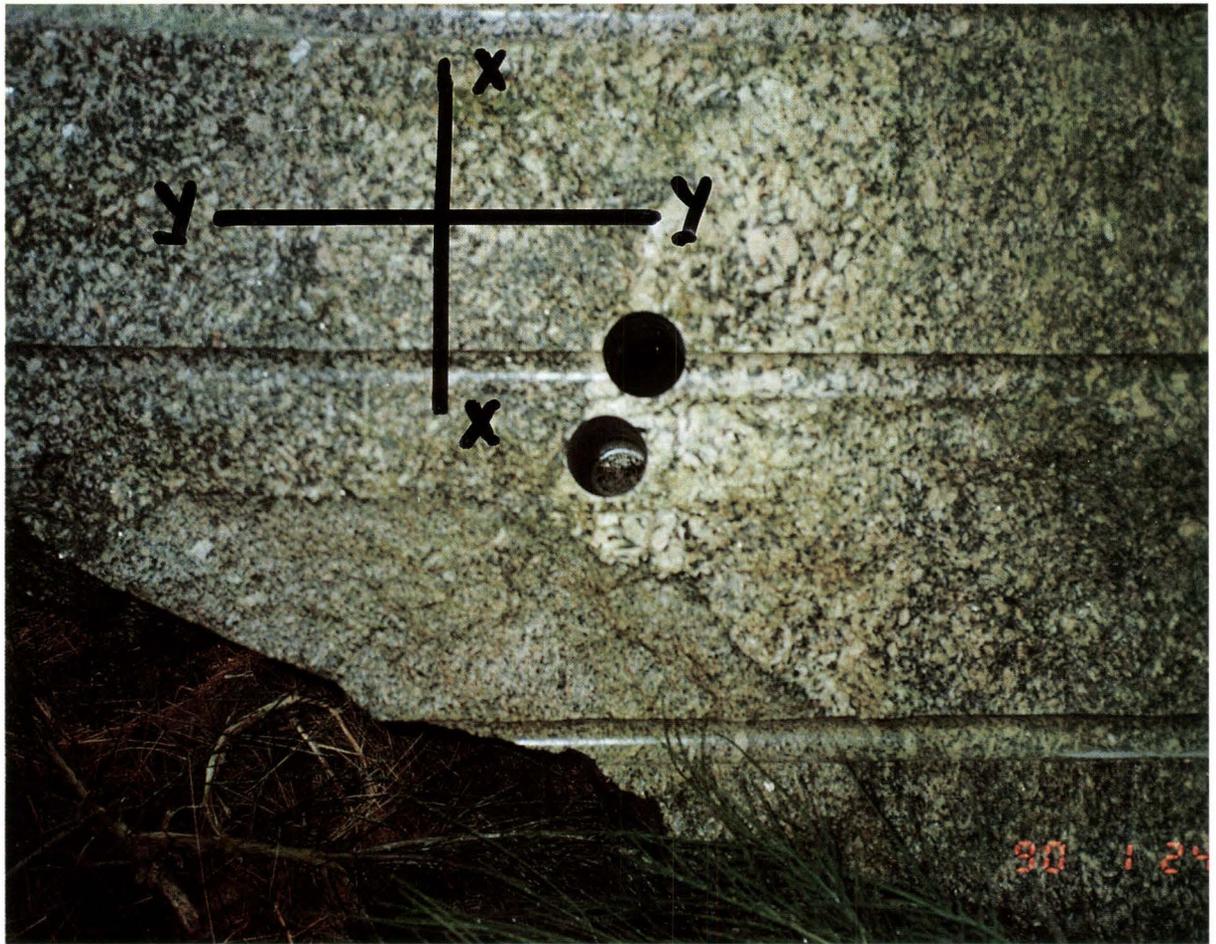


Figure 107 - Echantillons dans le bloc n°B-2

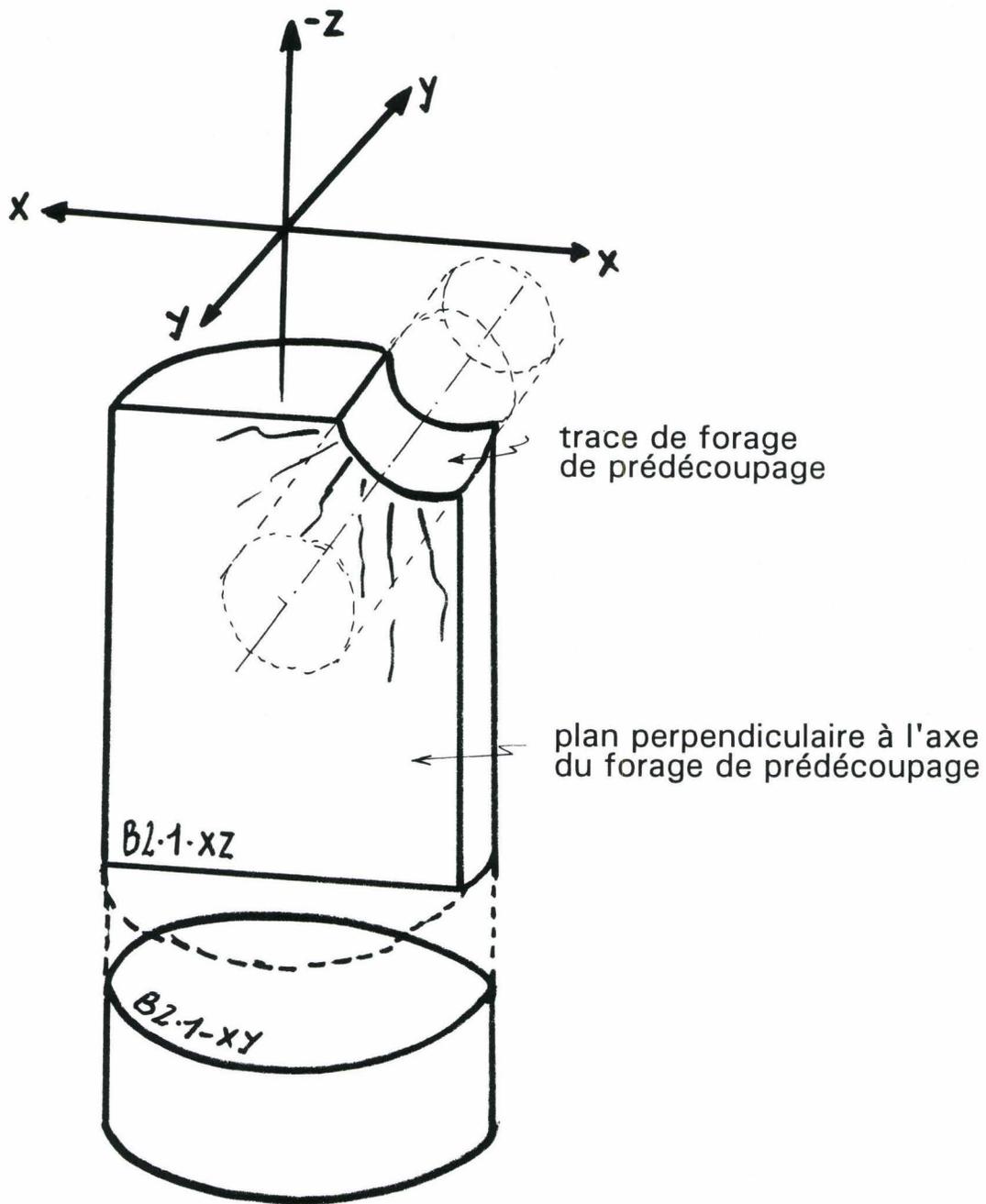


Figure 108 - Détail des découpes de l'échantillon B2-1 dans le bloc n°B-2

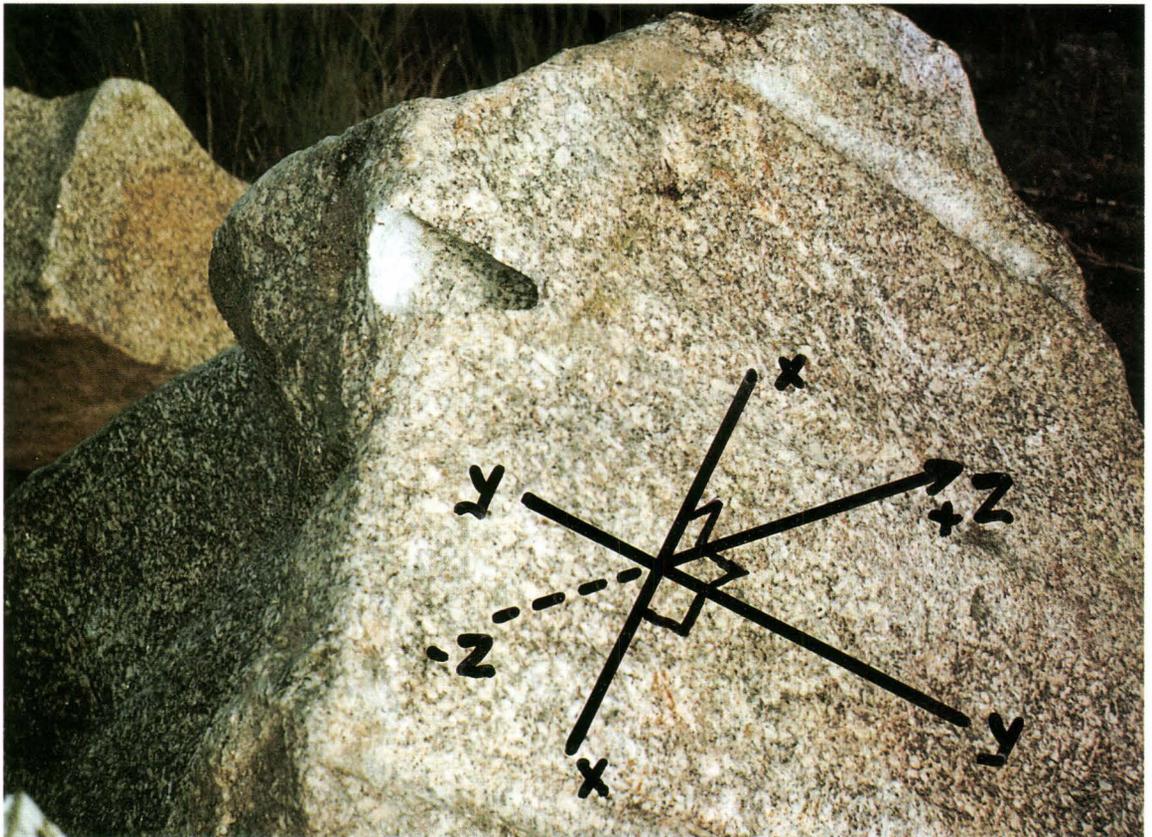
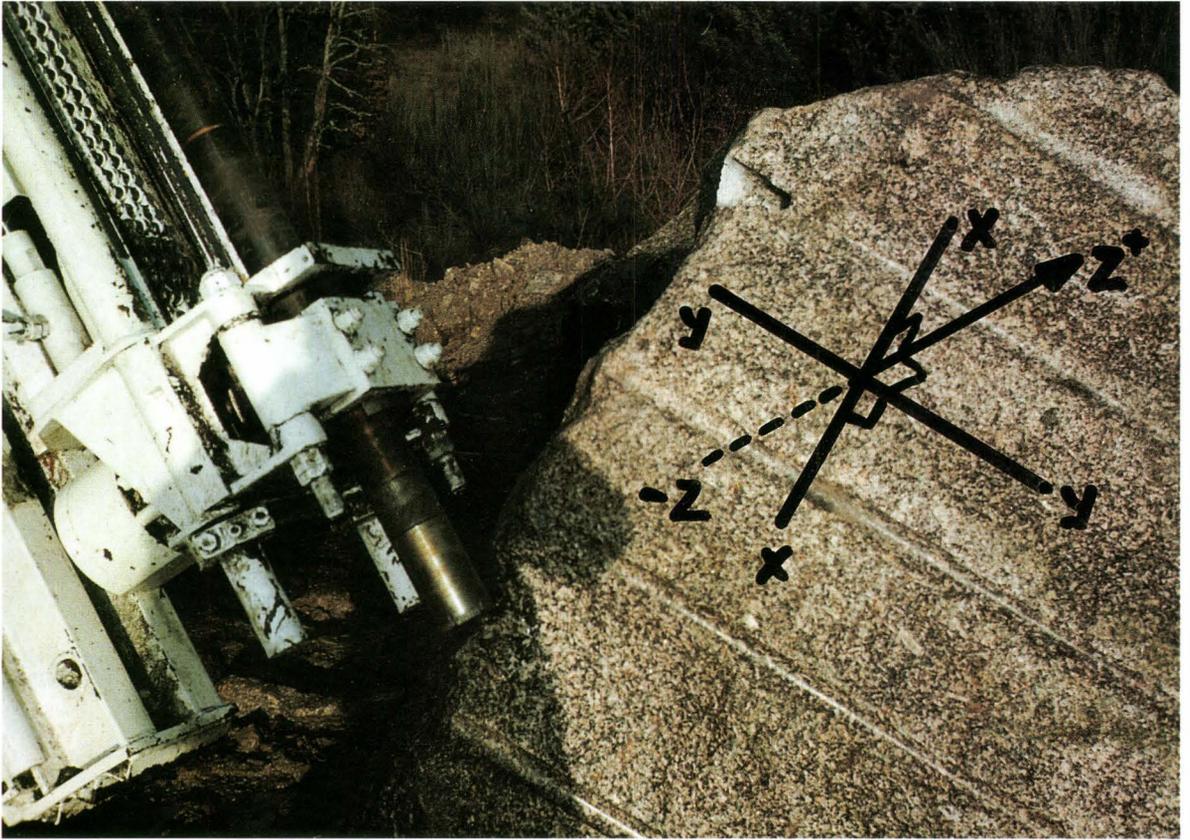


Figure 109 - Echantillon dans le bloc n°B-3

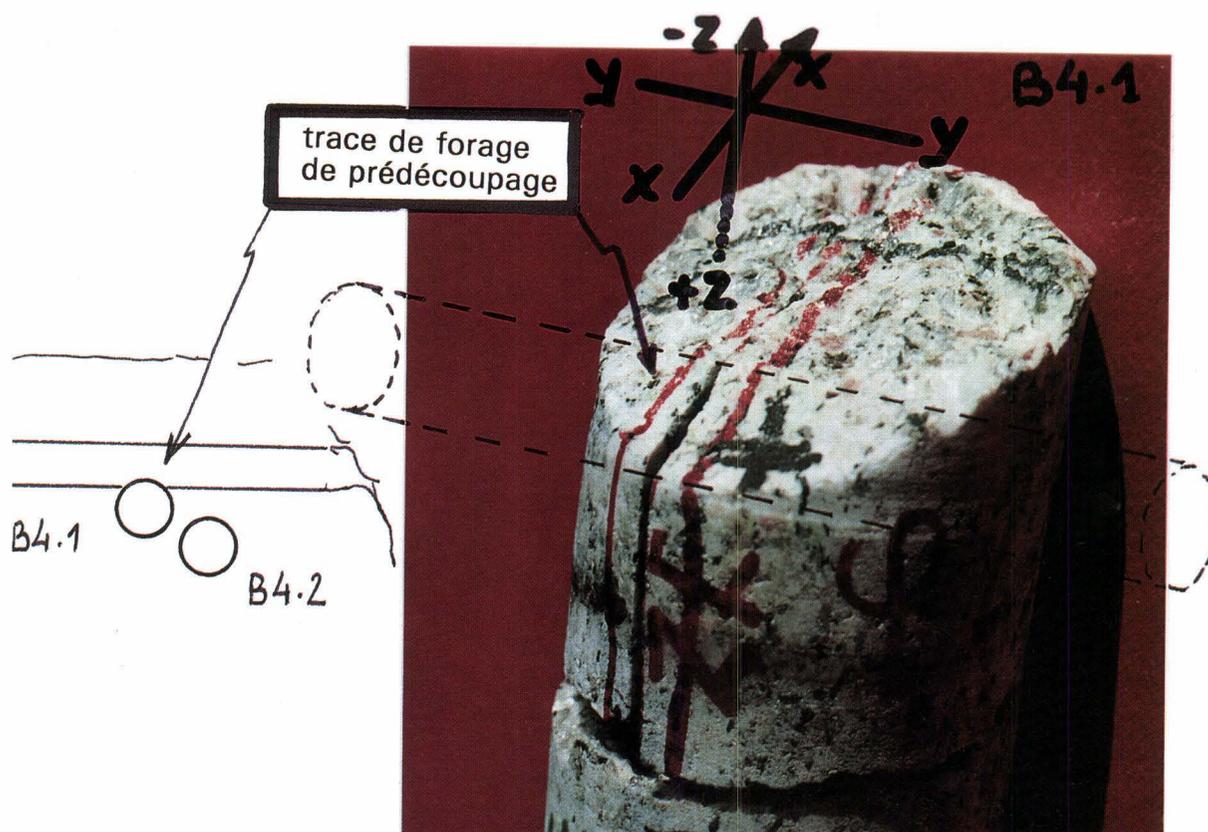
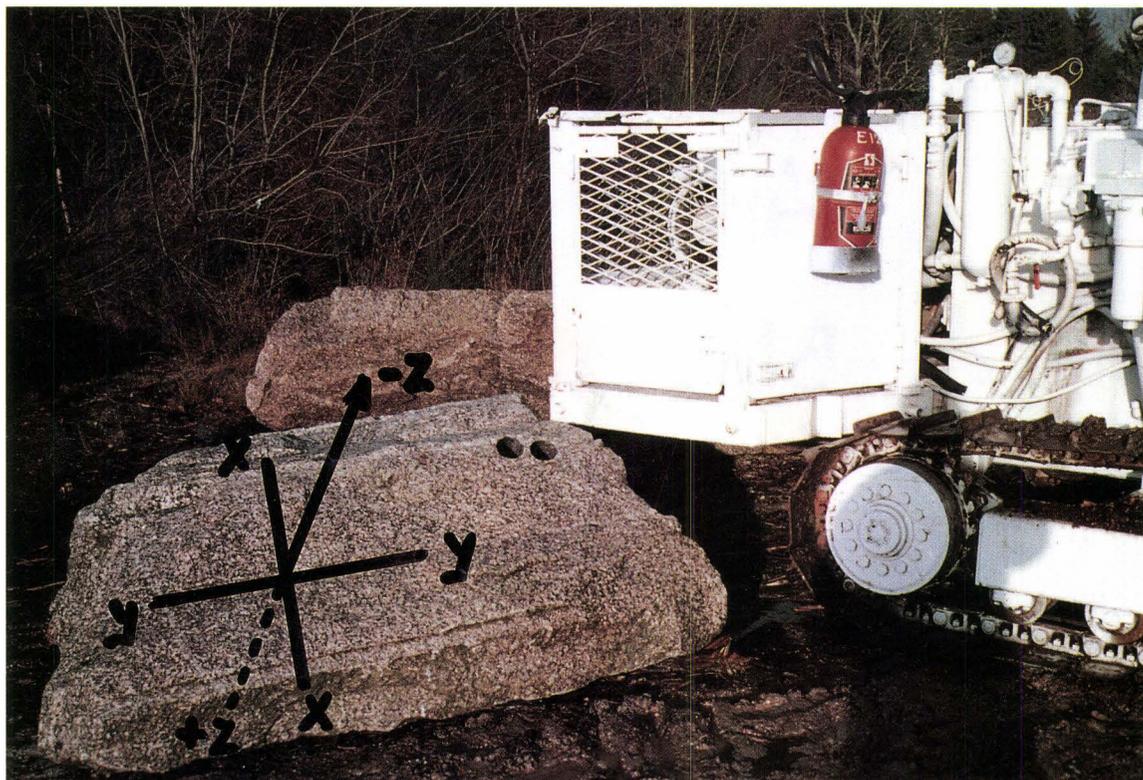


Figure 110 - Echantillons dans le bloc n°B-4

5.3.3 Echantillonnage dans une carotte de forage de grand diamètre (FGD) vertical descendant ($\varnothing = 1000$ mm), chambre THM des Tenelles

5.3.3.1 Objectifs de l'étude de ces échantillons

L'un des objectifs de ces forages en grand diamètre était la démonstration de la possibilité de creusement le moins perturbant possible de puits de grand diamètre en galerie minière. Afin également d'obtenir des échantillons "intacts" de granite pour l'étude de la fissuration du radier THM, il a été mis au point, par la société SOREIS, un dispositif adéquat de forage/carottage en très grand diamètre dans les formations granitiques.

La mise en oeuvre de cette méthode a été exécutée en décembre 1988 dans la chambre expérimentale T.H.M. du site COGEMA des Tenelles (DERLICH S., 1990). Cette mise en oeuvre est décrite en détail dans le paragraphe suivant n°5.4.

Le radier plan de cette chambre expérimentale en milieu granitique (environ - 100 m) avait été obtenu à partir de tirs à la poudre noire, introduit dans des forages dits de "pré-découpage" (cf. figure 106). Une fois l'expérience THM terminée, on a pu prélever dans la chambre, à partir du radier, une carotte cylindrique de plus de 4 tonnes ($\phi = 0,98$ m; H = 2,30 m) en trou vertical descendant non débouchant.

Le dispositif de carottage utilisé est sensé apporter le minimum de perturbation au milieu environnant, et fournit une carotte de surface et de diamètre réguliers.

L'implantation de ce forage le plus important, référencé FGD2 ϕ 1000 dans la chambre THM des Tenelles est précisée sur la figure 97.

5.3.3.2 Echantillonnage FGD2 \varnothing 1000

Dans la carotte du Forage en Grand Diamètre (FGD2 ϕ 1000), il a été prélevé, par carottage, 5 échantillons notés GD1, GD2, GD3, GD4, GD5, à partir de son sommet (niveau du radier) suivant un diamètre orienté perpendiculairement à la direction des forages de prédécoupage du radier des Tenelles. (cf. figure 111).

La situation exacte des 5 forages échantillonnés dans la carotte FGD2 ϕ 1000 est indiquée figure 112.

Les 5 forages sont en ϕ 70 mm (sauf GD2 qui est en ϕ 63 mm); leur longueur est d'environ 1,5 m et ils portent tous du béton en tête (socle sur le radier pour l'installation de la sondeuse pour le FGD2 ϕ 1000).

