

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

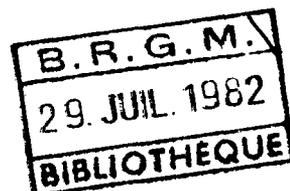
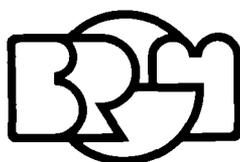
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

DOCUMENT PUBLIC

**ÉTUDE DE L'ALTÉRATION DE LA PIERRE
SUR LA CATHÉDRALE SAINTE-CROIX D'ORLÉANS
(Loiret)**

par

D. GIOT - J. GREFFARD - J. ROGER



**Département minéralogie,
géochimie, analyses**

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex
Tél.: (38) 63.80.01

**Département carte géologique
et géologie générale**

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex
Tél.: (38) 63.80.01

Mai 1982

82 SGN 399 MGA/GEO

Etude réalisée
pour le compte
du Ministère de l'Environnement

Contrat n° 80-086

ETUDE DE L'ALTERATION DE LA PIERRE SUR LA
CATHEDRALE SAINTE-CROIX D'ORLEANS (LOIRET)

RESUME

La cathédrale d'Orléans est un monument dont on connaît assez bien les étapes de la reconstruction depuis sa destruction.

Cette reconstruction s'échelonne de la fin de 1599 à 1829.

On n'est cependant pas certain de l'importance et des étapes des restaurations qui ont été réalisées au cours de ces siècles. La documentation sur l'origine des matériaux est inexistante.

Par contre, les renseignements sont assez précis pour les quarante dernières années, malgré l'absence de documents écrits, car le responsable du chantier est demeuré le même.

L'étude des altérations de la pierre a été réalisée sur des matériaux de pierre d'oeuvre, bandeau sculpté, balustrade, en prélevant calcin dur et adhérent, boursouflures et pierres entières pour essayer de déterminer le développement en profondeur de l'altération, le mécanisme de celle-ci.

Pour cela, les caractères pétrophysiques et pétrographiques de la pierre et des altérations ont été étudiés sur des échantillons bruts, par voie optique sur lames minces depuis la surface jusqu'au coeur de la pierre. Cette étude a été complétée par des examens au microscope électronique à balayage.

Les pierres prélevées sur le monument appartiennent à sa face sud. Les points altérés les plus profondément appartiennent aussi bien à des pierres isolées, des murs d'élévation, mais surtout au bandeau au niveau de la basse nef, le balustre ouvragé qui fait le tour de ce niveau. Les pierres peuvent être de type Apremont plus ou moins siliceux et de type Garchy oolithique (bandeau et balustre).

Du point de vue chimie des surfaces, ce qui ne peut constituer qu'une information qualitative étant donné la difficulté à avoir un échantillon représentatif de celle-ci, les éléments solubles représentatifs par ordre de concentration croissante sont : les nitrates représentant plusieurs milliers de ppm, les bicarbonates, 2 à 3% en HCO_3 , mais surtout les sulfates 30 à 40% exprimés en SO_4 .

Du point de vue pétrophysique, la comparaison des porosités montre sans variation globale importante du volume des pores, un déplacement vers des entrées de pores supérieures au micron.

Cependant, c'est l'examen pétrographique qui représente le plus grand intérêt. Les principales remarques qui peuvent être faites sont les suivantes :

- . La pierre est cimentée en surface par du gypse pour toutes les parties qui semblent épargnées par les pluies fouettantes. Ainsi, la partie externe du balustre en Garchy ne présente pas de revêtement gypseux. La partie orientée du côté de la toiture nord se présente comme une surface très cariée avec un peu de gypse, la partie inférieure, la plus noire, est toujours revêtue d'une croûte régulière de gypse qui se présente apparemment comme un ciment protecteur.
- . L'altération proprement dite, en présence ou en l'absence du revêtement gypseux commence toujours au niveau du grain oolithique, le ciment intergranulaire n'est pas touché. La dissolution périphérique du grain a entraîné le développement d'une porosité, puis d'une fissuration parallèlement à la surface de la pierre.

Le gypse n'est jamais exprimé en remplacement de la matière du grain dissous, ni dans la porosité qui se développe. Le gypse est toujours en croûte externe, suivant les irrégularités de la surface. L'interface est très nette.

- . Sur l'Apremont, le processus d'attaque est moins facile à mettre en évidence. Il est cependant marqué également par une attaque interne, le développement d'une fissuration et l'absence interne de gypse.

- Les surfaces apparaissent délabrées et profondément cariées sur la face externe.

Les échantillons superficiels, croûtes verruqueuses en partie détachées de la surface sont riches en gypse aussi bien sur la face externe que sur la face interne lorsque l'échantillon est protégé (dessous du bandeau du balustre). Sur des faces externes moins protégées, le gypse est absent ou faiblement exprimé.

Un prélèvement effectué sur la bordure du mortier liant normalement la pierre à un niveau où celle-ci est profondément altérée avec des fissures ouvertes perpendiculaires à la surface, montre que les fissures sont remplies de gypse. Sur la face externe de cette pierre, le gypse n'apparaît exprimé que dans de petites géodes. La partie interne de la pierre non affectée de dissolution demeure formée par les minéraux constitutifs de la pierre d'Apremont, calcite en fins et gros cristaux, quartz de quelques microns. Le gypse ne subsiste là encore que dans les parties semblant protégées des pluies fouettantes.

En conclusion, les diverses formes d'altération (décohésion pulvérulente, boursouflures, desquamation...) trouvent leur origine en premier lieu dans le développement d'une porosité secondaire de dissolution spécifique de chaque type de pierre, accompagnée dans un second temps par l'ouverture, en zone très superficielle uniquement, d'un réseau de microfissures sub-parallèles à la surface s'appuyant et raccordant les pores de dissolution.

Les éléments moteurs de cette dégradation sont d'une part les circulations de fluides agressifs pour les phénomènes de dissolution et les actions mécaniques d'origine thermique responsables de l'ouverture du réseau des fissures aboutissant aux divers gonflements de surface.

Il n'a jamais été constaté que la formation de gypse soit un élément moteur des dégradations relevées.

Ces phénomènes se matérialisent de façon très différente selon les types de matériaux employés, en particulier dans le Garchy et l'Aprémont, objet de cette étude, la texture et le litage apparaissent comme des éléments qui influencent le développement des altérations.

Il en découle donc, pour le cas particulier de la pierre calcaire, que toute amélioration pour l'utilisation de ce matériau, comme pour la restauration, doit passer par une sélection des matériaux en fonction de caractères pétrographiques et pétrophysiques entre autres qui seraient à définir par une étude systématique de très nombreux types de calcaires en place.

SOMMAIRE

<u>Texte</u>	<u>Pages</u>
I - HISTORIQUE DU MONUMENT ACTUEL	1 à 2
.Echantillonnage	2
.Situation des prélèvements	
1) Etude pétrographique et pétrophysique	3
2) Etude chimique - Examen au MEB	4
.Description lithologique des deux types de pierre	
1) La pierre d'Aprémont	5
2) La pierre de Garchy	5
.Observation macroscopique des pierres en place	5
.Observation microscopique	
1) Préparation de lames minces	7
2) Examen des croûtes noires	7
3) Etude chimique	11
4) Etude pétrophysique	12
.Etude au microscope électronique à balayage	14
II - SYNTHÈSE DES RESULTATS - ESSAI D'INTERPRÉTATION	19

ANNEXE 1.

Plan de l'Abbé CHENESSEAU (1921) Sainte-Croix d'ORLEANS

ANNEXE 2.

Figure 1 : Coupe de l'échantillon 903 (balustre)

Figure 2 : Coupe de l'échantillon 909 (corniche)

Figure 3 : Localisation de deux fragments prélevés (Echant. 901 et 908)

Figure 4 :

à 19 : Courbes différentielles de divers échantillons

ANNEXE 3.

Planches 1 à 28

ETUDE DE L'ALTERATION DE LA PIERRE
SUR LA CATHEDRALE SAINTE-CROIX D'ORLEANS
(LOIRET)

I - HISTORIQUE DU MONUMENT ACTUEL.

L'édifice antérieur a été détruit en partie par les Huguenots, le 24 mars 1568. La reconstruction a été si longue (1599-1829) que des restaurations ont déjà été réalisées au cours de cette période. L'histoire de la reconstruction de ce monument a été reconstituée à partir des archives par l'abbé CHENESSEAU. Ce document permet d'en suivre les étapes principales.

La planche 1 permet de retrouver les parties provenant de l'édifice avant et après sa destruction et de matérialiser les grandes époques des travaux.

Dans la documentation réunie par l'abbé CHENESSEAU par contre, il y a absence presque complète d'informations sur le matériau et les carrières qui ont approvisionné le chantier.

Il semble cependant que l'on ait utilisé avant tout 4 types de pierre : Apremont, Garchy, Tercé, Vergé... calcaire de Beauce. Cette dernière a été utilisée pour les soubassements, le Garchy, l'Apremont sur le pourtour extérieur de la nef, s'arrêtant au niveau de la basse nef. Le Tercé, au deuxième niveau (balustre), aurait été utilisé au cours d'une restauration assez récente, de l'ordre d'une vingtaine d'années. Le Vergé a été utilisé pour les caniveaux. Des parties sculptées, les petites colonnades de certaines travées sont en Tercé, d'autres, plus anciennes, ainsi que leurs pinacles, sont en Apremont.

Même à notre époque, il est très difficile, au niveau de l'entreprise chargée des restaurations depuis fort longtemps, d'avoir des informations précises sur les restaurations, l'origine des pierres...

Par conséquent, l'étude qui a été faite n'a pas permis de faire des corrélations avec le facteur temps.

Pour des raisons liées à la facilité d'accessibilité et à la possibilité de faire des prélèvements importants qui ne soient pas préjudiciables à l'esthétique, on a profité du démarrage de travaux sur la face sud externe de la basse nef, travée XII. Il s'agit donc d'une partie du monument remontant au 16e siècle.

ECHANTILLONNAGE.

Cet échantillonnage a été effectué sur les deux piliers externes sud (c) de la travée XII (planche 1) sur le balustre, sur les parties externes et notamment inférieures de la corniche qui borde la basse nef entre les deux piliers.

La position des prélèvements examinés est repérable à l'aide du plan de la figure 2. Les pierres ne datent pas toutes de l'époque de la construction, mais les plus récentes sont bien repérables par leur bon état de conservation.

La pierre des piliers est en Apremont, le balustre en Garchy, mais au niveau de la corniche, on note la présence de Garchy et d'Apremont, mis en place à une époque différente.

En dehors de ce cas précis et isolé, les niveaux ont été réalisés avec des matériaux de même type. La nature et l'intensité de leur altération, la couleur de la pierre vieillie, permettent également de bien différencier les matériaux, de constater toute anomalie ou de repérer des restaurations ponctuelles relativement récentes.

Suivant la position par rapport aux intempéries et l'exposition à l'ensoleillement, la pierre, par exemple au niveau de la corniche, a une couleur allant du gris au noir pour le Garchy, l'Apremont ayant une coloration blanc cassé, de jaune, verte dans les parties humides à l'abri de la lumière.

On a prélevé des échantillons sur des pierres très altérées sur plusieurs faces du pilier, sur le balustre, sur la corniche. De plus, on a effectué des grattages de surface sur de la pierre de pilier, à des niveaux apparemment non altérés, mais également sur des parties altérées : plaques dures

encore solidaires de la pierre, parties verruqueuses, très largement décollées de la surface ou des échantillons altérés en profondeur, présentant des fissures perpendiculaires à la surface, et dont la destruction semble liée à l'infiltration entre les pierres après disparition du liant.

SITUATION DES PRELEVEMENTS.

1 - Etude pétrographique et pétrophysique.

Echantillon 902 (planche 2)

Pierre d'Apremont. Prélèvement sur le pilier, position repérée 8ed.

Echantillon 901 (planche 2)

Pierre d'Apremont. Sur le pilier, position repérés 7 gf.

Echantillon 938 (planche 3)

Pierre d'Apremont. Esquilles sur le pilier. Repère m 5.

Echantillon 939 (planche 4)

Pierre d'Apremont. Esquilles sur le pilier. Repère p 5.

Echantillon 903 (planche 5)

Pierre de Garchy. Fragment de la rosace centrale du balustre.

Echantillon 908 (planche 6)

Pierre d'Apremont. Fragment de la corniche sous balustre, niveau O.

Echantillon 909 (planche 6)

Pierre de Garchy. Fragment de la corniche, mise en place plus récemment, moins altérée, niveau 0.

2 - Etude chimique - Examen au microscope électronique à balayage.

Poudres obtenues par grattage de surface.

Echantillon 1 (planche 7)

Pierre d'Aprémont, sur le pilier est, repère 8 d.

Echantillon 2 (planche 7)

Pierre d'Aprémont, sur le pilier est, repère 6 m.

Echantillon 3 (planche 8)

Pierre d'Aprémont, sur le pilier est, repère 6 a.

Echantillon 4 (planche 8)

Pierre d'Aprémont, écailles ou boursouflures, repère 7 ef.

Echantillon 5 (planche 7)

Pierre d'Aprémont, écaille boursouflée, repère 8 d.
Analyse chimique sur écaille entière.

Echantillon 6 (planche 7)

Pierre d'Aprémont, boursouffure, repère 7 d.
Analyse chimique sur échantillon entier.

Echantillon 7

Même boursouflure 7 d, partie interne.
Analyse sur partie interne poudreuse.

Lorsque les échantillons présentaient une tenue mécanique satisfaisante, l'analyse a pu être faite sur la partie grattée externe et/ou interne ; dans les autres cas, sur l'échantillon entier.

DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES DEUX TYPES DE PIERRE1 - La pierre d'Apremont.

Saine, c'est une roche bioclastique très fine, à fins pellets micritiques. On y relève la présence de traces de microquartz et de spicules siliceux.

Le ciment qui lie les grains est constitué par une sparite fine. Il peut être remplacé partiellement dans certains échantillons par de la silice (échantillon 938) et même se présenter sous forme de rognons de silex gris (échantillon 908).

2 - La pierre de Garchy.

Saine, le faciès est plus grossier. Il est constitué par une oobioalcalcarénite à ciment de calcite spathique.

OBSERVATION MACROSCOPIQUE DES PIERRES EN PLACE.

Les piliers constitués par de l'Apremont ont sensiblement la même couleur, quel que soit le niveau et leur état de conservation, jaunâtre, plus ou moins sale, en fonction des salissures par ruissellement mais surtout en fonction de leur exposition à la lumière qui peut jouer un rôle sur l'humidité de la pierre, de l'angle de la pierre avec la verticale (pierres de corniches...) qui peut favoriser le dépôt de poussières ainsi que le développement de lichens et de mousses.

Les pierres sont plus sombres sous encorbellement. La pierre de Garchy du balustre est d'apparence la plus sale, sa couleur variant toujours du gris au noir quelle que soit l'exposition. Il y a peut-être une relation avec un grain plus grossier de la pierre. De plus, la couleur varie en fonction de l'orientation à la lumière mais peut-être encore plus de l'angle avec la direction des pluies. Les parties les moins exposées sont toujours les plus noires.

En général, les niveaux, les zones, altérés, quand ils ne correspondent pas à une modification lithologique particulière, se présentent sous la forme de croûtes plus dures que la pierre saine, ne modifiant pas l'aspect initial de la surface, ne semblant pas se dissocier du matériau (ils font partie intégrante de la pierre).

Dans d'autres cas, ce sont des écailles partiellement décollées se détachant facilement ou des surfaces boursouflées laissant apparaître un volume interne non négligeable, servant de refuges à des insectes. Ces parties verruqueuses, souvent millimétriques, à l'intérieur poudreux, n'ont aucune résistance mécanique et sont certainement les altérations de l'Apremont dont la teinte est la plus sale, plus ou moins noirâtre.

Ces boursouflures se présentent comme des bandes irrégulières, fréquemment décimétriques sous la corniche, sensiblement parallèles à la surface de la pierre. Ces zones sont traversées par de fines fissures discontinues dont les deux lèvres présentent un léger soulèvement.

Ces phénomènes sont également observés sur la partie des piliers suivant les repères de a à h et m à p, c'est-à-dire les parties moins ensoleillées, humides (elles sont souvent verdâtres) mais aussi moins exposées à des pluies fouettantes qui sont en majorité orientées Sud-Sud.Ouest.

Les échantillons 938 et 939 proviennent de ces points particuliers.

Sur la face 1 du pilier, exposée par contre aux vents et aux pluies dominants, l'altération se présente apparemment comme une simple dissolution différenciée de la surface exposée, laissant en relief les éléments figurés, les fissures à remplissage de calcite.

Ce phénomène, à plus grande échelle, est observé sur l'autre pilier du site échantillonné. On y observe une alvéolisation selon un profil vertical. Il apparaît nettement lié à un ruissellement superficiel depuis le sommet du pilier (planche 9).

L'altération sélective, donnant à la surface de la pierre un grain assez grossier, sans altération en profondeur apparente (écaillés, boursoflures) est systématique sur la corniche, de restauration récente (une vingtaine d'années) du deuxième niveau de la nef, réalisé avec de la pierre de Tercé.

Ces parties du monument sont bien exposées aux pluies directes et l'altération apparaît toujours comme un phénomène de dissolution superficiel n'entraînant pas à l'époque de la visite de modification plus profonde.

OBSERVATION MICROSCOPIQUE.

1 - Préparation de lames minces.

Elle a été faite au microscope polarisant sur lames minces préparées après imprégnation par des résines colorées afin de sauvegarder la texture du matériau.

Ces lames ont été taillées suivant des directions perpendiculaires aux surfaces des pierres afin de pouvoir observer les modifications éventuelles entre la zone altérée externe et le cœur de la roche saine. Lorsque la taille de l'échantillon le permet, plusieurs lames minces sont réalisées afin de recouper perpendiculairement chacune des faces de la pierre.

2 - Examen des croûtes noires. (planche 10)

Les croûtes, sur leur face externe, sont constituées par un ensemble de fins cristaux aciculaires de gypse, enchevêtrés, piégeant des particules de poussières caractéristiques des émissions de combustibles. On observe également la présence d'oxyde de fer.

L'épaisseur de cette croûte, noire à l'extérieur, blanche à l'intérieur, varie beaucoup d'un échantillon à l'autre, d'une face à l'autre, suivant l'exposition ou latéralement en suivant une même face de la pierre. Elle peut varier entre 70 microns et 1 millimètre. Le gypse peut même disparaître complètement sur certains échantillons observés au microscope électronique comme nous le verrons et l'on peut penser que la présence ou l'absence, l'épaisseur de cette couche gypseuse externe est en relation avec l'exposition, c'est-à-dire à une action plus ou moins importante des pluies battantes et ruissellements.

A cette couche externe gypseuse succède le matériau initial plus ou moins altéré. La transition est en général brutale entre gypse et calcite, sauf en présence de fissures ouvertes où le gypse peut se prolonger en profondeur en remplissage de ces fissures comme on a pu l'observer à l'angle d'une pierre présentant des fissures ouvertes perpendiculaires à la surface. Ce dernier prélèvement correspond à un cas particulier, disparition du liant entre les pierres, humidité importante, ruissellement et infiltration, on peut penser que le nourrissage par le gypse est secondaire à la fissuration et non la cause, comme semble le montrer l'ensemble des observations.

Mais, d'une façon générale, au-delà de cette croûte de gypse, la pierre se caractérise par le développement d'un important réseau poreux influencé à la fois par la lithologie et les conditions de mise en oeuvre (position dans l'édifice).

Ainsi,

La pierre de Garchy est faite d'un assemblage de grains constitués surtout d'oolithes micritisés et de bioclastes cimentés par de grands cristaux de calcite sparitique.

A l'examen microscopique, on constate une évolution progressive des parties les plus saines aux plus altérées.

Elle débute par une dissolution périphérique partielle devenant progressivement complète des oolithes micritiques (planche 11)

des parois micritiques des microfossiles ainsi que des liserés superficiels micritisés des bioclastes. Le ciment sparitique, par contre, ne paraît pas affecté par un phénomène de dissolution.

Les éléments figurés finissent ainsi par "flotter" dans une cavité devenue trop grande. Ce phénomène est observable encore à plusieurs centimètres de profondeur. Vers l'extérieur, ces dissolutions partielles finissent, en se raccordant entre elles, par engendrer des fissures au tracé sinueux qui contournent les grandes plages de calcite sparitique.

Ces fissures ont, de plus, une orientation grossièrement parallèle à la surface de la pierre exposée. Les plus importantes d'entre elles montrent un léger déplacement des lèvres de la fissure (planche 12).

On observe également quelques fissures qui traversent les oolithes micritisés. Plus on se rapproche de la face externe, plus le réseau de fissures devient dense et se développe dans des directions multiples, pour former un ensemble complexe. A ce stade, presque tous les grains sont affectés par une dissolution périphérique ; ils présentent également toujours une fissuration subparallèle à la surface de la roche, les grains deviennent fragmentés.

Les cristaux de calcite sparitique apparaissent, à ce stade, également affectés, en partie, par ces fissures. De grandes plages sparitiques persistent

L'intensité de ces phénomènes peut conduire à une fragmentation presque totale. Les fragments sont alors à peine reliés entre eux.

La croûte gypseuse externe, quand elle existe, consolide superficiellement le matériau.

Dans la pierre de Garchy, on observe donc une dissolution préférentielle qui se développe progressivement de l'intérieur vers l'extérieur, aux dépens, principalement, des éléments figurés.

De plus, pour les fissures les plus importantes, le déplacement relatif des lèvres ne peut s'expliquer par la dissolution ni par un effet

mécanique dû à une recristallisation des sulfates en particulier, puisque le gypse est absent à l'intérieur du matériau. Des dilatations thermiques ainsi que les effets du gel d'eau coincée semblent plus susceptibles de provoquer cette expansion superficielle.

La pierre d'Apremont.

Cette calcarénite à pellets et bioclastes se caractérise par une taille plus fine des éléments figurés.

Le développement de l'altération y est sensiblement différent, moins visible, moins typé.

Les zones les plus internes altérées apparaissent comme affectées par une microporosité visible sur les éléments micritiques et la matrice également micritique (planche 13).

A mesure que l'on se rapproche de la surface, la microporosité augmente et l'on observe des fissures fines, discontinues sub-parallèles à la surface (planche 14).

Ces fissures peuvent déjà être ouvertes avec déplacement des deux lèvres.

Dans la partie externe, la fissuration sub-parallèle devient plus importante, la roche se présente en fragments allongés.

De fines cristallisations de gypse pénètrent dans les fissures de quelques centaines de microns à $1 \mu\text{m}$ 5, tapissant, pouvant même colmater les fissures (planche 14) consolidant ainsi, au moins superficiellement la roche.

Les échantillons silicifiés (938) semblent, par contre, peu sensibles à l'altération dans les parties riches en silice.

Comme pour la pierre de Garchy, l'altération se traduit par le développement d'une fissuration subparallèle à la surface exposée. La dissolution joue un rôle important, mais l'ouverture de cette fissuration, la fragmentation ne dépendent ni de cette action ni de cristallisations secondaires de gypse, mais peuvent être dues à une gélivité acquise.

3 - Etude chimique

Sur les échantillons référencés (page 3), constitués par des poudres obtenues par grattage le plus doux possible de la surface des pierres apparemment saines, de boursouflures, d'écailles, ou sur la totalité de l'échantillon, quand celui-ci ne résistait pas, on a effectué une extraction des sels solubles par l'eau déminéralisée.

Les résultats obtenus ne peuvent être par conséquent, ni représentatifs de la constitution du matériau, ni de celle de la surface.

Ils permettent cependant un certain nombre d'observations :

- . Les surfaces des pierres saines sont enrichies, sinon entièrement constituées par des anions et cations apportés par la pollution, quelle soit naturelle ou anthropogénique : sulfates surtout, et à moindre degré, bicarbonates puis chlorures, nitrates.
- . Sur les boursouflures, comme sur des écailles pluricentimétriques, en partie détachées de la pierre, on constate, même si c'est à plus faible concentration, ce qui peut s'expliquer par la mauvaise représentativité de l'échantillon (écaille entière et non grattage superficiel), la présence des mêmes éléments.

Donc, même si l'échantillonnage n'est pas rigoureusement représentatif de la surface, on observe toujours à la surface de la pierre, ou sur des parties très altérées, un fort gradient de sulfates, de nitrates qui ne sont pas des éléments constitutifs du matériau sain.

Il apparaît donc que l'ensemble des facteurs agressifs de l'atmosphère ont un rôle important que nous essaierons d'interpréter en fonction de l'ensemble des observations.

4 - Etude pétrophysique

L'emplacement des prélèvements sur lesquels ont été réalisés les porosités est donné sur les figures 1 à 3.

Celles-ci ont été réalisées sur le balustre en pierre de Garchy (fig.1, échant. 903), sur un profil de corniche également en Garchy (fig.2, échant.909) et sur de la pierre d'Apremont (pilier, fig.3, échant.904), sur un autre échantillon prélevé sur la corniche (échant. 908), au même niveau que le 909, soit également dans les mêmes conditions d'exposition.

Echantillon 903 (figures 4 à 10)

Prélevé sur la rosace, on a pu réaliser un échantillonnage devant permettre de mesurer les modifications éventuelles de la surface au coeur de la pierre. Les échantillons 903-1 et 903-7 représentant les faces supérieure et inférieure.

On constate tout d'abord une augmentation de la macroporosité et du diamètre des pores en se rapprochant des surfaces et une diminution des pores autour de 1 micron. Cette augmentation est plus importante sur la face supérieure plus exposée aux intempéries.

Echantillon 909 (figures 11 et 12)

Il n'apparaît pas de modifications significatives entre l'échantillon de surface et celui pris un peu plus au coeur, sauf une discrète augmentation en surface d'une porosité ayant un diamètre de pore apparent de l'ordre de 10 microns. Comparés aux résultats des échantillons les plus au coeur du balustre, ces deux prélèvements sembleraient présenter une légère augmentation de la porosité comprise entre 1 et 5 microns.

Cette pierre n'est pas très ancienne et ceci explique sans doute la discrétion des variations.

Echantillon 901 (figures 13 et 14)

Sur la pierre d'Apremont provenant du pilier, on observe, par contre, une nette modification. Pour la macroporosité, porosité supérieure à $7,5 \mu$, elle est assez faible ; elle est, par contre, très nette entre 7500 \AA et $7,5 \mu$.

Echantillon 908 (figures 15 et 16)

Comparée au 909, cette pierre d'Apremont, beaucoup plus ancienne que la pierre de Garchy, témoigne également d'une forte modification du spectre de porosité en même temps qu'une forte augmentation de la macroporosité qui passe de 1,48 à 10,41.

Ces résultats sont à comparer à trois types de pierres saines qui ont été utilisées dans la construction du monument ou à Orléans.

- A - L'Apremont de référence se rapproche assez bien des parties saines échantillonnées sur le monument avec une faible macroporosité et une porosité totale du même ordre (fig. 17).
- B - A l'inverse, une pierre très altérable et gélive, comme le Bourré, a une macroporosité plus importante, et surtout une porosité moyenne voisine de $7,5 \mu$, de type intergranulaire dont le spectre se rapproche de celui des matériaux altérés du Garchy ou de l'Apremont (fig. 18)
- C - La pierre de Beauce à grain fin a une faible porosité, centrée sur 75 \AA , la macroporosité de ce matériau peu altérable est peut-être provoquée par le développement de fissures lors de l'échantillonnage de ce matériau très dur (fig. 19)

ETUDE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.

APREMONT : Echantillon 8 (planche 15)

Morceaux de pierre pluricentimétriques se détachant aisément en débris parallèles à la surface, aux surfaces internes assez irrégulières. L'épaisseur varie de quelques millimètres à 10 millimètres. Prélevés sur le pilier (repère 6p)

La surface externe est gris sale et verruqueuse. Elle apparaît ($\times 1000/8.1.1$) caractérisée par une décohésion et des phénomènes de recristallisation de calcite. On retrouve quelques microsphères ayant la composition qualitative suivantes : Si, Al, Ca, Fe, K qui apparaît caractéristique des émissions de chauffage (8.1.2)

La partie interne du même échantillon présente, au même grossissement, une décohésion des grains de calcite qui semblent noyés dans une masse de cristallites plus petits. L'examen à plus fort grossissement montre cette désagrégation et le remplacement de la calcite par des cristaux de gypse (8.2.4).

GARCHY : Echantillon 9 (planches 16 et 17)

Débris de balustre échantillonnés à l'extrémité interne de la rosace.

Macroscopiquement, l'échantillon est noirâtre en surface, rugueux.

Au microscope électronique à balayage, la surface présente des éléments de pollution, cénosphère (S, Al, Si) noyés dans un enchevêtrement de cristaux de gypse. Les grains de calcite, de silice sont rares et isolés (9.2.1, 9.2.2)

A l'intérieur, l'échantillon se présente en grains assez grossiers, peu cohérents et de couleur blanchâtre.

Au microscope électronique à balayage, on a le même aspect ($\times 300$ et $\times 50$), photos 9.1.8 et 9.1.6.

A plus fort grossissement, on observe surtout des plages formées de grains de calcite primaire noyés dans des microcristallites. Sur certaines plages, le gypse apparaît prépondérant (9.1.2 et 9.1.5).

Echantillon 10 (planches 18 et 19)

Débris de pierre d'Apremont prélevés en bordure du pilier ouest (repère ab, niveau 0), à la racine de la gargouille. L'eau de la partie supérieure du pilier et du caniveau s'écoule entre les 2 pierres après disparition du mortier. La pierre est fissurée perpendiculairement à sa surface. Les fissures sont ouvertes, la couleur de la pierre est verdâtre.

Au microscope électronique à balayage, à faible grossissement, la fissuration d'un débris de pierre (photo 10.6) est apparente. L'intérieur des fissures est tapissé de gypse (photo 10.8). Sur la face externe où la calcite est en partie dissoute, le gypse rare n'est exprimé que dans de petites géodes, la matière organique apparaît (filaments) dans un ensemble disloqué. (Photos 10.12 et 10.13).

La coupe au niveau d'une fissure ouverte montre l'interface nette entre le gypse et la calcite.

Le gypse exprimé disparaît brutalement. Cependant, vers l'intérieur du matériau calcitique, le soufre reste détectable et disparaît progressivement.

A l'intérieur du matériau on retrouve un faciès de gros cristaux dans un ensemble de microcristaux constitué uniquement de calcite. On note des points riches en silice, grains de quartz de quelques microns dispersés dans cette matrice (photo 10.5).

Dans cet échantillon exposé à des ruissellements et des infiltrations, largement fissuré, ayant perdu une grande partie de sa dureté, les minéraux initiaux sont partiellement dissous ; il y a décohérence intergranulaire, précipitation de calcite et nourrissage par le gypse dans les fissures, géodes... et disparition en surface, c'est-à-dire dans les parties les plus sensibles à l'action des pluies fouettantes ou au ruissellement.

APREMONT : Echantillon 11 (Prélèvement sous la corniche).

Écaille de plusieurs centimètres de large, épaisseur 4 à 5 mm.

La face externe est gris sale, recouverte de plaques de lichens. La face interne est blanche, avec quelques salissures, montrant que l'échantillon est déjà partiellement détaché de la pierre. Cette écaille est dure.

Au MEB, la face externe montre des gros grains de calcite dans une masse de grains plus petits ou de calcite formant voile.

L'ensemble apparaît ainsi représenter des images d'altération de la calcite initiale (planche 20, photos 11.1.1 à 11.1.4).

Sur une coupe de l'échantillon, permettant d'examiner les faciès de l'extérieur vers l'intérieur, on observe des cristallisations en étoile et une partie tabulaire formées par de la calcite (photo 11.2.1). La photo 11.2.3 de la planche 21 montre un autre aspect de cette coupe plus éloignée de la surface, plus riche en gros grains de calcite, dans une pâte de microcristaux.

La coupe et le spectre correspondant montre un pôle enrichi en silice, partie externe, alors que la partie interne s'enrichit progressivement en calcite. Le soufre n'est jamais qu'à l'état de trace et le gypse n'est jamais exprimé (photos 11.2.4 et 11.2.5).

APREMONT : Echantillon 12 (même niveau).

Large plaque, en partie décollée, grise à l'extérieur. En coupe, se présente comme un ensemble de feuillets parallèles à la surface, aux lèvres des fissures plus ou moins ouvertes. La face interne est poudreuse.

Au MEB, la face interne se présente comme un ensemble de gros cristaux dans une pâte de microcristaux. La calcite seule est exprimée. Le soufre n'est jamais complètement absent mais ne s'exprime pas (planche 22, photo 12.1.1). Sur la face externe, le gypse est abondant. Il est cependant moins bien organisé que sur d'autres surfaces (photos 12.2.1 et 12.2.2). La surface constitue un ensemble peu cohérent sur le matériau altéré.

Echantillon 13

Pierre d'Apremont, morceau détaché de la masse de 8 sur 5 cm l'épaisseur peut atteindre 10 mm dans sa partie la plus épaisse. L'échantillon est blanc jaunâtre sur ses deux faces poudreuses.

Sur la face interne qui montre des figures d'altération (planche 23, photo 13.1.2), les parties proéminentes sont formées par du gypse, la photo 13.1.1 en donne la texture non organisée.

La partie en creux est représentée par des gros grains de calcite, les petits grains sont riches en silice (photo 13.1.4).

Sur la face externe (planche 24), la surface irrégulière (photo 13.2.2) est formée (photo 13.2.1) de gros grains de calcite recouverts partiellement par une pâte de microcristaux de calcite.

On observe également un autre faciès où les gros grains de calcite sont dans un enchevêtrement de cristaux en aiguilles qui semblent être de l'aragonite.

APREMONT : Echantillon 14.

Boursoufflure prélevée sous la corniche, au niveau 1, épaisseur de 1 à 2 mm, très décollée, noirâtre à l'extérieur ; côté interne : présence d'insectes. Les fragments sont très fragiles.

Sur la face externe, qui apparaît très disloquée (planche 26, photo 14.1.2), on trouve comme seuls éléments majeurs : calcium et soufre. Il s'agit d'une cristallisation de gypse très imbriquée sur laquelle on retrouve quelques cristaux de calcite qui peuvent être des cristallisations secondaires ou des dépôts mécaniques (photo 14.1.1).

La face interne est elle-même couverte de gypse apparemment non fissuré (planche 25, photo 14.2.3).

Sur une coupe (planche 25, photos 14.2.1, 14.2.2 et 14.2.4), on constate que la partie interne est constituée par de gros cristaux de calcite noyés dans des petits cristaux du même minéral.

Cette même écaille très mamelonnée apparaît donc comme un sandwich où les minéraux du matériau initial sont entre deux couches de gypse.

Echantillon 15

Même niveau de prélèvement que le 14, se présentant également sous l'aspect d'une pellicule noirâtre sur la face externe, gris sale à l'intérieur, ayant tendance à éclater en feuillets parallèles à la surface. Mais cet échantillon est plus épais que le précédent de 1 à 10 mm moins décollé de la pierre.

Sur la face externe, on a un ensemble corrodé, assez disloqué ; on relève de rares grains de quartz, l'ensemble apparaît strictement formé par du gypse (Planche 28, photos 15.1.1 à 15.1.3).

Sur la face interne (planche 27), on note la présence de trois éléments prépondérants : Si, Ca, S. Les photos 15.2.2 et 15.2.1 de la planche 27 mettent en évidence deux phases, grains de silice dispersés dans une masse de cristaux de gypse. Les photos 15.2.3 et 15.2.4 (planche 27) rendent compte d'un autre phénomène, la redissolution du gypse en fleur.

Si l'on veut résumer l'ensemble de ces observations, on note un ensemble altéré, la présence constante et importante du gypse. Mais le gypse se forme et se dépose toujours à une interface en contact avec l'air. Le dépôt de gypse peut être absent sur les parties du monument plus exposées aux variations météorologiques et à leurs conséquences : pluies, ruissellements.

Aussi, dans certains cas, la face externe ne présente pas de dépôt de gypse et l'on peut penser que cette absence est liée au lessivage de la surface.

II - SYNTHESE DES RESULTATS - ESSAI D'INTERPRETATION.

L'étude réalisée sur la cathédrale d'ORLEANS ne concerne pas la totalité du monument. Elle s'est focalisée sur des piliers, mur, corniche et balustre d'une partie de la nef construite au 16e siècle. Le manque d'archives ne permet pas d'essais de corrélations avec le temps d'exposition. Aussi l'étude s'est efforcée d'étudier l'altération et d'en expliciter le mécanisme sur les deux principaux types de pierres qui ont été utilisées dans cette partie de l'édifice.

L'échantillonnage a été réalisé en des points qui correspondent à des orientations ou des niveaux tels que toutes les influences peuvent être prises en compte : ruissellement, pluies battantes, exposition ou non à la lumière...

Sur les différents échantillons examinés, qu'ils soient apparemment sains ou altérés, on observe :

Du point de vue pétrographique une altération toujours très sélective du matériau calcitique qui touche les oolithes micritiques pour le Garchy, les pellets micritiques pour l'Apremont de la périphérie vers le centre des grains. Et, dans les exemples étudiés, on montre, contrairement aux hypothèses du CEBTP, que le ciment de la pierre n'est pas à l'origine de la décohésion. Cette altération importante en surface s'estompe en profondeur, et il semble qu'une corrélation existe avec la fréquence et la profondeur de saturation en eau du système poreux, ce qui expliquerait le parallélisme du développement de la fissuration avec la surface de la pierre.

A partir de ces points de faiblesse se développe une fissuration parallèle à la surface dont l'amplitude et la fréquence diminuent avec la profondeur.

Enfin, le gypse, même si il peut être détecté au sein du matériau calcitique, ne s'exprime réellement qu'à l'interface avec l'atmosphère. Il peut, par conséquent, être mis en évidence sur une face dirigée vers l'extérieur comme sur une face interne lorsque celle-ci est détachée. Les restes calcitiques sont alors pris en sandwich. Dans le cas où la pierre est directement exposée à l'action de l'eau le gypse n'est pas exprimé.

L'altération semble donc se développer de façon strictement chimique. Mais la porosité, la texture ont des rôles primordiaux pour permettre à celle-ci de se développer par le biais de l'eau, solvant de tous les agents agressifs et tout particulièrement du SO_2 .

L'expression du gypse, toujours à l'interface pierre-atmosphère, détruit a priori toutes les hypothèses qui ont été faites par maints auteurs d'une cristallisation intergranulaire dont le développement engendrerait la dislocation de la pierre.

Au contraire, la présence du gypse à l'interface semble bien indiquer que les solutés chargés en sels minéraux dissous, notamment en CaSO_4 , n'évoluent pas dans le système capillaire. L'évaporation et la sursaturation qui en découlent sont des phénomènes limités à l'interface.

Ces observations sont à rapprocher de celles du CEBTP qui, en effectuant des grattages successifs de la surface vers l'intérieur de la pierre, a montré l'enrichissement en CaSO_4 des surfaces (comme nous l'avons fait) et la disparition extrêmement rapide à plus d'un millimètre de profondeur.

Les examens microscopiques, optiques et MEB confirment ces observations et montrent encore mieux ce phénomène superficiel et la transition brutale entre calcaire altéré et gypse.

De plus, en comparant l'enrichissement superficiel en SO_4 , le CEBTP a établi une corrélation positive avec la porosité.

Le gypse apparaît donc, à nos yeux, comme une conséquence et non une cause de l'altération. Par contre, les couches de gypse formées peuvent ensuite avoir sur les exfoliations un rôle actif et provoquer gonflement, aspect irrégulier, gondolé par les contraintes qu'elles exercent sur une couche dont les propriétés mécaniques sont profondément altérées (dilatation thermique).

D'autre part, l'altération modifie le spectre poreux ; on peut très bien imaginer que le déplacement de la macroporosité vers les grands pores puisse rendre gélives des pierres qui initialement ne le seraient pas. Cela pourrait être le cas de l'Apremont sur certaines parties de la nef ou des arcs boutants plus particulièrement exposés à l'action de l'eau qui atteindrait "une teneur en eau critique" pour la répartition "acquise" de la porosité.

Par conséquent, il semblerait que l'on puisse améliorer une corrélation entre altérabilité naturelle d'une pierre et essais au gel si l'on prend également en compte des critères pétrophysiques et pétrographiques (minéralogie, cohésion de structure) de la pierre et son évolution (mode d'altération - cinétique).

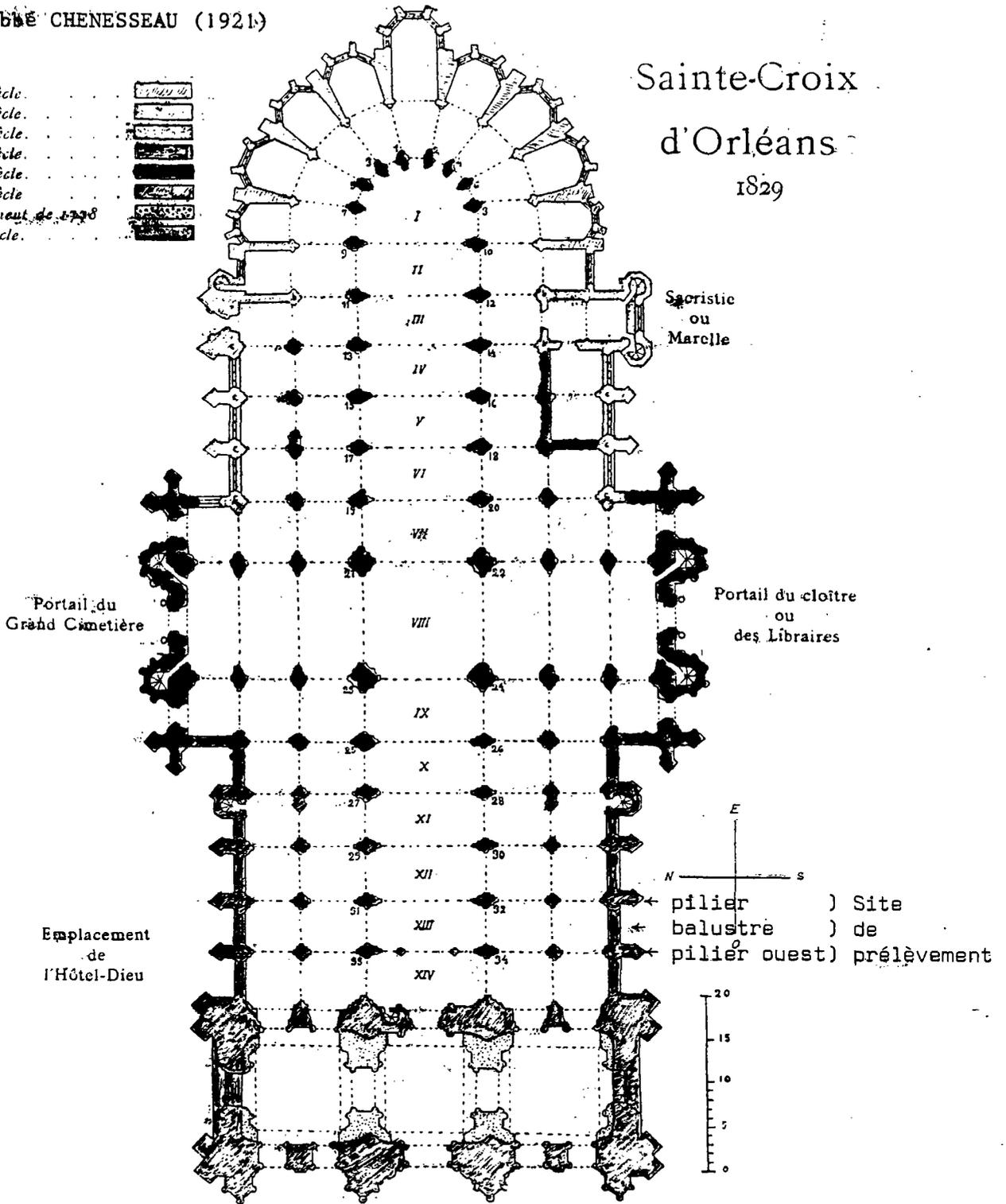
Comme, par ailleurs, l'eau est le vecteur essentiel de l'altération, il faudrait empêcher la pénétration de l'eau.

Il apparaît indispensable de mener des études en association avec les Chimistes en vue d'élaborer des produits hydrofuges et/ou isolants efficaces et inaltérables tout en vérifiant qu'ils n'ont aucune action secondaire immédiate sur la pierre ou en fonction des conditions d'exposition et du temps.

PLAN ABNÉ CHENESSEAU (1921)

Sainte-Croix
d'Orléans
1829

- XIII^e siècle.
- XIV^e siècle.
- XV^e siècle.
- XVI^e siècle.
- XVII^e siècle.
- XVIII^e siècle
- Renforcement de 1798
- XIX^e siècle.

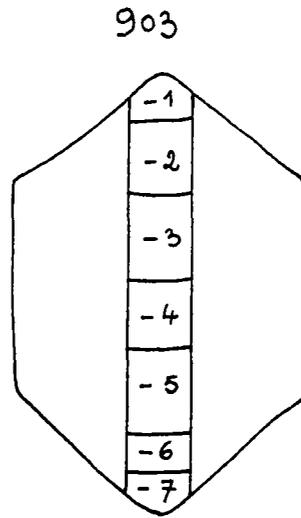


USAGE
DES SIGNES :

- Les chiffres romains désignent les travées du grand vaisseau.
 - Les chiffres arabes désignent les files de piliers dans le sens transversal : chiffres pairs au sud, impairs au nord.
 - Les lettres désignent les files de piliers dans le sens longitudinal.
 - Chaque pilier peut être désigné par la combinaison d'un chiffre et d'une lettre : le chiffre de sa file transversale et la lettre de sa file longitudinale.
- Plan d'ensemble de la Cathédrale à son achèvement (1829).

Echantillonnage pour les mesures de porosité.

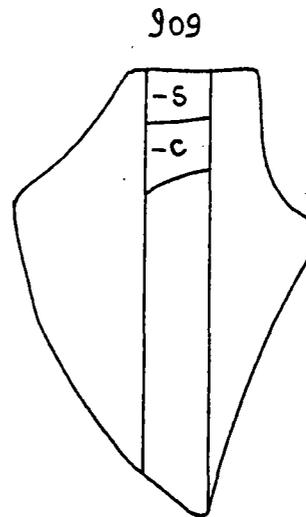
ig 1 Coupe de l'échantillon 903 (balustre)
avec localisation suivant un profil transversal
des échantillons analysés.



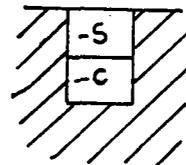
Faces exposées à
l'altération.

Faces protégées

ig 2 Coupe de l'échantillon 909 (corniche)
avec localisation suivant un profil transversal
des 2 fragments analysés.

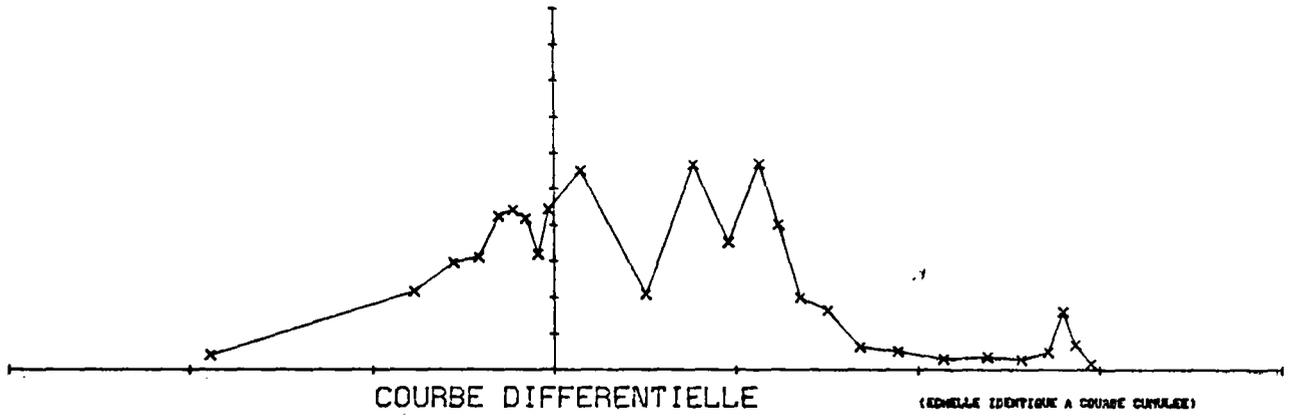


ig 3 Pour les échantillons 901 et 908, localisation
des 2 fragments prélevés = superficiellement (s)
et dans une zone plus interne (c).