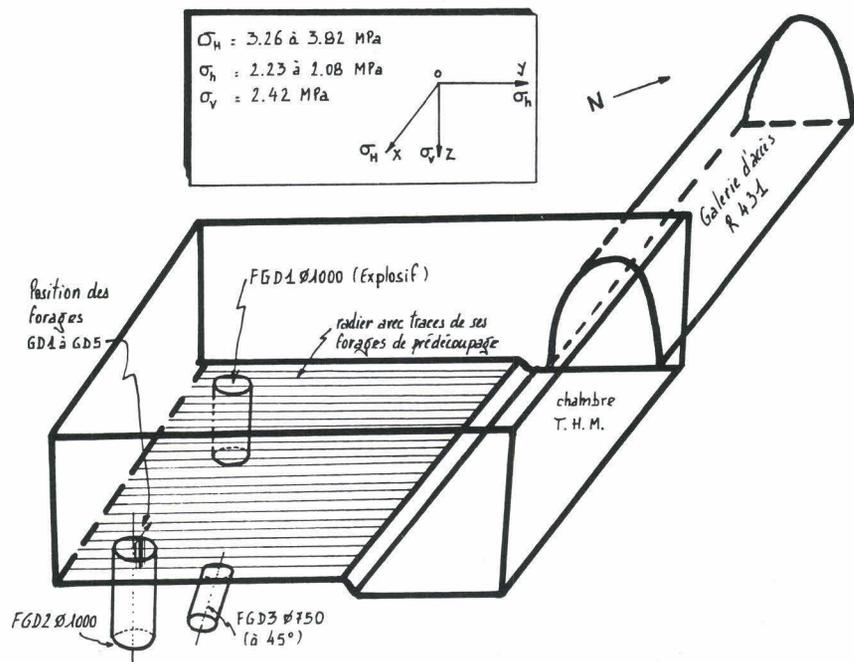
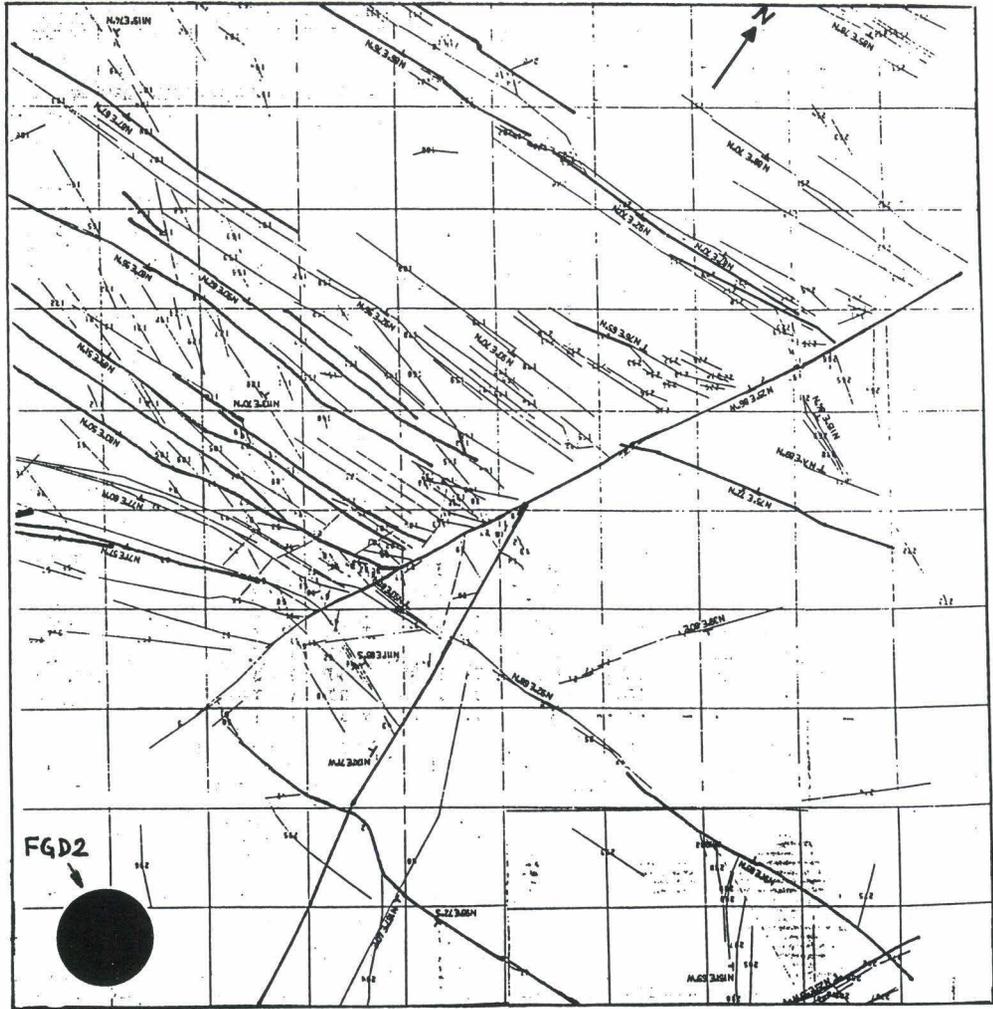


Figure 111 - Implantation des forages FGD dans la chambre THM

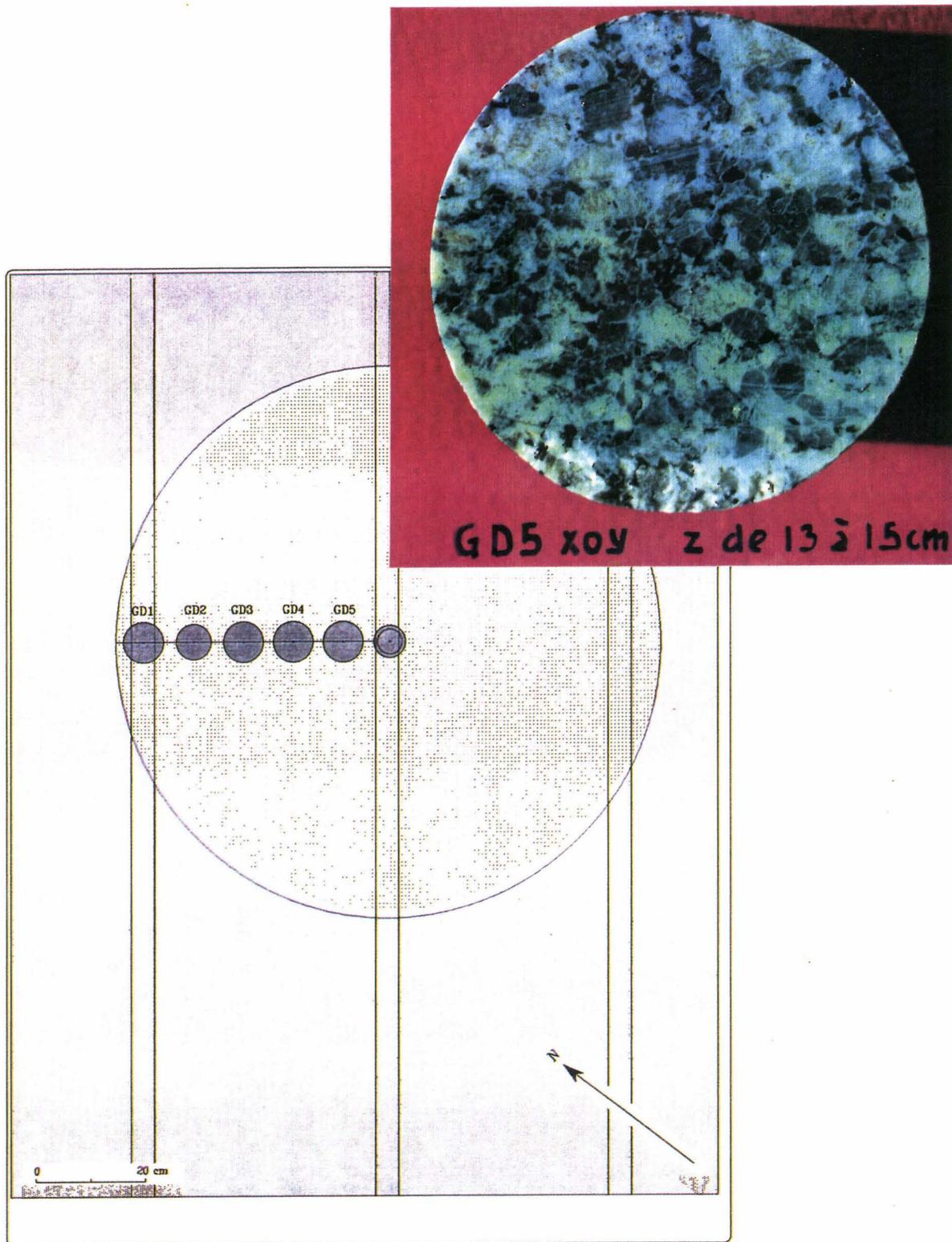


Figure 112 - (a) Disposition des 5 échantillons sur FGD2 Ø 1000
(b) Exemple de la section GD5 pour analyses

On notera que la tête de GD1 contient la trace d'un forage de prédécoupage.

Ainsi, pour ces échantillons carottés dans ce grand forage il s'agit d'analyser l'influence sur la fissuration du forage FGD2 ϕ 1000 lui même depuis le bord externe (échantillon n°GD1) jusqu'au centre (échantillon n°GD5) de la grande carotte.

Pour le choix des lames dans ces 5 carottes, on a retenu des niveaux à la même cote, et on tient compte du fait que la partie supérieure est influencée par les tirs de prédécoupage (voir l'échantillon GD1).

Le tableau ci-après résume ces données d'échantillonnage.

Tableau 26 - Echantillonnage carotté dans FGD2 ϕ 1000

	Bord=0	FGD2 ϕ 1000			Centre=490
noms échantillons	GD1	GD2	GD3	GD4	GD5
diamètres carottés	ϕ 70	ϕ 63	ϕ 70	ϕ 70	ϕ 70
0 à 13 cm tête des échantillons carottés avec béton					
13 à 15 cm : cote des lames minces	XOY	XOY	XOY	XOY	XOY
env.1500cm : fin des échantillons carottés dans FGD2 ϕ 1000					

L'analyse des lames minces confectionnées dans cette carotte FGD2 ϕ 1000 doit permettre de s'assurer de la faible incidence de ce mode de foration sur la fissuration du granite ainsi excavé en profondeur.

Notons que le forage FGD2 ϕ 1000 a été implanté dans une zone du radier THM où la fracturation naturelle relevée en surface est très faible (cf. Figure n°111). Ainsi on peut réellement étudier l'influence du mode de foration sur un granite sain, sans qu'il y ait a priori d'influences supplémentaires dues à la fracturation déjà existante.

Cette influence minime de la foration en grand diamètre sur la fissuration de la roche encaissante a pu être déjà constatée macroscopiquement. Les détails sur ce type d'opération et son grand intérêt dans le cadre de recherches technologiques concernant le stockage géologique, sont donnés ci après.

5.4 Réalisation de forages carottes grands diamètres dans un massif granitique en mine

5.4.1 Objectifs du creusement de puits de grands diamètres à partir de galeries minières

L'étude de la fissuration des roches dans des mines creusées dans le granite nous a conduit à réaliser des carottes de gros diamètre (0,75 ou 0,98 m) pour des longueurs de 2 à 2,2 m afin de tenter de minimiser le développement de fissures dans la roche, résultant des effets du carottage.

A la demande de l'IPSN, la société SOREIS a étudié en 1987 la possibilité de mettre en oeuvre une méthode de carottage permettant l'obtention et la récupération d'échantillons de roches cristallines de très grandes dimensions (environ 1 mètre de diamètre) sur plusieurs mètres de hauteur en trou borgne non débouchant, et ce à partir d'une galerie de mine de dimension standard.

La réalisation effective de ce prélèvement d'échantillons intacts de granite de très gros diamètre a été mise en oeuvre à partir du radier de la chambre expérimentale des Tenelles à 100 m de profondeur environ (site de l'expérience THM, DERLICH S., 1990). Le toit de la chambre est à environ 5 m de hauteur au dessus du radier, et la mise en oeuvre de la sondeuse n'a pas nécessité d'aménagement particulier au dessus des puits réalisés (ni excavation au toit, ni grosse puissance, ni grandes quantités de fluides...).

Cette opération de grande importance, menée avec succès, présente un double intérêt:

- obtention d'un échantillon d'un volume permettant d'atteindre les conditions mécaniques recherchées;
- exécution d'un forage par une méthode "douce", c'est à dire apportant un minimum de perturbations au milieu environnant. La paroi de forage obtenue est très régulière et présente un diamètre régulier tant en direction axiale que radiale.

Les méthodes d'extraction de la carotte hors du forage peuvent être adaptées à l'objectif souhaité:

- soit la carotte doit être récupérée intacte et sa conservation au cours de l'extraction est alors prioritaire;
- soit l'objectif visé est la réalisation d'un puits régulier et on mettra en oeuvre une méthode par laquelle la carotte sera extraite plus rapidement. Elle sera éventuellement fragmentée pour en faciliter l'évacuation.

Lors de nos essais dans la chambre THM de la mine des Tenelles, deux puits verticaux descendants d'environ 2 mètres de profondeur et 1 mètre de diamètre ont été réalisés. Pour l'un des puits, la carotte a été extraite en entier, intacte, après rupture à la base, par palan, alors que pour l'autre l'utilisation d'explosif l'a fracturée et projetée hors du puits.

Dans ces deux cas, les puits résultant des deux forages présentent la même qualité de rectitude et d'état de paroi.

Les possibilités de cette méthode ne sont pas limitées aux 2 mètres de profondeurs réalisés pour la présente expérimentation. Dans un souci de rentabilité de ce procédé, seules des manipulations devant être réalisées pour de plus grandes profondeurs ont été retenues. Ainsi, il serait tout à fait possible d'adapter cette méthode jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Dans le cadre de cette même expérimentation, une troisième carotte de 0,75 m de diamètre, 1 m de long, descendante et inclinée à 45° a également été réalisée. Ainsi, on montre que les conditions de réalisation de ce type de carottes ne sont pas limitatives, et qu'il serait tout à fait possible de forer de la sorte beaucoup plus profond sous des angles variés.

5.4.2 Description du site et du projet

Les études préliminaires et les travaux ont été réalisés par la Société SOREIS de Limoges (Haute Vienne) à la demande et pour le compte de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire du Commissariat à l'Energie Atomique (Service d'Etudes de Protection pour les Déchets - Centre de Fontenay aux Roses).

Cette opération s'est déroulée dans une mine d'uranium des Tenelles du siège minier de FANAY-AUGERES (figure 96), exploitée par la COGEMA.

C'est dans la chambre principale du laboratoire souterrain qu'ont eu lieu les carottages.

L'accès à ce laboratoire se fait aisément par véhicule, par une descenderie partant du carreau de la mine des Tenelles.

On trouvera toutes les précisions relatives aux caractéristiques de ce site (roche granitique et son environnement) dans les références bibliographiques (DERLICH S., 1989 et 1990).

Les sondages réalisés sont au nombre de trois:

- un forage vertical descendant d'environ 1000 mm de diamètre pour une profondeur de 2,30 m, dont la carotte a été extraite par l'utilisation d'explosif (FGD1 ϕ 1000);
- un forage vertical descendant d'environ 1000 mm de diamètre pour une profondeur de 2,30 m, dont la carotte a été extraite par sectionnage mécanique de la base et remontée intacte au palan (FGD2 ϕ 1000);
- un forage incliné à 45° descendant, de 750 mm de diamètre pour une longueur de l'ordre de 1,30 m (FGD3 ϕ 750).

L'implantation de ces ouvrages dans le laboratoire THM est précisée sur les figures 97 et 111.

Ce projet a comporté deux phases distinctes:

- une phase d'étude préalable comprenant la recherche et la définition des moyens à mettre en oeuvre, les adaptations nécessaires, la fabrication des outils, la définition de la méthodologie de forage, et l'évaluation des coûts;

- une phase de réalisation avec:

- . les carottages verticaux implantés dans la chambre du laboratoire THM à proximité de la paroi verticale;

- . le carottage oblique descendant, implanté à l'intersection de la paroi verticale et de la dalle de la chambre THM, à quelques mètres des précédents.

Pour une bonne réalisation de ces ouvrages, le granite doit être parfaitement découpé, et les carottes doivent être extraites intactes sans que leur intégrité géométrique, mécanique, géologique et tectonique n'aient été modifiées.

Ces mêmes conditions étaient applicables aux parois des forages ainsi exécutés.

5.4.3 Moyens mis en oeuvre

5.4.3.1 La sondeuse

C'est une sondeuse Diamant Boart DB 1500 équipée d'un moteur électrique de 55 kW qui a été retenue et utilisée. Ses caractéristiques essentielles par rapport au problème posé sont:

- avance hydraulique, capable d'exercer une poussée ou une retenue à l'aide de deux vérins de 80x36;

- course de la broche de 600 mm pour un diamètre de passage de 92 mm;

- broche orientable permettant de carotter dans toutes les directions;

- châssis rétractable, avec course de 400 mm et glissement sur bâti métallique;

- treuil de manoeuvre d'une capacité de 13,7 tonnes;

- mandrin de serrage hydraulique.

Cette sondeuse a été fixée à une sous-structure métallique avec plancher de travail, de 1,40 m de hauteur, permettant ainsi le dégagement du carottier sous la broche.

Cet ensemble prêt à fonctionner dans les conditions sus-décrites est présenté sur la photographie de la figure 113.

5.4.3.2 Les carottiers

Compte tenu de l'importance des vitesses circonférentielles induites par la rotation de la machine pour ces carottages en gros diamètre, les carottiers utilisés devaient répondre à des critères très précis de fabrication.

Ils ont été fabriqués par la société Diamant Boart d'après les spécifications et sous la direction de la société SOREIS.

Le système d'entraînement est composé d'une tige HR de forage, fixée sur le haut du carottier par des flasques boulonnées (diamètre de la tige : 88,9 mm OD x 77,8 mm ID; 70 mm au refoulement).

L'extrémité basse du carottier (surface d'attaque) est constituée d'une série de segments diamantés brasés sur la périphérie.

La dimension de ce segment a été étudiée en fonction du problème posé, c'est à dire, en tenant compte des poids applicables, de la vitesse de rotation, et de la circulation des fluides pour la remontée des cuttings; la vitesse de pénétration est déterminée par le nombre de segments sur la périphérie.

Chaque segment est composé d'un liant ou matrice dans lequel est noyée de la poussière de diamant naturel. Il comporte une gorge permettant de le positionner sur l'extrémité du tube carottier. Tous les segments sont fixés à l'aide d'une brasure d'argent, et la chauffe du tube (600°C environ) est très délicate, car il faut absolument éviter toute déformation de cette couronne.

La longueur des carottiers est soit de 0,60 m soit de 2,30 m, et les diamètres intérieurs respectivement de 1000 mm ou 750 mm suivant les cas. La photographie de la figure 113 donne une idée de l'un des carottiers employés.

5.4.3.3 Autres moyens

5.4.3.3.1 Système d'injection

Comme dans tout travail de carottage, l'injection revêt une importance considérable. Nous en rappellerons simplement les fonctions principales:

- lubrifier et refroidir l'outil, afin de maintenir sa durée de vie et sa capacité de coupe optimale;



Figure 113- Sondeuse et carottier ϕ 1000

- remonter et évacuer les cuttings dégagés par l'épaisseur de la couronne.

Les diamètres des carottiers habituels s'échelonnent entre 60 et 150 mm environ, et l'utilisation d'une pompe à piston classique de type BEAN 470 (230 l/mn sous 40 bars) est bien adaptée, voir surdimensionnée. Pour des diamètres de 750 ou 1000 mm, elle s'avère très insuffisante, compte tenu du volume beaucoup plus important des cuttings et du débit nécessaire à leur dégagement efficace. Aussi, l'injection du système a été adaptée à partir d'une pompe FLYGT à faible pression (3 à 5 bars) mais à fort débit (500 l/mn).

La colonne d'injection est constituée d'un flexible armé, de 2" de diamètre, et d'un touret 25/3,5.

Le fluide utilisé a été l'eau. L'alimentation en eau a été fournie à partir de l'installation fixe de la mine.

Les produits ou additifs de foration sont des produits GSP: un polymère viscosifiant, le GS 550 et un produit "extrême pression" le GS 20 qui a pour but de mieux refroidir les segments diamantés et d'augmenter la durée relative diamant/roche.

5.4.3.3.2 Système de manutention

Une fois l'opération de carottage réalisée, la manutention de la carotte est un problème à considérer, car son poids (4,8 tonnes pour une carotte intacte de 2,30 m de long pour un diamètre de 1000 mm) nécessite une installation spécifique.

Pendant toute la durée des travaux, on a utilisé un engin de levage, qui a permis de manoeuvrer les carottiers et de les approcher de la zone de travail.

5.4.3.3.3 Infrastructures de génie civil

Un élément essentiel de la réussite de l'opération réside dans la stabilité parfaite du matériel en cours de forage. Aussi, sur la surface granitique de la chambre THM, il a été coulé des semelles en béton comportant des tiges filetées, sur lesquelles a été fixée la sous-structure déjà mentionnée. Pendant toute la durée des travaux, il n'a été enregistré aucune vibration.

En ce qui concerne la tête de forage, une dalle de béton a été mise en place, parfaitement horizontale, permettant au carottier une attaque simultanée sur toute sa périphérie.

La mise en place du béton dans le coffrage, une virole en tôle épaisse d'un diamètre très légèrement supérieur au diamètre extérieur du carottier a été scellée. Son but est de guider le carottier pour l'attaque et de constituer une réserve de fluide pour le refroidissement des segments diamantés. Cette disposition est visible au bas de la photographie de la figure 114.



Figure 114 - Carotte FGD2 ϕ 1000 et virole en tête de forage

5.4.4 Réalisation des forages

5.4.4.1 Réalisation du forage FGD1 Ø 1000

Le premier sondage réalisé est un sondage vertical descendant de diamètre 1000 mm et 2,30 m de profondeur (voir figures 97 et 111 pour l'implantation). Le déroulement chronologique des opérations a été le suivant:

- préparation, descente du matériel en mine, installation, et génie civil ;
- opérations de foration (durée : 2 postes de 8 heures).

Les opérations de carottages se sont déroulées dans de bonnes conditions d'avancement, de découpe, et de remontée des cuttings. Le système de circulation d'eau a parfaitement fonctionné.

Des poids sur la couronne compatibles avec la capacité de la machine ont été exercés et les vitesses de rotation ont été ajustées au mieux.

La fin du carottage nous a naturellement amené à passer à la deuxième phase de l'opération, à savoir la rupture de la carotte et son extraction.

Rappelons brièvement les opérations effectuées lors d'un carottage classique, c'est à dire, à l'aide de carottiers standards dont les dimensions des carottes obtenues s'échelonnent entre 36,4 mm (BQ), 85 mm (PQ) ou 102 mm (146 SK 6L):

- à la fin du carottage, la rotation est arrêtée, et le sondeur, par l'intermédiaire de la broche de la machine, exerce une traction sur la garniture bloquée dans le mandrin;
- l'extracteur, de forme cône, coince alors la carotte, et celle-ci rompt et se désolidarise du massif sous l'effet de cet effort. Il suffit alors de remonter le carottier et de récupérer l'échantillon. Cette manoeuvre est valable dans toutes les formations, y compris pour les granites les plus compacts.

Dans ce cas, cette manoeuvre est quasiment impossible à mettre en oeuvre, car d'abord, la présence d'un extracteur dans le carottier obligerait à une sur-épaisseur de l'acier et donc de l'outil, d'où une très forte diminution de la vitesse de pénétration et ensuite parce que l'effort de traction qui serait nécessaire pour rompre une carotte d'un tel diamètre, nous conduirait à utiliser un appareil extrêmement plus puissant et de grande dimensions.

Pour résoudre ce problème, il a donc été imaginé d'entourer la carotte, à sa base, d'un cordeau détonnant, qui avec un effort de traction conjugué au tir, devait permettre la rupture sous l'effet de cisaillement induit par l'onde de choc.

Cette mission, confiée à un spécialiste en explosif, a été mal évaluée, et s'est malheureusement soldée par un échec, car l'explosion a détruit la carotte, et a induit sur les parois du forage et dans la formation granitique même, une microfissuration incompatible avec les buts recherchés.

5.4.4.2 Réalisation du forage FGD2 Ø 1000

A la suite de cette première opération, il a été procédé à la réalisation d'un second forage FGD2 ϕ 1000 de mêmes caractéristiques générales que le précédent. Il a été implanté dans l'angle opposé de la chambre THM (cf figures 97 et 111) et la foration a pu reprendre, une fois les travaux de génie civil indispensables réalisés.

La chronologie des travaux a été la suivante:

- génie civil, installation, etc...;
- foration.

La fin du forage a eu lieu pour 2,30 m de longueur de carotte.

Pour la rupture de cette carotte, l'utilisation de toute forme d'explosif a été proscrite. Il a été imaginé un système mécanique, qui a fonctionné de façon parfaite, et la rupture a été obtenue à la base de la carotte, sans aucune altération de celle-ci, ni des parois du puits.

Le temps de mise en place de l'appareillage spécifique, et l'opération de rupture ont duré environ 30 minutes.

A la suite de cette opération, la carotte a été extraite, comme l'atteste la figure 114.

5.4.4.3 Réalisation du forage FGD3 Ø 750

A la suite de la réalisation du forage FGD 2, il a été procédé à l'installation de la machine sur le site du sondage FGD 3 descendant vertical, incliné à 45° de 750 mm de diamètre et de 1,30 m de longueur.

La chronologie des opérations a été la suivante :

- génie civil et installation ;
- carottage.

La rupture de la carotte a été réalisée à l'aide du même appareillage que pour la précédente et avec le même succès.

Les photographies de la figure 115 montrent la fin de la phase d'extraction de cette carotte.

Enfin, notons que pour les phases finales d'extraction et de transport il a été procédé comme suit:

- dans le haut de chaque carotte, il a été foré un trou permettant la mise en place d'un boulon d'ancrage et d'un anneau de levage;
- il a donc suffi de connecter un câble par l'intermédiaire de la poulie fixée au toit de la chambre THM, et à l'aide d'un palan, d'extraire les carottes de leur puits.



Figure 115 - Extraction de la carotte inclinée FGD3 ϕ 750

5.4.5 Conclusion sur les opérations de carottage très gros diamètre

Ces opérations ont permis de démontrer la faisabilité de forages de très gros diamètres dans les conditions pré-citées. On retiendra de ces essais les constatations suivantes:

- au niveau du matériel, et notamment de la sondeuse, un appareillage de type carottage classique mais bien adapté est suffisant. Il faut en effet quelques adaptations et en particulier, pour de futures opérations, l'équipement électrique nécessitera la mise en place d'un système de variation d'intensité pour moduler et ajuster au mieux la vitesse de rotation du carottier;

- les outils utilisés se sont très bien comportés, et leur usure a été tout à fait normale. Il n'a pas été observé de dessertissage de segments, et le poids appliqué a permis des vitesses d'avancement relativement rapides. La carotte a été réalisée en 8 heures avec un changement de carottier.

Il a été possible également de conclure que, pour ce type d'opération où le respect de l'intégrité du matériau est primordial, l'utilisation des explosifs est à éviter car il y a risque d'induire des fissurations supplémentaires telles qu'elles ont pu être observées dans le puits du premier forage FGD 1. La méthode mise en oeuvre occasionne un faible volume de roche détruit par rapport au "plein trou", et les parois du puits restent lisses et parfaitement calibrées ; ceci est illustré par les photographies de la figure 116.

Si l'on se place dans la perspective de réaliser des puits borgnes de plusieurs mètres de longueur, voire plusieurs dizaines, la méthode utilisée peut tout à fait convenir, à la fois sur le plan technique, et sur le plan financier, en raison du faible coût journalier du matériel mis en oeuvre, du personnel réduit, et du système très rapide et peu onéreux de rupture et d'extraction des carottes.

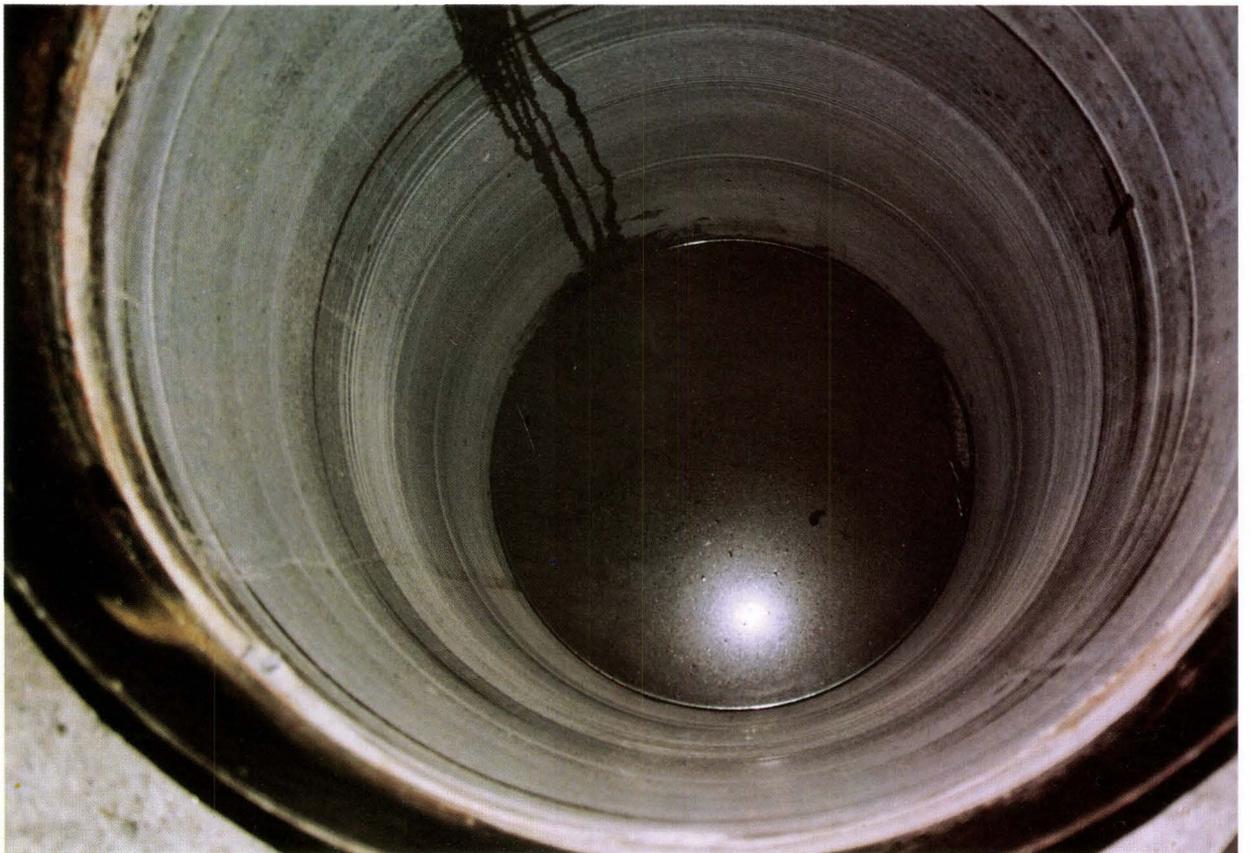


Figure 116 - Parois parfaitement lisses du forage FGD2 ϕ 1000

6. ETUDE DE LA FRACTURATION INDUITE PAR LES FORAGES DANS LE GRANITE DE LA MINE DE VENACHAT

6.1 Introduction

La réalisation de forages dans un milieu granitique peut être à l'origine d'une fracturation induite, différente de celle d'origine tectonique. Dans la mesure où l'organisation structurale du milieu considéré est analysée à partir des fractures présentes dans le forage, il est indispensable de différencier la fracturation d'origine tectonique (naturelle) de celle liée au processus de forage (artificielle). Dans ce but on a réalisé des carottages dans le granite avec imprégnation préalable à la résine dans des forages de courte longueur afin d'étudier cette fracturation artificielle.

Des opérations d'imprégnation de granite par résine en laboratoire ont été présentées pour des carottes du forage d'Auriat (VUILLEUMIER C., 1990; et dans ce rapport paragraphe n°3). Pour l'étude de la microfissuration induite par la foration, il est nécessaire d'analyser la zone située autour du forage et les essais d'imprégnation doivent être réalisés sur le terrain. La roche en place est soumise à un champ de contraintes naturel qui conditionne son comportement au moment de l'extraction par forage.

Cependant, les imprégnations in situ posent des problèmes différents de ceux rencontrés en laboratoire. Nous avons été conduits à élaborer dans le cadre de ce contrat de recherche toute une méthodologie quant à la faisabilité d'imprégnation in situ avant prélèvements.

6.2 Description du site retenu

Les forages ont été localisés dans un secteur de massif granitique supportant une certaine charge lithostatique. La mine de Vénachat située au Nord de Limoges (Haute Vienne) qui a été retenue pour réaliser l'essai (figure 96) présente ces conditions.

Ce paragraphe présente les caractéristiques géologique du secteur d'essai dans la mine de Vénachat et la localisation des forages.

6.2.1 Cadre structural de la région

La mine de Vénachat est située dans le Limousin à l'ouest du Massif Central. Cette région a été le théâtre de fortes déformations tectoniques, de phases métamorphiques et de la mise en place de granites liés à l'orogénèse hercynienne (MOLLIER, 1983; MOLLIER et LESPINASSE, 1985; HOLLIGER et al., 1985). Le secteur d'étude est localisé dans le leucogranite tardi-hercynien du massif de Saint Sylvestre (figure 117). Ce massif est composé de trois unités granitiques : le granite planaire de la Brême à biotite-sillimanite, le leucogranite fin de Chateauponsac et le leucogranite à deux micas de Saint Sylvestre. Cette dernière unité comporte une zonalité (BARBIER et RANCHIN, 1969; LEROY, 1978) : une zone occidentale à faciès "non albitisé" à muscovite losangique et à faciès à grain, et une zone orientale "albitisée" à perthites maclées. La mine de Vénachat est située dans la zone occidentale non albitisée.

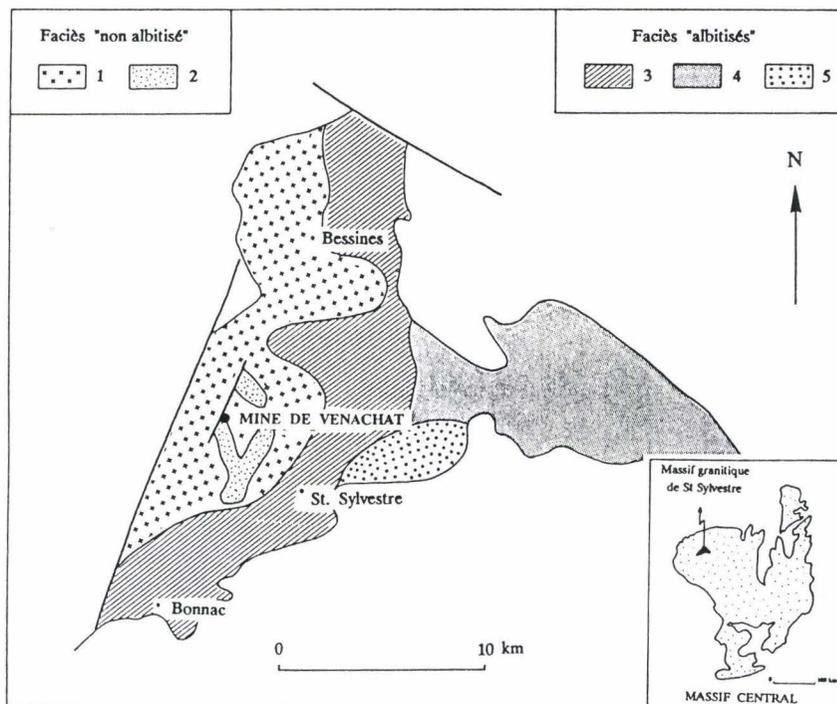
Un ensemble de phases tectoniques majeures a affecté le complexe granitique de Saint Sylvestre. Les principales structures associées à cette évolution tectonique sont les suivantes (figure 118) : la faille de Nantiat que limite le granite de la Brême de la série cristallophyllienne de la Basse-Marche, une fracturation régionale de direction N10 à N30 soulignée par la zone d'accidents de la Nationale 20 et par des filons lamprophyres, et une fracturation orientée N130 à N150.

6.2.2 Caractéristiques structurales de la mine de Vénachat

L'exploitation de la mine d'uranium de Vénachat est en partie souterraine et en partie à ciel ouvert. Le secteur choisi pour l'étude est localisé dans la partie à ciel ouvert (figure 119). Le granite est caractérisé par une forte densité de fracturation orientée principalement E-W, et par une fracturation parallèle aux accidents de la Nationale 20 le long de laquelle plusieurs filons de pegmatites sont associés. En général la fracturation est fortement inclinée.

Un ensemble de failles qui a affecté le massif granitique présente une cinématique polyphasée. Le long de ces failles l'altération du granite est clairement soulignée.

Les deux familles de fractures décrites précédemment ont conduit à la formation de blocs tabulaires dans le granite.



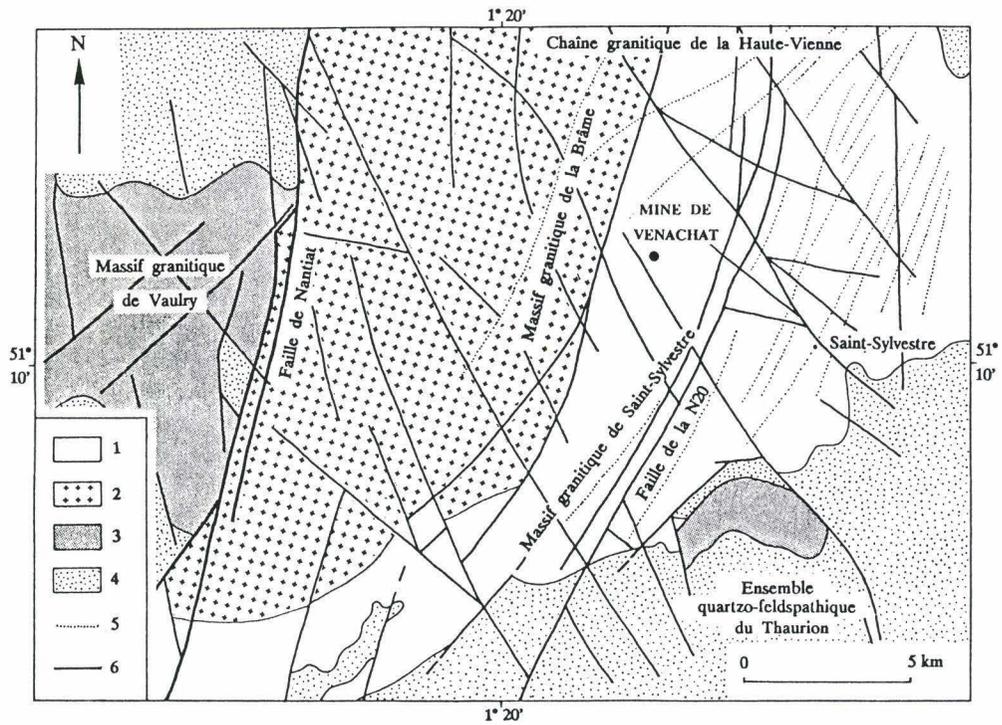
Faciès "non albitisé":

- 1 - à muscovite losangique
- 2 - à grain fin.

Faciès "albitisés":

- 3 - à microcline quadrillé
- 4 - sans microcline quadrillé
- 5 - à quartz monocristallin.

Figure 117 - Localisation de la mine de Vénachat dans le contexte du complexe granitique du massif de Saint Sylvestre (Carte d'après J. Barbier et G. Ranchin, 1969)



- 1 - granite de Saint Sylvestre
- 2 - granite de la Brême
- 3 - granite de Vaulry
- 4 - séries métamorphiques
- 5 - filons
- 6 - failles

Figure 118 - Schéma structural de la région d'Ambazac (Carte BRGM, 1974)



Figure 119 - Panorama de la mine à ciel ouvert de Vénachat

6.2.3 Localisation des forages

Plusieurs conditions sont nécessaires pour déterminer la localisation des forages :

- le granite ne doit pas être altéré,
- la présence d'une fracturation bien définie est nécessaire,
- cette fracturation doit être intersectée par les forages à courte distance (maximum à un mètre de la tête du forage),
- le site doit supporter une certaine charge lithostatique,
- il doit se localiser dans un secteur de bonne accessibilité pour faciliter la réalisation des opérations de forage.

Plusieurs secteurs dans la mine à ciel ouvert présentent les conditions requises indiquées. Parmi ces secteurs les sites A et B ont été choisis parce qu'ils présentent les meilleures conditions de réalisation (figure 119).

6.2.3.1 Site A

Trois forages (F1, F2 et F3) ont été réalisés dans le site A (figure 121). Ce site constitue un bloc déterminé par l'intersection de la fracturation proche de E-W avec les plans proches de N20. Trois plans majeurs caractérisent le site : le plan P1 qui est le repère 0 des forages, le plan P2 qui sera intersecté par les forages à 40 cm environ de la tête du forage, et le plan P3 qui est un plan conjugué par rapport aux premiers (Figures 120 et 122, et Tableau 27). Ainsi le plan P2 constitue le plan à analyser en détail dans l'étude des imprégnations.

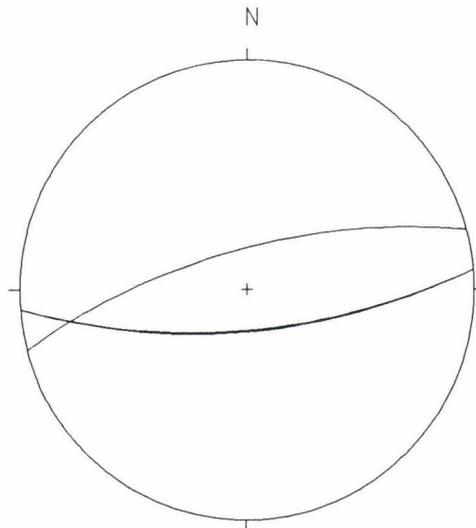


Figure 120 - Projection stéréographique des plans du site A (Projection de Wulff, hémisphère inférieur)

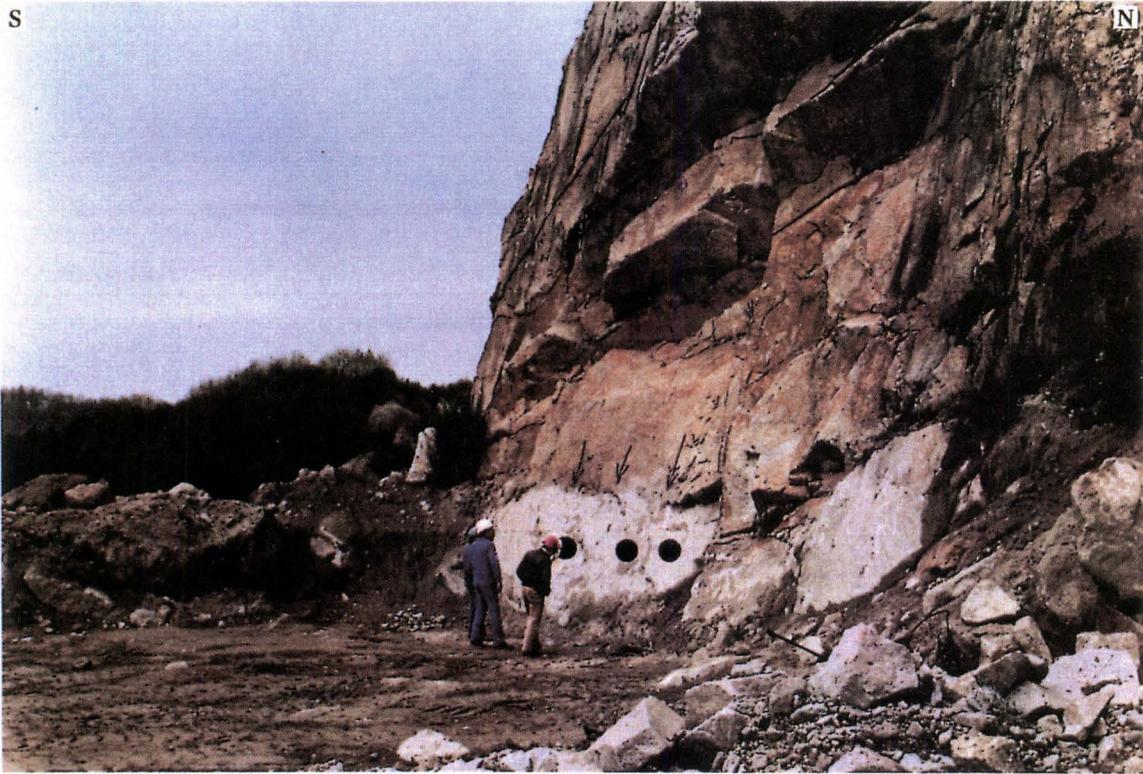


Figure 121 - Localisation des forages F1, F2 et F3 dans le site A

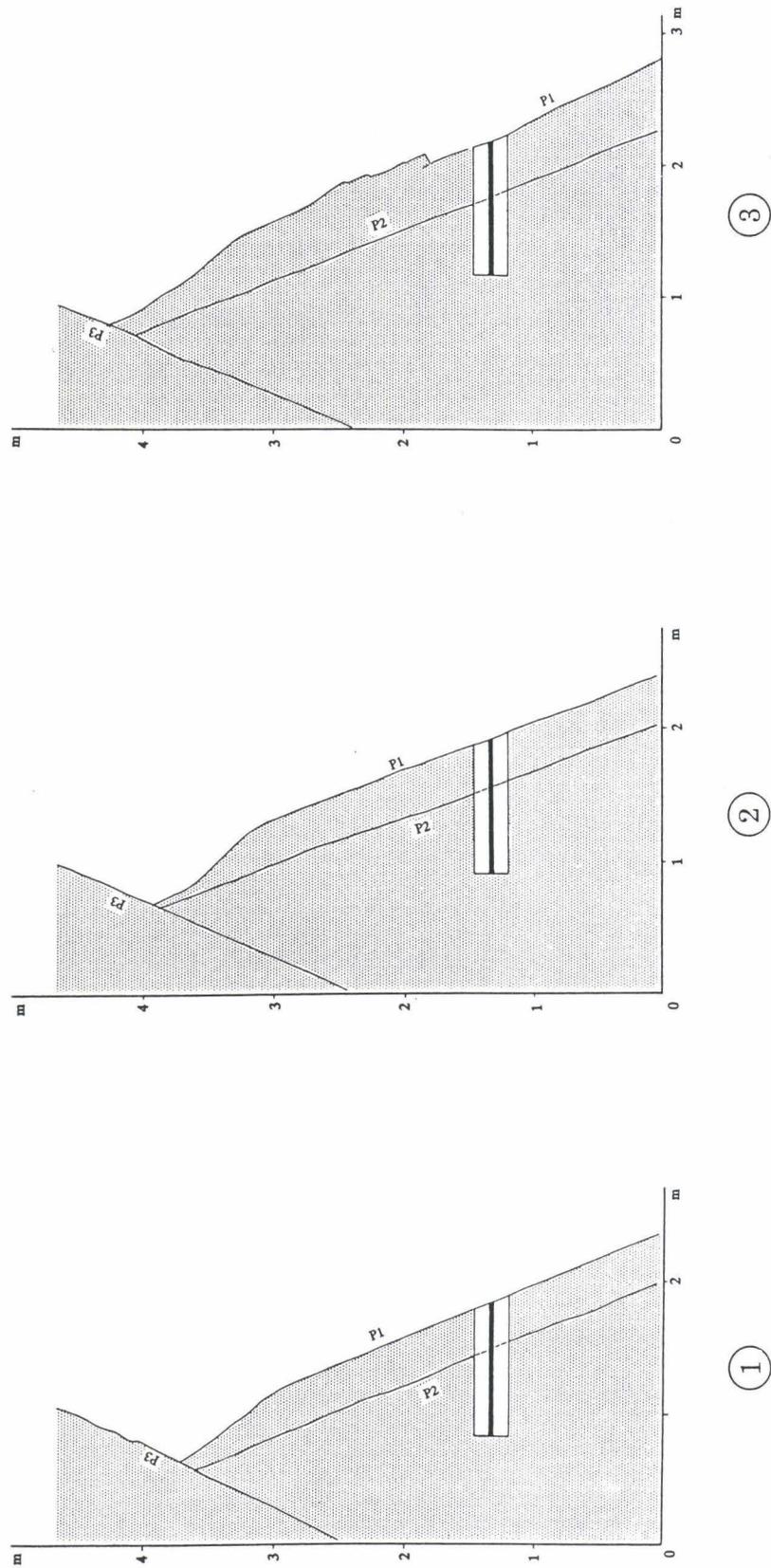


Figure 122 - Profils structuraux du site A avec la localisation des forages F1, F2 et F3

Tableau 27 - Caractéristiques géométriques de la fracturation dans les sites A et B choisis pour les opérations de forage

Label	Direction	Pendage	Quadrant
P1	85	70	S
P2	85	69	S
P3	75	70	N
P4	90	74	S
P5	90	75	S
P7	92	61	N

6.2.3.2 Site B

Dans ce site deux forages (F4 et F5) ont été réalisés (figure 124). La fracturation proche de E-W détermine des blocs de forme tabulaire dont l'épaisseur est plus grande par rapport à celle des blocs du site A (figure 125). Trois plans majeurs sont présents dans le site : le plan P4 qui constitue le repère 0 des forages, le plan P5 qui sera intersecté par le forage à 90 cm environ du repère 0 des forages, et le plan P6 qui est le plan conjugué comme pour le site précédent (figures 123 et 125). Un plan mineur P7 affecte le bloc tabulaire à forer ; celui-ci sera intersecté à 30 cm environ du repère 0 du forage (Tableau 27).

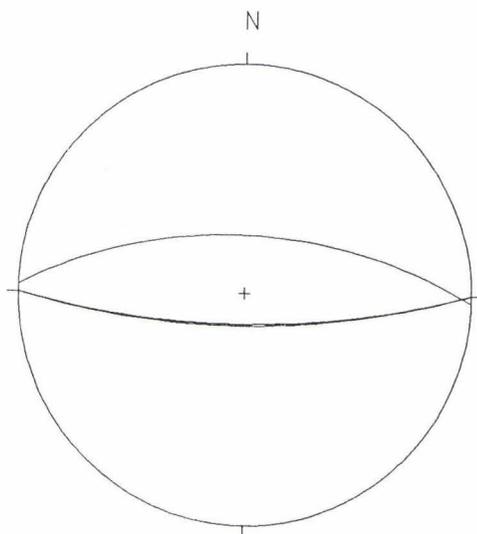


Figure 123 - Projection stéréographique des plans du site B (Projection de Wulff, hémisphère inférieur)

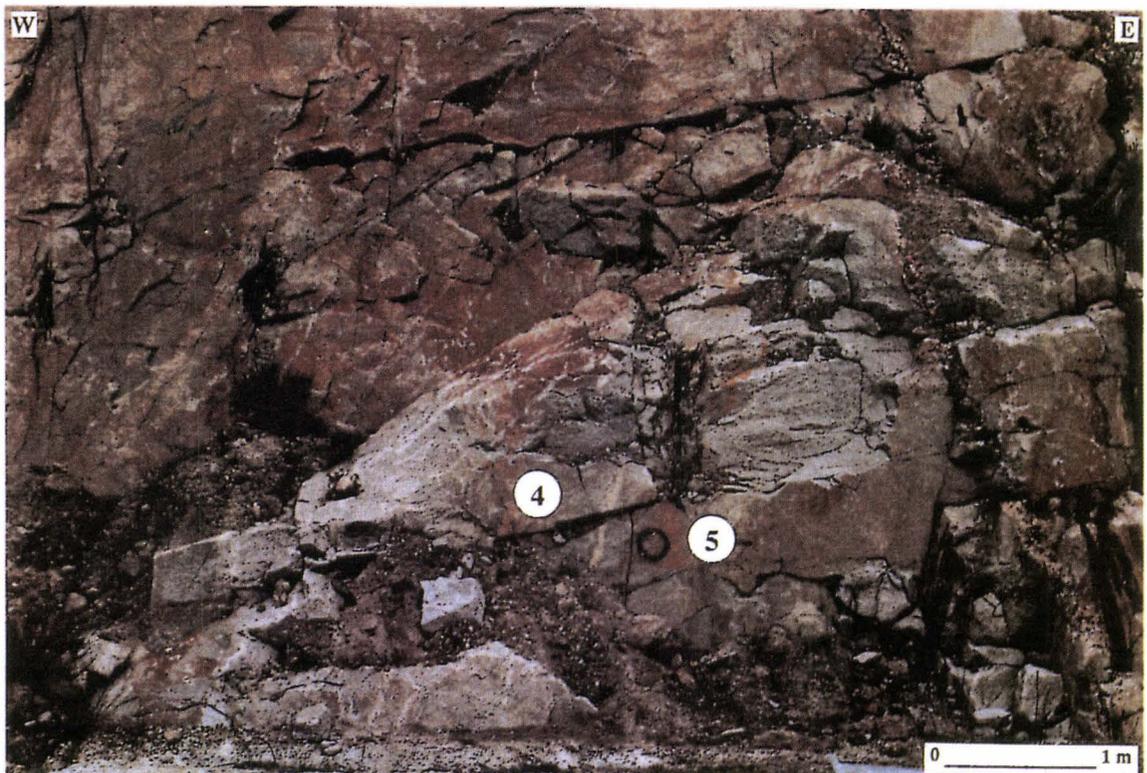
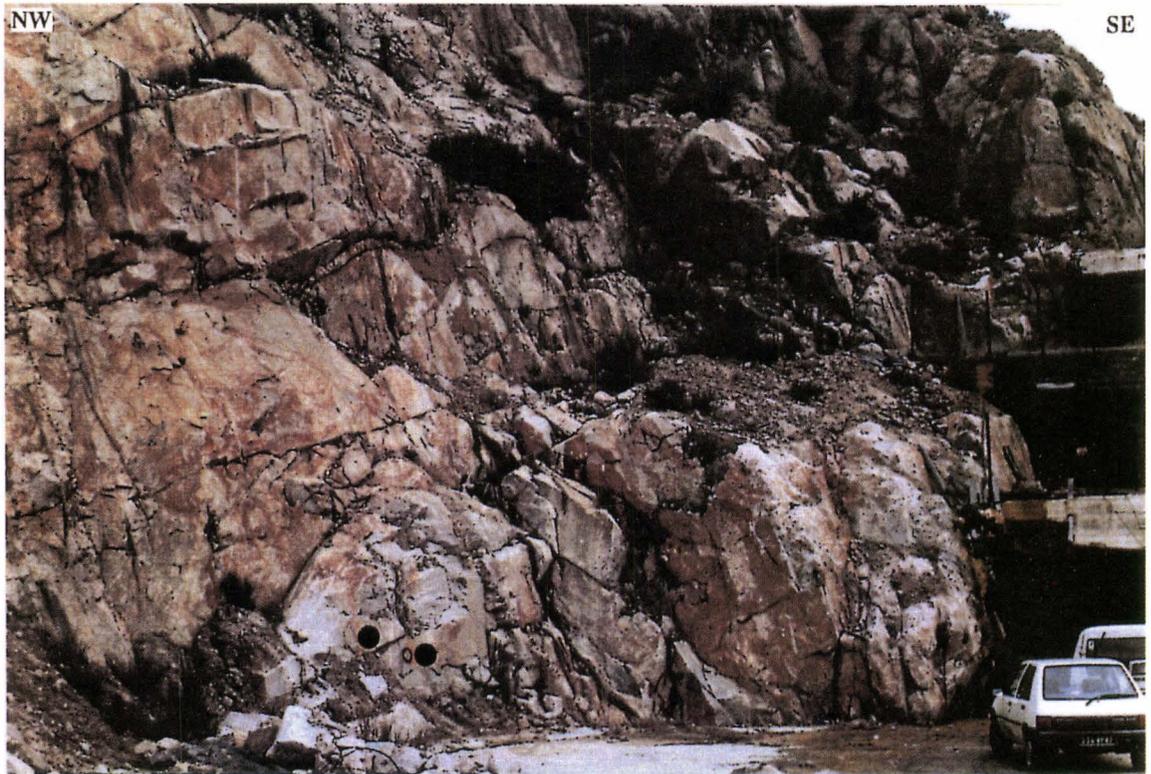