échelle verticale : 1/2

Fig. 4



POROSITE MACRO 10.51 POROSITE MICRO 18.00 POROSITE TOTALE 28.51 DENSITE SOLIDE 2.64

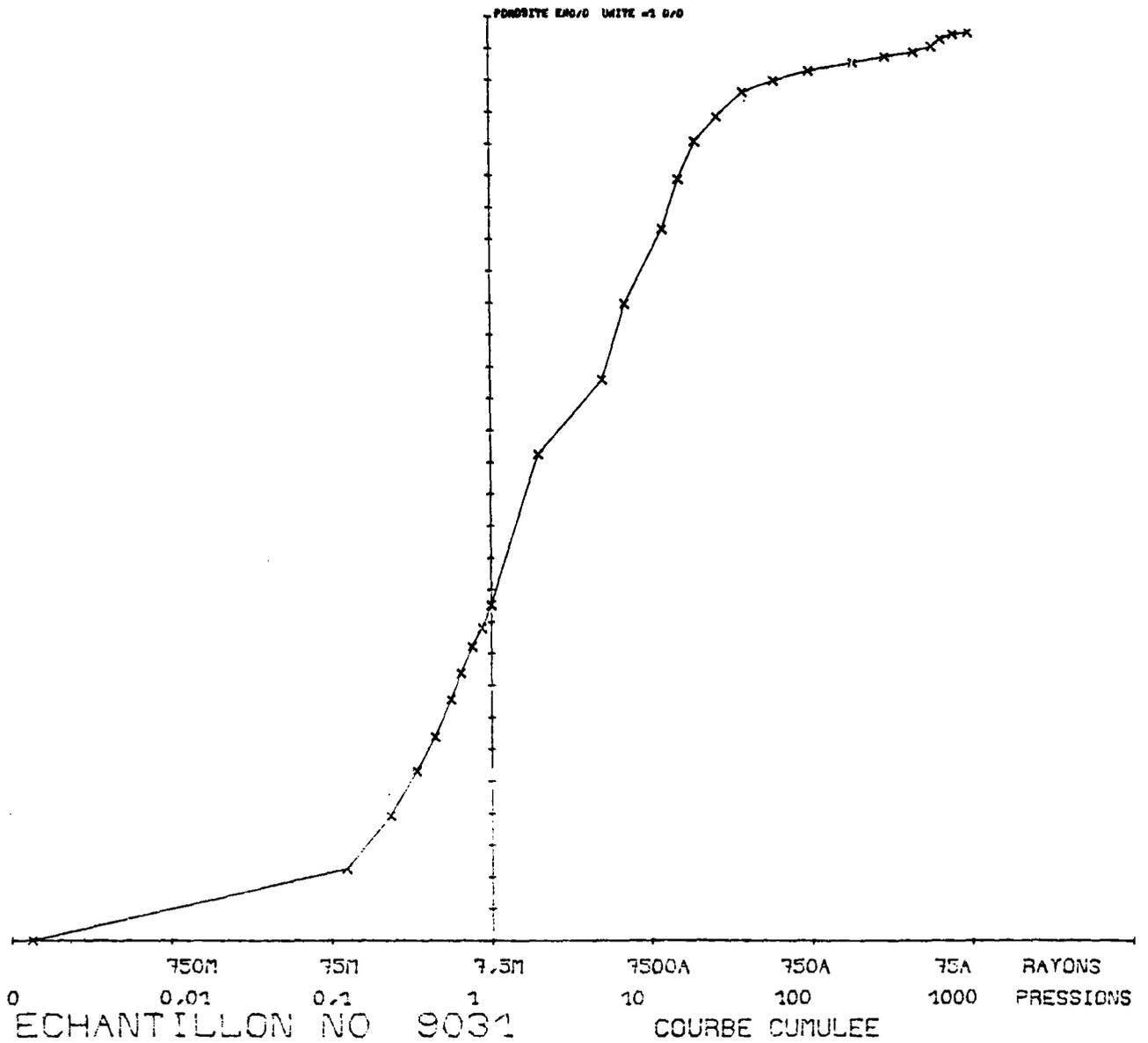
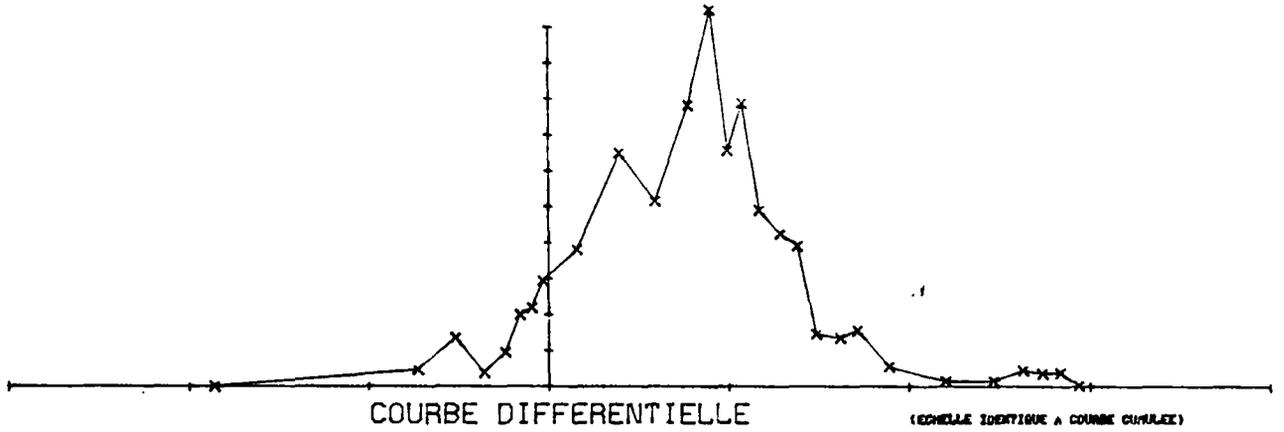


Fig. 5



POROSITE MACRO 2.49 POROSITE MICRO 23.13 POROSITE TOTALE 25.62 DENSITE SOLIDE 2.64

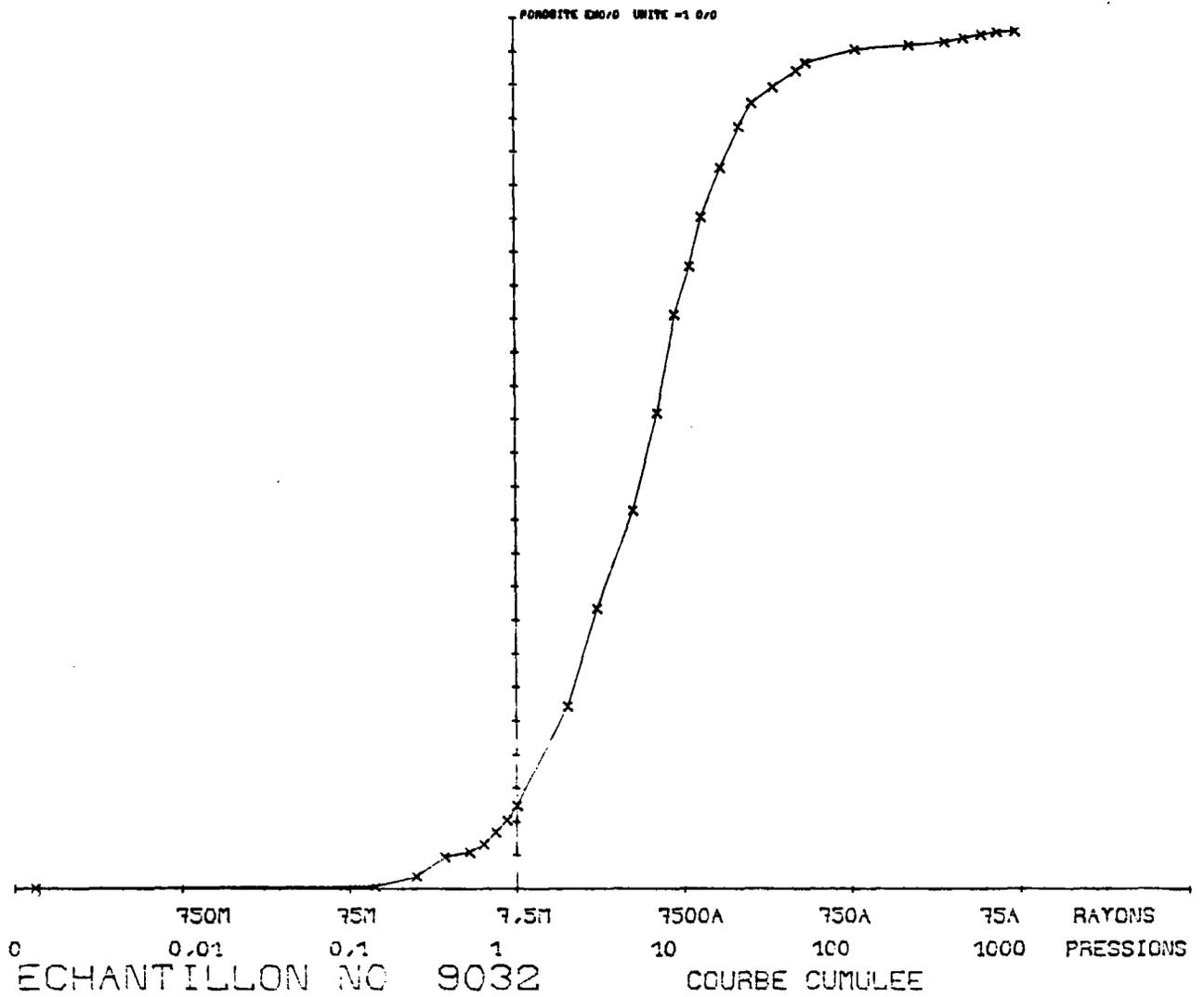
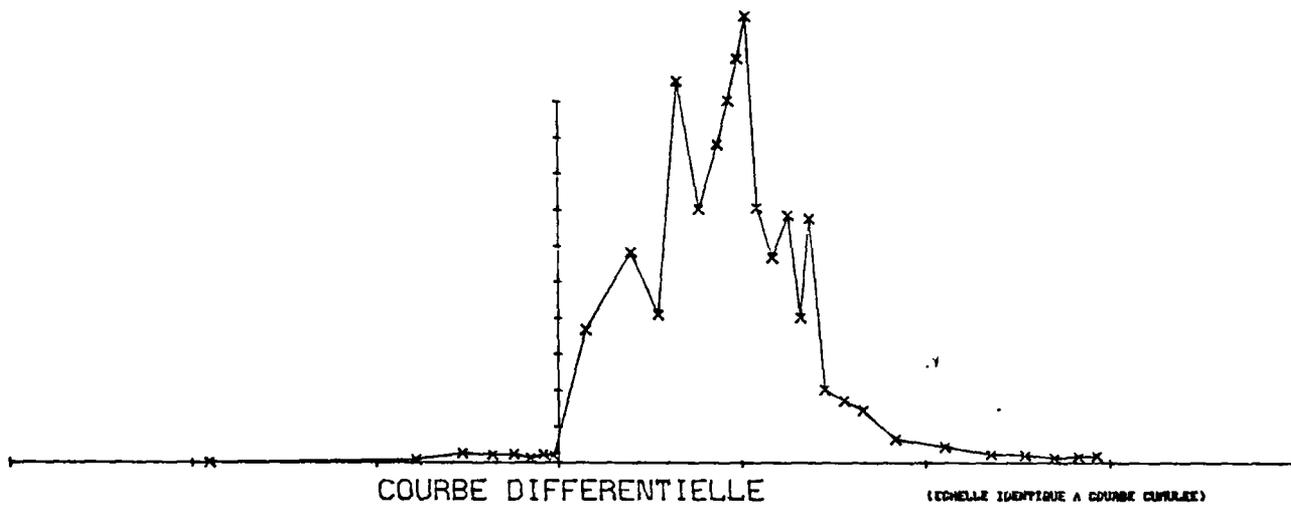


Fig. 6



POROSITE MACRO 0.45 POROSITE MICRO 23.16 POROSITE TOTALE 23.61 DENSITE SOLIDE 2.64

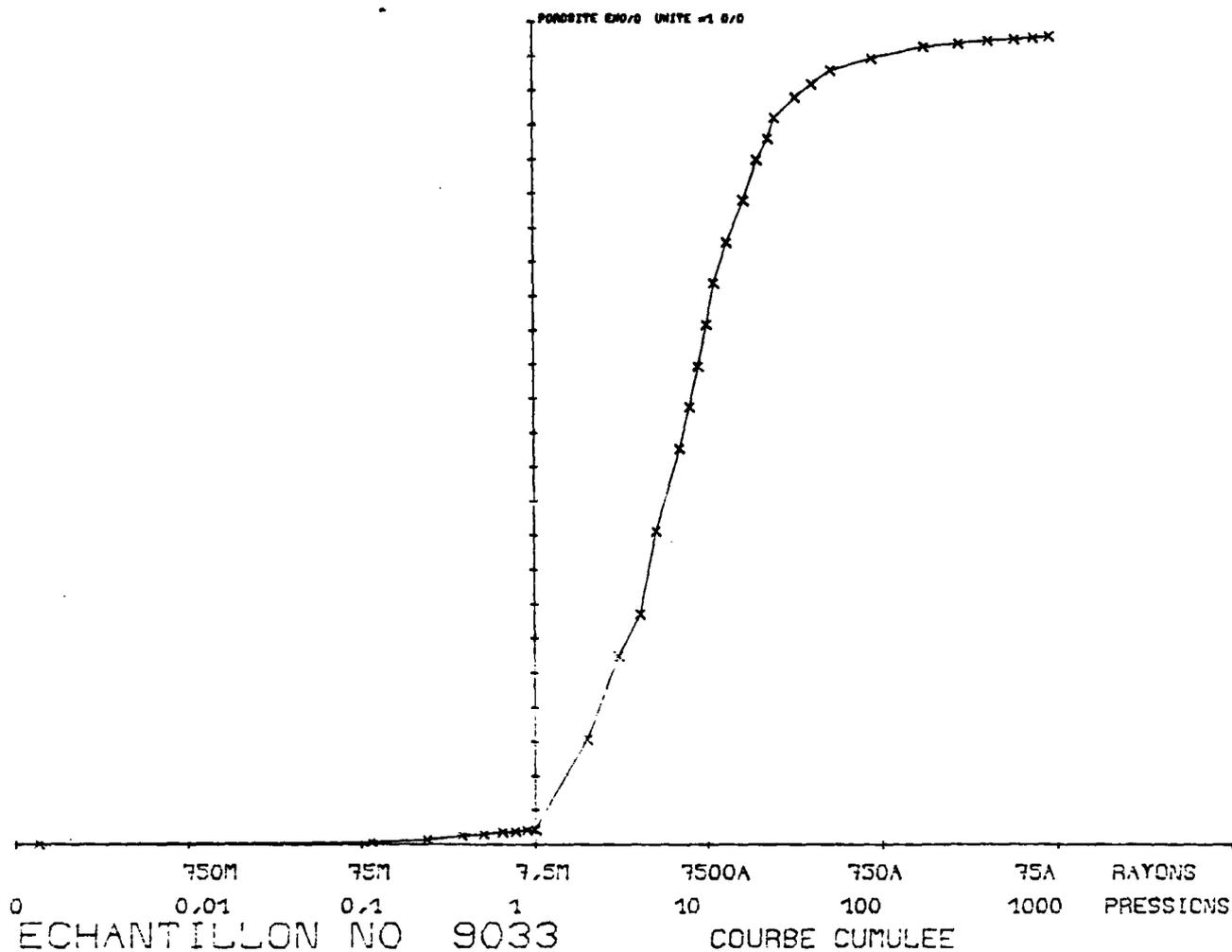
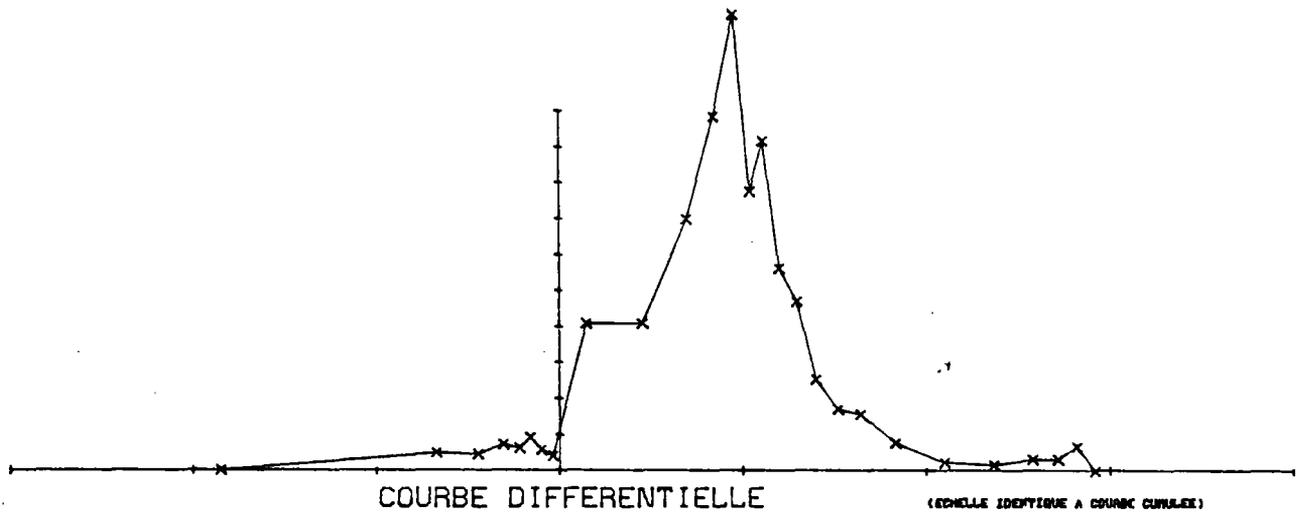


Fig. 7



POROSITE MACRO 1.21 POROSITE MICRO 23.52 POROSITE TOTALE 24.73 DENSITE SOLIDE 2.64

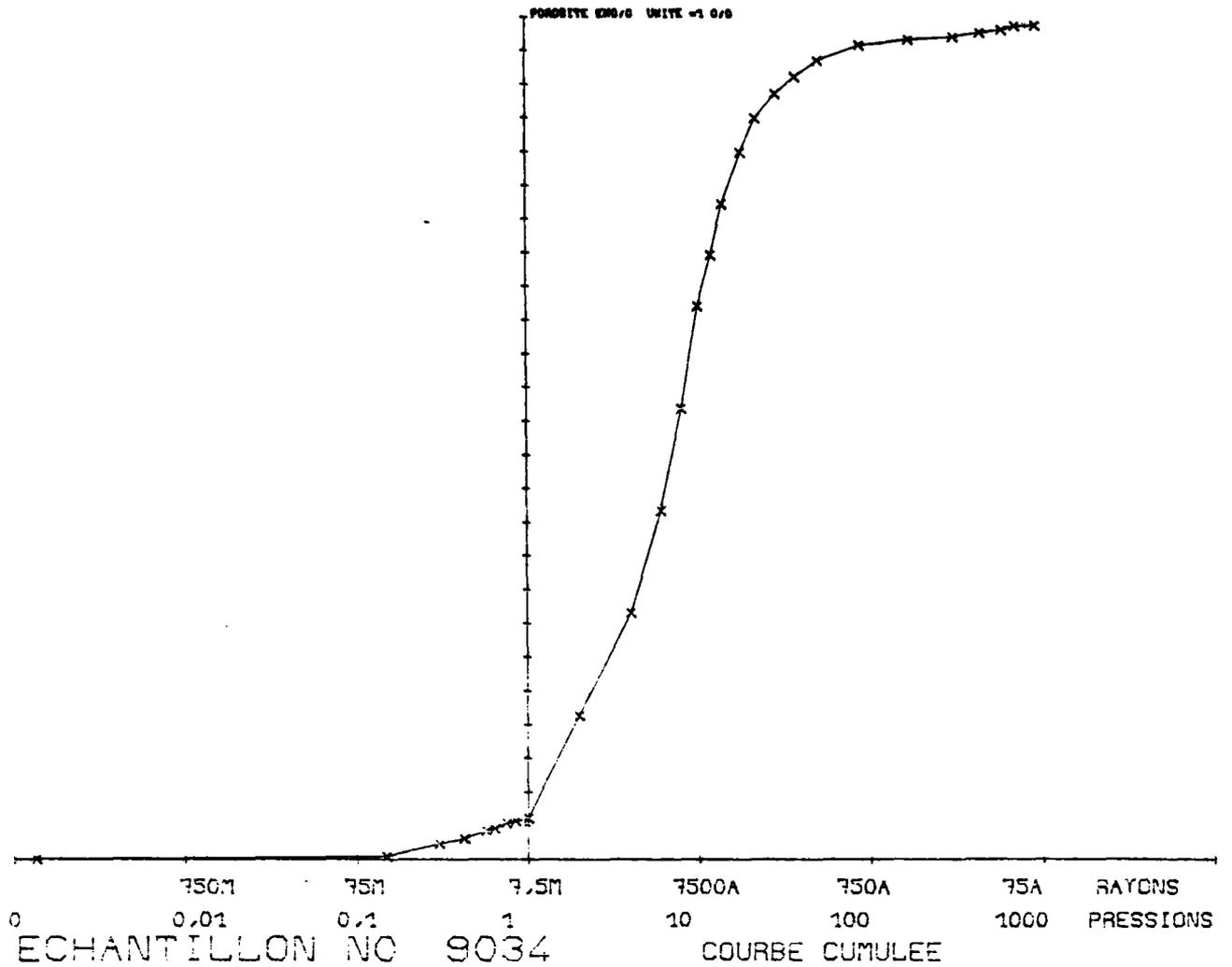
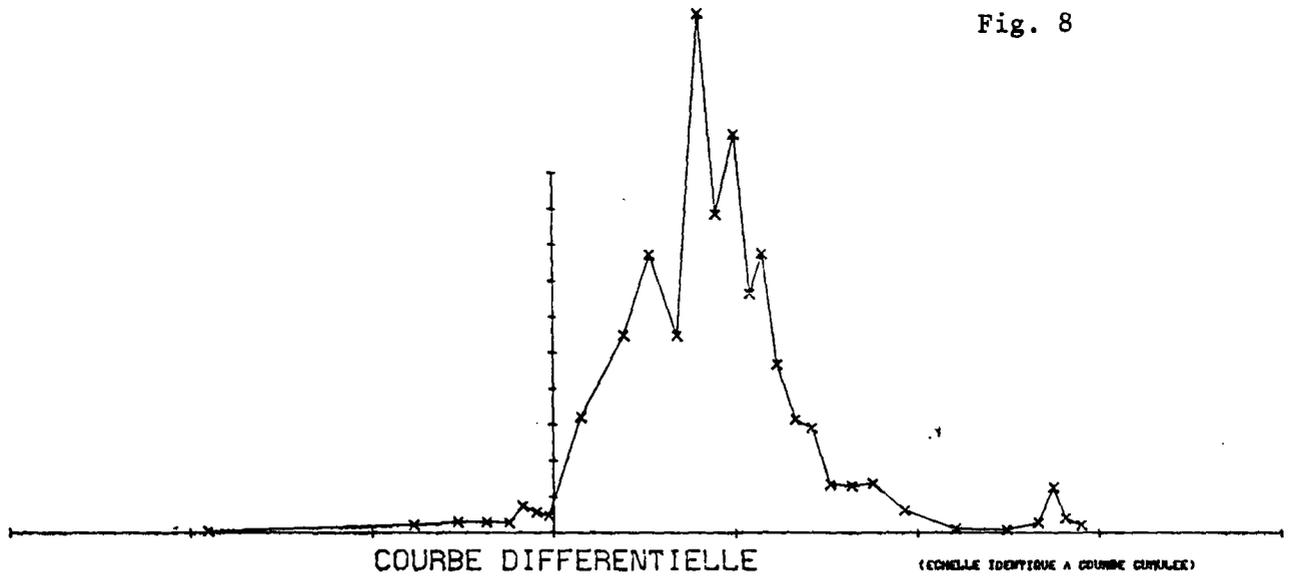


Fig. 8



POROSITE MACRO 0.93 POROSITE MICRO 21.71 POROSITE TOTALE 22.64 DENSITE SOLIDE 2.64

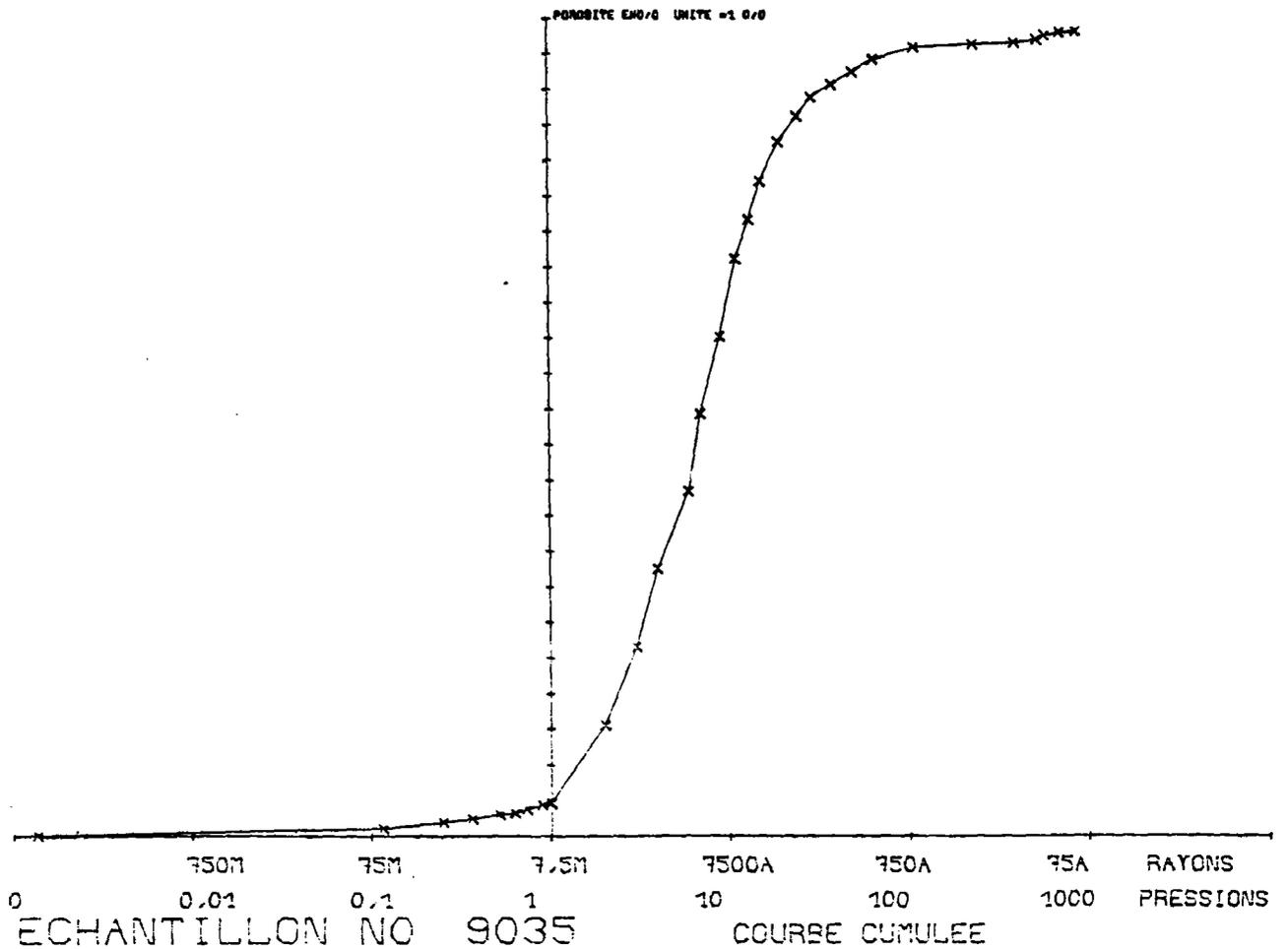
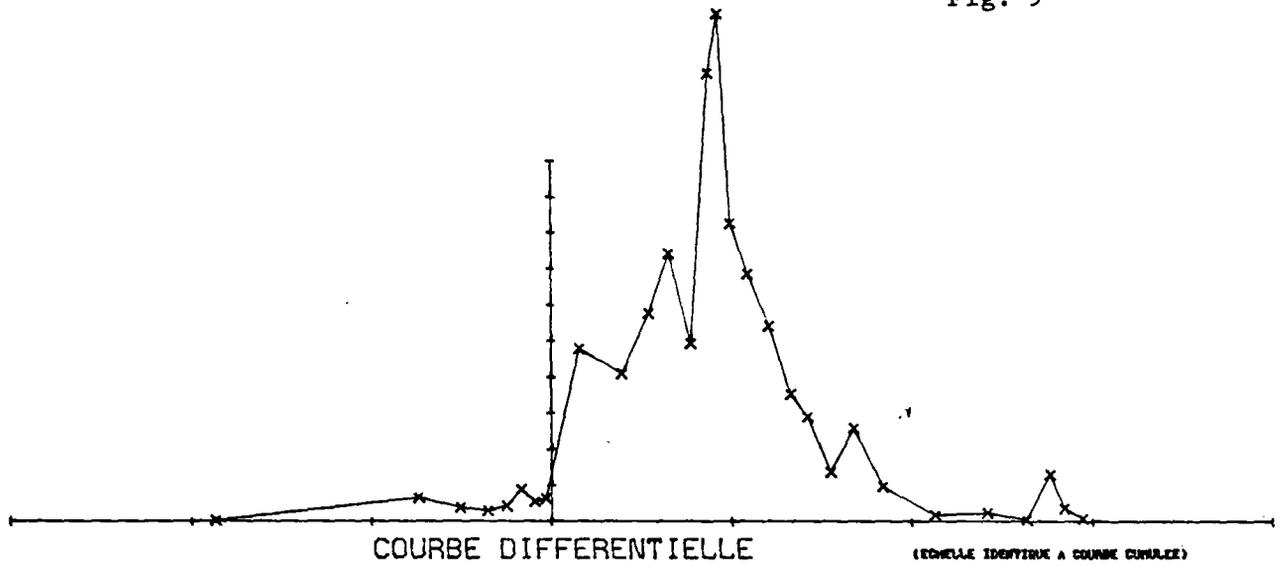