Figure 124 - Localisation des forages F4 et F5 dans le site B

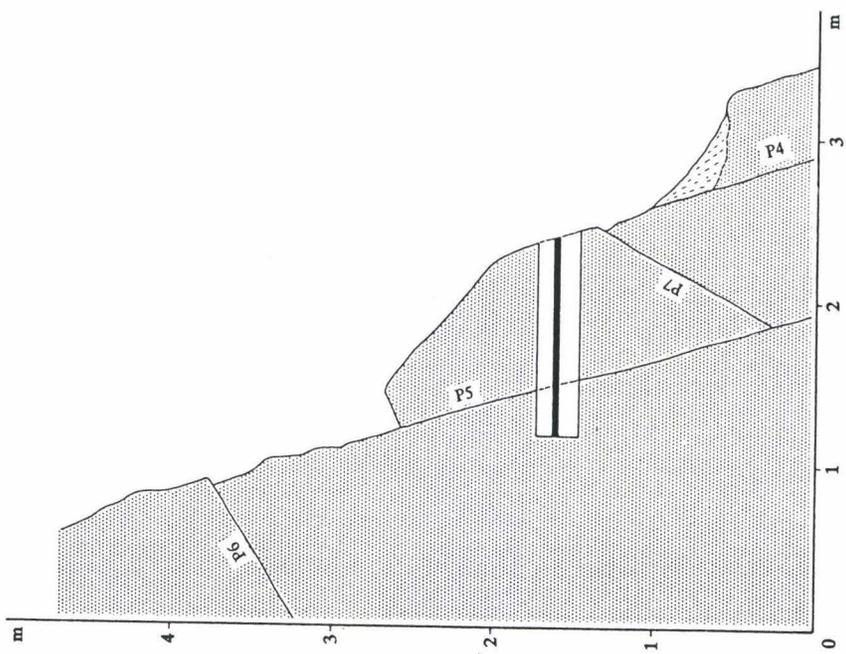
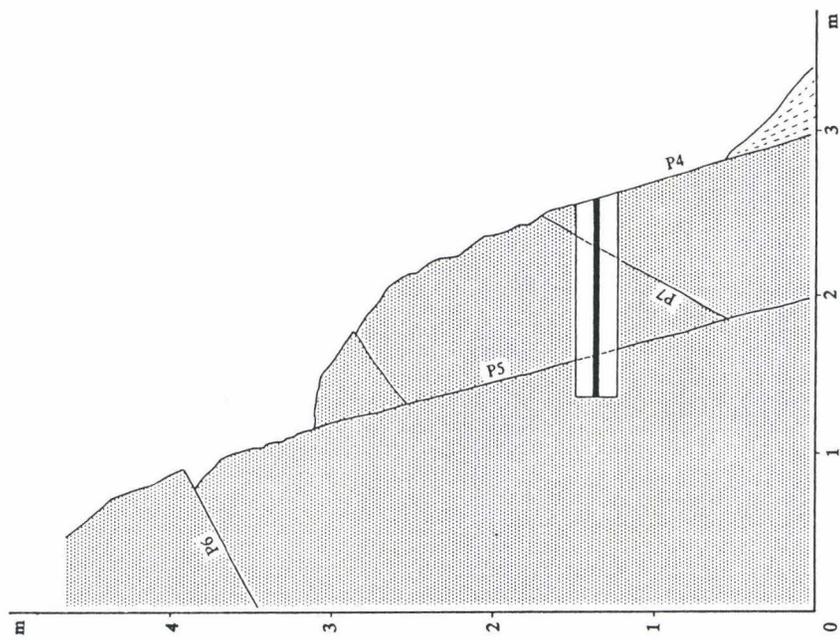


Figure 125 - Profils structuraux du site B avec la localisation des forages F4 et F5

6.3 Réalisation des opérations de forage, injection et surcarottage

Les sites choisis pour les forages dans la mine de Vénachat, présentent toutes les caractéristiques favorables pour la réalisation de l'étude des imprégnations in situ en forages. Le granite est peu altéré, il présente une fracturation bien définie dont les fractures peuvent être intersectées à courte distance de la tête des forages. Les sites supportent une charge lithostatique faible mais ils sont localisés dans des secteurs de bonne accessibilité.

Les cinq forages sont de courte longueur (entre 1 et 1.3 m), une fracture a été intersectée, à l'exception du forage F5 où deux plans ont été recoupés. Les cinq surcarottages avaient la même longueur que les forages.

Ce paragraphe présente la réalisation des cinq forages pour les imprégnations, l'analyse de carottes de 56 mm de diamètre, les opérations d'imprégnation de résine, la réalisation de surcarottages, l'analyse des surcarottes imprégnées pour le choix des sections destinées à l'étude de la microfracturation au microscope .

6.3.1 Réalisation des forages

La réalisation de l'ensemble des forages, confiée à la société SOREIS ; a nécessité la mise en oeuvre de travaux d'aménagement préalables. Ces travaux, ont été les suivants :

Ils comprennent la construction de deux dalles en ciment pour chacun des sites A et B, afin d'établir une base horizontale pour la sondeuse et faciliter le recalage et centrage précis de la machine pour les surcarottages sur les forages injectés de résine.

Une embase en ciment a été mise en place à la tête de chaque forage pour installer le dispositif devant servir à l'injection de la résine. En effet, la fixation du dispositif utilisé pour les opérations d'injection de la résine requiert d'une surface plane et verticale au niveau de la tête du forage. Les surfaces de la mine n'étant pas verticales, il a été nécessaire de réaliser un coffrage en ciment au niveau de chaque tête de forage (figure 126).

Les cinq forages F1, F2, F3, F4 et F5 ont été réalisés en diamètre 56 mm pour des longueurs variant entre 107 et 141 cm. Les forages sont horizontaux et orientés suivant la direction N-S. On a pu constater une légère déviation (3° maximum) par rapport à l'horizontale pour les forages F2, F4 et F5. Les carottes ont été récupérées entièrement pour chacun des forages.



Figure 126 - Réalisation des forages en diamètre 56 mm



Figure 127 - Circulation d'eau le long des plans pendant la réalisation des forages en diamètre 56 mm. L'exemple montre plusieurs sorties d'eau autour du forage F1

Pendant les opérations de foration, réalisées avec injection d'eau, on a constaté plusieurs sorties d'eau au niveau des fractures apparentes sur la paroi du site autour des forages (figure 127). Ces venues d'eau prouvent la grande facilité de circulation de fluide dans ce volume rocheux le long des fractures principales. Les circulations ont été accentuées artificiellement par l'injection d'eau sous pression pendant les forages. Par conséquent, on a tenté d'étancher au niveau de la paroi ces zones de fractures conductrices par du ciment sous peine de voir se produire le même phénomène de perte de produit lors de l'injection de la résine.

6.3.2 Analyse des carottes

L'analyse des carottes de 56 mm de diamètre a été effectuée de façon macroscopique. Chaque plan est repéré afin de l'identifier postérieurement dans les sur-carottages de 260 mm. Ces plans seront a priori imprégnés par la suite de résine colorée lors de l'injection. Le label de chaque plan comporte une lettre majuscule qui est liée à son identification : "P" pour les plans identifiés sur le terrain, "C" pour ceux identifiés dans les carottes, et "S" pour ceux identifiés dans les surcarottages. L'orientation des fractures a été réalisée à l'aide du logiciel NAEBHTV (CABRERA, 1990) par numérisation des développées de carottes. Ces données structurales sont rassemblées pour les quatre forages figure 128.

Forage F1

La carotte du forage F1 est formée d'un granite légèrement altéré au niveau des cristaux. Le plan P2 a été intersecté à une distance de 67 cm de la tête du forage. Ce plan montre un remplissage d'argile fortement altérée, témoin d'une circulation d'eau souterraine.

Forage F2

La carotte du forage F2 montre la même altération que la précédente. Dans ce forage le plan P2 a été intersecté à 74 cm de la tête du forage. Dans le détail, ce plan se décompose en deux plans équidistants de 10 cm. Un plan très oblique et mal défini a été intercepté à environ 40 cm du point 0 (plan C10). Ce plan est intéressant à analyser après imprégnation afin d'observer l'influence de la foration.

Forage F3

Le plan P2 dans le forage F3 est caractérisé par plusieurs plans intersectés entre 88 et 105 cm. Les trois plans observés dans cette zone, présentent une forte altération.

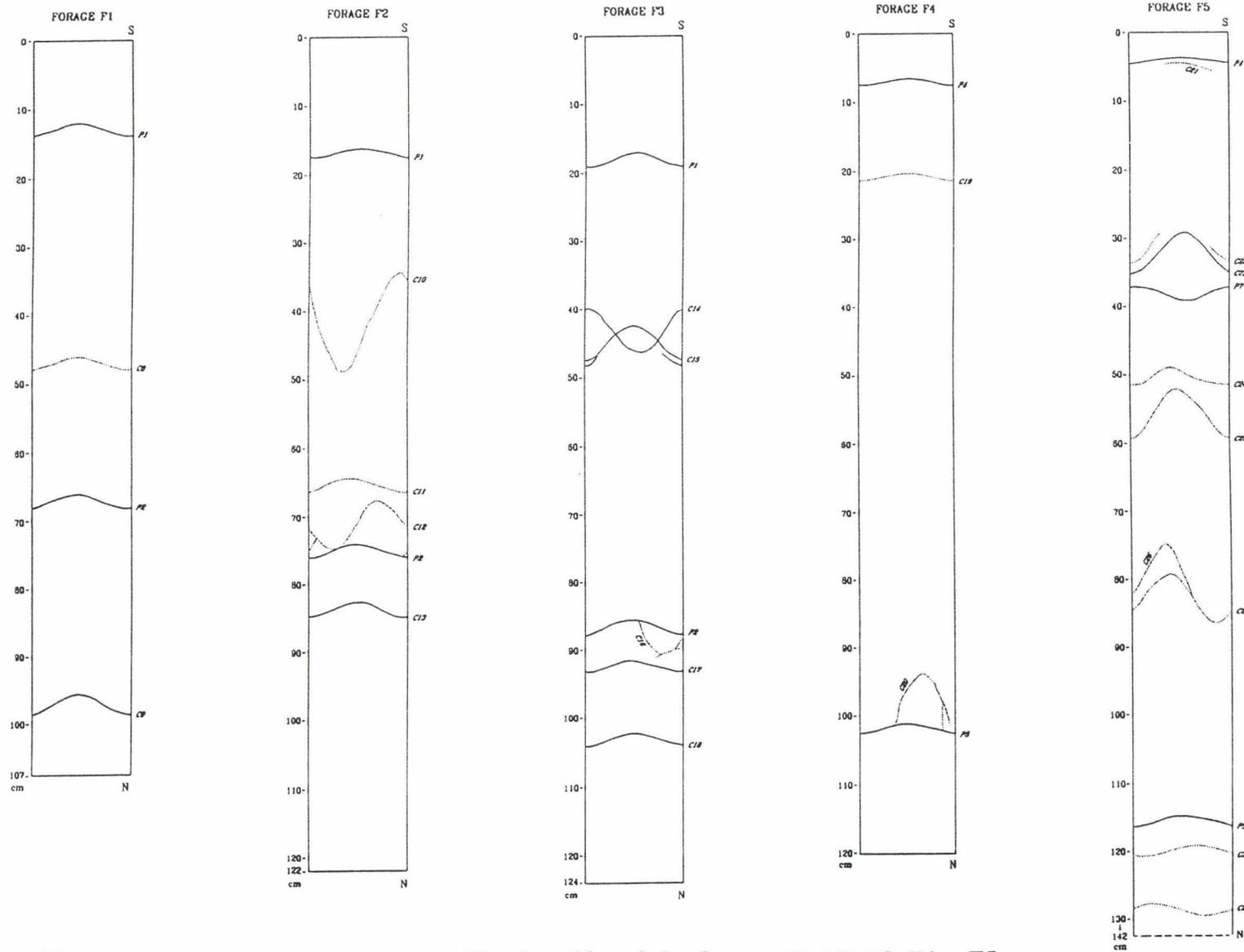


Figure 128 - Développées des carottes (diamètre 56 mm) des forages F1, F2, F3, F4 et F5

P - plan identifié
C - plan identifié dans les carottes
Les traits discontinus correspondent aux plans moins bien définis.

Entre les plans P1 et P2 il existe un plan transversal faiblement incliné et des petites fissures (plan C14). Ce plan sera à observer lors de l'analyse des imprégnations.

Forage F4

La carotte du forage F4 est formée d'un granite à grain fin qui ne présente pas d'altération contrairement aux carottes des forages précédents. Le plan P5 a été intercepté à 105 cm de la tête du forage. Celui-ci présente des traces d'une circulation d'eau. En général, la carotte ne présente pas d'autres plans majeurs, seul un plan mineur est localisé à proximité du plan P4 (plan C19). Du fait, de l'état non altéré de la roche ainsi que du faible nombre de plans, ce forage sera analysé en détail après les imprégnations.

Forage F5

La carotte de ce forage présente plusieurs plans. Les plans majeurs correspondent aux plans P5 et P7. D'autres plans moins bien définis et moins inclinés se localisent entre le plan P4 et le plan P5. Ce forage présente une très forte perméabilité et par conséquent les imprégnations sont plus difficiles à réaliser.

En conclusion, l'analyse de l'ensemble des carottes nous montre l'existence d'une fracturation plus discrète entre deux plans majeurs. Par conséquent, ces zones sont à analyser en détail. Un autre secteur important est le fond de chaque forage, car l'absence de plan et la localisation plus à l'intérieur du volume rocheux, déterminent de bonnes conditions pour l'analyse détaillée de la microfracturation.

6.3.3 Opération d'imprégnation

6.3.3.1 Essais de laboratoire

La recherche a consisté à proposer un produit et une mise en oeuvre répondant aux critères suivants:

- produit suffisamment fluide lors de la mise en place pour la bonne pénétration dans les microfissures;
- temps de polymérisation ni trop long, ni trop court (quelques heures maximum);
- bonne homogénéité et rigidité en masse de la résine après polymérisation;
- peu de variations volumiques au cours de la prise, c'est à dire pas d'expansion en cours de polymérisation, et pas de retrait lors du refroidissement;
- pas de montée excessive en température lors de la polymérisation (réaction exothermique modérée);
- simplicité de mise en oeuvre;
- faible toxicité.

La mise au point de la méthode a débuté par des essais en laboratoire en reproduisant, le mieux possible les conditions de terrain. A cette fin, on a procédé au choix d'une résine et sa mise en oeuvre la mieux adaptée, grâce à de nombreux tests d'injections de résines en forage pratiqués au laboratoire dans des blocs de granite, et la conception d'un dispositif spécifique pour la mise en oeuvre de l'injection en forage sur le terrain.

Trois types de réactifs ont été étudiés :

- Réactif 1 : Un monomère (métacrylate de méthyle - MAM), un catalyseur en poudre (Perkadox Y 16), et un accélérateur liquide (VN 2).

- Réactif 2 : Une colle Altulor composée d'un constituant A (Altufix P 10) et d'un constituant B (catalyseur).

- Réactif 3 : Résine étudiée par les laboratoires Atochem.

Les différents essais ont été réalisés avec chaque réactif séparément, et avec un mélange des réactifs 1 et 2 dans des tubes à essais en verre, et dans des forages réalisés dans des carottes de granite afin de se rapprocher des conditions de terrain.

Ces expérimentations ont montré que le mélange des réactifs 1 et 2 (MAM et ALTUFIX A et B) donnait des résultats satisfaisants : un temps de polymérisation de l'ordre d'une heure, un durcissement de plusieurs heures, et une température de réaction maximale de l'ordre de 100°C au centre du volume.

Certains inconvénients n'ont pu être évités : léger rétrécissement du volume (de l'ordre de 8%), formation de bulles de gaz au cours de la polymérisation, et un temps de durcissement au centre de la masse de résine supérieur à 24 heures. Cependant, si on considère que l'objectif est d'imprégner les fissures à partir du forage et que les temps de polymérisation et de durcissement sont plus rapides au niveau des fissures (faibles masse et volume) que dans le forage, ces inconvénients n'ont pas paru suffisants pour modifier ce choix .

Par conséquent, les réactifs et concentrations (rapport volumique) retenus sont les suivants :

- MAM (Méthacrylate de méthyle) à 9,6%.
- ALTUFIX A à 85,6%
- ALTUFIX B à 3,5%
- Colorant bleu DW 0135 de CIBA GEICY.

6.3.3.2 Dispositif d'injection in situ

Le dispositif d'injection est constitué de deux plaques circulaires (diamètre 300 mm) et d'un tube en "Duralumin" (figure 129) placés sur la surface plane et vertical du coffrage en ciment prévu au niveau de la tête de chaque forage:

- une première plaque est ancrée à la paroi de ciment et constitue une embase plane en tête de forage;

- une deuxième plaque qui se fixe sur la première et constitue ainsi un bouchon étanche en tête de forage injecté. Cette seconde plaque est solidaire du tube (longueur de 1035 mm, diamètre ext. 40 mm et diamètre int. 10 mm), qui est mis en place dans le forage et qui y occupe une longueur de 950 mm.

L'injection de la résine est faite à l'aide d'une pompe à main reliée au tube par un flexible. La résine injectée sort d'abord au fond du forage et remplit ensuite le volume annulaire compris entre le tube et la paroi du puits. Une sortie placée au niveau de la partie supérieure de l'espace annulaire dans les plaques circulaires permet à la fois la purge de l'air pendant le remplissage, et également la vérification du remplissage de l'ensemble du volume. Après remplissage et par obturation de la sortie de purge il est possible d'augmenter légèrement la pression du mélange injecté dans la chambre afin de faciliter l'injection de la résine dans les fractures, fissures et microfissures si nécessaire.

6.3.3.3 Opération de remplissage

Dans un premier temps l'injection de résine a été réalisée dans les deux forages F1 et F2 afin de tester la mise en oeuvre de la technique et d'en évaluer les premiers résultats.

Plus de 5 litres de résine ont été injectés dans le forage F1. Cet important volume de résine injectée, qui dépasse largement le volume du forage, est dû essentiellement à l'écoulement de la résine le long du plan P2. Le remplissage du forage a été fait sans mise en pression.

Pour le forage F2, on a utilisé un tube plus court que précédemment (longueur inférieure à 300 mm au lieu de 1035 mm). Cette modification a eu l'avantage de faciliter le remplissage de l'ensemble du volume du forage de façon homogène. Environ 5 litres ont été injectés dans le forage F2 sans mise en pression.

La résine injectée lors du remplissage des forages F3, F4 et F5 a été légèrement mise en pression (de l'ordre de 0,2 à 0,3 MPa en moyenne), ce qui constitue donc des conditions de mise en oeuvre différentes des précédents remplissages des forages F1 et F2.

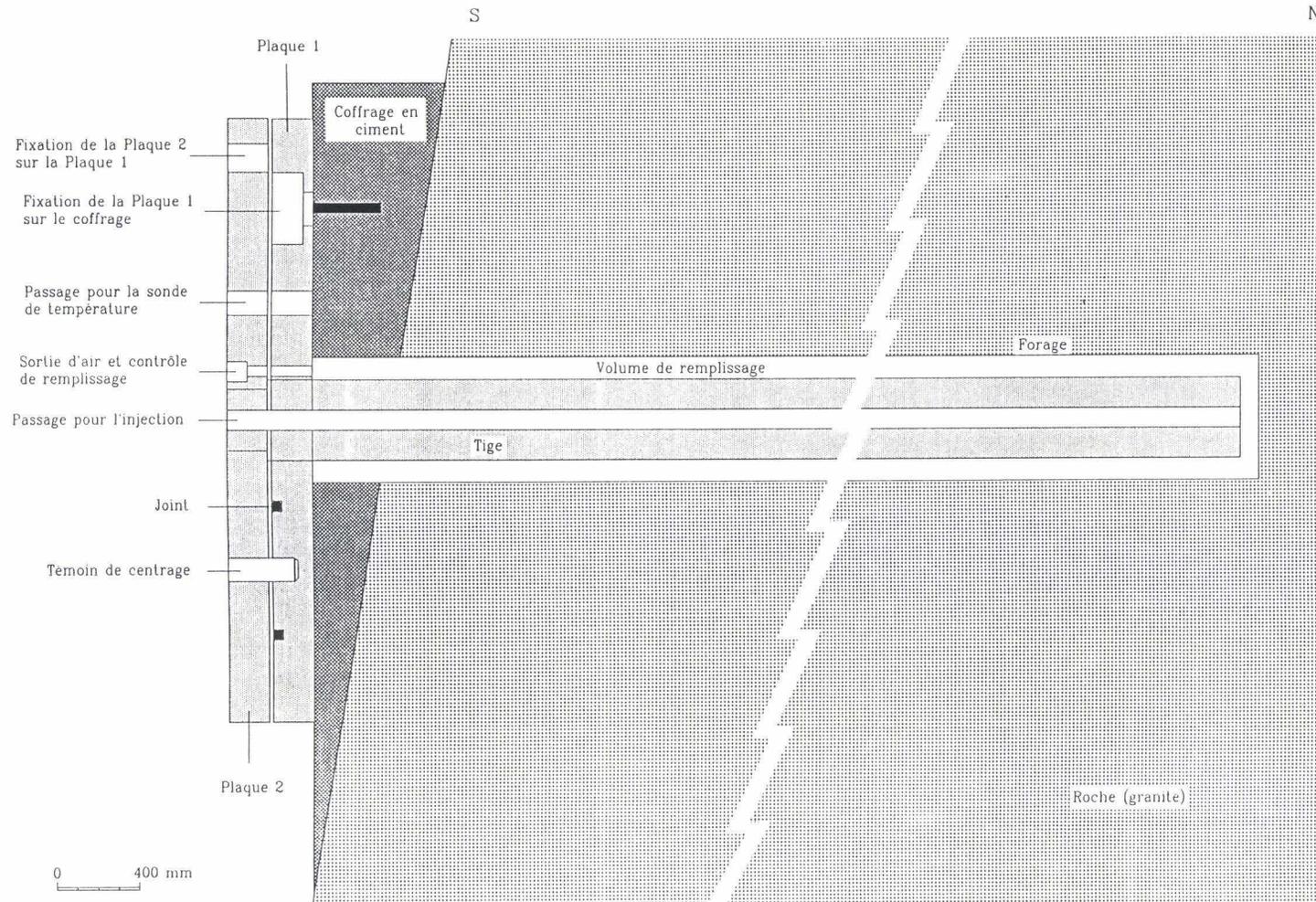


Figure 129 - Schéma du dispositif en tête de forage pour mise en oeuvre des imprégnations in situ

Afin de pouvoir augmenter cette pression, il a été nécessaire de procéder au préalable au blocage du passage de la résine vers les plans majeurs; ceci a été réalisé par la mise en place de portions de tuyaux métalliques faisant office d'obturateurs au niveau de l'intersection du forage avec les plans. Après avoir, dans un premier temps, vérifié le remplissage du forage, on bloque le système de purge et on continue à injecter la résine sous pression. Pour l'injection de ces trois forages on a utilisé des tiges courtes similaires à celle du forage F2. Un léger chauffage a été pratiqué afin de sécher la paroi des forages avant l'injection de résine.