Fig. 9



POROSITE MACRO 1.17 POROSITE MICRO 20.49 POROSITE TOTALE 21.66 DENSITE SOLIDE 2.64

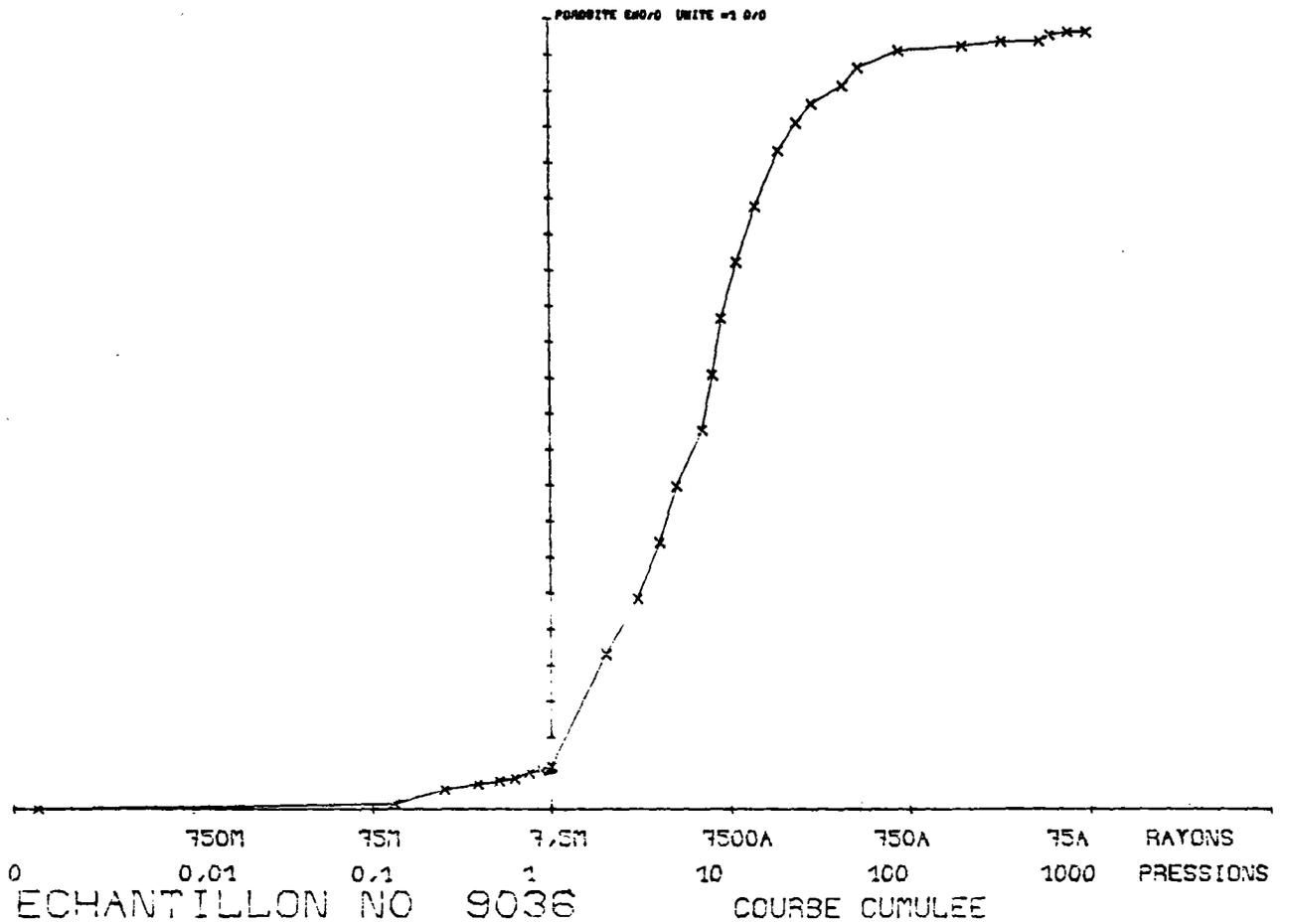
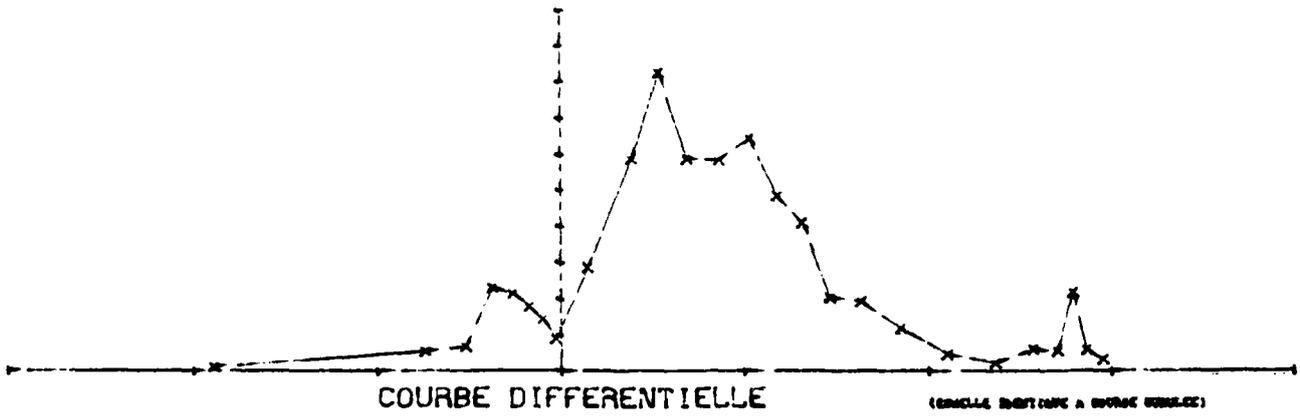


Fig. 10



POROSITE MACRO 2.63 POROSITE MICRO 17.92 POROSITE TOTALE 20.57 DENSITE SOLIDE 2.64

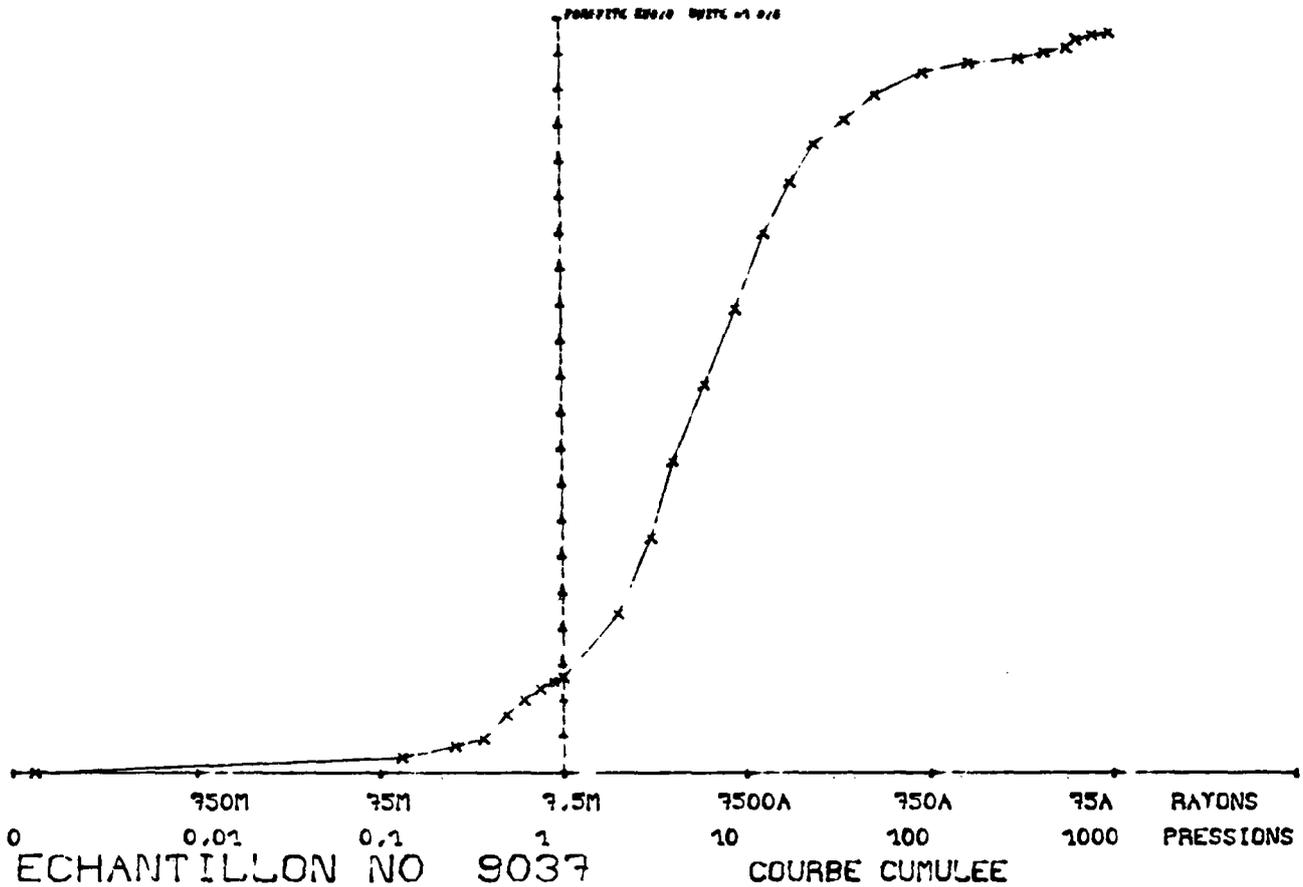
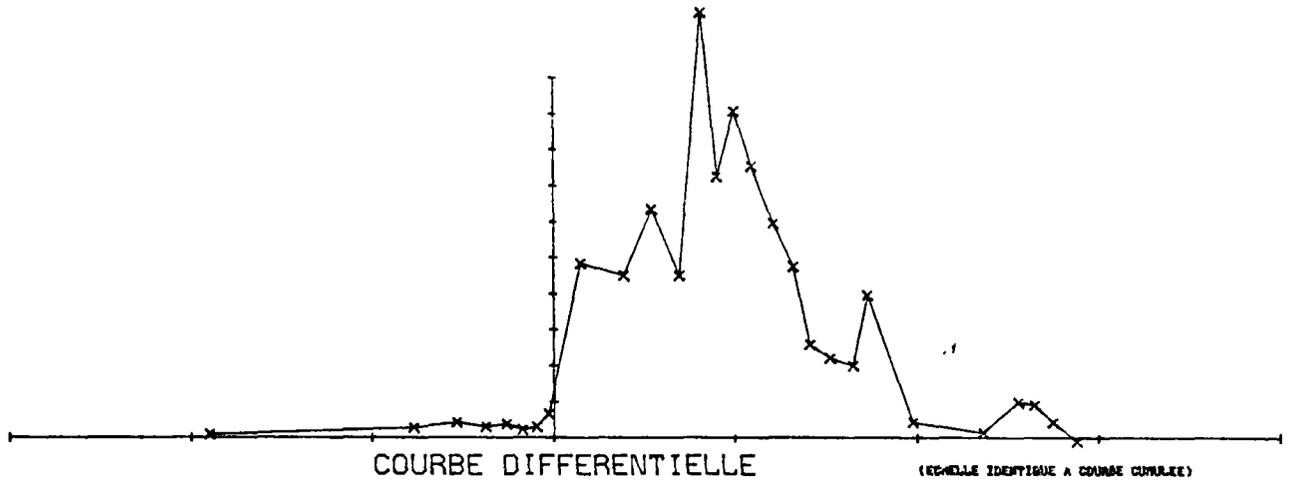


Fig. 11



POROSITE MACRO 1.07 POROSITE MICRO 21.43 POROSITE TOTALE 22.50 DENSITE SOLIDE 2.64

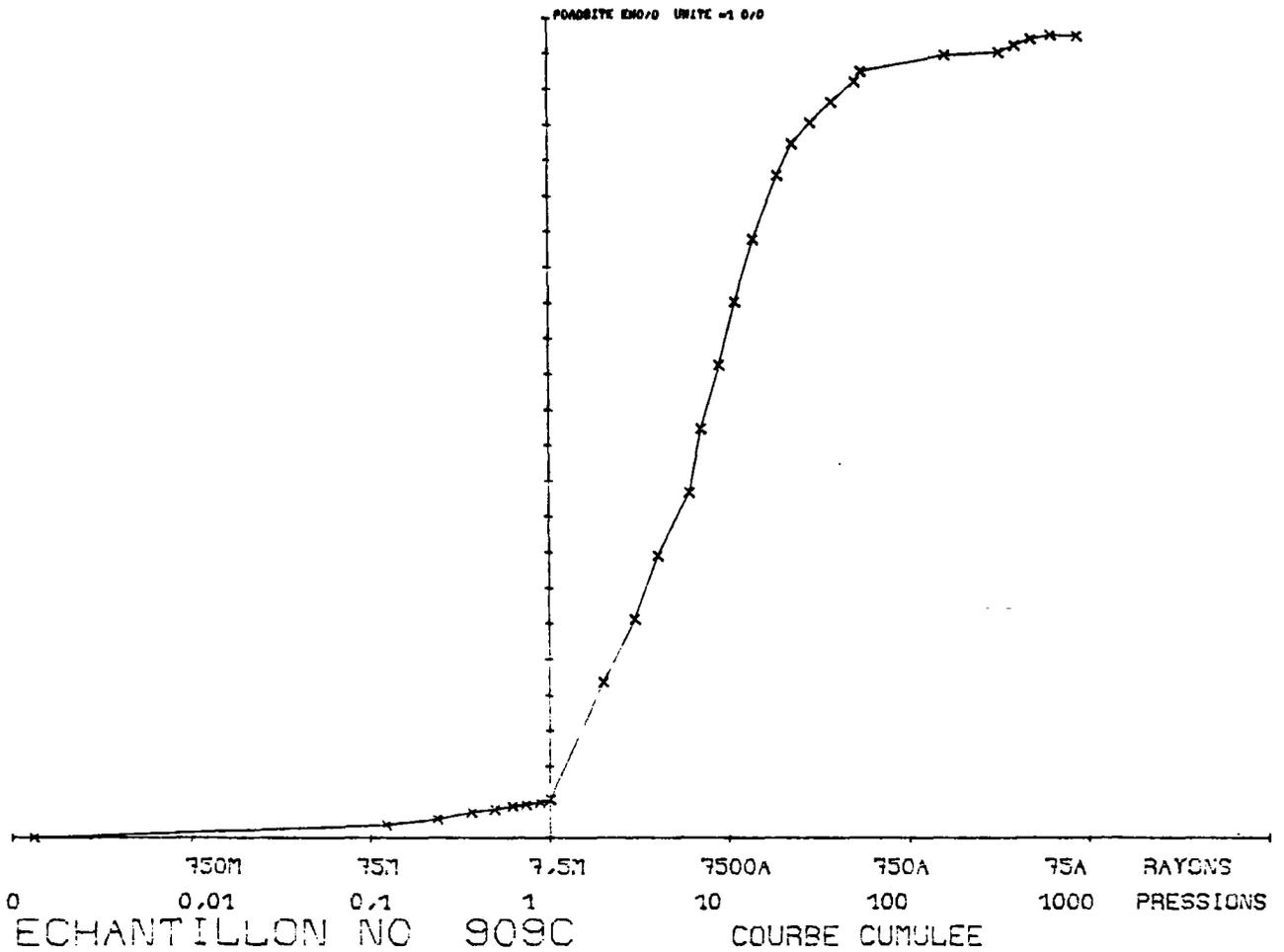
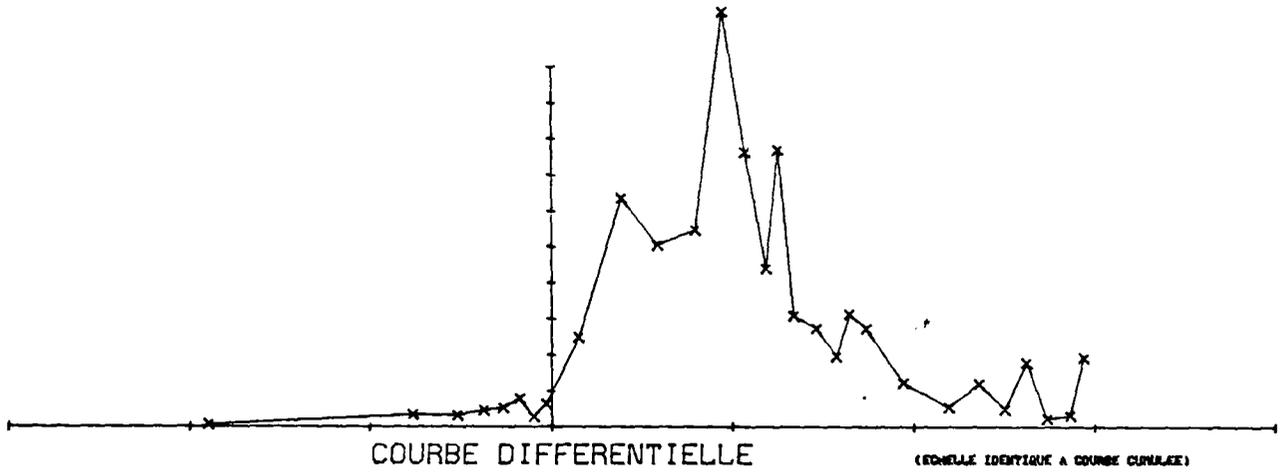


Fig. 12



POROSITE MACRO 0.99 POROSITE MICRO 18.72 POROSITE TOTALE 19.71 DENSITE SOLIDE 2.64

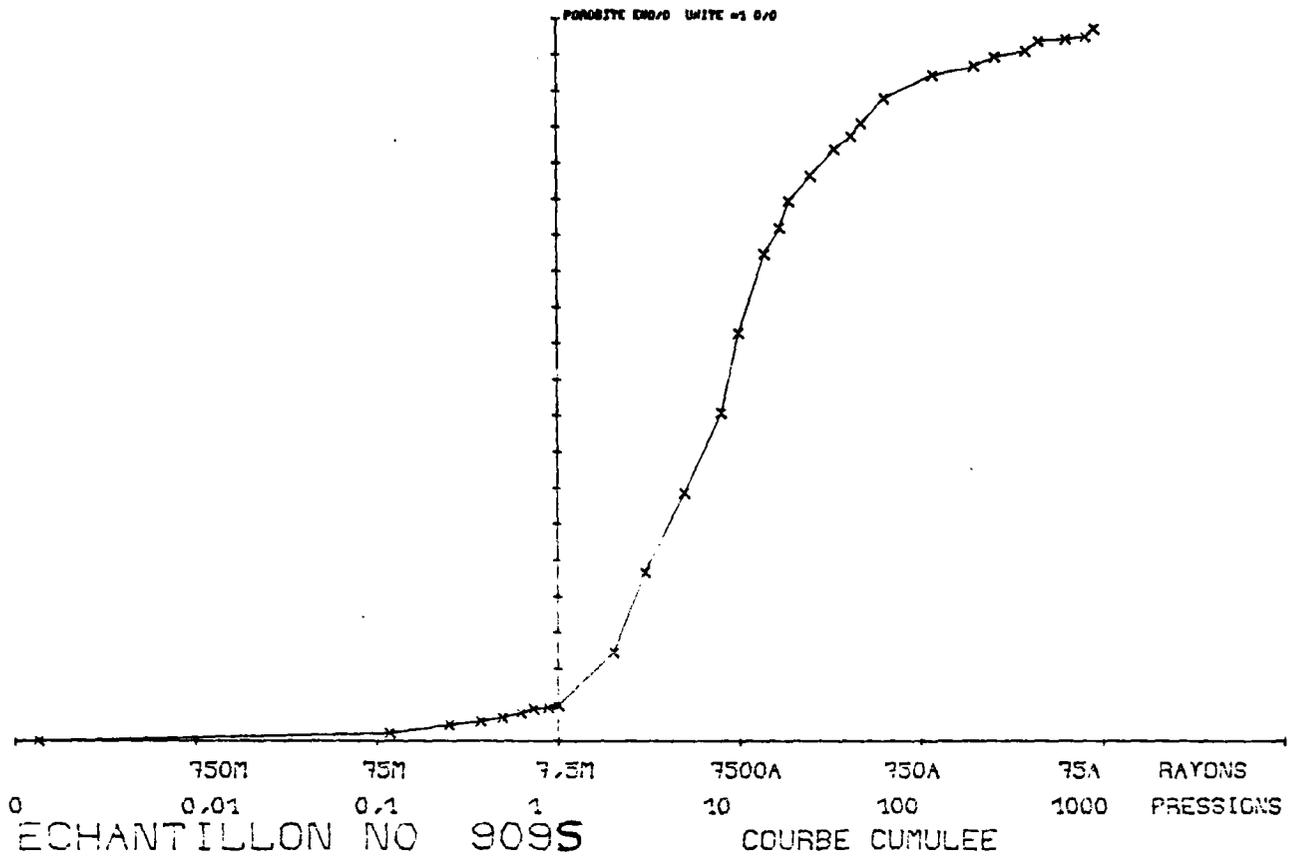
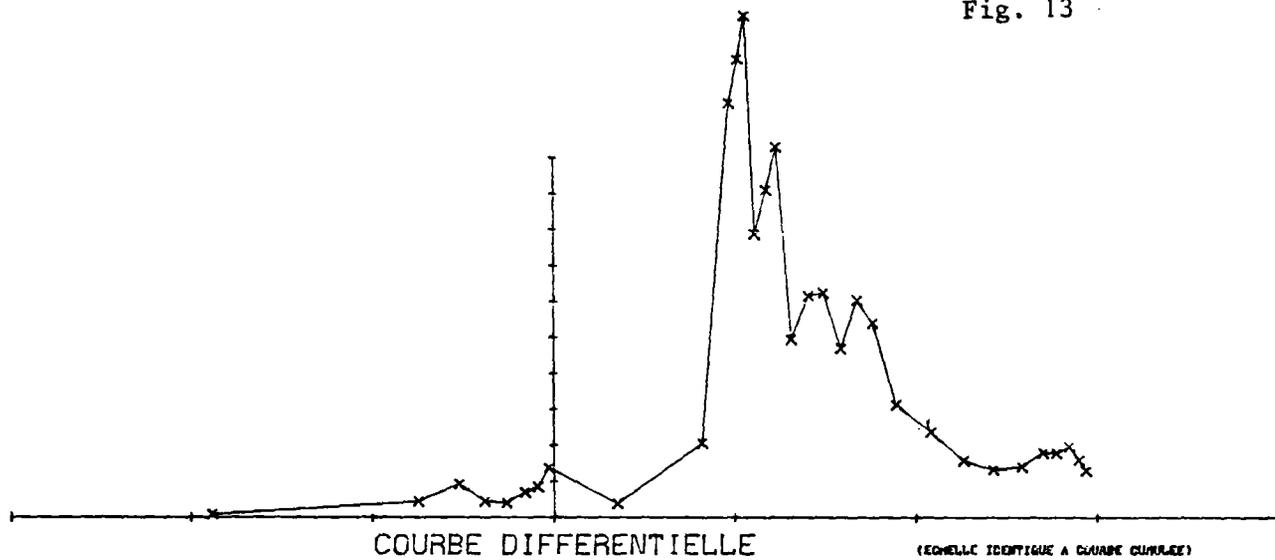


Fig. 13



POROSITE MACRO 1.82 POROSITE MICRO 22.02 POROSITE TOTALE 23.84 DENSITE SOLIDE 2.64

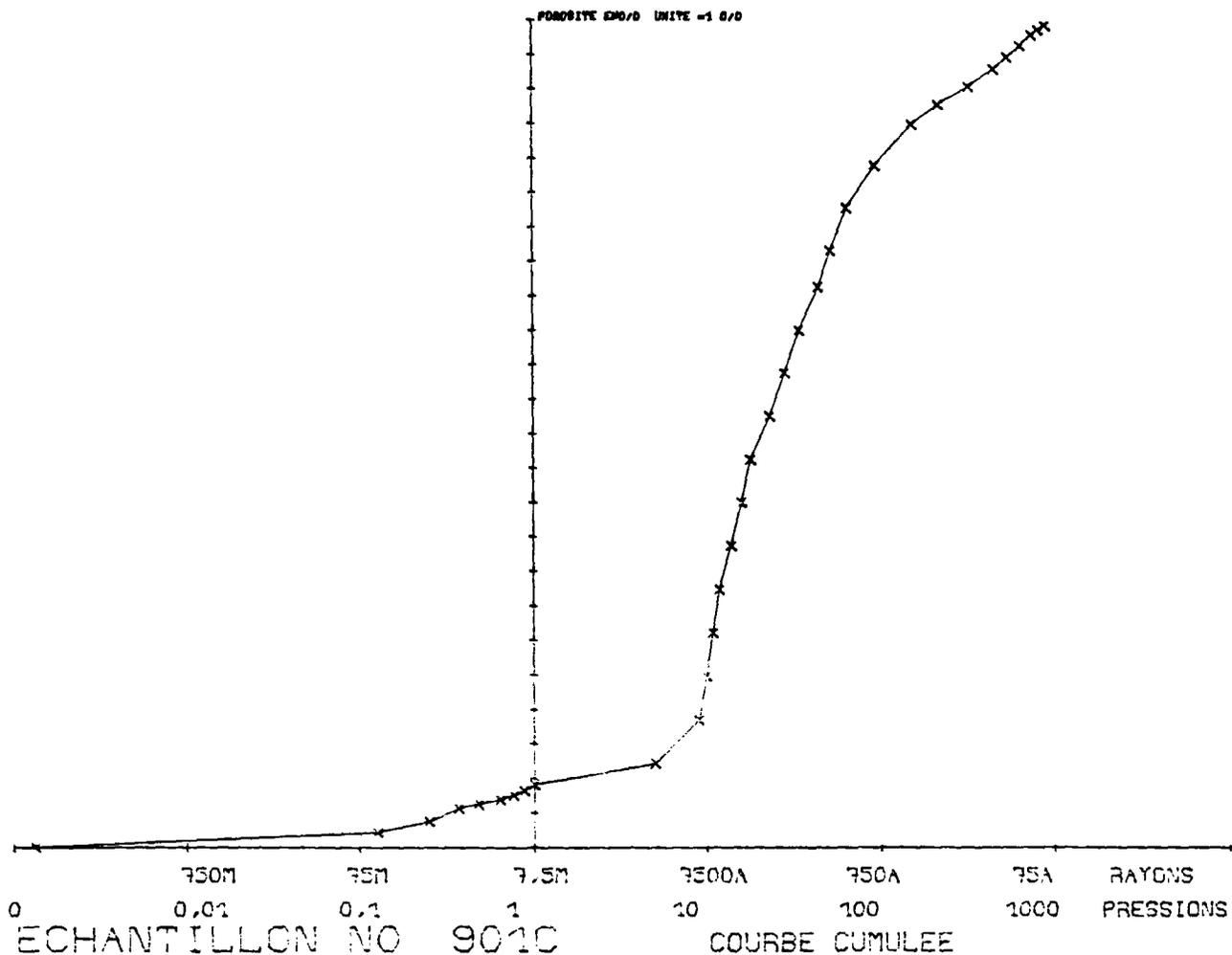
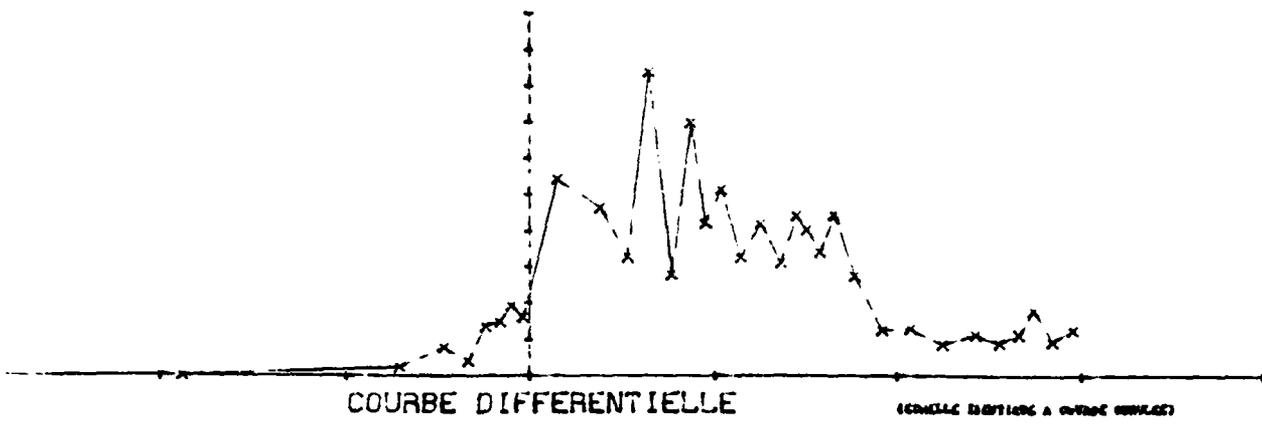


Fig. 14



POROSITE MACRO 2.10 POROSITE MICRO 27.45 POROSITE TOTALE 29.56 DENSITE SOLIDE 2.64

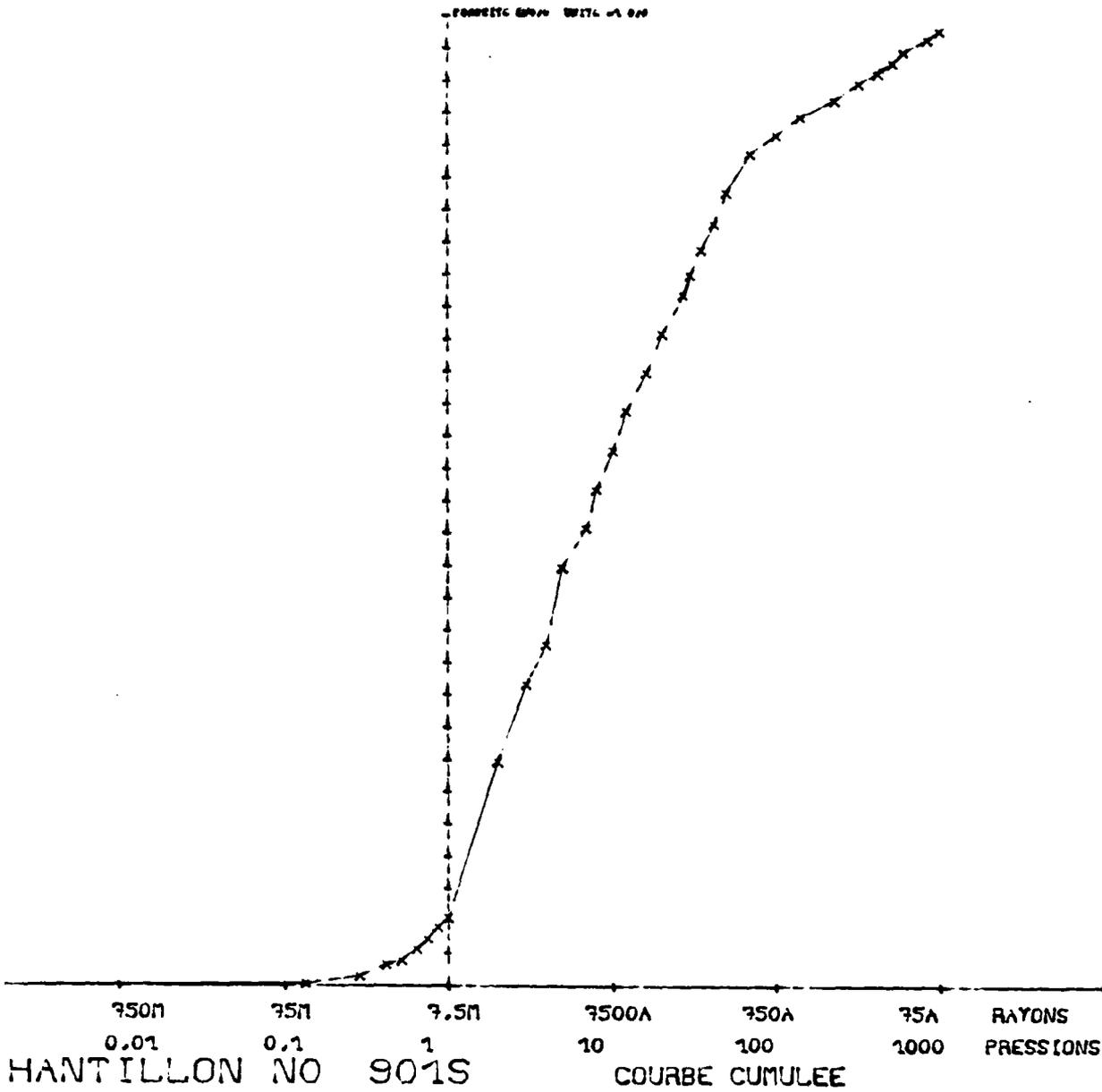
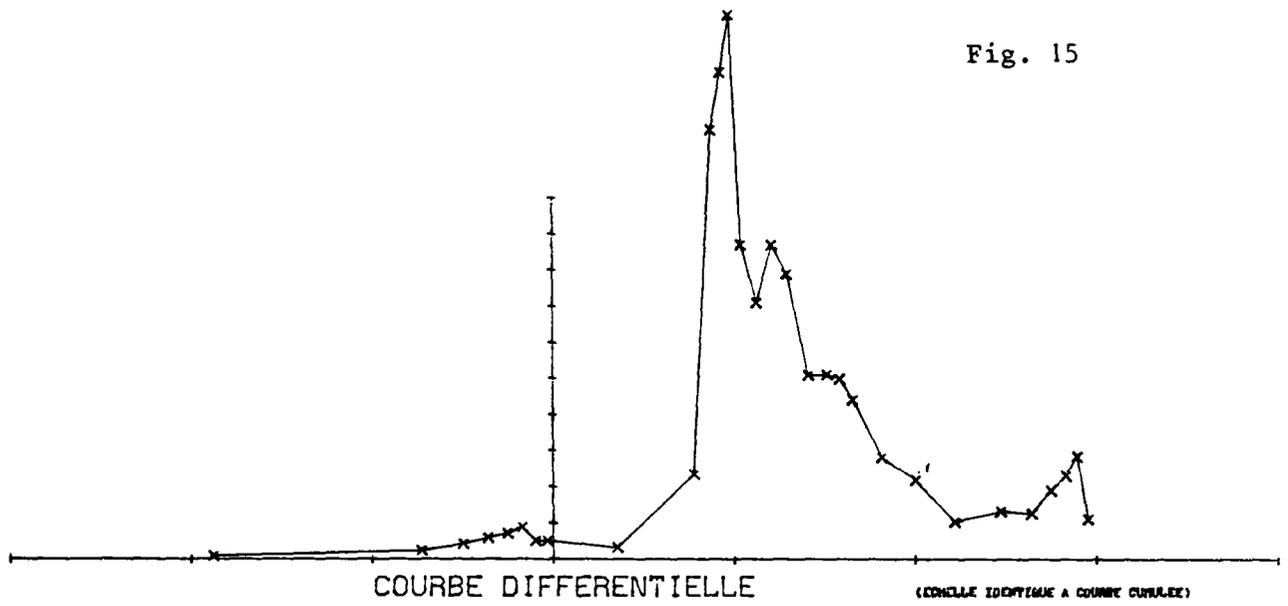


Fig. 15



POROSITE MACRO 1.48 POROSITE MICRO 23.86 POROSITE TOTALE 25.34 DENSITE SOLIDE 2.64

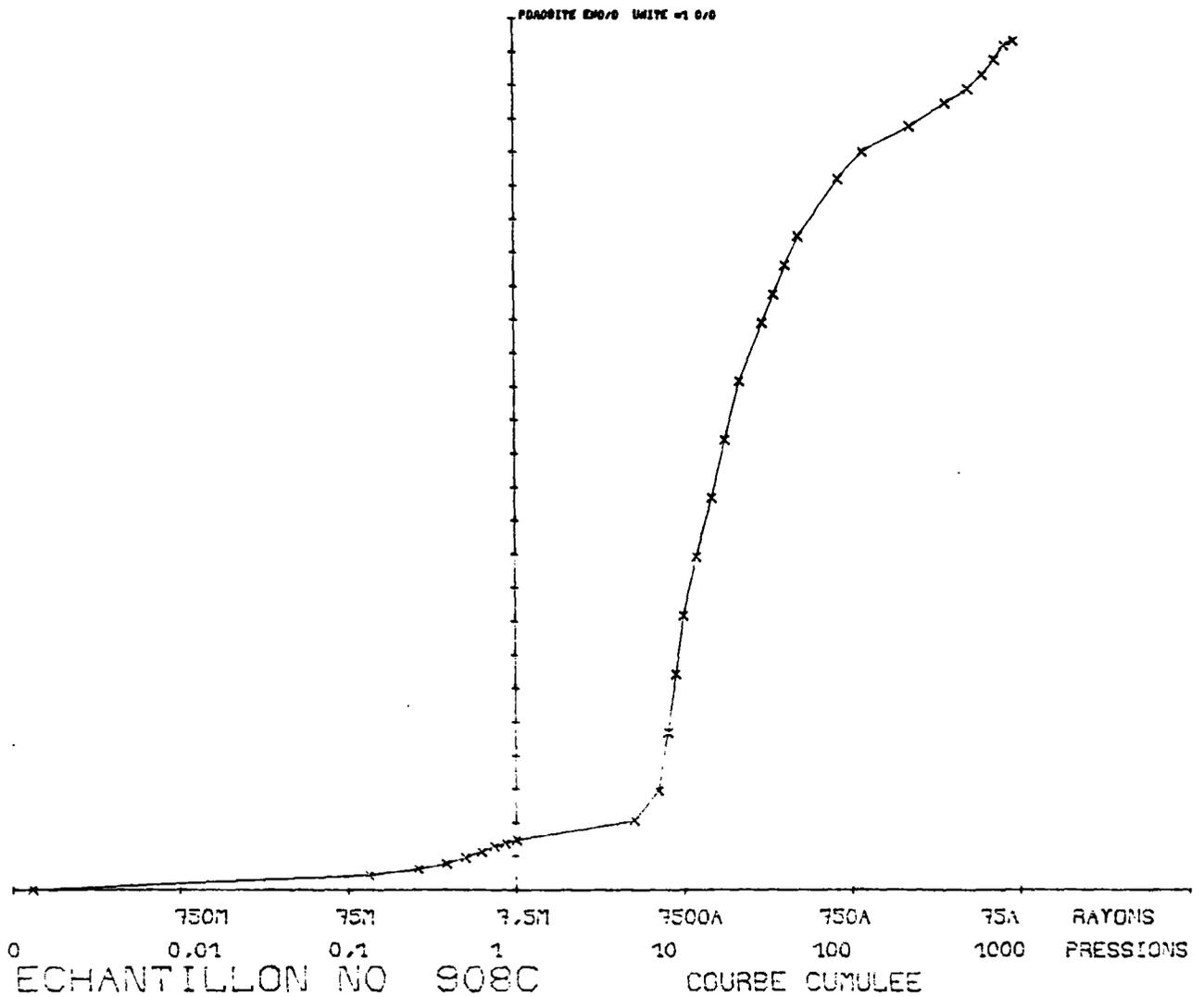
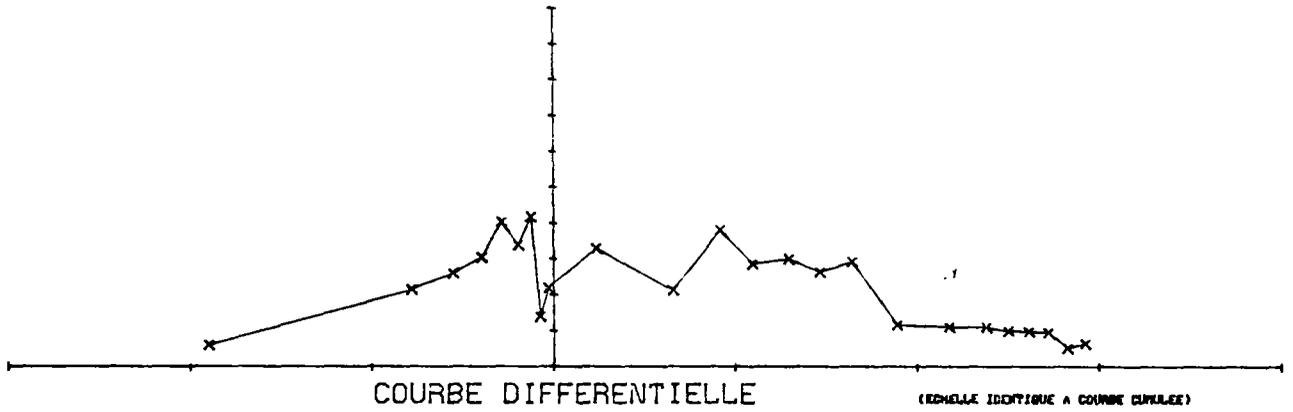
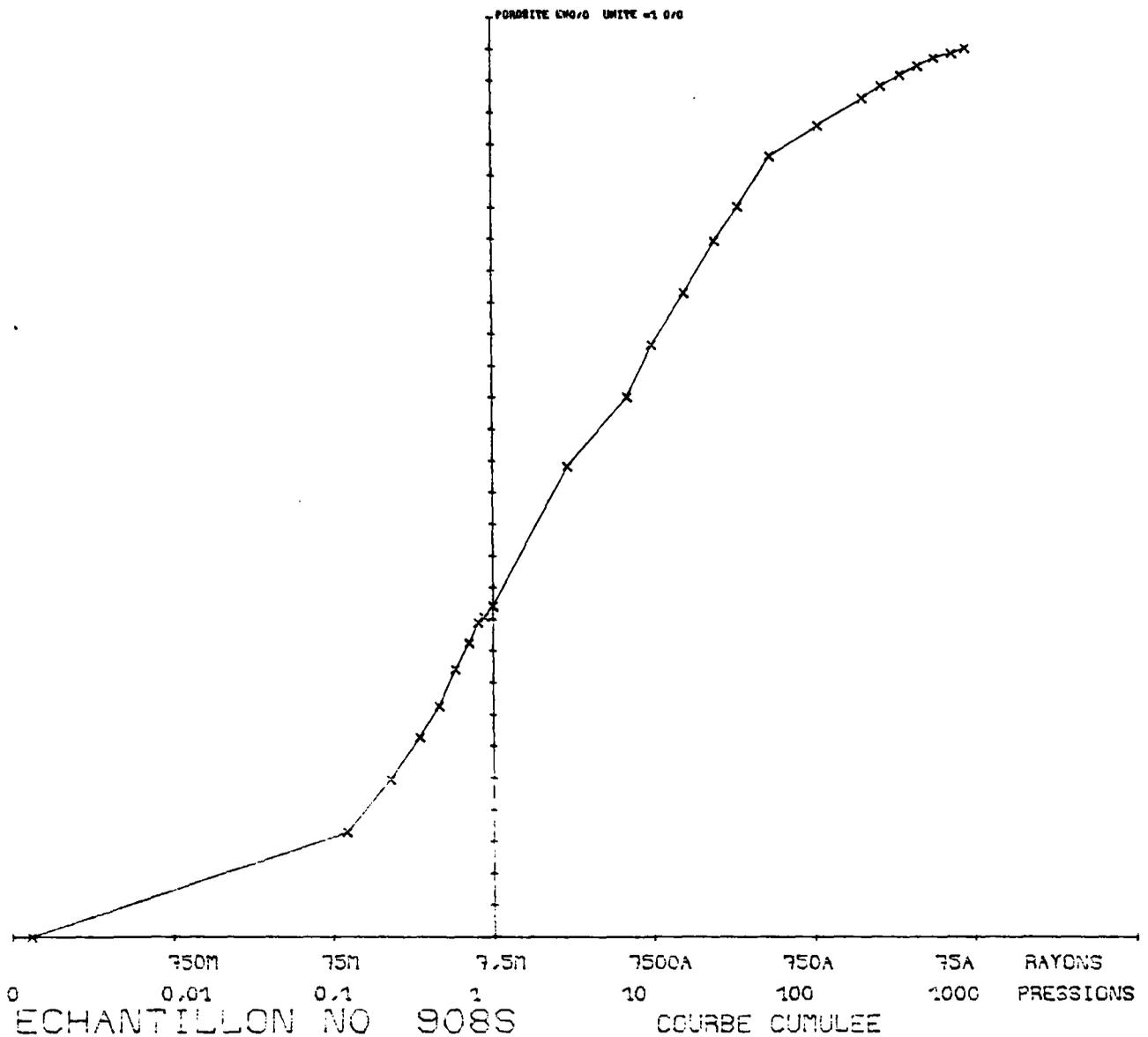