Le remplissage du forage F3 a été soumis à une pression initiale de 0,5 MPa pendant environ 10 minutes. La chute progressive de pression à 0,2 à 0,3 MPa est due au fait que dans ce milieu naturel les conditions d'étanchéité ne sont pas parfaites. Environ 5 litres de résine ont été utilisés pour l'injection du forage F3.

Le forage F4 est un forage particulièrement intéressant car il est réalisé dans un granite non altéré et on se trouve en présence d'un seul plan de fracture (P5) vers le fond du forage (figure 128). Environ 8 litres de résine ont été injectés. Le remplissage a été mis en pression au départ à 0,5 MPa, cette pression a chuté rapidement en quelques minutes puis a été maintenu à 0,2 à 0,3 MPa pendant une dizaine de minutes environ à l'aide d'une injection continue.

Pour l'injection du forage F5 environ 9 litres de résine ont été utilisés. Malgré les dispositions prises, une fuite de résine le long des plans majeurs a néanmoins été observée. La chambre a été mise en pression initialement à 0,5 MPa, cependant, cette pression a chuté très rapidement à cause des fuites de résine le long des plans.

6.3.4 Les surcarottages

La phase de surcarottage a débuté par le surcarottage du forage F1 en diamètre 148 mm afin de tester la méthode et a été poursuivie en 260 mm de diamètre pour les forages F2, F3, F4 et F5.

6.3.4.1 Surcarottage de F1 en 148 mm

Le surcarottage du forage F1 a été réalisé à la fois dans le but d'analyser la pénétration de la résine dans les fractures et d'adapter éventuellement la technique d'injection pour les autres forages en fonction des constatations faites.

Une bonne pénétration de la résine le long des plans est observée dans la surcarotte du forage F1. Cependant, si le surcarottage à ce diamètre est suffisant pour une opération test, en revanche pour les opérations proprement dites il s'est avéré prudent de réaliser les surcarottages en plus gros diamètre (260 mm).

6.3.4.2 Surcarottage de F2, F3, F4 et F5 en 260 mm

Les forages F2, F3, F4 et F5 ont été surcarottés en 260 mm, diamètre suffisant pour analyser en section les surcarottes (figure 130). En général, les surcarottages sont restés centrés par rapport aux axes des forages initiaux.

Pour l'ensemble des surcarottes, la pénétration de la résine le long des plans de fracture a été bonne.



Figure 130 - Surcarotte du forage F5 de 250 mm de diamètre. Elle montre une bonne pénétration de la résine le long des plans

6.4 Sélection et observation de sections surcarottées

Le découpage en tronçons (quelques dizaines de centimètre de long) et leur sélection pour chaque surcarotte pour les premières observations ont été effectués sur le terrain à la suite des opérations de surcarottage.

On a ensuite procédé au découpage des tronçons sélectionnés en sections d'environ deux centimètres d'épaisseur (cf figure 131). Les deux faces de ces sections ont été analysées à la loupe binoculaire. Une cartographie de la fissuration a ainsi été effectuée en différenciant les fissures remplies de résine de celles non imprégnées.

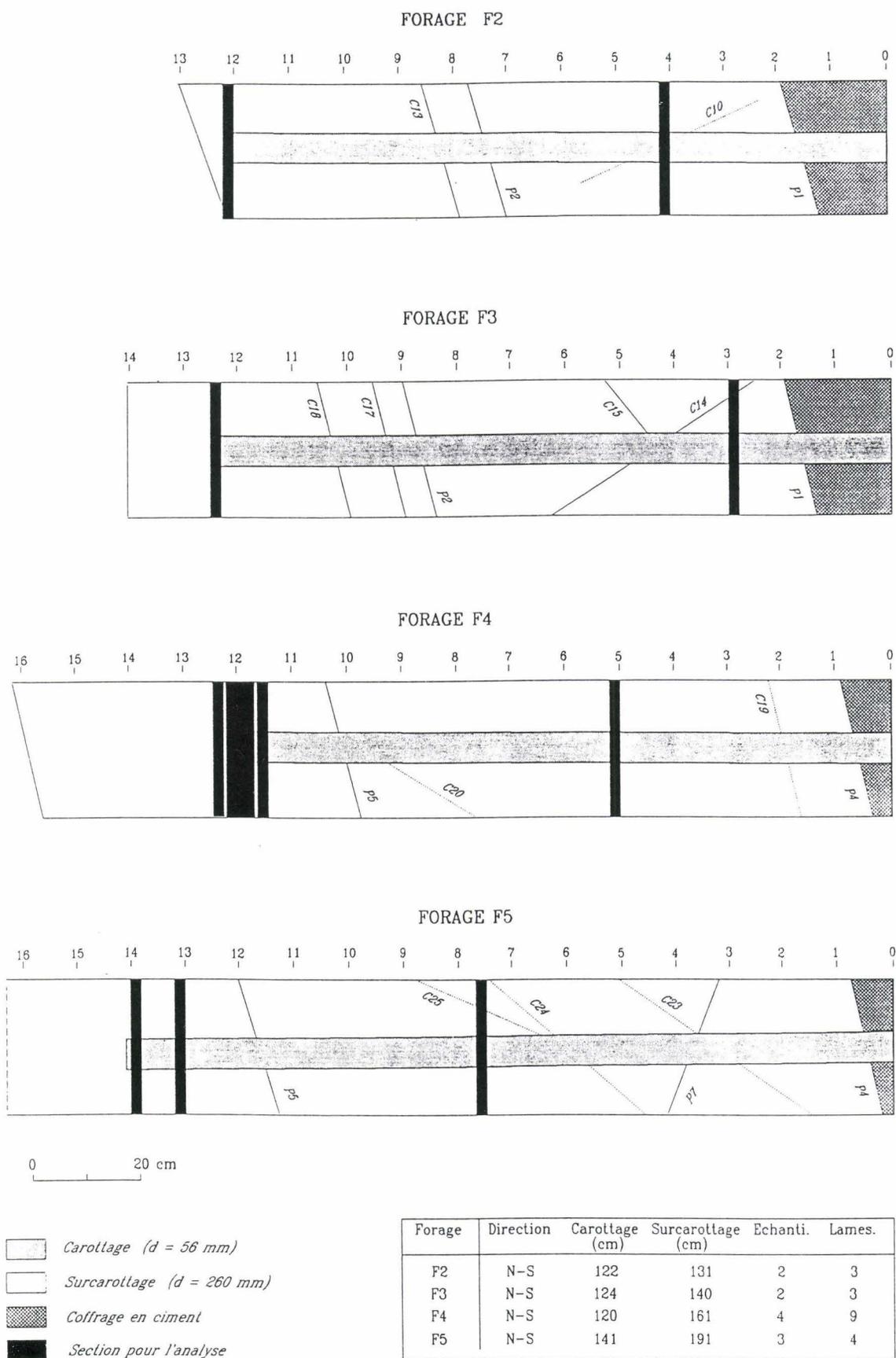


Figure 131 - Coupe des forages et surcarottages avec la fracturation interceptée et les section choisies pour l'analyse

Cette cartographie a permis la sélection des zones sur les carottes pour la confection de lames minces.

L'ensemble des sections retenues pour l'étude de leurs faces est précisé figure 131.

L'ensemble des faces cartographiées est rassemblé dans les figures 134 à 139.

Les figures 132 et 133 permettent de préciser les conventions d'orientation des carottes, des sections et des lames qui ont été adoptées pour cette étude, ainsi que la nomenclature utilisée pour le repérage des lames minces.

Rappelons que chaque section retenue correspond à un disque de granite de 2 cm d'épaisseur, comportant deux faces dont les cotes sont indiquées par rapport à la tête du forage.

Sur la tranche de ces sections, est tracé un trait matérialisant la partie supérieure des carottes horizontales, et donc en même temps la trace de la direction du Nord (orientation de l'axe des forages).

Chaque section comporte deux faces sur lesquelles sont localisées les lames à étudier. Leur nomenclature indique le nom du forage, la cote de la face par rapport à la tête du forage. Les faces reproduites dans les figures 134 à 139 sont vues conventionnellement depuis le Sud (-X) en regardant vers le Nord (+X)..

La nomenclature des lames relatives à une face donnée, est identique à celle des faces, avec une lettre minuscule (a, b, c...) précisant le nombre de lames sur une même face de section.

On décrit ci-après les premiers résultats observés sur ces injections de résine in situ dans des granites.

6.4.1 Forage F1

La surcarotte du forage F1 a été découpée en tronçons de 10 cm, afin d'analyser le détail de la pénétration de la résine car c'était une opération de test. L'ensemble des sections montre bien une bonne pénétration de la résine le long des plans de fracture. Ceci est observé à l'échelle des fissures très fines (microfissures). On observe un contact net entre la résine et la paroi du forage, un léger rétrécissement de la résine de la chambre ainsi que la présence de quelques bulles d'air. Ces phénomènes ont été observés lors des expériences de laboratoire.

Les analyses du forage test ont montré que la pénétration de la résine est satisfaisante. Cependant, pour faciliter celle-ci dans les microfissures, une légère montée en pression du remplissage semble être nécessaire. En revanche, cette pression ne doit pas dépasser quelques dixièmes de MPa, car on assisterait à une néoformation de microfissures créées par la pression. Dans cette optique les forages F3, F4 et F5 ont été conditionnés pour mettre la chambre à une pression de quelques dixièmes de MPa.

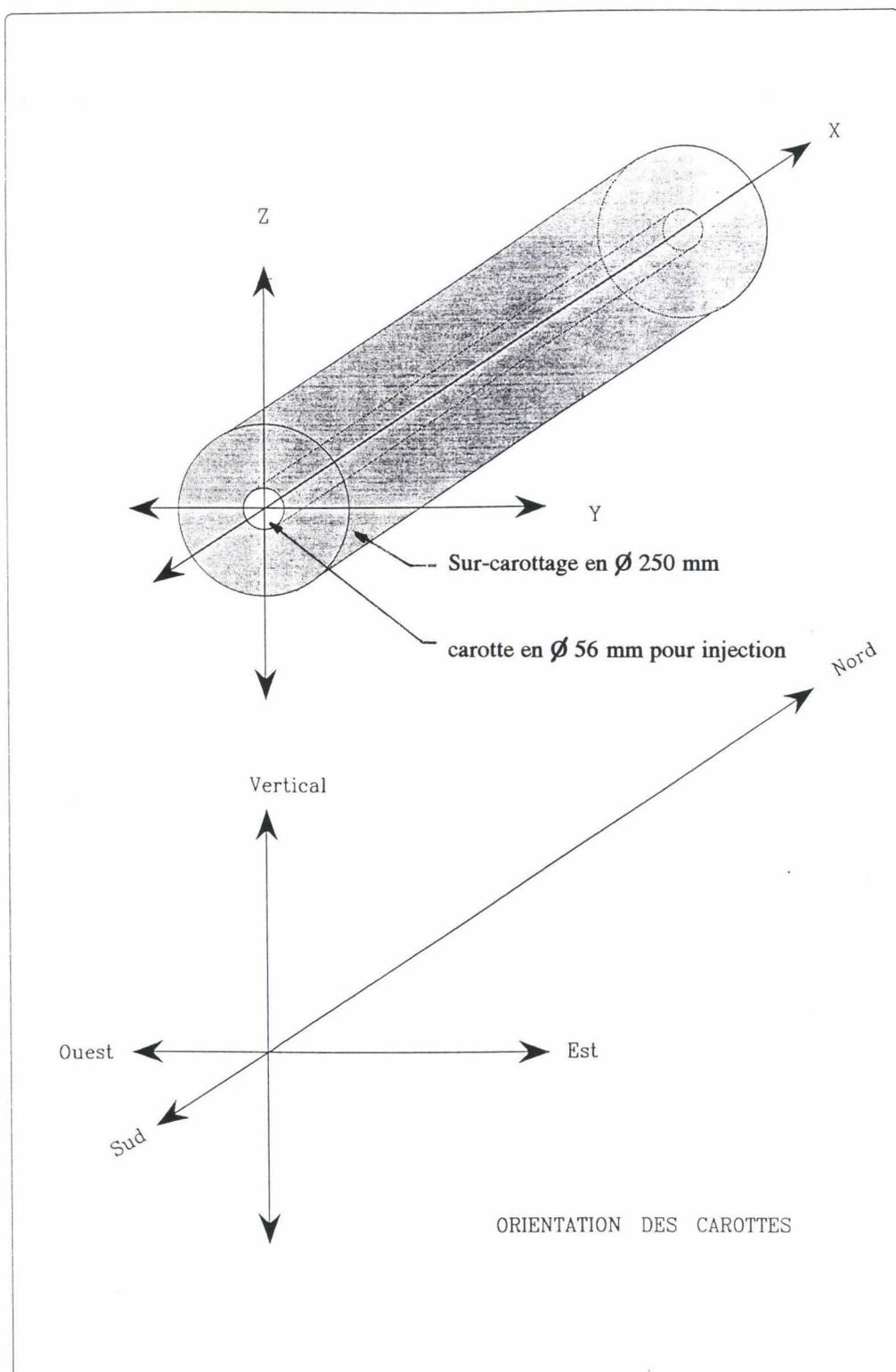
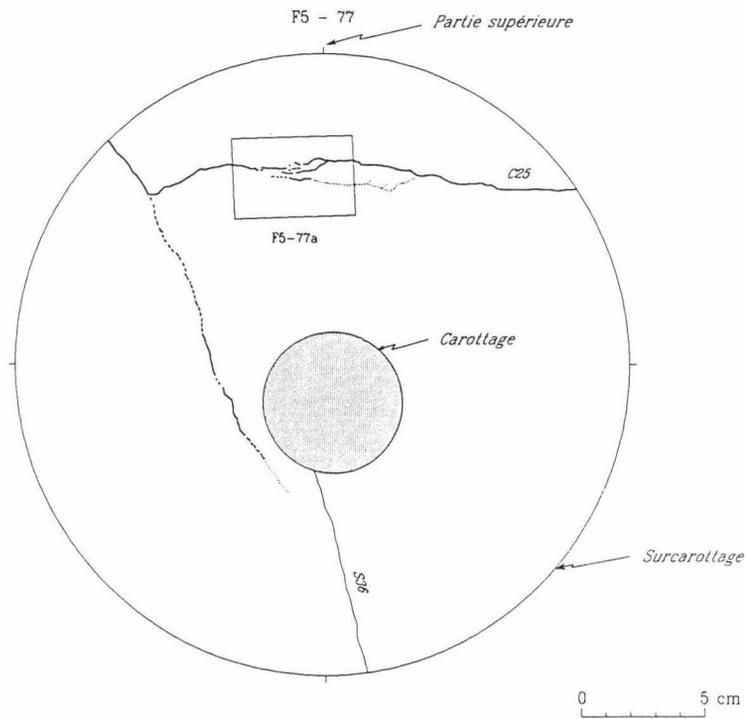


Figure 132 - Orientation des carottes

LEGENDE



- Plan de faille ou fracture bien définis
- Plan de fracture secondaire
- Fracture remplie de résine
- Localisation de la lame mince
- Remplissage de résine dans le forage
- P1 Label du plan identifié sur le terrain
- C25 Label du plan identifié dans la carotte
- S36 Label du plan identifié dans la surcarotte
- F5-77 Section à 77 cm de la tête du forage F5
- F5-77a Label de la lame mince (Forage 5, section 77, lame a)

Figure 133 - Légende des symboles utilisés pour les figures 134 à 139

6.4.2 Forage F2

Deux sections ont été retenues pour l'analyse du forage F2 : l'une située entre 40 et 42 cm de la tête du forage, et l'autre entre 120 et 122 cm (figure 131). La première est choisie pour analyser la microfissuration localisée entre les plans majeurs P1 et P2, la deuxième afin d'observer la microfissuration au fond du forage, pour atténuer les effets de surface.

Les faces de la section 40-42 montrent une fissure remplie de résine qui présente des ramifications (figure 134, section 40-42). Cette fissure n'est pas néoformée lors du forage F2 car elle est présente dans la carotte. Cependant, il est intéressant d'analyser en lame mince le détail de cette ramification et l'intersection de cette fracture avec le forage afin d'identifier s'il existe une néoformation de microfissures. Dans ce but deux lames minces ont été sélectionnées (figure 134, section 40-42).

Les faces de la section 120-122 ont été choisies afin d'observer le contact entre la résine de la chambre et la paroi du forage au fond du forage. La finalité est d'identifier s'il existe une microfissuration néoformée au bord du forage. Une lame mince a été choisie dans ce but (figure 134, section 120-122).

6.4.3 Forage F3

Dans le forage F3 deux sections ont été sélectionnées. La première (28-30 cm) afin d'analyser les microfissures localisées entre un plan faiblement incliné et le forage. La deuxième pour étudier la microfissuration au fond du forage (figure 131).

Les faces des sections localisées entre 28 et 30 cm montrent une microfissuration localisée entre le plan C14 (plan pré-existant) et le forage F3. Au niveau de l'intersection entre le plan C14 et le plan S31 (plan observé dans les surcarottes) on observe une ramification de la microfissuration, et celle-ci est remplie de résine (figure 135, section 28-30). La formation d'une partie de cette microfissuration peut être liée à l'influence du forage F3. Ceci reste à préciser lors de l'analyse des lames minces. Dans ce but deux lames ont été choisies (figure 135, section 28-30).

Les faces de la section 123-125 sont localisées au fond du forage. A la loupe binoculaire on n'observe pas de microfissures remplies de résine autour du forage. Il est nécessaire d'analyser en détail les microfissures au bord du forage F3 car le remplissage a été soumis à une légère pression (0,2 à 0,5 MPa) lors de l'injection. S'il existe des microfissures formées lors du forage F3, elles peuvent avoir été imprégnées par la résine. Une lame mince a été choisie sur la face 125 de la section 123-125 (figure 135, section 123-125).

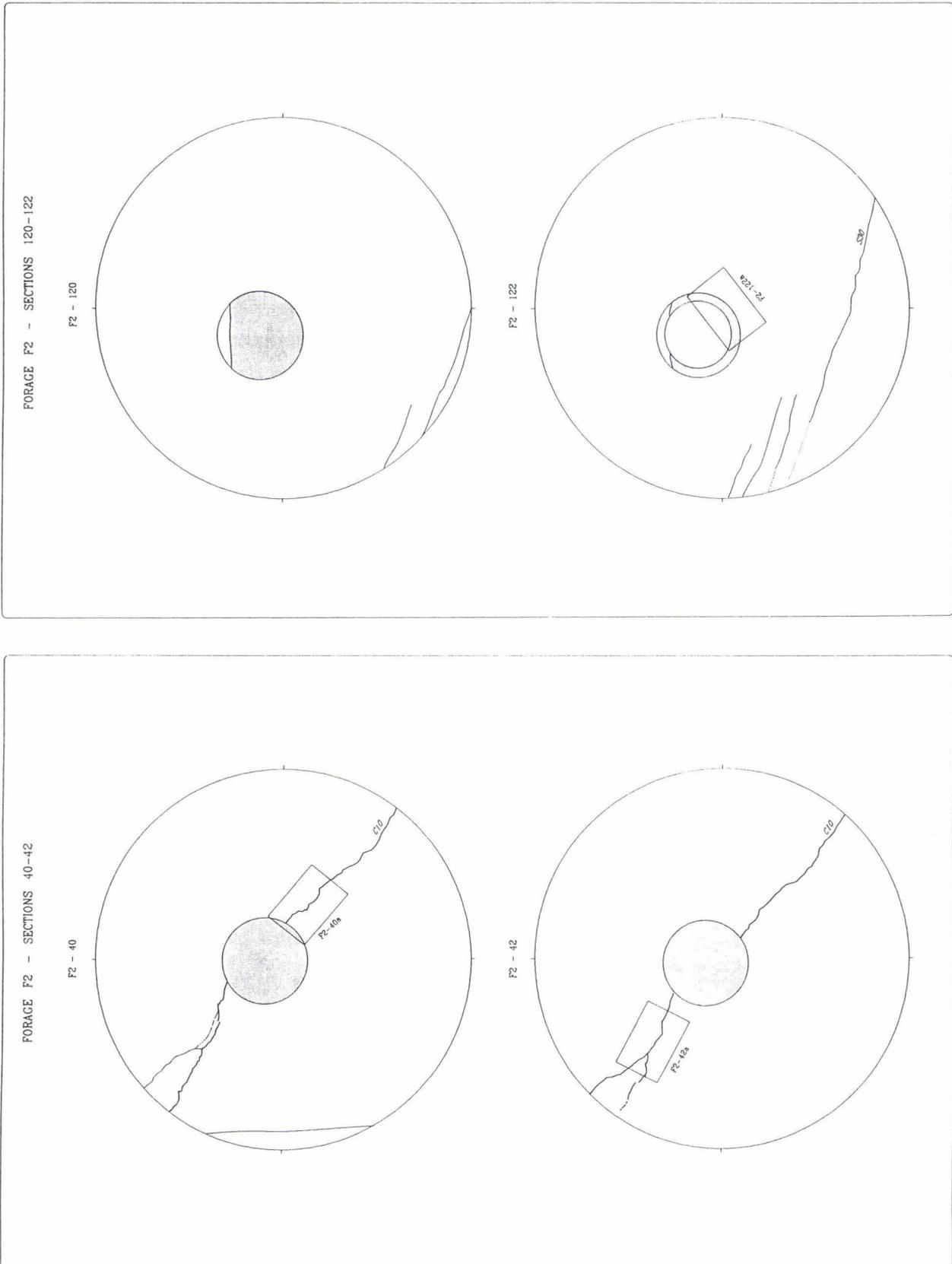


Figure 134 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces

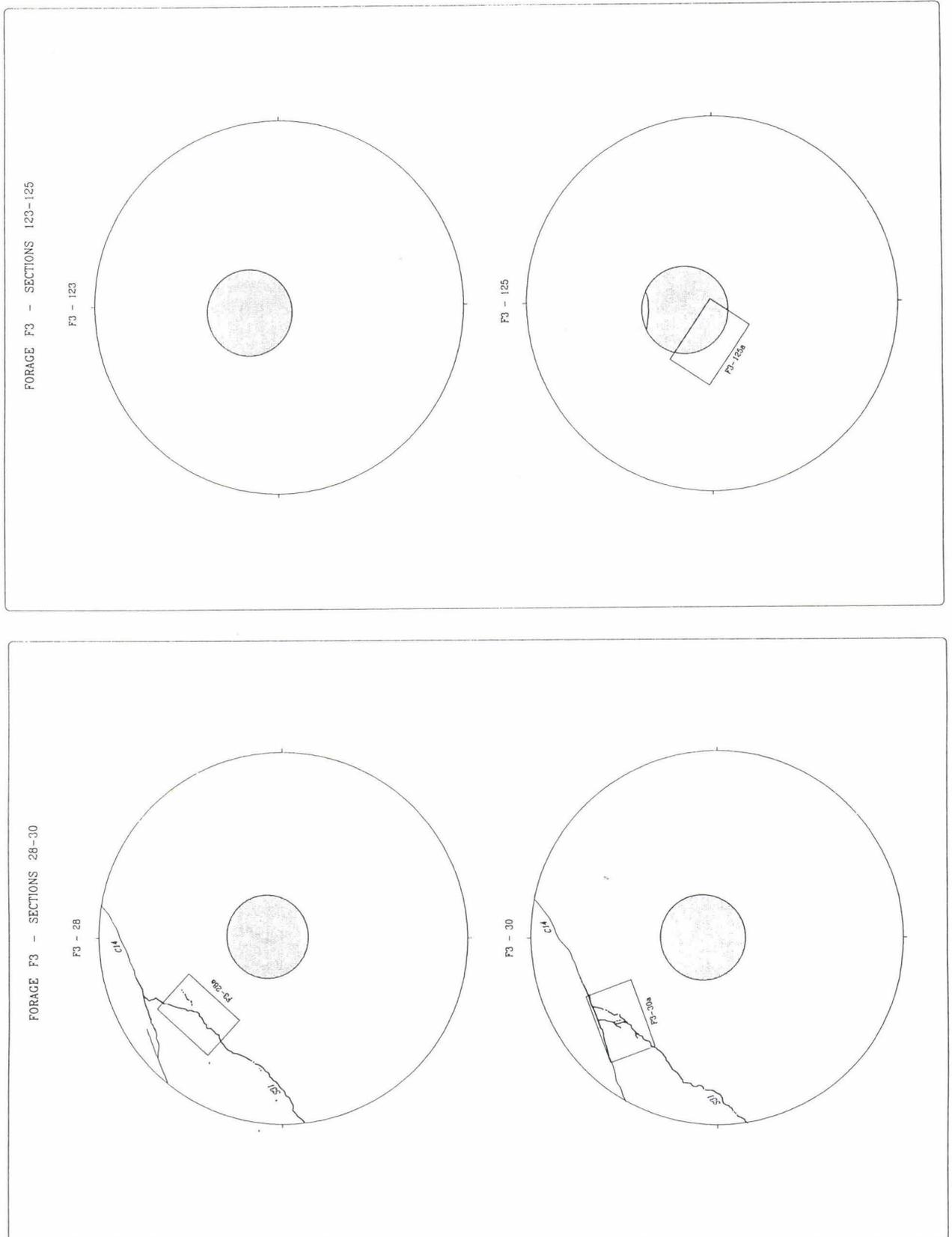


Figure 135 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces

6.4.4 Forage F4

Le forage F4 pratiqué dans un granite sain présente une zone très importante au niveau du fond caractérisé par l'existence d'une microfissuration imprégnée localisée entre deux zones de fissures (figure 136). Cette microfissuration n'a pas été identifiée dans la carotte de 56 mm de diamètre. Quatre sections ont été choisies pour le forage F4 (figure 131).