Fig. 16

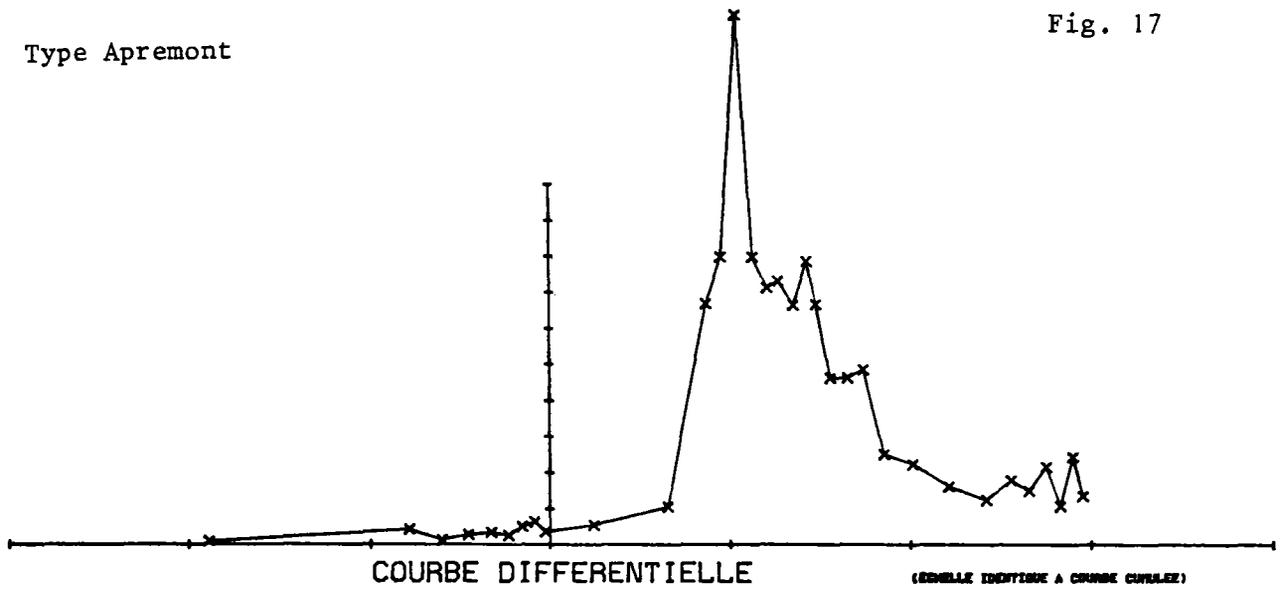


POROSITE MACRO 10.41 POROSITE MICRO 17.64 POROSITE TOTALE 28.05 DENSITE SOLIDE 2.64

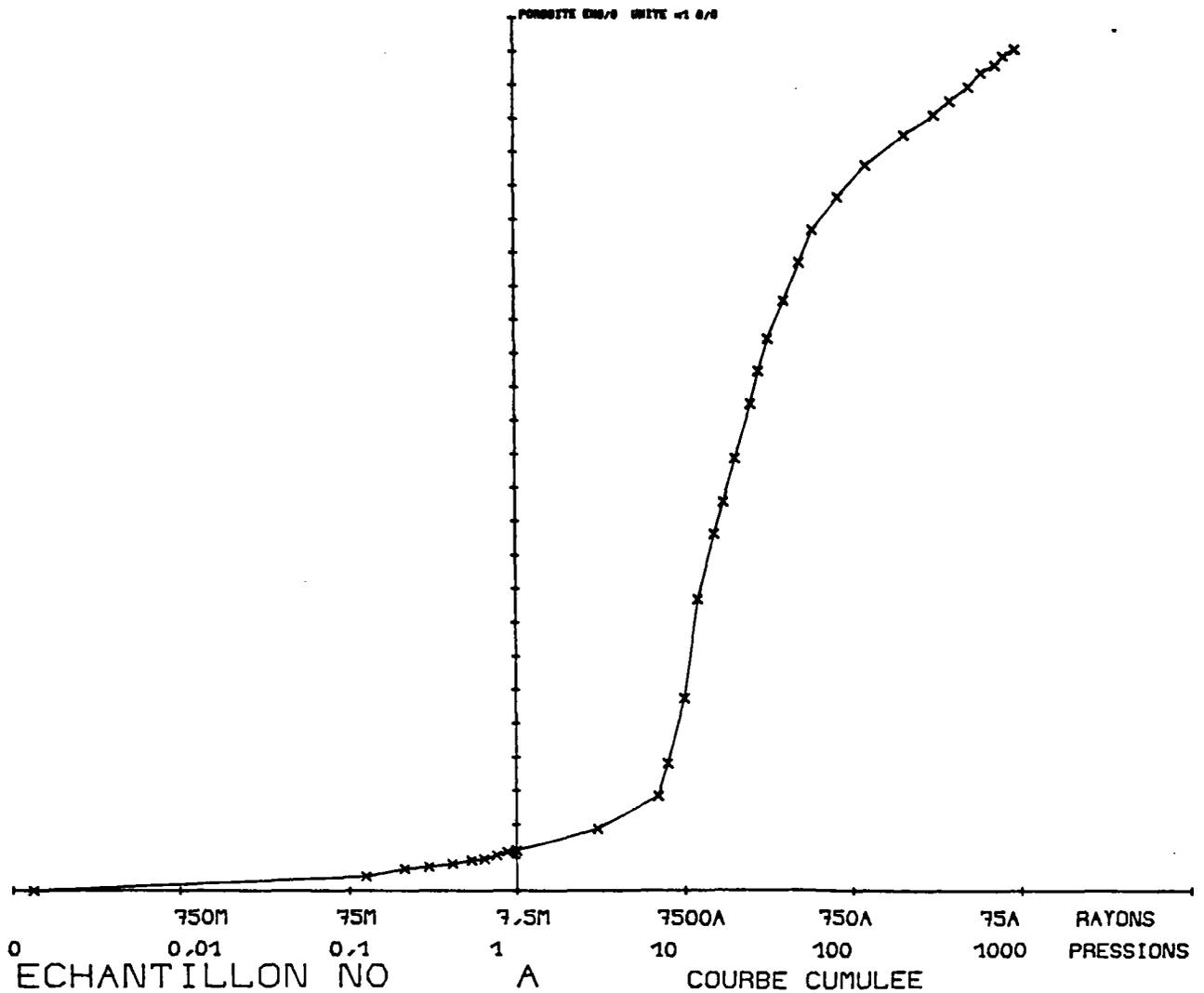


Type Apremont

Fig. 17

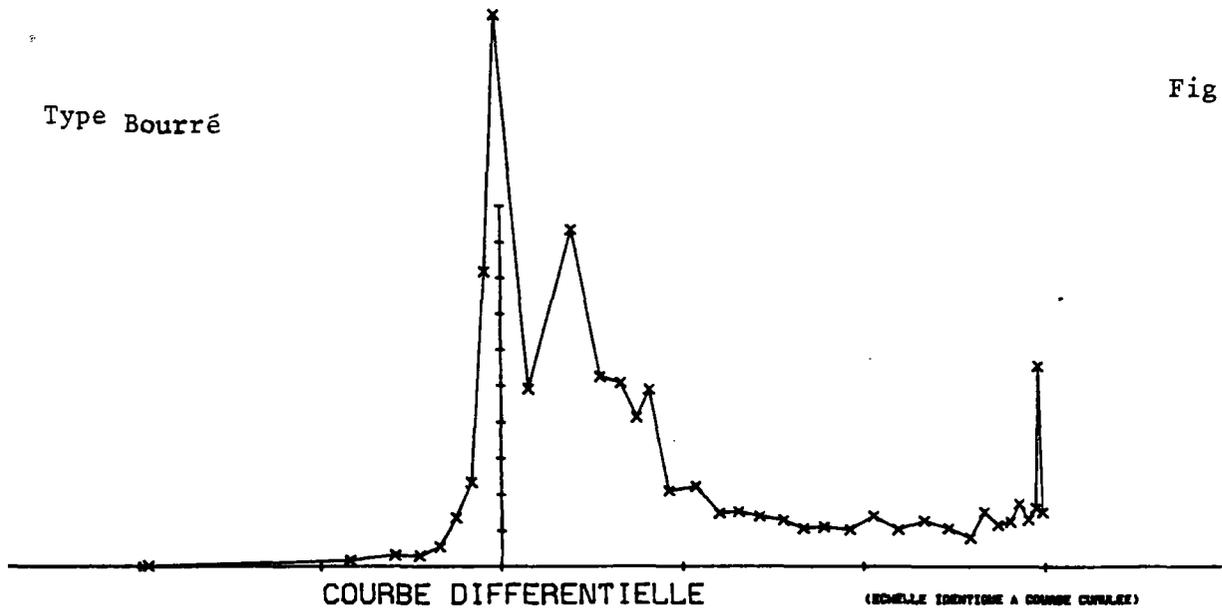


POROSITE MACRO 1.21 POROSITE MICRO 23.85 POROSITE TOTALE 25.06 DENSITE SOLIDE 2.65



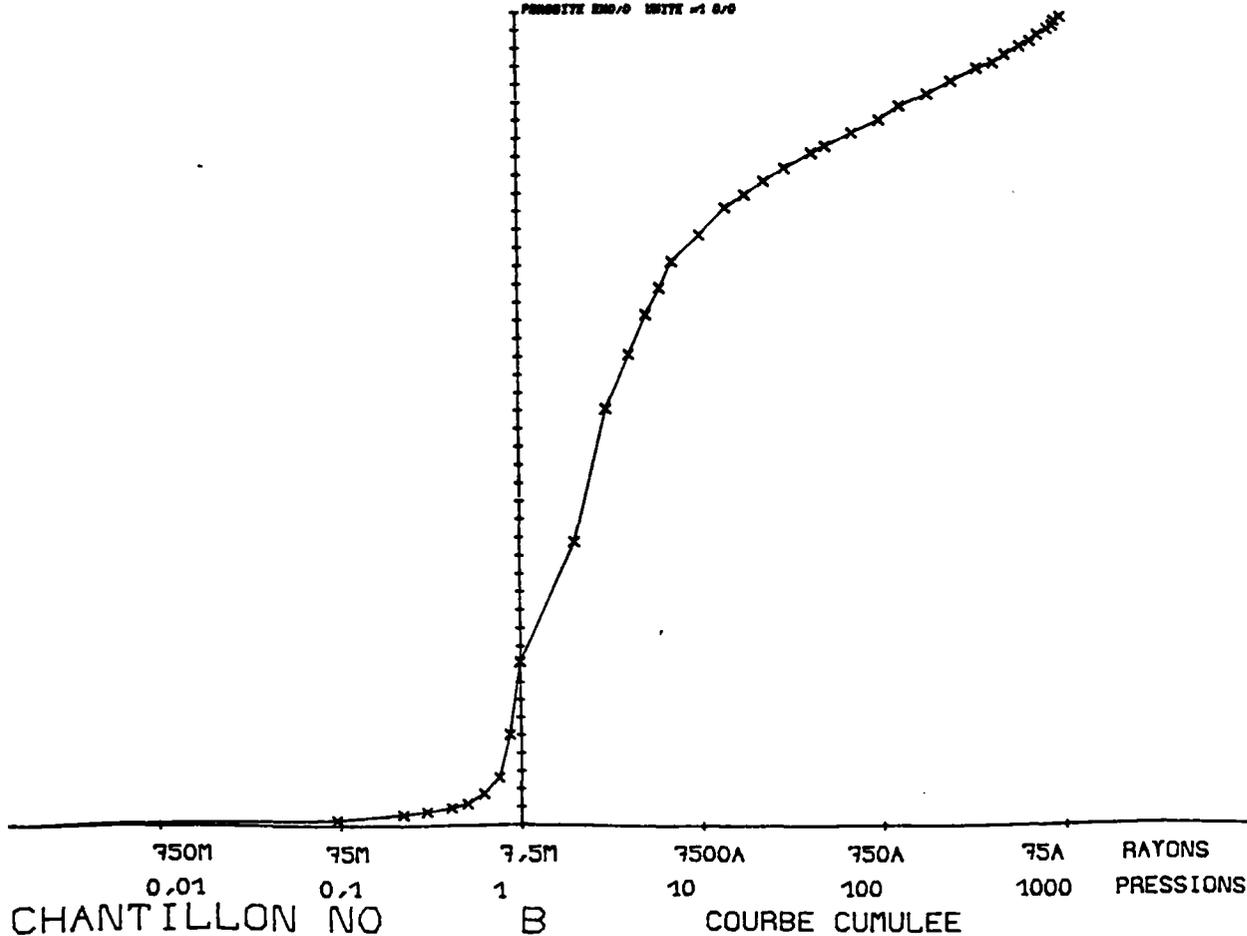
Type Bourré

Fig. 18



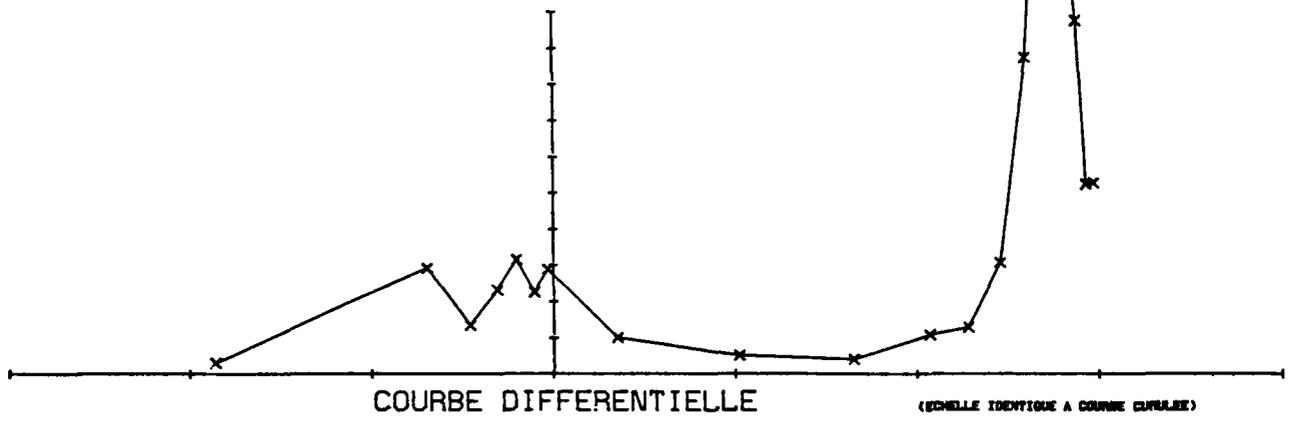
SITE MACRO 9.12 POROSITE MICRO 35.60 POROSITE TOTALE 44.71 DENSITE SOLIDE 2.65

POROSITE END/O NETTE #1 0/0

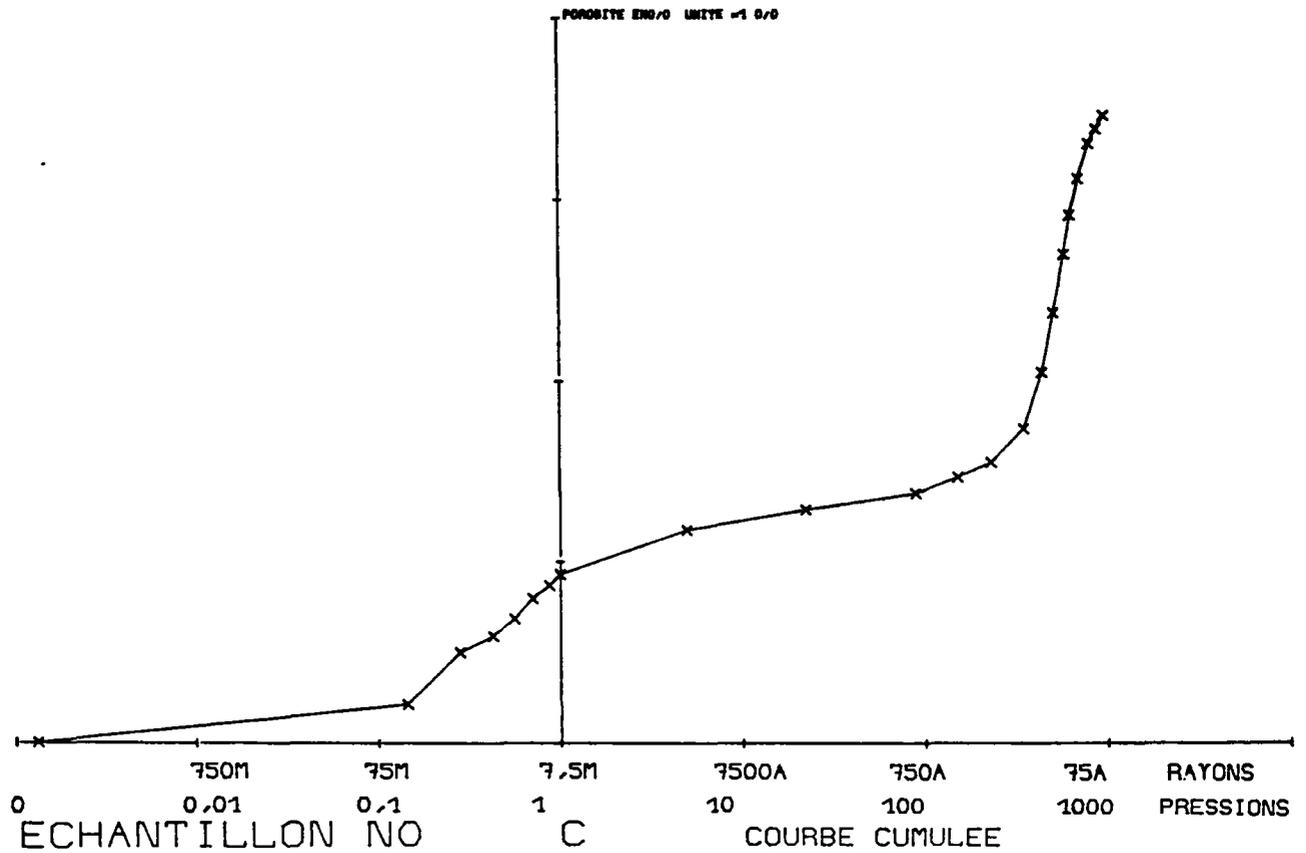


Calcaire de Beauce

Fig. 19

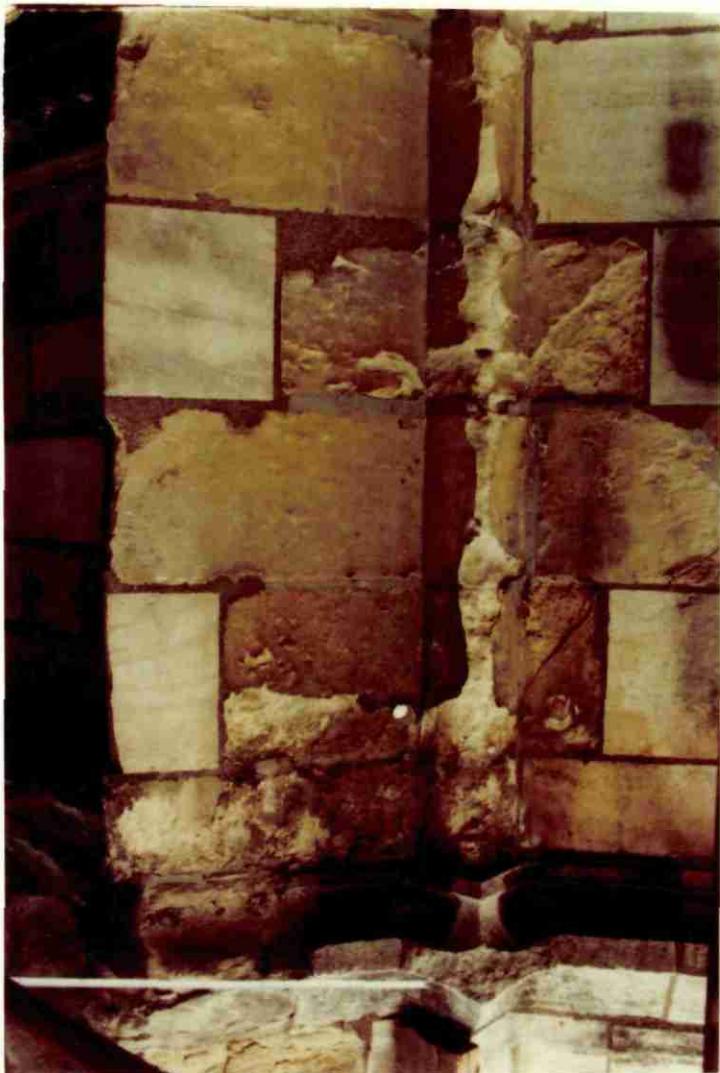
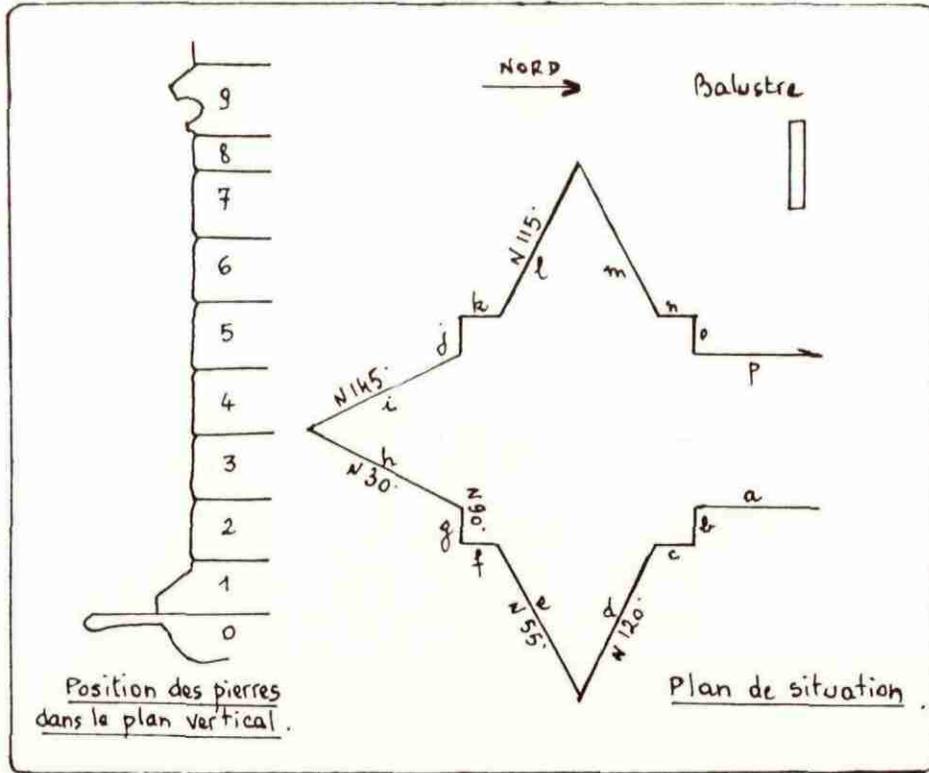


POROSITE MACRO 0.93 POROSITE MICRO 2.53 POROSITE TOTALE 3.46 DENSITE SOLIDE 2.75



Détail des assises du pilier EST

La corniche 0 correspond au bandeau



9

8

7

6

5

4

Vue d'ensemble de la face h à e

h g f e d

Echantillon 902 (8 ed)



9

8

g f

e

Echantillon 901 (7 gf)



8

7

6

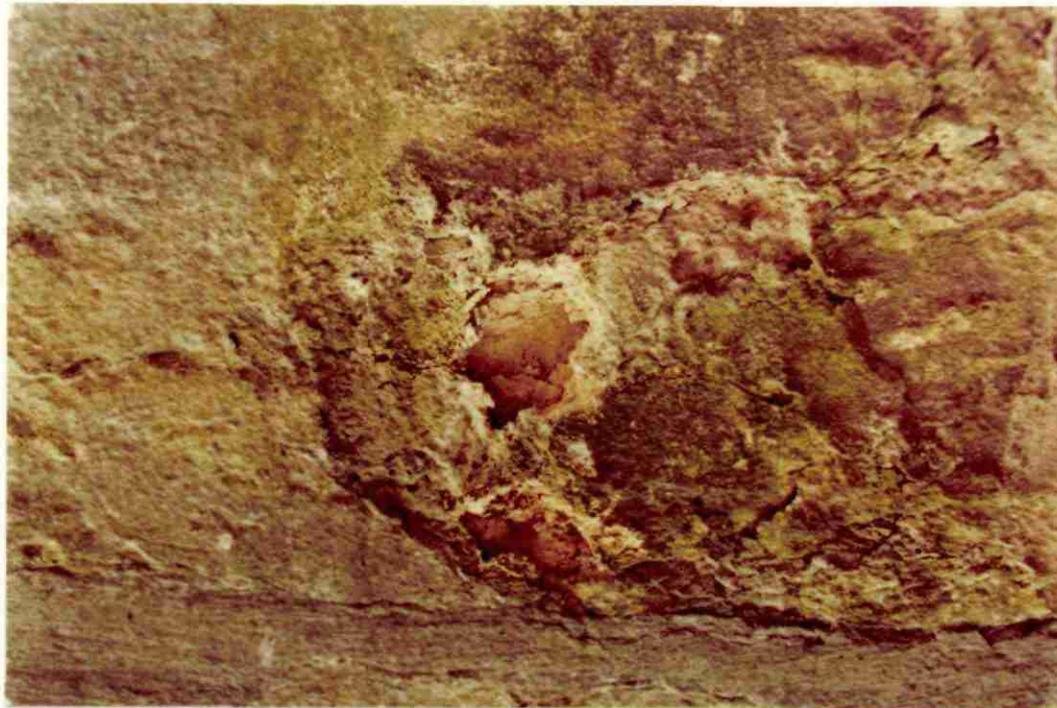
h

g f

e



Vue d'ensemble face o à m



m.5

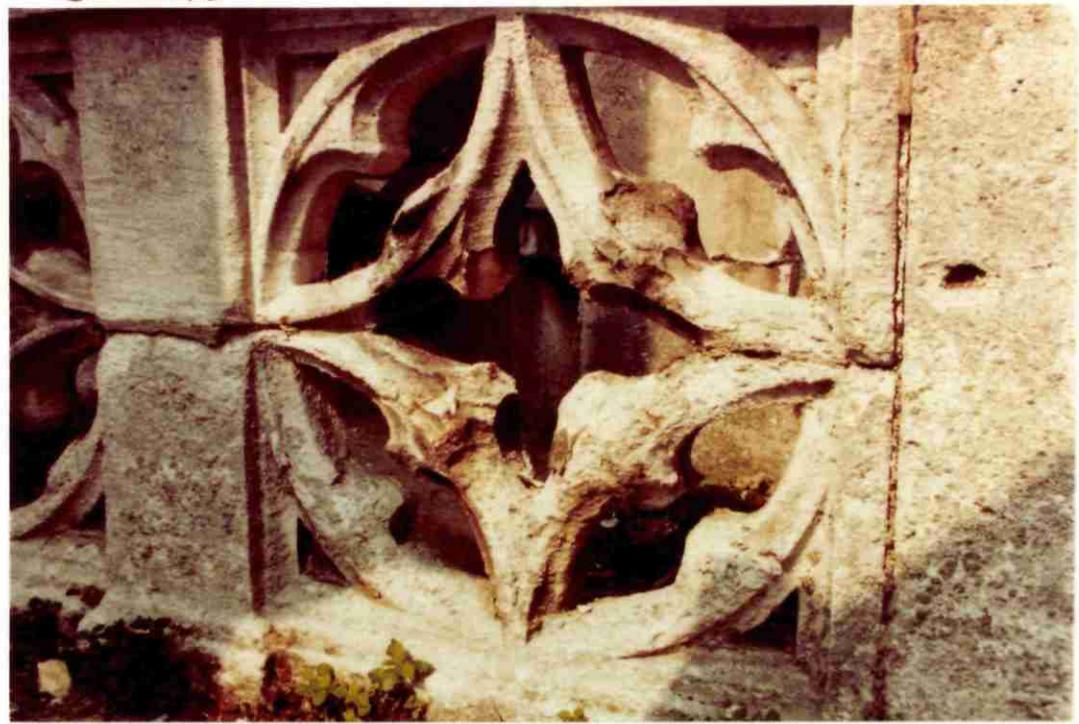


detail m.5

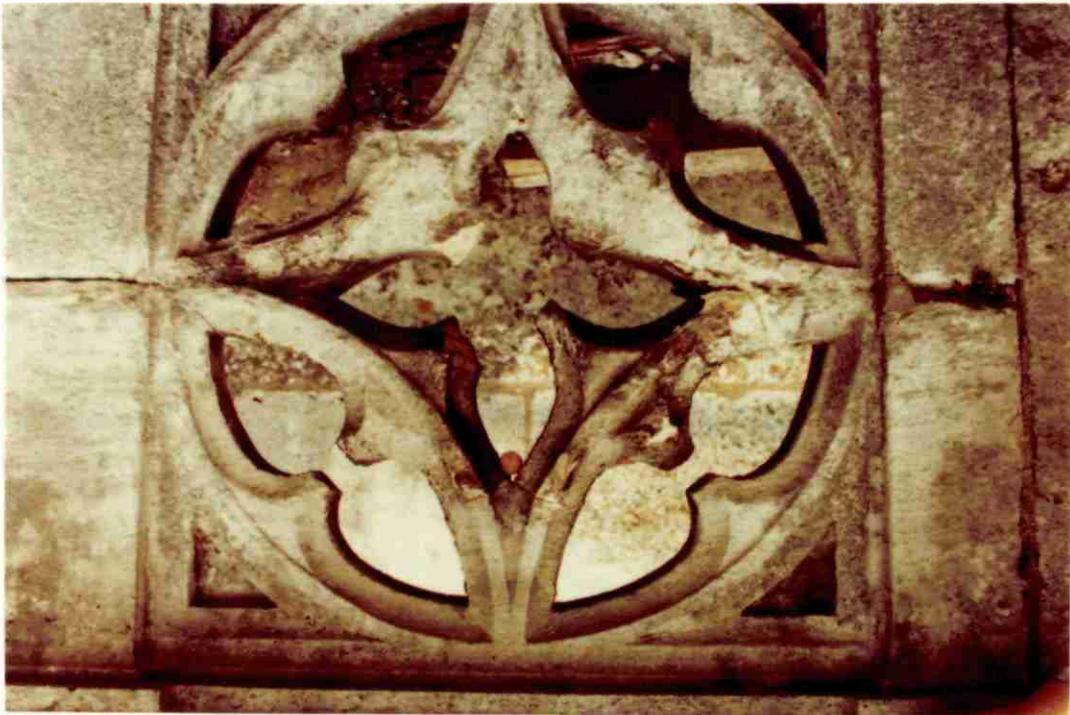
Echantillon 938 (m 5)