La section 50-52 localisée dans une zone sans macrofracturation (figure 131) a été choisie dans le but d'analyser les microfissures au niveau du bord du forage F4. Deux lames ont été sélectionnées, de même inclinaison mais placées sur les faces opposées de la section au bord du forage initial (figure 136, section 50-52).

Les sections 115-117, 117-123, et 123-125 correspondent à une zone de microfissures remplie de résine et orientée selon un plan sub-horizontale (plan S35) localisé entre deux zones de fissures (S32 et S33, figures 136 et 137). Cette microfissuration (S35) n'est pas observée dans la carotte en diamètre 56 mm, par conséquent elle est à rattacher à une néoformation due au forage F4. Le plan moyen qui contient cette microfissuration est sub-parallèle à l'axe du forage. Ceci est en accord avec une fracturation formée par un changement des contraintes lié à l'intervention mécanique du forage. Ce phénomène a été observé dans plusieurs forages ou creusements de galeries (DERLICH S., 1970, 1972, 1989). Particulièrement en galerie, le creusement provoque une fissuration et une microfissuration parallèles aux parois.

Dans la section 115-117 deux lames ont été choisies dans le but d'étudier le détail de la microfissuration à proximité du bord du forage (figure 136, section 115-117). A la loupe binoculaire on observe que cette microfissuration suit en partie les bords des cristaux et présente des discontinuités.

A partir de la face 117 de la section 117-123 deux lames ont été choisies afin d'étudier la microfissuration remplie de résine (S35) selon un plan vertical et parallèle à l'axe du forage (figure 137, section 117-123). Ces deux lames permettront entre autre d'observer s'il existe une discontinuité du plan selon la direction parallèle au forage.

Dans la section 123-125 localisée dans le fond du forage, trois lames ont été sélectionnées sur la face 125 : une, localisée dans la bordure ouest du forage, une lame placée au centre du forage (partie de carotte non dissociée de la roche), et une lame localisée dans la bordure est du forage (figure 137, section 123-125). Ces trois lames sont sur le plan orthogonal par rapport à l'axe du forage et inclinées de 5° vers l'ouest.

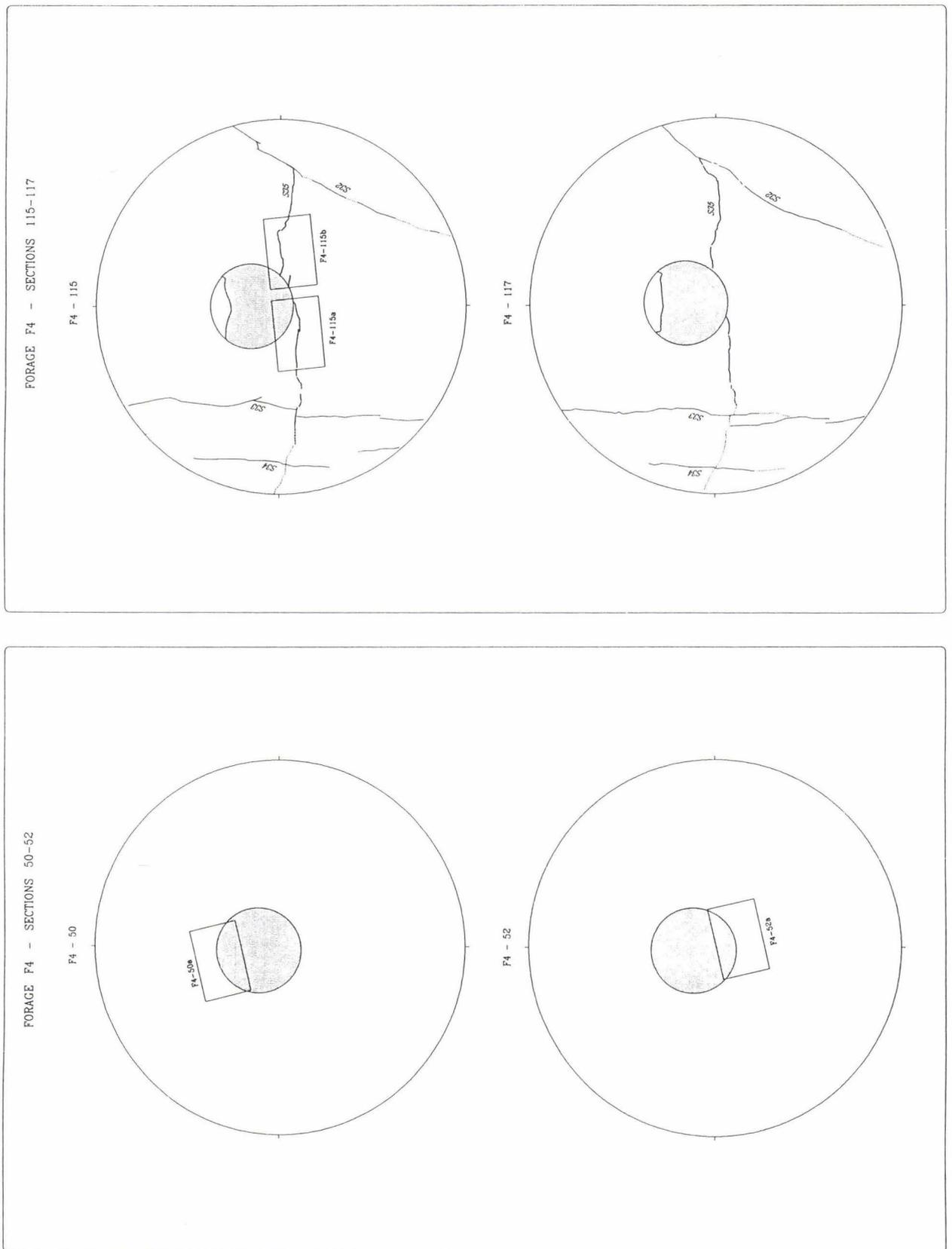


Figure 136 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces

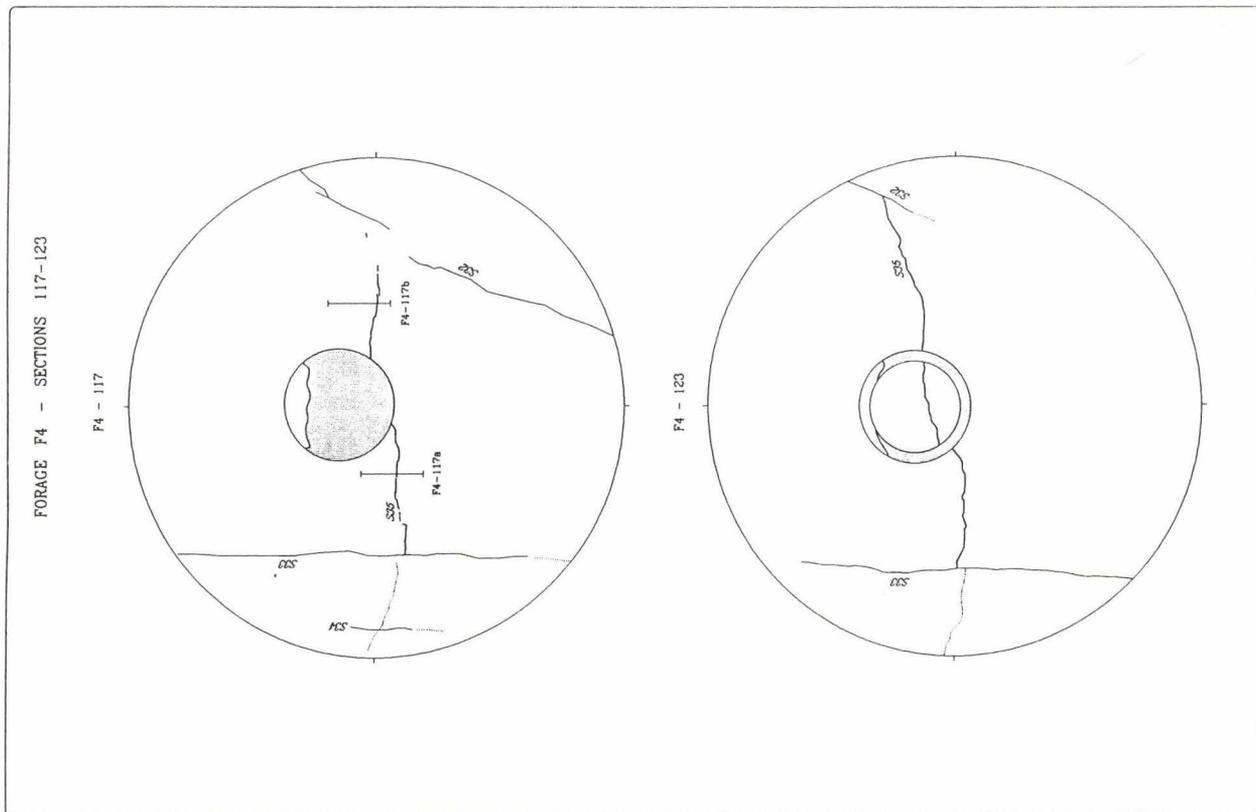
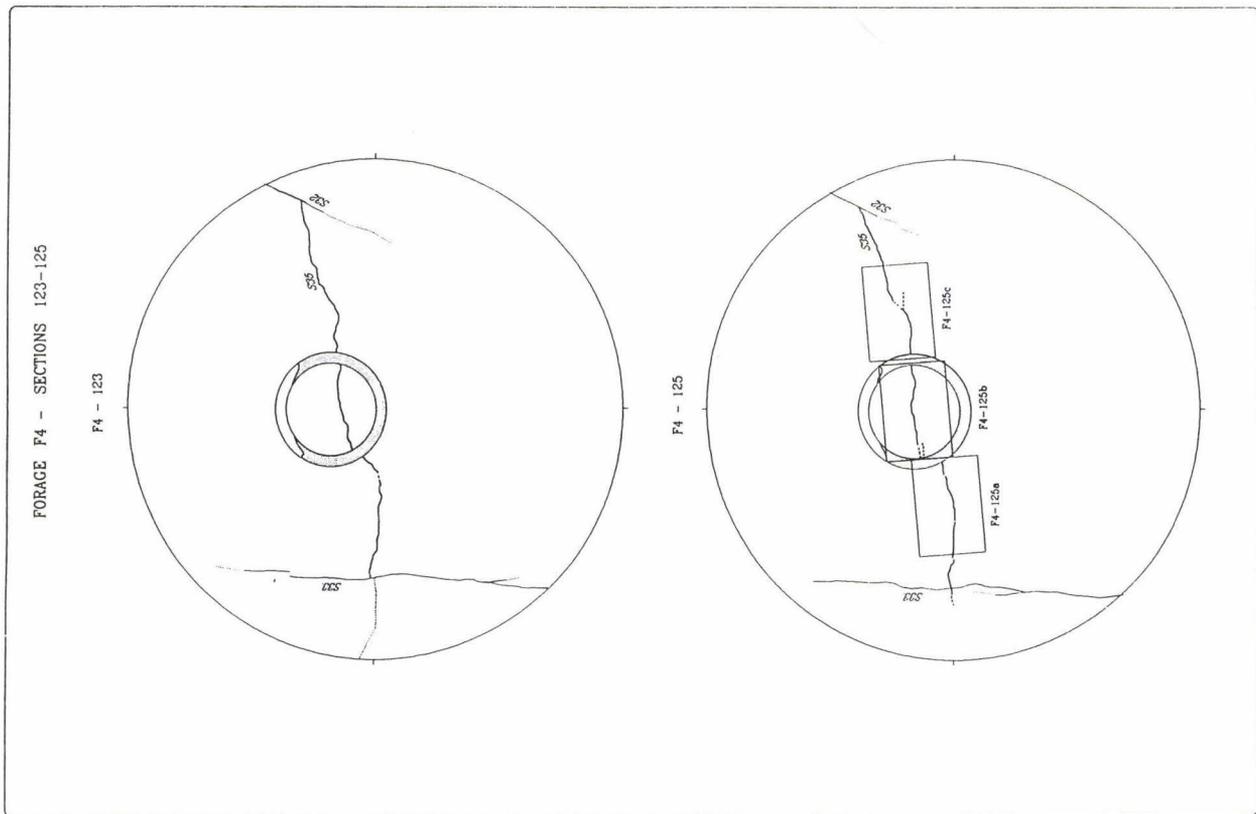


Figure 137 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour étude en lames minces

6.4.5 Forage F5

Dans le forage F5 trois sections ont été sélectionnées. La première afin d'analyser les ramifications des fissures près du forage et les deux dernières pour analyser la microfissuration au fond du forage (figure 131).

Les faces de la section 75-77 sont coupées par deux fractures : une fracture légèrement inclinée identifiée dans les carottes (C25), et une fracture fortement inclinée et discontinue (S36) identifiée dans la surcarotte (figure 138, section 75-77). La fissure C25 présente une microfissuration ramifiée localisée au-dessus du forage. Cette ramification peut être associée à l'influence du forage F5 et on a choisi à ce propos de réaliser la lame F5-77a de la section 75-77 inclinée de 2° vers l'ouest (figure 138, section 75-77). La deuxième lame, située sur cette même face et inclinée de 56° vers l'est permettra d'analyser la fracture S36, partiellement remplie de résine, dans la bordure du forage F5 (figure 138, section 75-77).

L'analyse des faces des sections 130-132 et 132-138 a pour finalité de révéler le détail de la microfissuration de la paroi du forage au fond de celui-ci. Deux lames ont été choisies: une lame placée sur le bord inférieur du forage sur la face 130 (figure 138, section 130-132), et une lame sur la face 138 située également dans la bordure inférieure (figure 139, section 138-140). Les deux lames sont inclinées de 2° vers l'ouest.

Le tableau ci après résume l'ensemble des prélèvements in situ effectués après imprégnation de résine colorée.

Tableau 28 - Sélection d'échantillons imprégnés in situ et surcarottés dans le granite de la mine de Vénachat

COTES DES SECTIONS RETENUES	N° LAME
VENACHAT CAROTTE n° F1 ϕ int 56 ϕ ext 146	
VENACHAT CAROTTE n° F2 ϕ int 56 ϕ ext 250	
F2 040-042	F2 040 - F2 042
F2 120-122	F2 122
VENACHAT CAROTTE n° F3 ϕ int 56 ϕ ext 250	
F3 028-030	F3 028 F3 030
F3 123-125	F3 125
VENACHAT CAROTTE n° F4 ϕ int 56 ϕ ext 250	
F4 050-052	F4 050 F4 052
F4 115-117	F4 115 a F4 115 b
F4 117-123 coupe dans l'axe	F4 117 a F4 117 b
F4 123-125	F4 125 a F4 125 b F4 125 c
VENACHAT CAROTTE n° F5 ϕ int 56 ϕ ext 250	
F5 075-077	F5 77 a F5 77 b
F5 130-132	F5 130
F5 138-140	F5 138

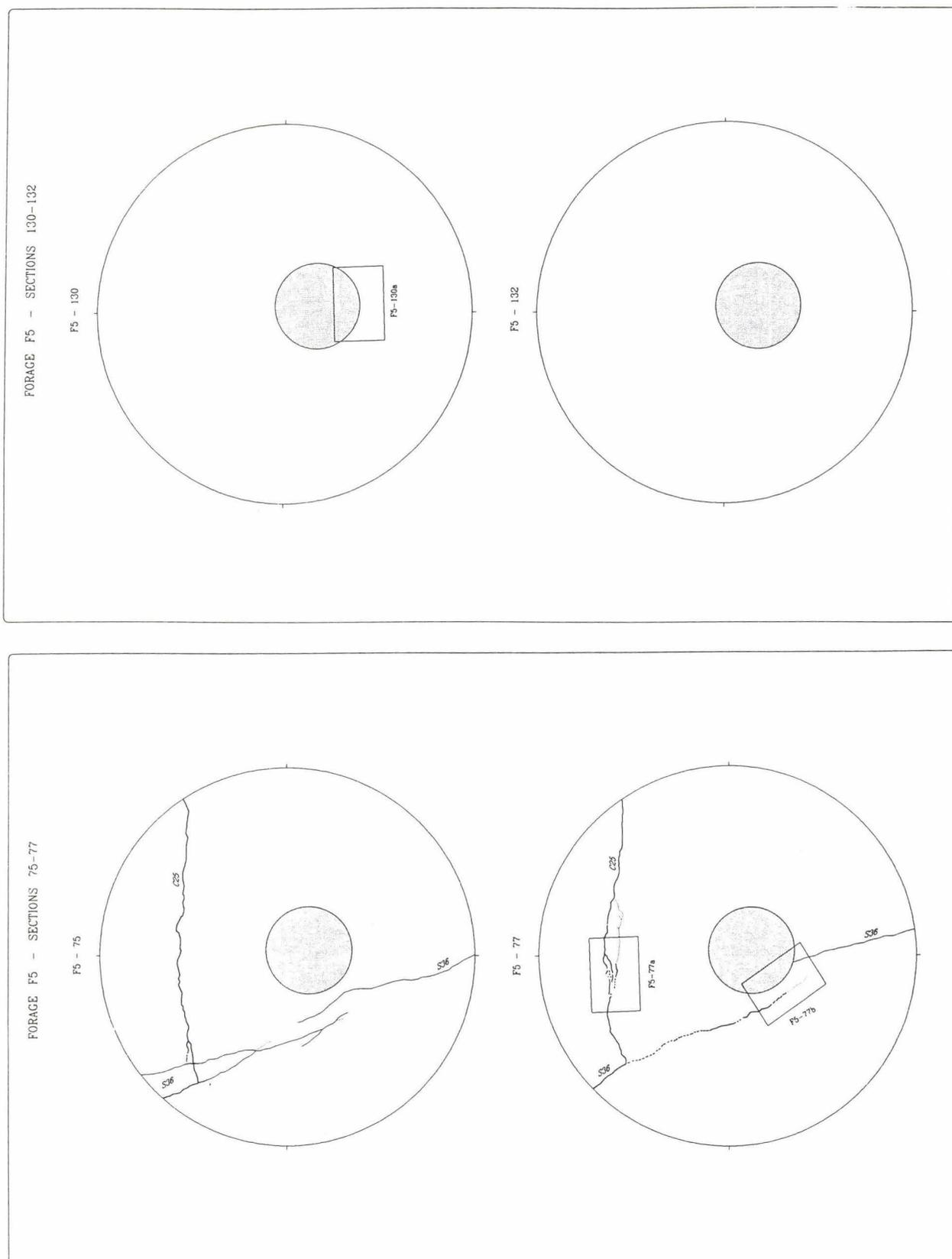


Figure 138 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix des secteurs pour prélèvements et pour étude en lames minces

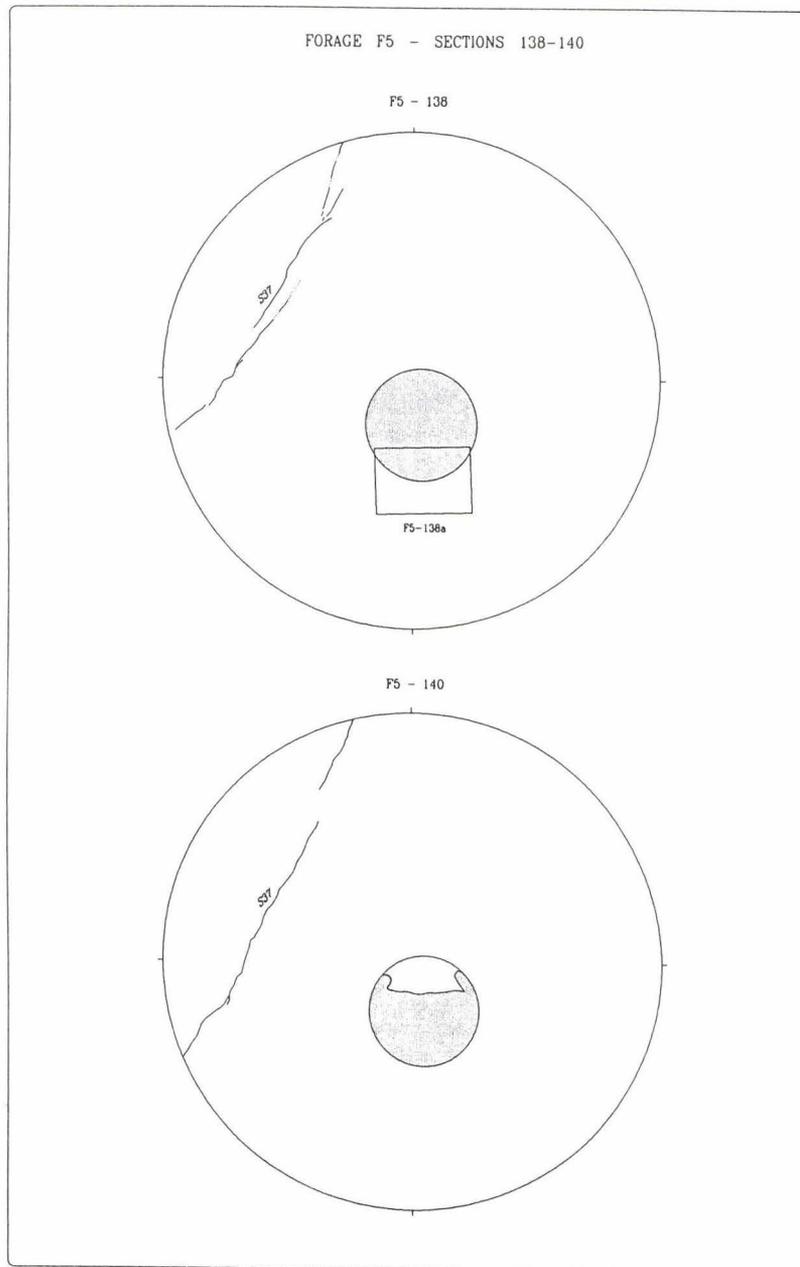


Figure 139 - Cartographie de section analysée à la loupe binoculaire et choix de secteur pour prélèvements et étude en lames minces

6.5 Intérêts de l'imprégnation in situ

L'expérience d'imprégnation des fissures dans le granite de la mine de Vénachat, située près de la surface à la base d'une paroi, a été menée dans deux secteurs dont les caractéristiques lithologiques et structurales sont différentes.

Le premier secteur correspond à un granite légèrement altéré caractérisé par deux plans majeurs (P1 et P2) que délimitent des blocs tabulaires de 50-70 cm d'épaisseur. Les carottes des trois forages réalisées dans ce secteur (F1, F2 et F3) ont mis en évidence d'une part la présence de fissures à l'intérieur des blocs et d'autre part l'existence de plans parallèles à la limite des blocs.

Le deuxième secteur est localisé dans un granite sain dont les plans majeurs (P4 et P5) délimitent des blocs tabulaires plus épais (95-110 cm) que ceux du premier secteur. Les carottes des deux forages (F4 et F5) montrent une variation structurale allant d'un bloc sans fissures (F4) à un bloc fortement fissuré (F5).

La perméabilité des deux secteurs est contrôlée essentiellement par de ces plans. La circulation d'eau le long des plans majeurs a été mise en évidence pendant la réalisation des forages. Bien que ces plans présentent un remplissage argileux, celui-ci n'est pas suffisant pour les colmater.

Le dispositif de mise en oeuvre des injections a bien fonctionné. La résine utilisée, sélectionnée au laboratoire, est un mélange de Méthacrylate de méthyle, Altufix A, Altufix B et un colorant.

Les opérations d'injection de résine ont été réalisées soit sans pression soit avec une pression d'injection maximale de 0,5 MPa). Les volumes de résine utilisés ont été supérieurs à ceux des forages, car la perméabilité du milieu a contribué à la circulation de la résine le long des plans. En conséquence, pour les injections avec pression il est nécessaire de conditionner les forages. Cependant, malgré une chute graduelle de pression lors de l'injection, prouvant l'existence d'une légère circulation le long des plans, on a pu obtenir de bonnes conditions de mise en oeuvre devant permettre d'imprégner au mieux les fissures et microfissures du granite.

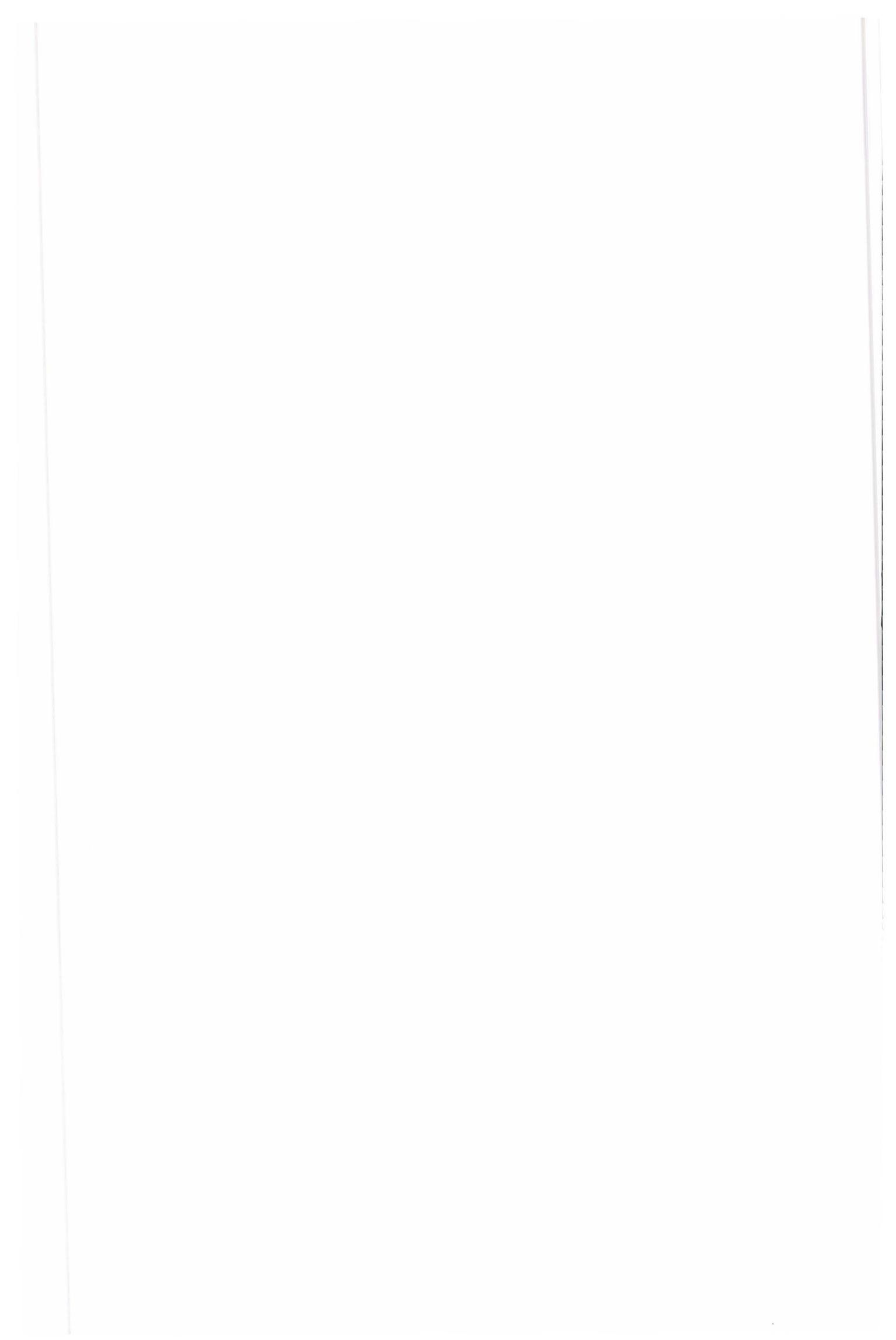
L'analyse des surcarottes (260 mm de diamètre) a confirmé une bonne pénétration de la résine dans les fissures. L'expérience sur le terrain a montré, comme celle de laboratoire, un léger rétrécissement de la résine dans le forage, la formation de quelques bulles au cours de la polymérisation et un long durcissement au centre du forage (supérieur à 24 heures). Cependant, ces caractéristiques n'ont pas modifié l'expérience car les temps de polymérisation et de durcissement sont plus rapides au niveau des fissures (faible masse volumique) que vers l'axe du forage.

Un ensemble de sections des surcarottes a été choisi pour l'analyse des fissures et microfissures. Les critères retenus sont : l'analyse de la microfissuration proche de la paroi du forage localisée au fond de celui-ci (> 100 cm) afin de s'éloigner le plus possible des effets de surface, l'analyse des fissures remplies de résine localisées à proximité du forage ou qui interceptent celui-ci afin d'identifier la néoformation des microfissures associées au processus de forage, et l'analyse des microfissures néoformées et remplies de résine.

L'analyse de la fissuration et de la microfissuration a été effectuée d'abord sur les sections de surcarottes à l'aide de la loupe binoculaire. Elle consiste à déterminer les zones d'intérêt en établissant une cartographie de la fissuration en différenciant les fissures remplies de résine de celles qui ne le sont pas. A partir de cette analyse plusieurs secteurs ont été choisis pour les études en lame mince au microscope.

Les premières analyses mettent en évidence une néoformation de microfissures localisées entre deux plans pré-existants ou bien à proximité de ceux-ci. Une accentuation de la fissuration pré-existante est observée dans les secteurs proches du forage. Dans la plupart des cas, ces microfissures induites remplies de résine, sont orientées selon des plans qui forment un faible angle avec l'axe du forage. Cette géométrie est en accord avec une fracturation liée à un changement de contraintes lié à l'intervention mécanique du forage. Ce phénomène est aussi observé particulièrement dans les galeries de mines, où le creusement provoque une fissuration et une microfissuration parallèles aux parois.

La formation et la géométrie de microfissures au niveau de la paroi du forage ne sont pas encore clairement établies ; elles devraient pouvoir être précisées lors de l'analyse détaillée des lames minces.



CONCLUSION GENERALE

La reconnaissance de la microfissuration des granites a été entreprise dans le cadre d'études de sûreté concernant les projets de stockage profond des déchets radioactifs de haute activité. Dans les roches cristallines, le réseau microfissuré jouerait en effet un rôle prépondérant dans les migrations éventuelles des radioéléments vers la biosphère. La quantification de ce réseau est donc fondamentale. Pour ce faire, nous avons conduit, dans le cadre de ce contrat, à la fois une recherche sur les effets de travaux miniers (forages, ou explosifs) sur la fissuration du granite, une recherche sur quelques techniques de prélèvements et préparations de ces échantillons, et une recherche sur des moyens d'étude au laboratoire de quantification de la microfissuration, notamment pour le granite des forages profonds d'Auriat.

Les résultats obtenus au cours de cette étude sur la quantification de la microfissuration d'un granite sont intéressants à double titre. D'une part ils ont nécessité au niveau des techniques mises en oeuvre, à savoir la porosimétrie au mercure et l'analyse optique des lames minces de granite, l'amélioration et l'adaptation des appareils existants, mise au point de conceptions nouvelles. D'autre part, ils ont permis de mettre en évidence des facteurs qui influent de façon déterminante ou secondaire sur les caractéristiques du système microfissural du granite dans son ensemble.

En ce qui concerne les techniques mises en oeuvre:

- nous avons tout d'abord augmenté de façon significative la sensibilité d'un porosimètre au mercure standard, inadapté au départ pour des mesures sur des matériaux compacts tel que le granite. Il a fallu concevoir et réaliser une nouvelle cellule de mesure et prendre en compte les effets du second ordre tels que la compressibilité de l'échantillon et du mercure, l'élévation de la température ou la déformation de la cellule au cours de la montée en pression. La prise en compte de ces différents facteurs nous a conduit à élaborer de nouveaux logiciels de traitement des données. La conception de cet ensemble a donc abouti à un système nettement plus performant que tout les systèmes actuellement sur le marché, et bien adapté au problème posé;

- pour l'analyse optique des lames minces de granite imprégnées par une résine colorée, le système met en oeuvre un microscope polarisant, une tablette à numériser et un microordinateur. Nous avons conçu un traitement semi-automatique de l'image avec choix de l'élément à analyser et élaboré les logiciels correspondants. De nombreux paramètres ont été sélectionnés pour cette analyse: dimensions des fissures, orientation, caractère intra ou intergranulaire et nature des minéraux adjacents.

Nous avons pu montrer que les deux techniques mises au point ou améliorées étaient bien adaptées au but recherché et qu'elles donnaient des résultats fiables et reproductibles. Elles ont l'avantage d'être complémentaires et en définitive de couvrir l'ensemble du système microfissural d'un granite ($20 \mu\text{m}$ à 60 \AA) qui doit jouer, selon I. NERETNIECKS (1980), un rôle essentiel dans le phénomène de migration des radionucléides au sein des roches cristallines de type granite.

En ce qui concerne les résultats relatifs aux caractéristiques du granite, la quantification réalisée sur les deux forages d'Auriat (500 et 1000 mètres) à l'aide de ces deux techniques apporte un certain nombre d'éléments nouveaux :

- certaines caractéristiques, inconnues jusqu'à présent, du matériau granitique dans son ensemble sont mises en évidence. Ainsi quelle que soit la nature ou l'état de dégradation du matériau, le volume de la porosité ($2 \mu\text{m}$ à 60 \AA) est au minimum deux fois plus important que celui de la microfissuration ($20 \mu\text{m}$ à $1 \mu\text{m}$). Le caractère intragranulaire des fissures apparaît prépondérant. La répartition des fissures à l'intérieur des minéraux respecte approximativement la répartition modale de ces derniers, avec peut-être une prédominance du phénomène de fissuration du quartz;

- la faible densité de fracturation, le colmatage des fractures ou des fissures, ou encore la présence d'une zone cataclasée se manifestent généralement par de faibles valeurs de microfissuration ou de porosité. Nous avons d'ailleurs dissocié les deux facteurs : colmatage et altération, qui n'apparaissent pas forcément simultanément et qui provoquent des effets contraires sur le système microfissural;

- la profondeur et les caractéristiques microfissurales du granite ne semblent pas corrélées. On pouvait penser que les effets du prélèvement par forage auraient pu se voir à Auriat, compte tenu des valeurs de contraintes mesurées in situ à 1000m (CORNET F.H., 1984):

$$\begin{aligned}\sigma_v &= 25,6 \text{ MPa (contrainte verticale)} \\ \sigma_H &= 26,5 \text{ MPa (contrainte horizontale maximum)} \\ \sigma_h &= 18,1 \text{ MPa (contrainte horizontale minimum)}\end{aligned}$$

Or il est apparu qu'aucune manifestation de relâchement des contraintes sous forme de discage, microdiscage ou microfissuration n'était visible dans le cas des forages profonds d'Auriat.

Un certain nombre d'objectifs n'ont pas été atteints, et il serait nécessaire de développer les points suivants:

- revoir le traitement des données, concernant les volumes injectés en fonction de la pression, indiqués par le porosimètre au mercure. En effet, cette analyse repose à l'heure actuelle sur une modélisation suivant des pores cylindriques. Un autre modèle pour le traitement de ces données, plus réaliste et plus conforme à la réalité du granite serait à développer ;

- confronter ces résultats avec d'autres obtenus par des techniques différentes (perméabilité, propriétés mécaniques,...) sur les mêmes échantillons. Ce n'est qu'à la vue de l'ensemble de telles données que des quantifications réelles et fiables des caractéristiques de la fissuration et de l'espace poreux pourront être réalisées.

Pour les effets en galerie, il sera a priori facile de mettre en évidence par les études de la fracturation au microscope, l'influence des différents tirs (explosifs forts et faibles). L'échantillonnage que nous avons présenté dans le cadre de ce travail doit permettre d'y parvenir. Les méthodes d'analyses structurales au microscope sont probablement plus efficaces pour mettre en évidence, si elle existe, une fissuration induite par les travaux humains.

Les méthodes quantitatives doivent être mises en oeuvre en second lieu pour étudier les conséquences des travaux sur la perméabilité et l'altérabilité de la roche.

Par contre, il semble nécessaire de mettre au point des méthodes utilisant la libération des contraintes par sur-carottages avec imprégnations successives de la microfissuration. C'est dans ce sens que nous avons mis en oeuvre et présenté une technique d'imprégnation in situ suivie de surcarottage en gros diamètre. A priori, cette technique semble bien adaptée comme le montrent les premières observations effectuées à la loupe binoculaire sur les échantillons. Seules des analyses sur lames minces permettent de confirmer ces premières observations.

Cette idée de carottage en gros diamètre permettant de minimiser l'influence destructrice des méthodes d'excavation conventionnelles sur la roche environnante, et sur les échantillons recueillis pour études, nous a conduit à mettre en oeuvre une technique de forage-carottage en roche granitique de très gros diamètre, c'est à dire au moins 1 mètre ou plus, pour des profondeurs de plusieurs mètres, le tout en condition de mine classique. Les premières constatations faites tant sur les carottes ainsi obtenues que sur les parois des puits de forages ainsi réalisés montrent que cette technique provoque le minimum de perturbations sur la roche du point de vue de la fissuration induite. L'observation de lames minces sur des échantillons prélevés dans le granite foré par cette technique (carotte ou paroi de puits) doit permettre de confirmer les avantages de la méthode. Il semble certain de ce moyen de foration de puits de grandes dimensions répond aux objectifs de sûreté que l'on doit prendre en compte pour la mise en oeuvre des techniques de travaux miniers liés à un stockage.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGTERBERG F.P., KATSUBE T.J. et LEW S.N. (1985) - Use of multiple regression for petrophysical characterization of granites as a fonction of alteration. Paper of Geological Survey of Canada, 85-1B, p. 451-458

ARCHIE G.E. (1942) - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Amer. Inst. Mining Metall. Eng. Trans., vol. 146, p.54-67.

BLES J.L., BLANCHIN R. (1986) - Fracturation profonde des massifs rocheux granitiques. Rapport CCE n°EUR 10378.

BRGM (1974) - Carte géologique d'Ambazac n°664 au 1/50 000 ème

BRGM (1981) - Investigation par forages profonds du granite d'Auriat. Rapport C.S.D.R. n° 81/03 - CEA/IPSN.

BALDRIDGE S. et SIMMONS G. (1971) - Progress in microcrack decoration. Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 52, p. 342.

BARBIER J. et RANCHIN G. in Peterlongo (1972). Guide géologique régional, Massif Central. Ed. Masson, 200.

BARRETT E.P., JOYNER L.G. et HALENDA P.P. (1951) - The determination of pore volume and area distributions in porous substances. J. Am. Chem. Soc., vol. 73, p. 373.

BOEGLIN E. (1989) - Améliorations d'un porosimètre au mercure en vue de la quantification de la microfissuration des granites. D.E.A. Sciences des Matériaux, Université de Besançon.

BRACE W.F., ORANGE A.S. et MADDEN T.R. (1965) - The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks. J.Geophys. Research, vol. 70, p. 5669 - 5678.

BURNHAM C.W. (1979) - Magmas and hydrothermal fluids. In geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd edition, Barnes Ed, John Wiley and sons, 798 p..

CABRERA J., CUSHING E. et DERLICH S. (1990) - Etude par forages de la fracturation profonde en roches dures (granites) à partir de carottes et imagerie sonique (BHTV): exemple du forage d'Auriat. Journées d'étude diagraphies et mécanique des terrains, Bordeaux, 13 et 14 Novembre 1990.

CALLEJA L., MONTOTO M., PEREZ GARCIA B., SUAREZ DEL RIO L.M., MARTINEZ HERNANDO A. et MENENDEZ VILLAR B. (1989) - An ultrasonic method to analyse the progress of weathering during cyclic crystallization laboratory tests. Int. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Bari, Italie, 15 p.

CATHLES L.M. (1977) - An analysis of the cooling of intrusives by groundwater convection which includes boiling. Econ. Geol., vol. 72, p. 804 - 826.

CAVALETTI R., LAZZARINI L., MARCHESINI L. et MARINELLI G. (1985) - A new type of Epoxy resin for the structural consolidation of badly decayed stones. Proc. du Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre, Lausanne, vol. 2, p. 769-778.

CHANDLER R.J. (1969) - The effects of weathering on the shear strength of Keuper Marl. *Geotechnique*, vol. 19, p. 321-334.

CHARPENTIER J.P. (1983) - Etude du comportement du granite sous l'effet de la pression (jusqu'à la rupture) et à température élevée (jusqu'à 200°C). Rapport C.S.D.R. 83/15 - C.E.A..

CORNET F.H. (1984) - Mesures de contraintes à Auriat (Creuse). Journées sur le granite, Orléans la Source, 26 Juin 1984 Edition Documents du BRGM n°84

DAS RIES (1969) - *Geologica Bavarica*, n°61, Bayer. Geologischen Landesamt., Munchen.

DEJOU J., CLEMENT P. et KIMPE C. de (1982) - Importance du site dans la génèse des minéraux secondaires issus des altérations superficielles ; exemple des granites et gabbros du Mont Megantic, Quebec, Canada. *CATENA*, Braunschweig, vol. 9, p. 181-198.

DERLICH S. (1970) - Explosions nucléaires souterraines : Effets sur des ouvrages dans le granite. Rapport CEA-R-4014.

DERLICH S. (1972) - Effets des explosions nucléaires souterraines dans le granite : fracturation de la roche. *Revue de l'Industrie Minérale*, Cahier n°4, 15 Avril 72 du Comité Français de Mécanique des Roches.

DERLICH S. (1989) - Comportement mécanique du granite : fissures et microfissures. Accord de Coopération AECL /CCE; présentation Whiteshell de Septembre 1989 (non publié).

DERLICH S. (1990) - Etude des possibilités de stockage dans les formations géologiques : l'expérience thermo-hydro-mécanique THM. Rapport CCE n°13115 FR.

DUBININ M.M. (1960) - The potential theory of adsorption of gases and vapors for adsorbents with energetically non-uniform surfaces. *Chem. Rev.*, vol.60, p. 235.

EVERETT D.H. et STONE F.S. (1957) - Structure and properties of porous materials. *Collected papers*, Butherworth, London.

FAUDOT D. (1980) - Etude structurale d'un corps poreux. *Pétrole et techniques*, n° 273.

FOOKES P.G. et HORSWILL P. (1969) - Discussion on engineering grade zones. Professional Conference in-situ Testing Soils and Rocks, Institution of Civil Engineers, London, England, p. 53-57.

FRENCH B.M. et SHORT N.M. (1968) - Shock Metamorphism of Natural Materials, Mono Book Corp. Baltimore, 644 p..

GARDNER R.D. et PINCUS H.J. (1968) - Fluorescent dye penetrants applied to rock fractures. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, vol. 5, p.155 - 158.

GATEAU C., HALFON J., LOUIS C. et PREVOSTEAU J.M. (1975) - Paramètres de quantification de la fracturation par analyse d'images. Journées Nationales Géotechniques, Orléans.

GENTIER S. (1987) - Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale. Documents du BRGM n°134.

Massif Central) défini par les données isotopiques U-Pb sur zircon et monazite. C.R. Acad. Sc. Paris, t 303, sér II (14), 1309-1314.

KAMINENI D.C. et DUGAL J.J.B. (1982) - A study of rock alteration in the Eye-Daskwa Lake Pluton, Atikokan, northwestern Ontario, Canada. Chem. Geol., vol. 36, p. 35-57.

KATSUBE T.J. (1981) - Pore structure and pore parameters that control the radionuclide transport in crystalline rocks. In Proc. Tech. Program Int. Powder Bulk Solid Handling Processing (Rosemont, Illinois). CAHNERS Exposition Group, Chicago, Illinois.

KATSUBE T.J. et KAMINENI D.C. (1983) - Effect of alteration on pore structure of crystalline rocks : core samples from Atikokan, Ontario. Canadian Mineralogist vol. 21, p. 637-646.

KATSUBE T.J., PERCIVAL J.B. et HUME J.P. (1985) - Characterisation of a rock mass by pore structure parameters. Compte-rendu de la 17^{ème} réunion d'information sur le programme de gestion des déchets de combustible nucléaire, Pinawa, Manitoba (Canada), vol. 2, p. 375 - 413.

KRANK K.D. et WATTERS R.J. (1983) - Geotechnical properties of weathered Sierra Nevada granodiorite. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, vol. 20, p. 173-184.

LAGEAT Y. (1981) - Contribution à la connaissance de la porosité des roches cristallines. Physio-géo, n°1, p. 3 - 33.

LE BEL L. (1979) - Micas magmatiques et hydrothermaux dans l'environnement du porphyre cuprifère de Cerro-Verde, Santa-Rosa, Pérou. Bul. Mineral., vol. 102, p. 35 - 41.

LECA D. (1990) - Caractérisation des altérations du granite d'Auriat (Creuse) - Etude de son espace poreux. Thèse de Géologie de l'ingénieur E.N.P.C., Paris, 332 p.

LECA D., LAPEYRE C., STRUILLLOU R, ARNOULD M. (1990) - Analyse des divers aspects de l'altération du granite d'Auriat (Creuse); sondage 0689/2X/14. Rapports n°1 et 2 du contrat CEA - ARMINES N° BC 4323.

LEROY J. (1978)- - Métallogénèse des gisements d'uranium de la division de la Crouzille (COGEMA - Nord Limousin, France). Mém. Sc. de la Terre, Nancy, 15, 7-40.

MOLLIER B. (1983) - Géologie et géochimie de l'uranium. Thèse 3^{ème} Cycle, Univ. de Nantes.

MOLLIER B. et LESPINASSE M. (1985) - Déformation magmatique et plastique en limite Nord du granite de Saint-Sylvestre (Nord-Ouest du Massif Central français) : la faille d'Arrènes-Ouzilly. C.R. Acad. SC. Paris, t. 300, Sér II, n° 14, 681-686

MONTOTO L. (1978) - A method to measure pores and fissures in geologic materials under S.E.M. by Image Processing. 9th Int. Cong. on Electron Microscopy, Toronto, vol. 1, p. 212 - 213.

MONTOTO M., MONTOTO L., RÖSHOFF K. et LEIJON B. (1981) - Microfractographic study of heated and non heated Stripa granite. Proceedings of the International Symposium "Subsurface Space", Pergamon Press, vol. 3, p. 1357 - 1368.

MOYE G.D. (1955) - Engineering geology for the Snowy Mountains scheme. Australian Journal of the Institution of Engineers, vol. 29, p. 281-298.

NERETNIEKS I. (1980) - Influence of microfissures in crystalline rock on radionuclide migration. *Computers and Geology*, vol.4, p. 137-152.

NORTON D. et CATHLES L.M. (1979) - Thermal aspects of ore deposition. In *geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd edition, Barnes Ed., John Wiley and sons, 798 p.

NORTON D. et KNAPP R. (1977) - Transport phenomena in hydrothermal systems : the nature of porosity. *Amer. Journ. Sci.*, vol. 277, p. 913 - 936.

OBERT L. et DUVALL W. I. (1967) - *Rock mechanics and the design of structures in rock*. John Wiley and Sons Inc..

OLLIER C.D. (1969) - *Weathering*. American Elsevier Publishing Company, Inc., New-York, 304 p.

ORDAZ J., ESBERT R.M. et SUAREZ DEL RIO L.M. (1978) - A proposed petrographical index to define mineral and rock deterioration in granitic rocks. *Int. Symp. on deterioration and protection of stone monuments*, Paris, p. 19 - 29.

PARNEIX J.C. (1987) - Mécanismes de l'altération hydrothermale dans les granites. Implications pour le stockage des déchets nucléaires. Thèse Sciences Naturelles, Paris, 200 pp.

PARNEIX J.C., BEAUFORT D., DUDOIGNON P. et MEUNIER A. (1985) - Biotite chloritization process in hydrothermally altered granites. *Chem. Geol.*, vol. 51, p. 89 - 101.

PERAMI R. (1971) - Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques. Thèse Sciences, Toulouse, 276 p..

RICHTER D. et SIMMONS G. (1974) - Thermal expansion behavior of igneous rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 11, p.403 - 411.

ROGET J. (1988) - Essais non destructifs. L'émission acoustique, AFNOR. - CETIM, 195p.

ROOTARE H.M. et PRENZLOW Z.L. (1967) - Surface areas from mercury porosimeter measurements. *J. Phys. Chem.*, vol. 71, p. 2733.

RUIZ DE ARGANDONA V.G. et CALLEJA L. (1984) - Determinacion del umbral de microfisuracion termica mediante emision acustica / actividad microsismica. VII Simposio Nacional "Reconocimiento de macizos rocosos", Madrid.

RUIZ DE ARGANDONA V.G., CALLEJA L. et MONTOTO M. (1985) - Determinacion experimental del umbral de microfisuracion termica de la "roca matriz" o "intact rock". *Trabajos de Geologia, Univ. de Oviedo*, vol. 15, p. 299 - 306.

RUXTON B.P. et BERRY L. (1957) - Weathering of granite and associated erosional features in Hong-Kong. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 68, p. 1263-1291.

SIEGFRIED R., SIMMONS G., SCHATZ J. et RICHTER D. (1974) - Effect of shock waves on elastic properties of rocks. *Trans. Amer. Geophys. Union, abstracts*, vol. 55, p. 418.

SIMMONS G. et CARUSO L. (1983) - Microcracks and radioactive waste disposal. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 15.

SIMMONS G. et RICHTER D. (1976) - Microcracks in rocks. The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks, Interscience, p. 105 - 137.

SIMMONS G., RICHTER D., TODD T. et WANG H. (1973) - Microcracks ; their potential for obtaining P - T history of rocks. Geol. Soc. Amer., abstracts, vol. 5, p. 810.

SIMMONS G., SIEGFRIED R., RICHTER D. et SCHATZ J. (1974) - Estimating peak shock pressures for lunar rocks. Fifth Lunar Science Conf., abstracts, p. 709 - 711.

SIMMONS G., TODD T. et BALDRIDGE S. (1975) - Towards a quantitative relationship between elastic properties and cracks in low porosity rocks. Amer. J. Sci., vol. 275, p. 318 -345.

SIMMONS G., WANG H., RICHTER D. et TODD T. (1973) - Microcracks created by P,T changes. Trans. Amer. Geophys. Union, abstracts, vol. 54, p. 451.

TODD T., RICHTER D., SIMMONS G. et WANG H. (1973) - Unique characterisation of lunar samples by physical properties. Proc. of 4th Lunar Science Conf., Geochim. et Cosmochim, p. 2639-2662.

VUILLEUMIER C. (1986) - Etude du système microfissural d'un granite (premier sujet) DEA Chimie physique des surfaces, Université de Besançon.

VUILLEUMIER C. (1990) - Visualisation et quantification du système microfissural d'un granite - exemple des forages d'Auriat (Creuse). Thèse Physique-Chimie de l'Université de Franche-Comté.

VUILLEUMIER C., BOEGLIN E., COUCHOT P., CHAMBAUDET A. (1989) - Rapport final du contrat n° BC 3872 de l'étude de la porosité des granites issu des rapports suivants :

- KUDJAWU T., COUCHOT P., VUILLEUMIER C., CHAMBAUDET A. (1987) - Rapports d'état d'avancement des travaux sur l'étude de la porosité des granites n°1B et 2B, C.E.A.