Echantillon 939 (p 5)



Balustre
Echantillon 903





← d 8
Echantillon 1
grattage de surface +
écaïlle

d 7
← Echantillon 6
Boursouflure



← m 6
Echantillon 2
grattage de surface



↑ 6 a
Echantillon 3
Grattage de surface



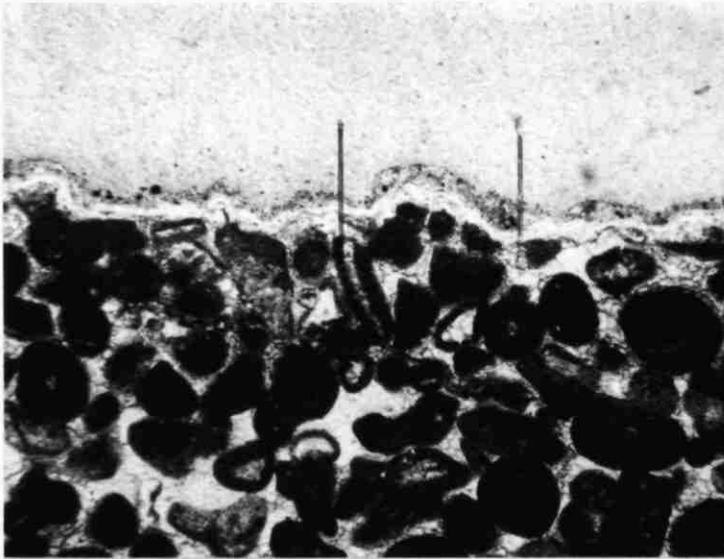
↑ 7 e f
Echantillon 4
Grattage de surface



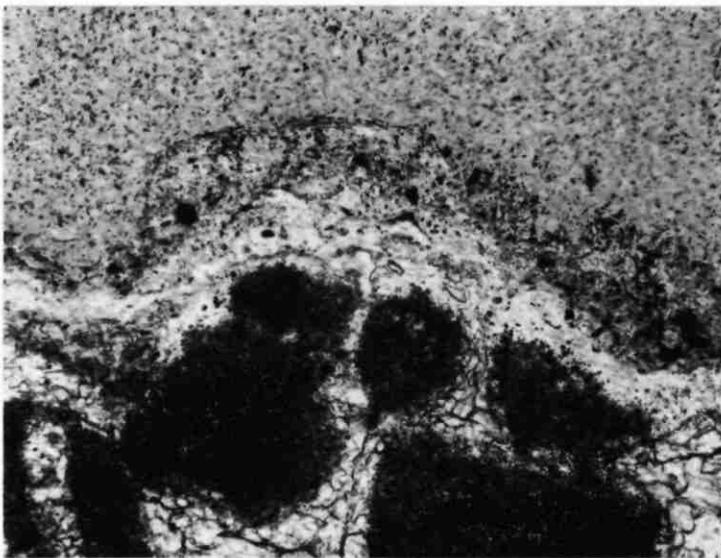
Pilier ouest vu du site échantillonné, avec alvéolisation par ruissellement



face 1
érosion différentielle
par ruissellement

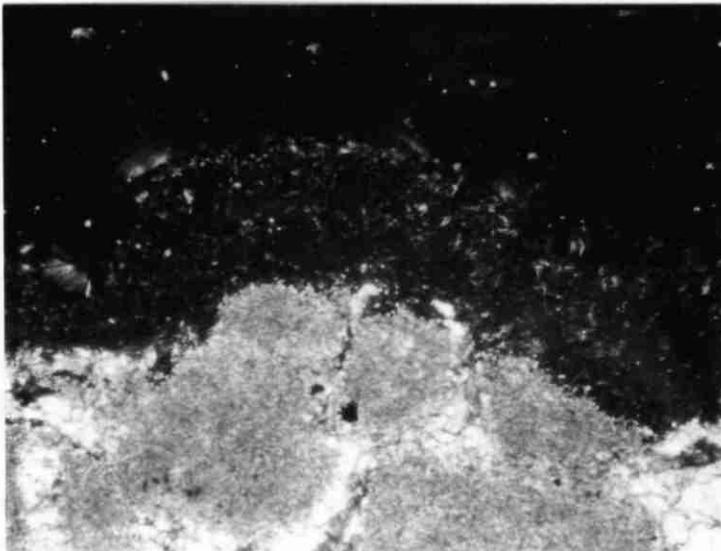


←
Lumière naturelle x 30



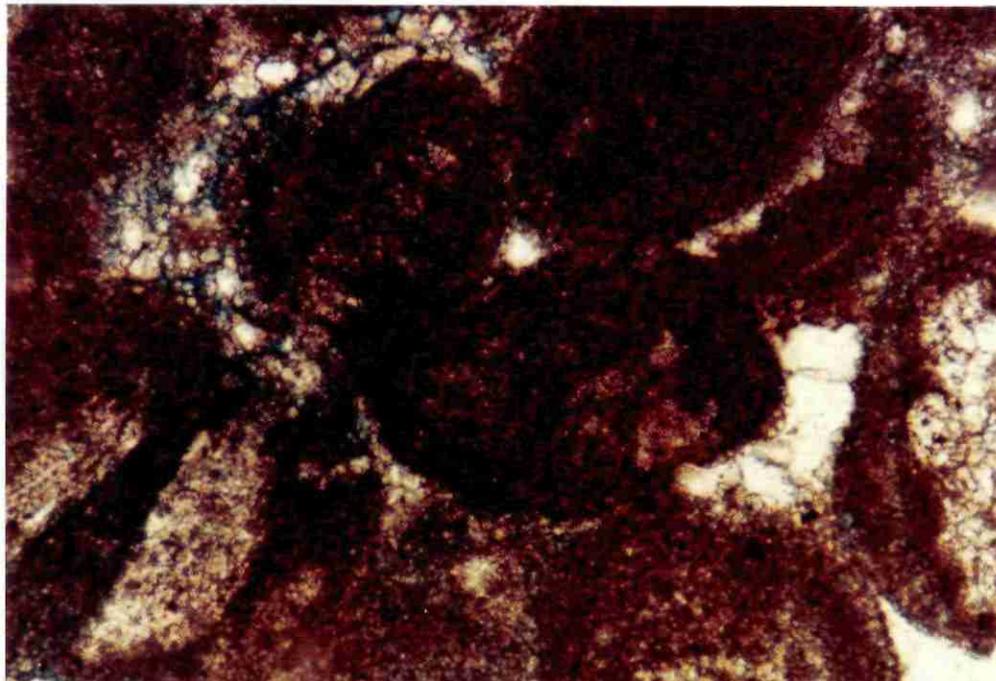
←
Agrandissement de ci-dessus

←
Lumière naturelle x 120



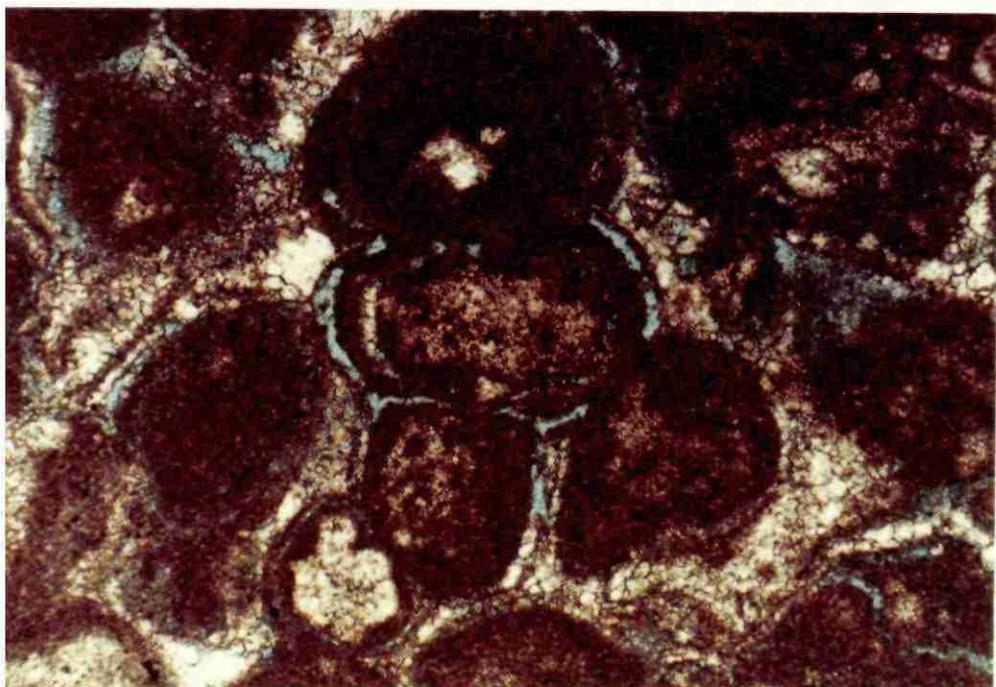
←
idem

←
Lumière polarisée x 120



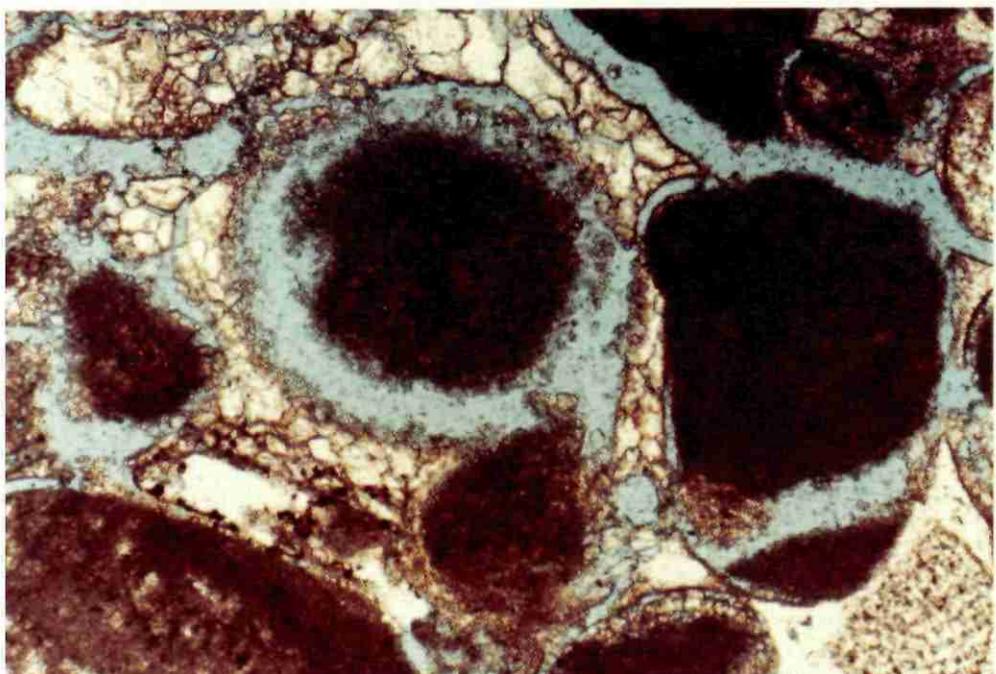
Début de dissolution

Lumière naturelle x 100



Dissolution partielle de la
couche externe des grains

Lumière naturelle x 100



Dissolution passée de la zone
externe des grains donnant
un grain flottant dans sa
cavité

Lumière naturelle x 100

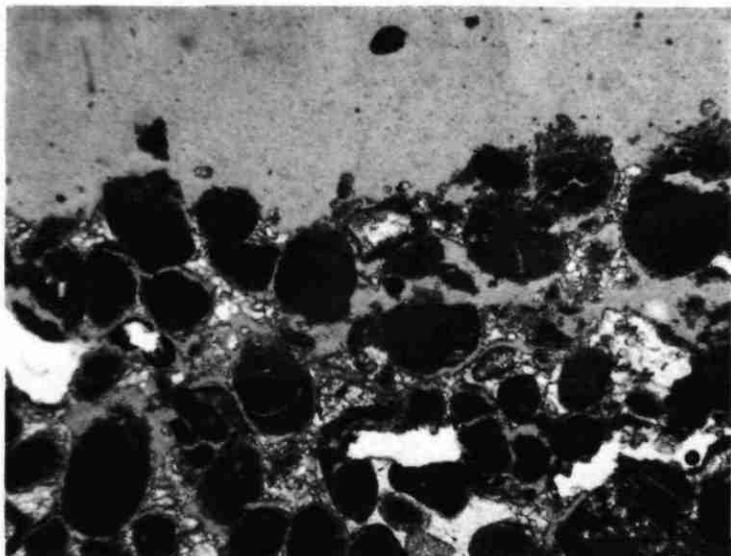
ECHANTILLON 903 A (balustre)

Pierre de Garchy

en bordure de la face altérée

(x 25)

Lumière naturelle
accentuation des dissolutions périphériques avec ouverture d'un réseau fissural sub-parallèle à la face exposée

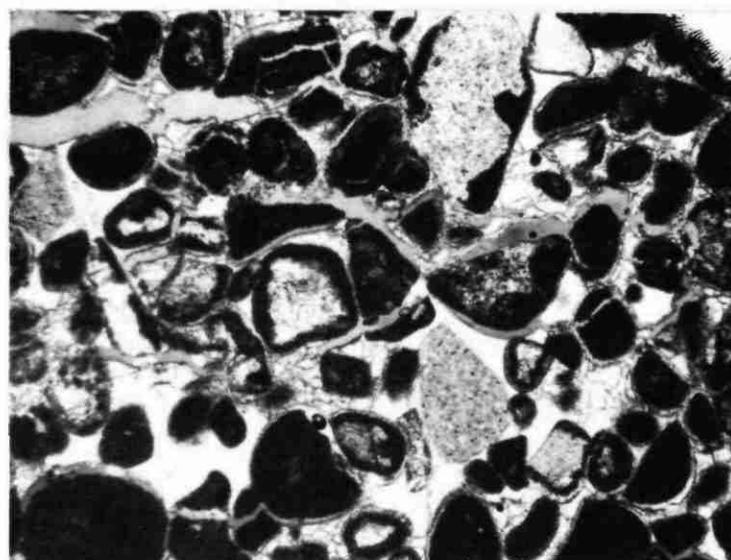


A 1 cm de la face altérée

(x 25)

Lumière naturelle

début de la fissuration



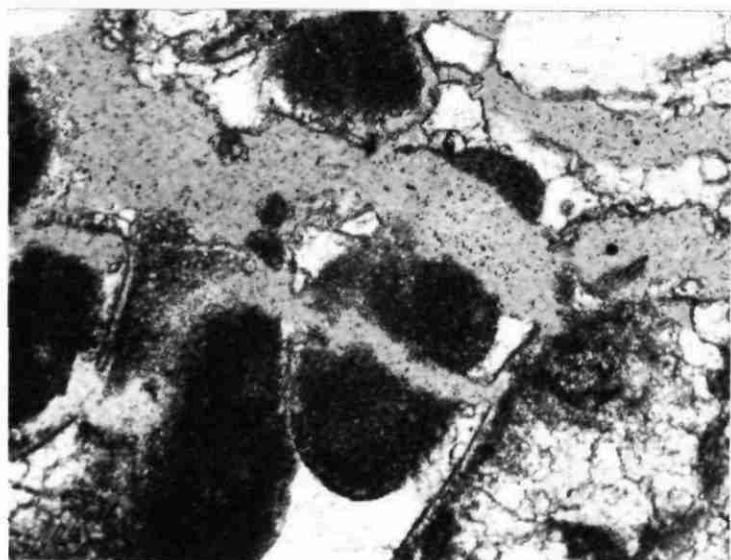
idem

Vue de détail

(x 100)

Lumière naturelle

Ouverture de fissure avec déplacement

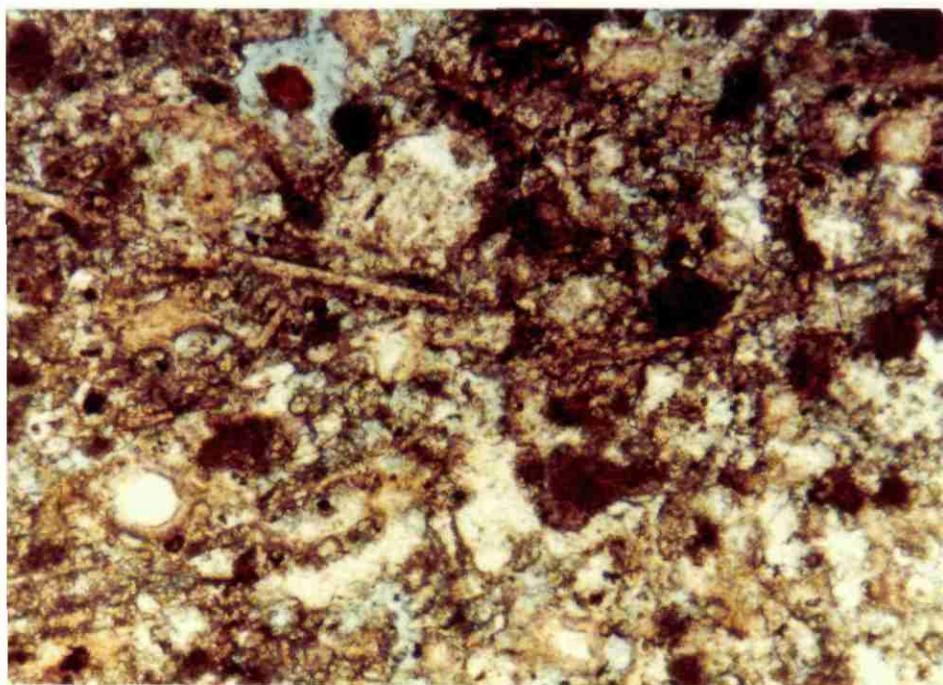




Echantillon 908 A
(x 250)

Lumière naturelle

Microporosité affectant la zone
interne de l'échantillon



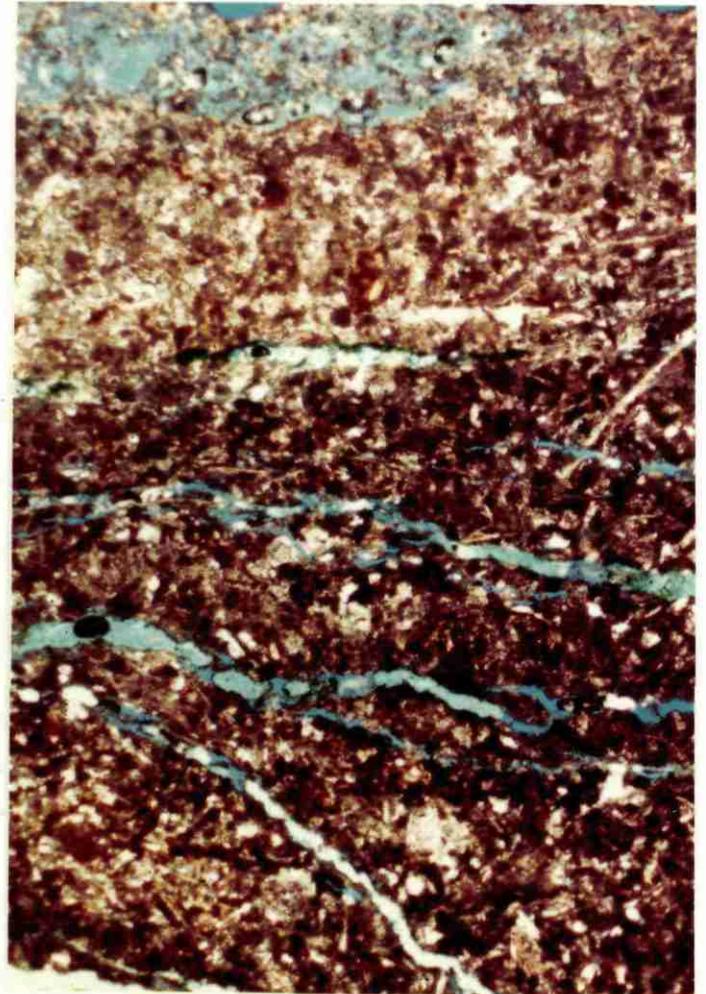
Echantillon 908 A
(x 100)

Lumière naturelle

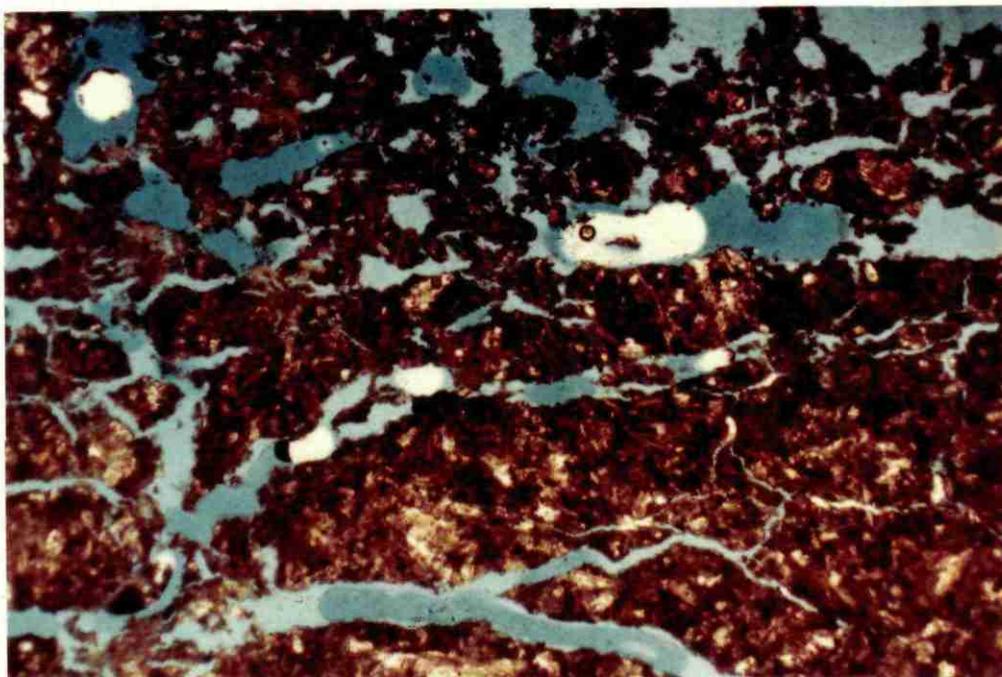
Accentuation de la microporosité



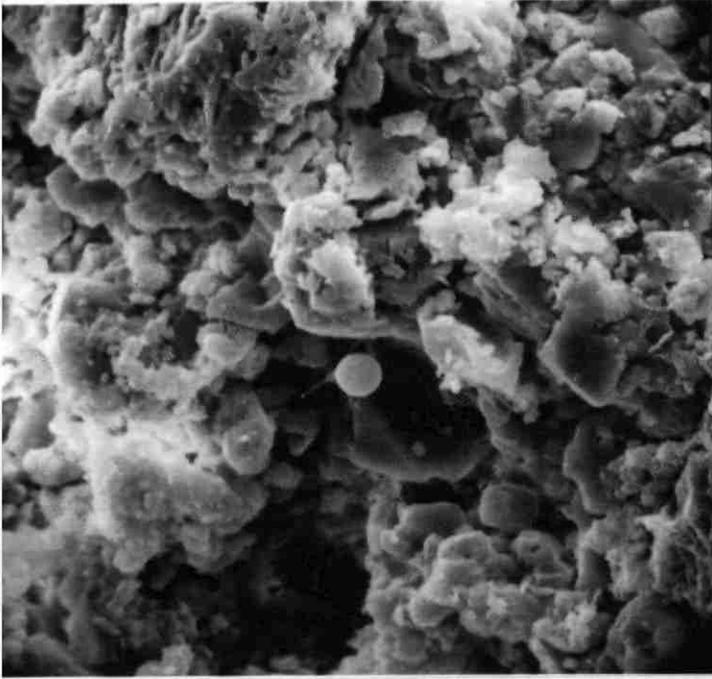
Zone externe fissures ouvertes à développement de gypse provoquant les boursouflures



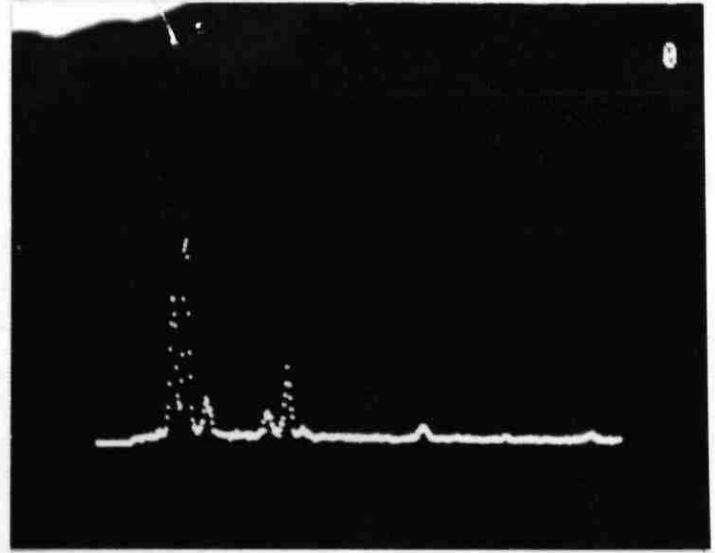
Réseau de fissures sub-parallèles à la face exposée