- BOEGLIN E., VUILLEUMIER C., COUCHOT P., CHAMBAUDET A. (1988) - Rapport d'état d'avancement des travaux sur l'étude de la porosité des granites n°3B, C.E.A..

- VUILLEUMIER C., BOEGLIN E., COUCHOT P., CHAMBAUDET A. (1988) - Rapport d'état d'avancement des travaux sur l'étude de la porosité des granites n°4B, C.E.A..

VUILLEUMIER C., CHAMBAUDET A., COUCHOT P. (1989) - Rapport final du contrat n° BC 3873 de l'étude de la microfissuration des granites issu des rapports suivants :

- VUILLEUMIER C., CHAMBAUDET A., COUCHOT P. (1987) - Rapports d'état d'avancement des travaux sur l'étude de la microfissuration des granites n° 1A et 2A, C.E.A.

-VUILLEUMIER C., CHAMBAUDET A., COUCHOT P. (1988) - Rapports d'état d'avancement des travaux sur l'étude de la microfissuration des granites n° 3A et 4A , C.E.A..

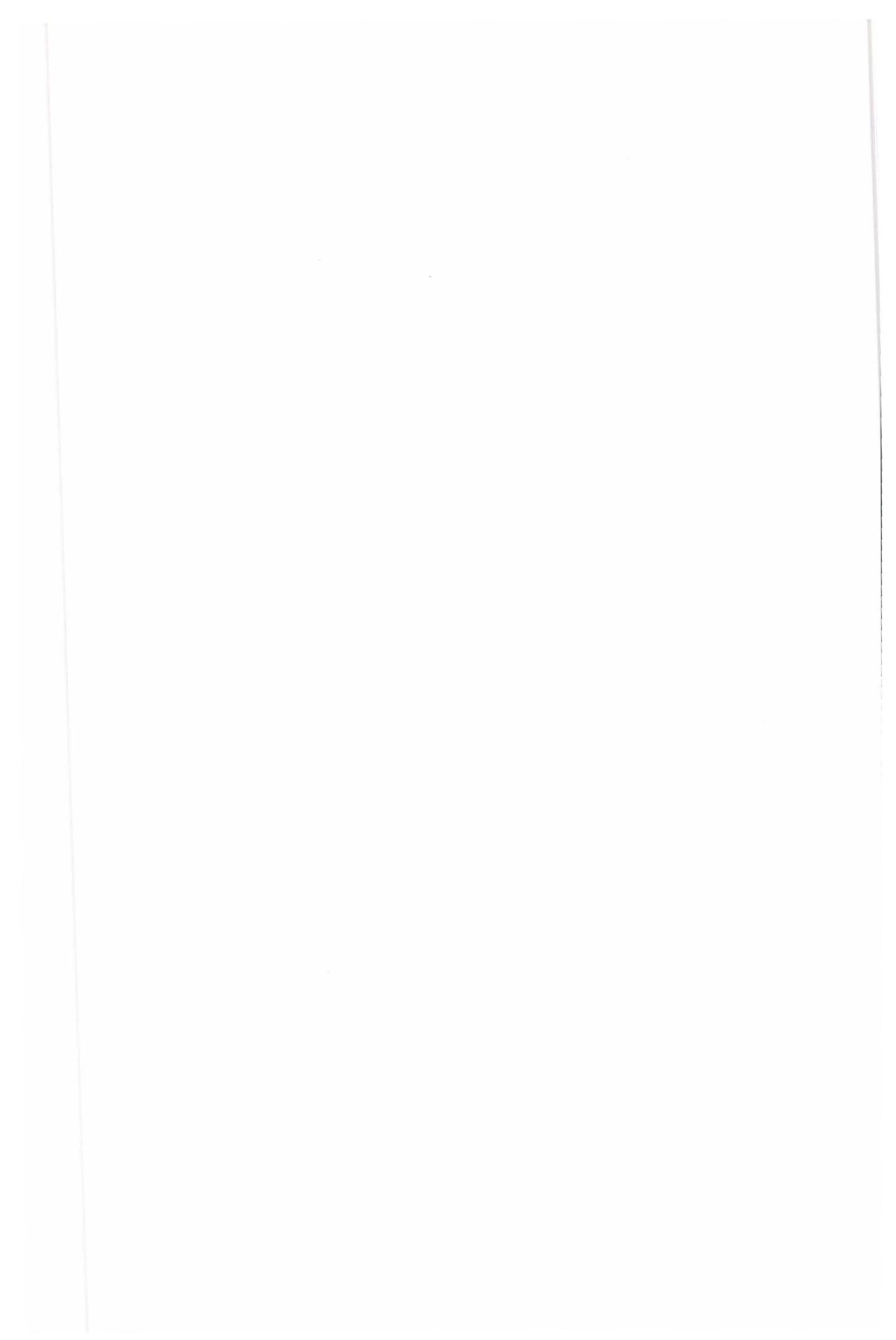
WALSCH J.B. (1966) - Cracks and pores in rocks. C.R. du premier congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches,Lisbonne p. 643 - 646.

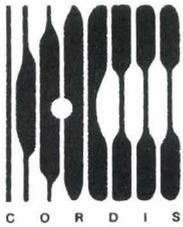
WANG H., TODD T., WEIDNER D. et SIMMONS G. (1971) - Elastic properties of Apollo 12 rocks. Proc. of 2nd Lunar Science Conf., vol. 3, Geochim. et Cosmochim, p. 2327 - 2336.

WARREN N. W. et LATHAM G. V. (1970) - An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity. J. Geophys. Res, vol. 75, p. 4455 - 4464.

WASHBURN E.W. (1921) - Note on a method of determining the distribution of pore-sizes in a porous material. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 7, p. 115 - 116.

WRIGHT T.L. et DOHERTY P.C. (1970) - Linear programming and least squares computer method for solving petrologic mixing problems. Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 81, p. 1995 - 2007.





The Communities R & D Information Service

(Service d'information de recherche et développement des Communautés)

C O R D I S

Un élément vital de votre stratégie de diffusion

CORDIS est un service d'information créé dans le cadre du programme VALUE afin de donner un accès rapide et facile à l'information sur les programmes de recherche de la Communauté européenne. Il s'agit d'un service en ligne gratuit accessible par le centre serveur de la Commission européenne (ECHO) et aussi d'un CD-ROM récemment mis à la disposition du public.

CORDIS offre à la Communauté de recherche et développement européenne:

- un aperçu détaillé et actualisé des activités RDT dans la Communauté européenne, grâce à un ensemble de bases de données et de services associés;
- un accès rapide et aisé à l'information sur les programmes et résultats de la recherche dans la Communauté européenne;
- un service de la Commission en évolution permanente adapté aux besoins de la communauté de recherche et de l'industrie;
- une assistance complète de l'utilisateur incluant la documentation, la formation et les services du bureau d'assistance CORDIS.

Bases de données CORDIS

**RTD-Programmes — RTD-Projects — RTD-Partners — RTD-Results
RTD-Publications — RTD-Comdocuments — RTD-Acronyms — RTD-News**

Pour que votre programme profite au maximum des services CORDIS:

- informez l'équipe CORDIS de vos initiatives en matière de programmes;
- communiquez régulièrement des informations aux bases de données CORDIS telles que RTD-News, RTD-Publications et RTD-Programmes;
- utilisez les bases de données CORDIS, telles que RTD-Partners, pour la mise en application de votre programme;
- consultez CORDIS pour obtenir les informations les plus récentes sur d'autres programmes proches de vos activités;
- informez vos partenaires des possibilités de CORDIS et de l'importance de leur contribution au service comme des bénéficiaires qu'ils pourront en retirer;
- contribuez à l'évolution de CORDIS en communiquant au bureau CORDIS vos commentaires sur le service.

Pour plus d'informations sur la communication avec CORDIS, contactez l'équipe CORDIS à la DG XIII:

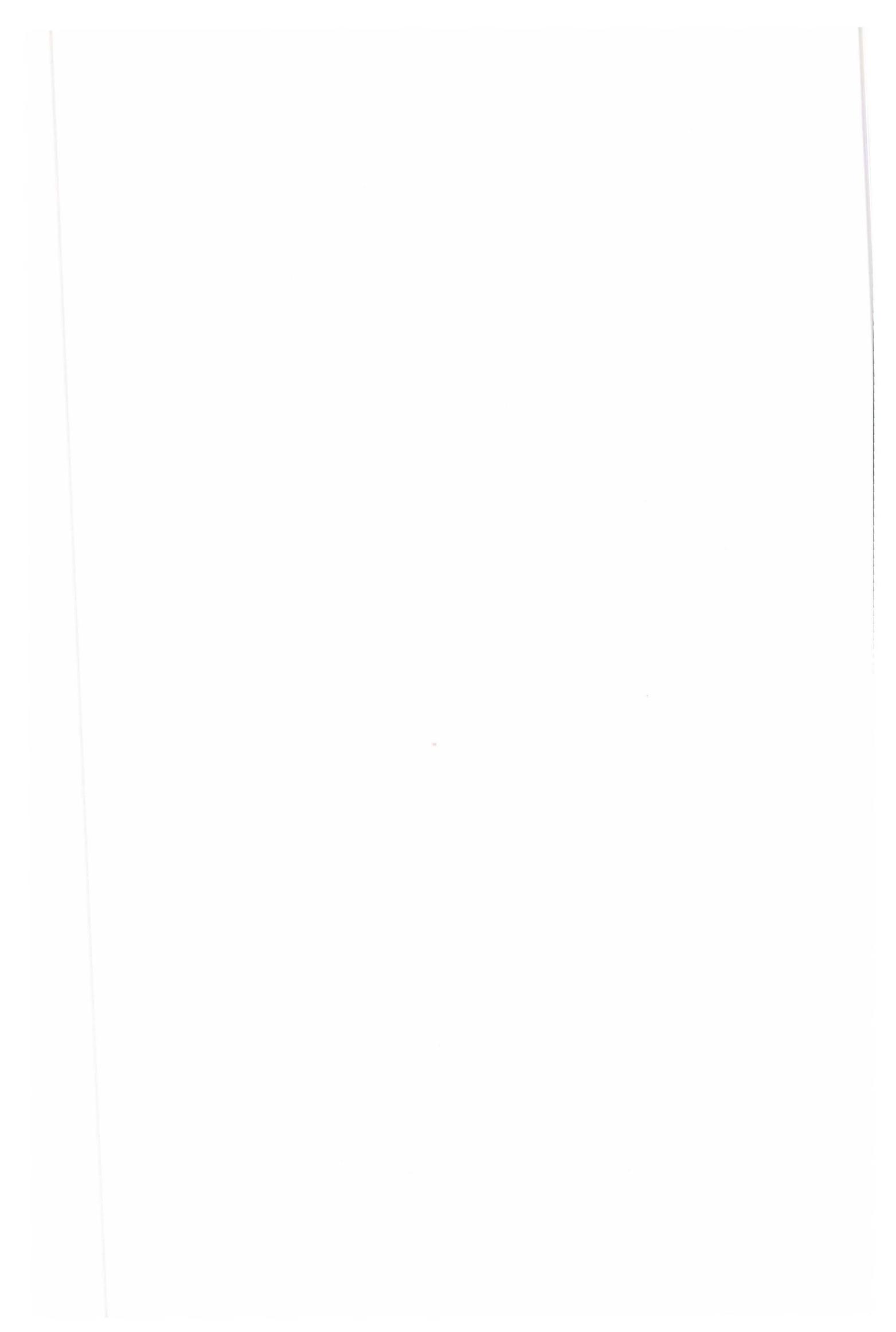
Bruxelles
M^{me} I. Vounakis
Tél. (+32-2) 299 04 64
Fax (+32-2) 299 04 67

Luxembourg
M. B. Niessen
Tél. (+352) 43 01-33638
Fax (+352) 43 01-34989

Pour obtenir un accès en ligne à CORDIS, veuillez en faire la demande à l'adresse suivante:

Service de la clientèle ECHO
BP 2373
L-1023 Luxembourg
Tél. (+352) 34 98-1240
Fax (+352) 34 98-1248

Si vous êtes déjà un utilisateur ECHO, ayez l'amabilité d'indiquer votre numéro d'utilisateur.



Commission européenne

**EUR 15185 – Études de la fissuration et de la microfissuration
du granite**

J. Y. Boisson et H. S. Derlich

Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés
européennes

1994 – XXII, 236 p., fig. – 21,0 x 29,7 cm

Série: Sciences et techniques nucléaires

ISBN 92-826-8666-3

Prix au Luxembourg, TVA exclue: ECU 28

La recherche entreprise dans le cadre de ce contrat avait pour objectif de caractériser l'extension des zones altérées autour de galeries ou de sondages dans des formations granitiques par changement de régime de contraintes, en tentant de qualifier et de quantifier la fissuration induite dans la roche par ces ouvrages. En effet, dans les roches cristallines susceptibles de recevoir un stockage de déchets radioactifs, le réseau microfissuré jouerait un rôle prépondérant dans la migration éventuelle des radioéléments vers la biosphère. La quantification de ce réseau est donc fondamentale.

Le travail a porté à la fois sur un programme de prélèvement d'échantillons issus de différents travaux souterrains (effets des explosifs, des carottages...), sur la sélection de quelques méthodes de caractérisation de la fissuration et sur leur application à des échantillons d'origine connue.

La sélection d'échantillons a concerné des granites de la région limousine (Tenelles, Vénachat), les prélèvements ayant été faits à partir de parois de galeries ou de chambres souterraines excavées à l'explosif, à partir de carottages en grands et très grands diamètres, à partir de surcarottages autour de sondages préimprégnés in situ et à partir de carottes des deux forages profonds d'Auriat (de 500 et de 1 000 mètres).

L'étude de la microfissuration du granite d'Auriat a été réalisée grâce à la mise au point de deux techniques complémentaires:

- l'imprégnation sous pression d'échantillons rocheux par une résine colorée permettant la visualisation des fissures en lames minces. Ces fissures sont quantifiées et répertoriées suivant leurs dimensions, leur orientation et leur environnement par analyse d'image semi-automatique. La méthode couvre le domaine des fissures dont la largeur est comprise entre 20 μm et 1 μm ;
- la porosimétrie au mercure, utilisée pour des dimensions plus faibles, de 2 μm à 60 Å. Compte tenu de la très faible porosité du granite, une nouvelle cellule de mesure a été construite, et un logiciel de traitement des données spécifique a également été élaboré prenant en compte des effets du second ordre.

L'analyse d'échantillons des forages d'Auriat (de 500 et de 1 000 mètres de profondeur) en appliquant ces deux méthodes a montré qu'une altération croissante du granite entraîne une augmentation du réseau poreux, mais que la profondeur ne paraît pas avoir d'influence déterminante sur les grandeurs mesurées. Par contre, la présence de fractures et le phénomène de colmatage ultérieur de celles-ci sont de nature à influencer ces grandeurs.

Par ailleurs, la nécessité, pour ce type d'étude, d'obtenir des échantillons aussi peu perturbés que possible lors de la phase de prélèvement nous a conduits à étudier et à mettre en oeuvre des techniques spécifiques:

- une technique d'imprégnation in situ par résine colorée injectée à partir d'un forage suivie d'un surcarottage en gros diamètre;
- une technique de carottage en très gros diamètre (1 mètre et plus) en trou borgne à partir de galeries de mines permettant non seulement de fournir des carottes de grandes proportions pour échantillons préservés suivant les besoins, mais aussi de forer des puits de grandes dimensions avec parois saines et d'excellente qualité.

Venta y suscripciones • Salg og abonnement • Verkauf und Abonnement • Πωλήσεις και συνδρομές
Sales and subscriptions • Vente et abonnements • Vendita e abbonamenti
Verkoop en abonnementen • Venda e assinaturas

BELGIQUE / BELGIË

Moniteur belge / Belgisch staatsblad
 Rue de Louvain 42 / Leuvenseweg 42
 1000 Bruxelles / 1000 Brussel
 Tél. (02) 512 00 26
 Fax (02) 511 01 84

Jean De Lannoy
 Avenue du Roi 202 / Koningslaan 202
 1060 Bruxelles / 1060 Brussel
 Tél. (02) 538 51 69
 Télex 63220 UNBOOK B
 Fax (02) 538 08 41

Autres distributeurs/
 Overige verkooppunten:

Librairie européenne/ Europese boekhandel
 Rue de la Loi 244/Wetstraat 244
 1040 Bruxelles / 1040 Brussel
 Tél. (02) 231 04 35
 Fax (02) 735 08 60

Document delivery:

Credoc
 Rue de la Montagne 34 / Bergstraat 34
 Bte 11 / Bus 11
 1000 Bruxelles / 1000 Brussel
 Tél. (02) 511 69 41
 Fax (02) 513 31 95

DANMARK

J. H. Schultz Information A/S
 Herstedvang 10-12
 2620 Albertslund
 Tlf. 43 63 23 00
 Fax (Sales) 43 63 19 69
 Fax (Management) 43 63 19 49

DEUTSCHLAND

Bundesanzeiger Verlag
 Breite Straße 78-80
 Postfach 10 05 34
 50445 Köln
 Tel. (02 21) 20 29-0
 Telex ANZEIGER BONN 8 882 595
 Fax 202 92 78

GREECE/ΕΛΛΑΔΑ

G.C. Eleftheroudakis SA
 International Bookstore
 Nikis Street 4
 10563 Athens
 Tel. (01) 322 63 23
 Telex 219410 ELEF
 Fax 323 98 21

ESPAÑA

Boletín Oficial del Estado
 Trafalgar, 27-29
 28071 Madrid
 Tel. (91) 538 22 95
 Fax (91) 538 23 49

Mundi-Prensa Libros, SA

Castelló, 37
 28001 Madrid
 Tel. (91) 431 33 99 (Libros)
 431 32 22 (Suscripciones)
 435 36 37 (Dirección)
 Télex 49370-MPLI-E
 Fax (91) 575 39 98
 Sucursal:

Libreria Internacional AEDOS

Consejo de Ciento, 391
 08009 Barcelona
 Tel. (93) 488 34 92
 Fax (93) 487 76 59

Libreria de la Generalitat de Catalunya

Rambla dels Estudis, 118 (Palau Moja)
 08002 Barcelona
 Tel. (93) 302 68 35
 Tel. (93) 302 64 62
 Fax (93) 302 12 99

FRANCE

Journal officiel Service des publications des Communautés européennes
 26, rue Desaix
 75727 Paris Cedex 15
 Tél. (1) 40 58 77 01/31
 Fax (1) 40 58 77 00

IRELAND

Government Supplies Agency
 4-5 Harcourt Road
 Dublin 2
 Tel. (1) 66 13 111
 Fax (1) 47 80 645

ITALIA

Licosa SpA
 Via Duca di Calabria 1/1
 Casella postale 552
 50125 Firenze
 Tel. (055) 64 54 15
 Fax 64 12 57
 Telex 570466 LICOSA I

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

Messageries du livre
 5, rue Raiffeisen
 2411 Luxembourg
 Tél. 40 10 20
 Fax 49 06 61

NEDERLAND

SDU Overheidsinformatie
 Externe Fondsen
 Postbus 20014
 2500 EA 's-Gravenhage
 Tel. (070) 37 89 880
 Fax (070) 37 89 783

PORTUGAL

Imprensa Nacional
 Casa da Moeda, EP
 Rua D. Francisco Manuel de Melo, 5
 1092 Lisboa Codex
 Tel. (01) 69 34 14
 Fax (01) 69 31 66

Distribuidora de Livros Bertrand, Ld.^a

Grupo Bertrand, SA
 Rua das Terras dos Vales, 4-A
 Apartado 37
 2700 Amadora Codex
 Tel. (01) 49 59 050
 Telex 15798 BERDIS
 Fax 49 60 255

UNITED KINGDOM

HMSO Books (Agency section)
 HMSO Publications Centre
 51 Nine Elms Lane
 London SW8 5DR
 Tel. (071) 873 9090
 Fax 873 8463
 Telex 29 71 138

ÖSTERREICH

Manz'sche Verlags- und Universitätsbuchhandlung
 Kohlmarkt 16
 1014 Wien
 Tel. (1) 531 610
 Telex 112 500 BOX A
 Fax (1) 531 61-181

SUOMI/FINLAND

Akateeminen Kirjakauppa
 Keskuskatu 1
 PO Box 218
 00381 Helsinki
 Tel. (0) 121 41
 Fax (0) 121 44 41

NORGE

Narvesen Info Center
 Bertrand Narvesens vei 2
 PO Box 6125 Etterstad
 0602 Oslo 6
 Tel. (22) 57 33 00
 Telex 79668 NIC N
 Fax (22) 68 19 01

SVERIGE

BTJ AB
 Traktorvgen 13
 22100 Lund
 Tel. (046) 18 00 00
 Fax (046) 18 01 25
 30 79 47

ICELAND

BOKABUD LARUSAR BLÖNDAL
 Skólavörðustíg, 2
 101 Reykjavík
 Tel. 11 56 50
 Fax 12 55 60

SCHWEIZ / SUISSE / SVIZZERA

OSEC
 Stampfenbachstraße 85
 8035 Zürich
 Tel. (01) 365 54 49
 Fax (01) 365 54 11

BÄLGARIJA

Europress Klassica BK Ltd
 66, bd Vitoshka
 1463 Sofia
 Tel./Fax 2 52 74 75

ČESKÁ REPUBLIKA

NIS ČR
 Havelkova 22
 130 00 Praha 3
 Tel. (2) 24 22 94 33
 Fax (2) 24 22 14 84

MAGYARORSZÁG

Euro-Info-Service
 Honvéd Európa Ház
 Margitsziget
 1138 Budapest
 Tel./Fax 1 111 60 61
 1 111 62 16

POLSKA

Business Foundation
 ul. Krucza 38/42
 00-512 Warszawa
 Tel. (2) 621 99 93, 628-28-82
 International Fax&Phone
 (0-39) 12-00-77

ROMÂNIA

Euromedia
 65, Strada Dionisie Lupu
 70184 Bucuresti
 Tel./Fax 0 12 96 46

RUSSIA

CCEC
 9,60-letiya Oktyabrya Avenue
 117312 Moscow
 Tel./Fax (095) 135 52 27

SLOVAKIA

Slovak Technical Library
 Nm. slobody 19
 812 23 Bratislava 1
 Tel. (7) 220 452
 Fax : (7) 295 785

CYPRUS

Cyprus Chamber of Commerce and Industry
 Chamber Building
 38 Grivas Dhigenis Ave
 3 Deligiorgis Street
 PO Box 1455
 Nicosia
 Tel. (2) 449500/462312
 Fax (2) 458630

MALTA

Miller distributors Ltd
 PO Box 25
 Malta International Airport
 LQA 05 Malta
 Tel. 66 44 88
 Fax 67 67 99

TÜRKIYE

Pres Gazete Kitap Dergi Pazarlama Dagitim Ticaret ve sanayi AŞ
 Narlıbaçe Sokak N. 15
 Istanbul-Cagaloğlu
 Tel. (1) 520 92 96 - 528 55 66
 Fax 520 64 57
 Telex 23822 DSVO-TR

ISRAEL

ROY International
 PO Box 13056
 41 Mishmar Hayarden Street
 Tel Aviv 61130
 Tel. 3 496 108
 Fax 3 648 60 39

EGYPT/ MIDDLE EAST

Middle East Observer
 41 Sherif St.
 Cairo
 Tel/Fax 39 39 732

UNITED STATES OF AMERICA / CANADA

UNIPUB
 4611-F Assembly Drive
 Lanham, MD 20706-4391
 Tel. Toll Free (800) 274 4888
 Fax (301) 459 0056

CANADA

Subscriptions only
 Uniquement abonnements

Renouf Publishing Co. Ltd
 1294 Algoma Road
 Ottawa, Ontario K1B 3W8
 Tel. (613) 741 43 33
 Fax (613) 741 54 39
 Telex 0534783

AUSTRALIA

Hunter Publications
 58A Gipps Street
 Collingwood
 Victoria 3066
 Tel. (3) 417 5361
 Fax (3) 419 7154

JAPAN

Kinokuniya Company Ltd
 17-7 Shinjuku 3-Chome
 Shinjuku-ku
 Tokyo 160-91
 Tel. (03) 3439-0121

Journal Department

PO Box 55 Chitose
 Tokyo 156
 Tel. (03) 3439-0124

SOUTH-EAST ASIA

Legal Library Services Ltd

Orchard
 PO Box 0523
 Singapore 9123
 Tel. 73 04 24 1
 Fax 24 32 47 9

SOUTH AFRICA

Safto
 5th Floor, Export House
 Cnr Maude & West Streets
 Sandton 2146
 Tel. (011) 883-3737
 Fax (011) 883-6569

AUTRES PAYS OTHER COUNTRIES ANDERE LÄNDER

Office des publications officielles des Communautés européennes
 2, rue Mercier
 2985 Luxembourg
 Tél. 499 28-1
 Télex PUBOF LU 1324 b
 Fax 48 85 73/48 68 17

AVIS AU LECTEUR

Tous les rapports scientifiques et techniques publiés par la Commission européenne sont signalés dans le périodique mensuel «**euro abstracts**». Pour souscrire un abonnement (1 an: ECU 60), prière d'écrire à l'adresse ci-dessous.

Prix au Luxembourg, TVA exclue: ECU 28



OFFICE DES PUBLICATIONS OFFICIELLES
DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

L-2985 Luxembourg

ISBN 92-826-8666-3



9 789282 686669 >