Intensification de la fissuration provoquant une expansion et la microfragmentation de la roche en surface

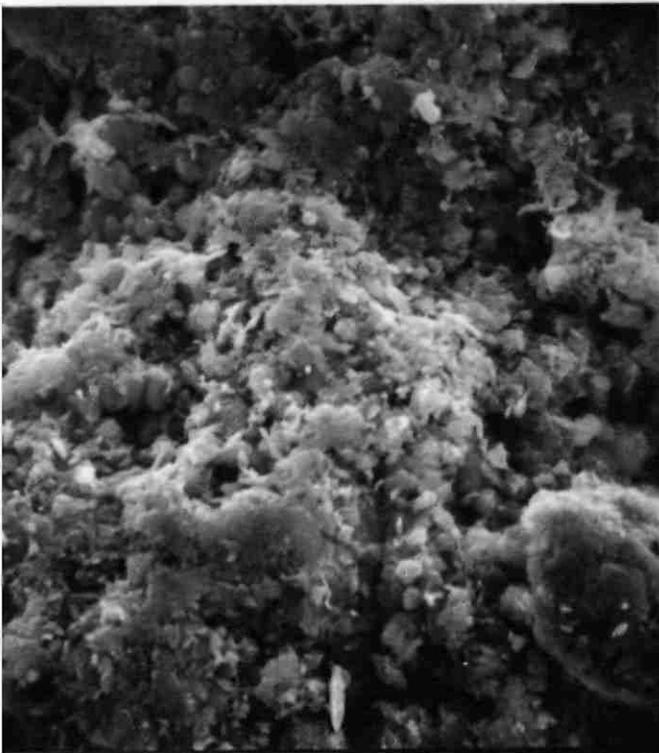


Face externe 8-1-1 x 1000

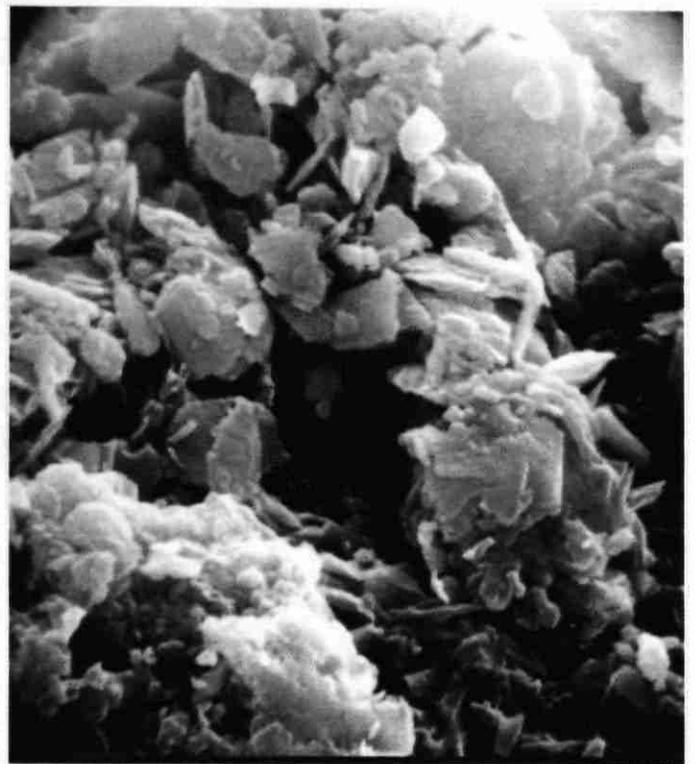


8-1-2

Face externe Eléments majeurs Al, Si
K, Ca, Fe

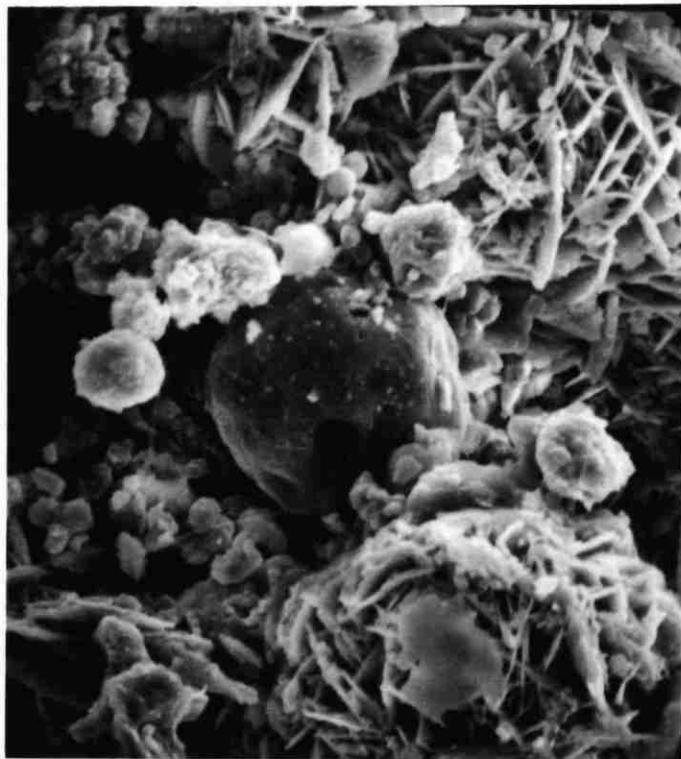


Face interne 8-2-4 x 1000

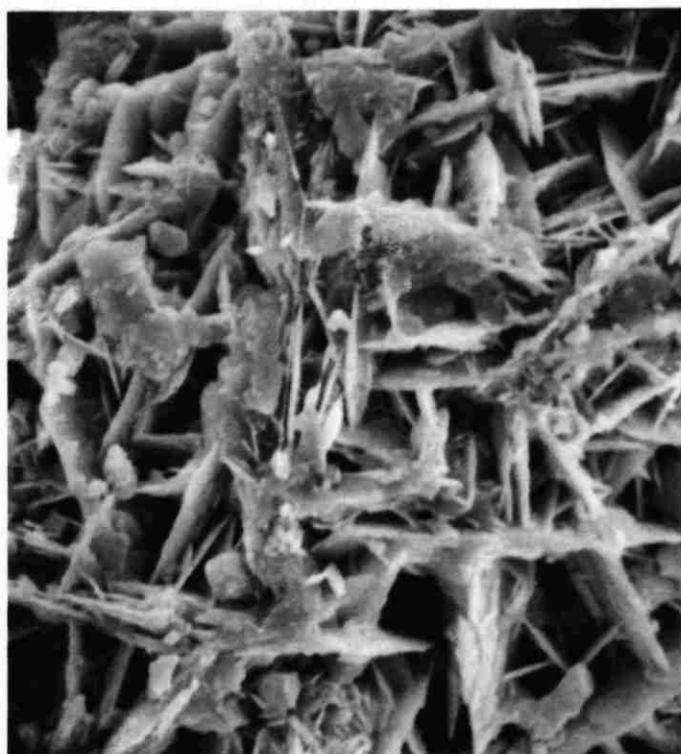


Face interne 8-2-2 x 6000

ECHANTILLON 9

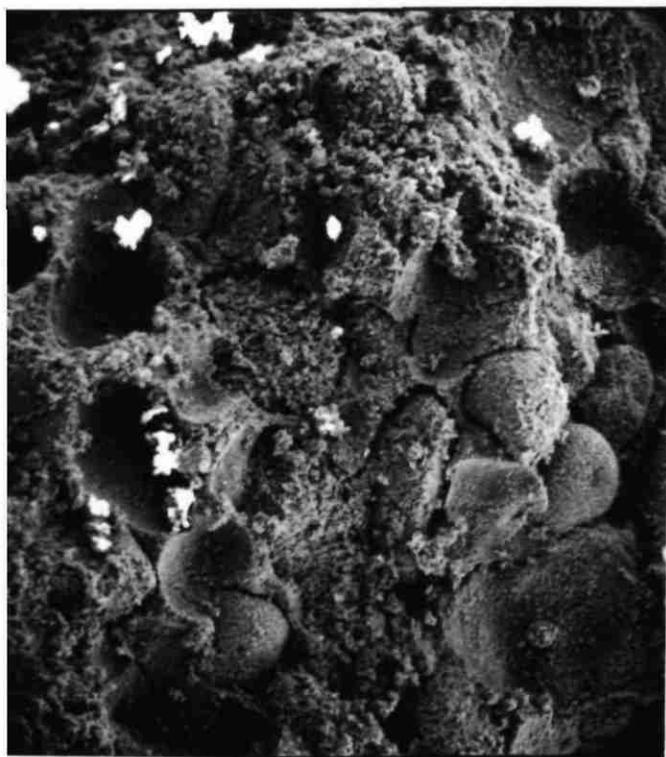


Face externe 9-2-1 x 500
Chimie majeure de la cénosphère S - Si - Al



Face externe 9-2-2 x 1000

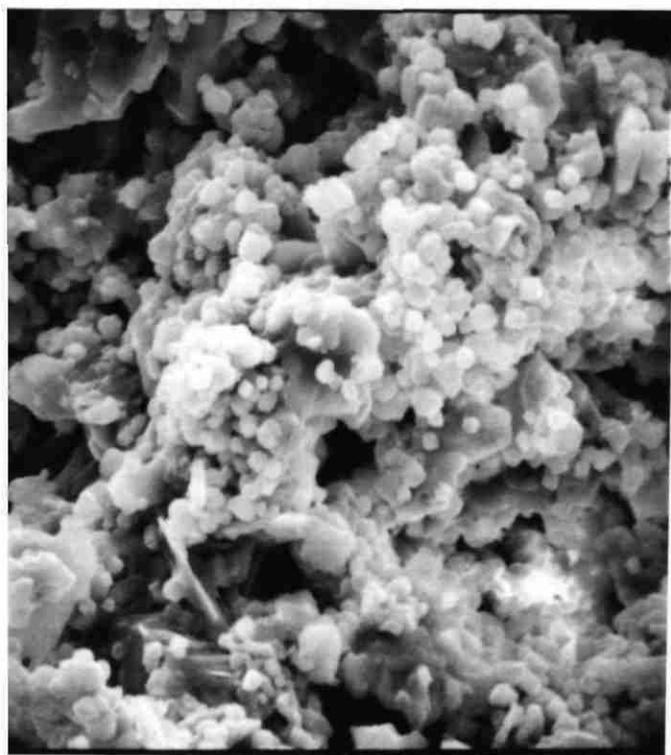
ECHANTILLON 9 (face interne)



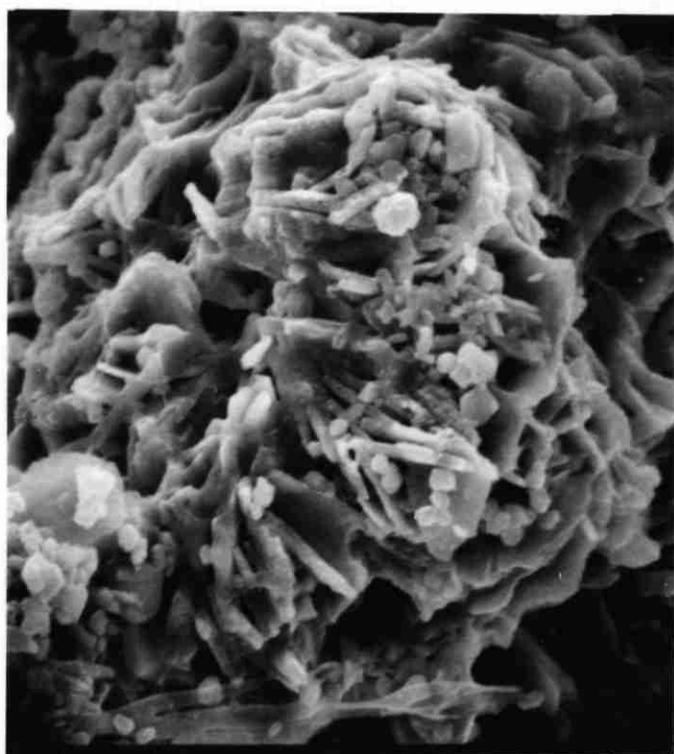
9-1-8 x 50



9-1-6 x 300

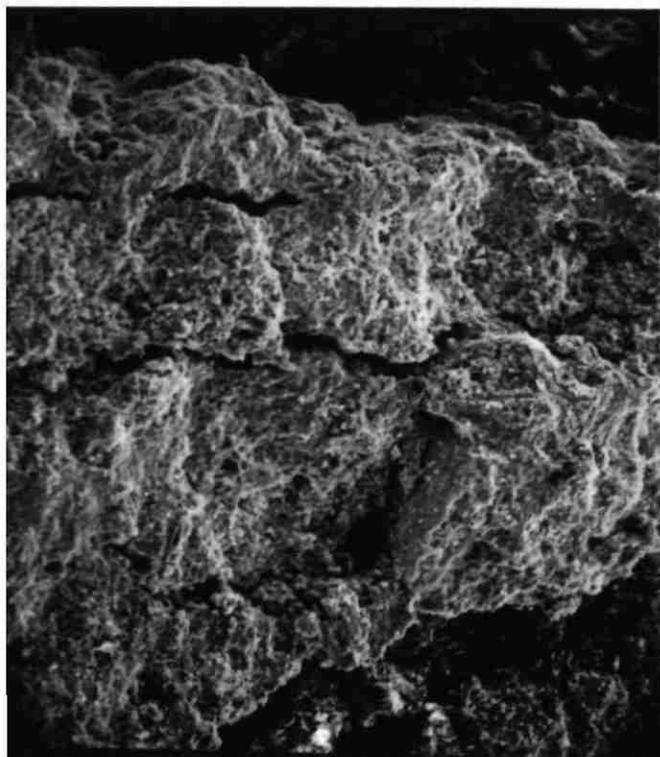


9-1-2 x 1000

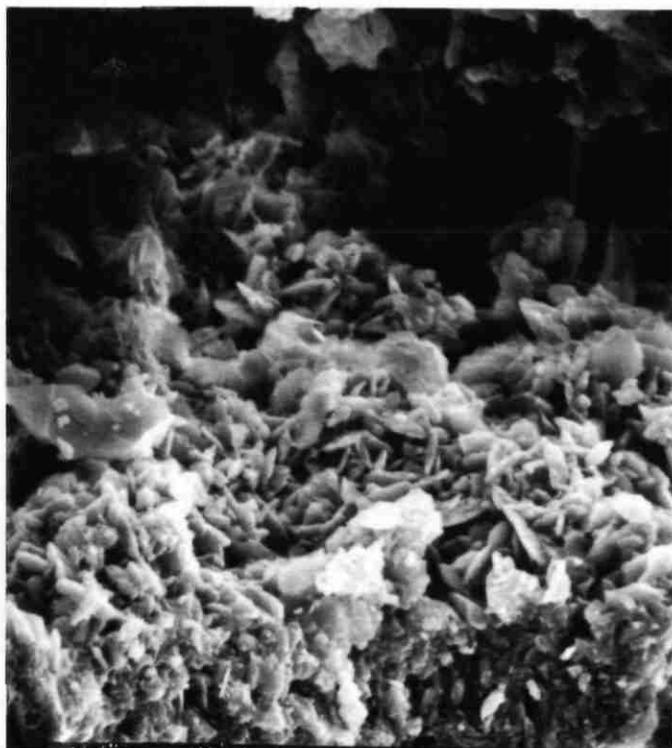


9-1-5 x 1000

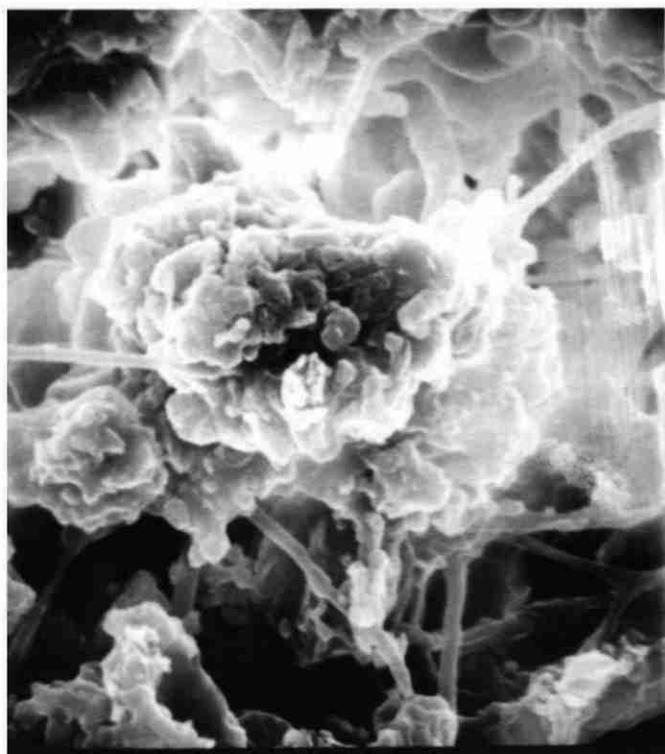
ECHANTILLON 10



10-6 x 50



10-8 x 1000

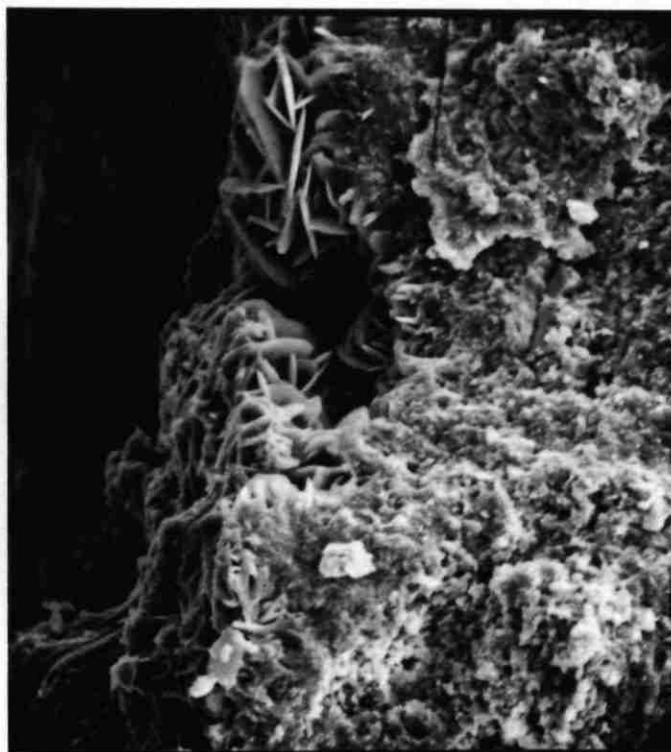


10-12 x 2000



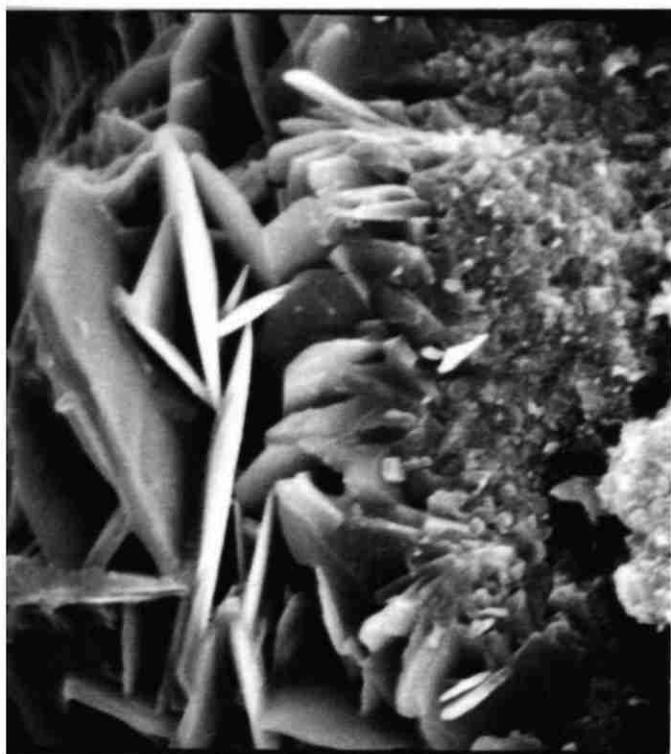
10-13 x 1000

ECHANTILLON 10



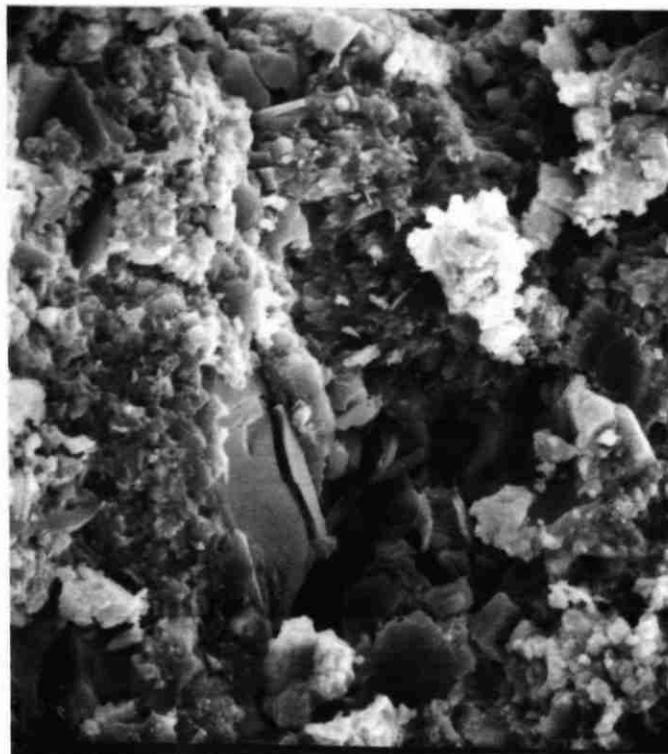
10-3 x 300

Eléments majeurs Si - Ca - S



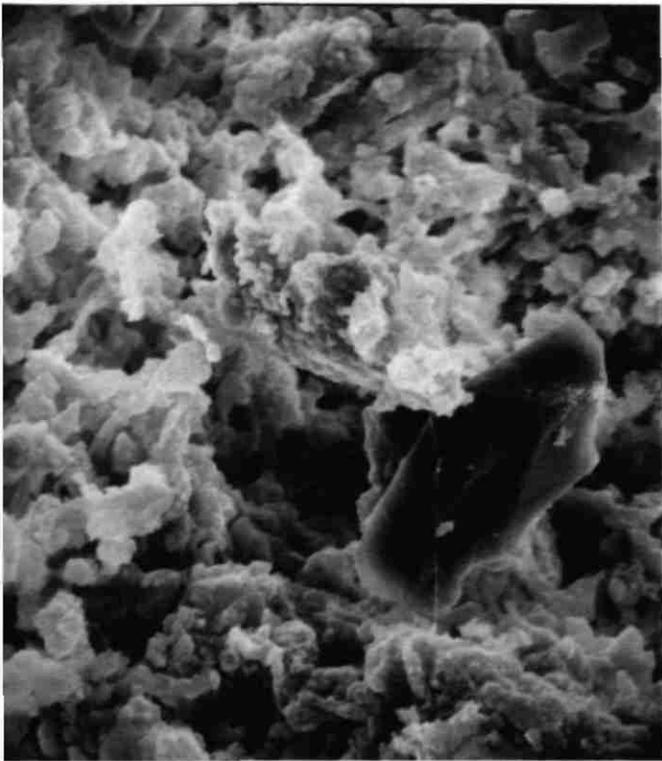
10-4 x 1000

Eléments majeurs S - Ca

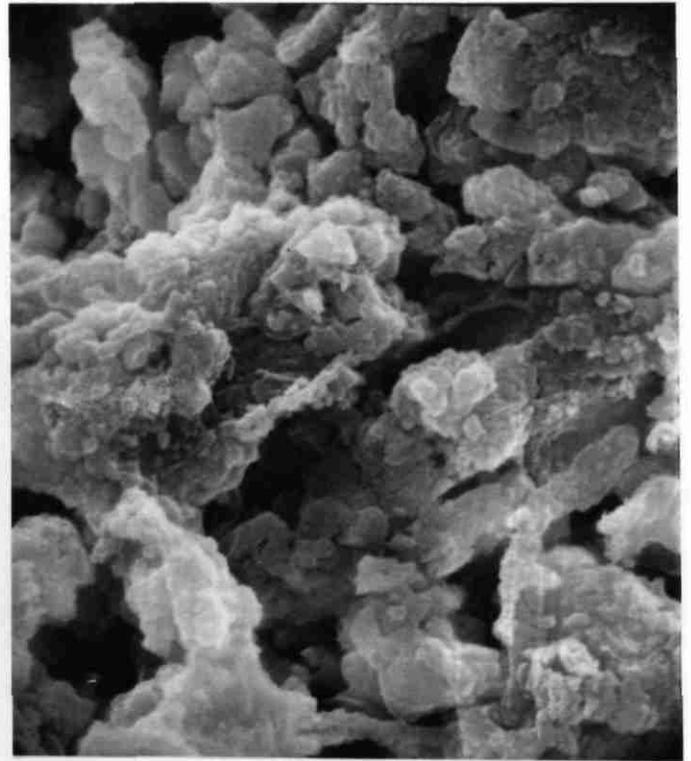


10-5 x 1000

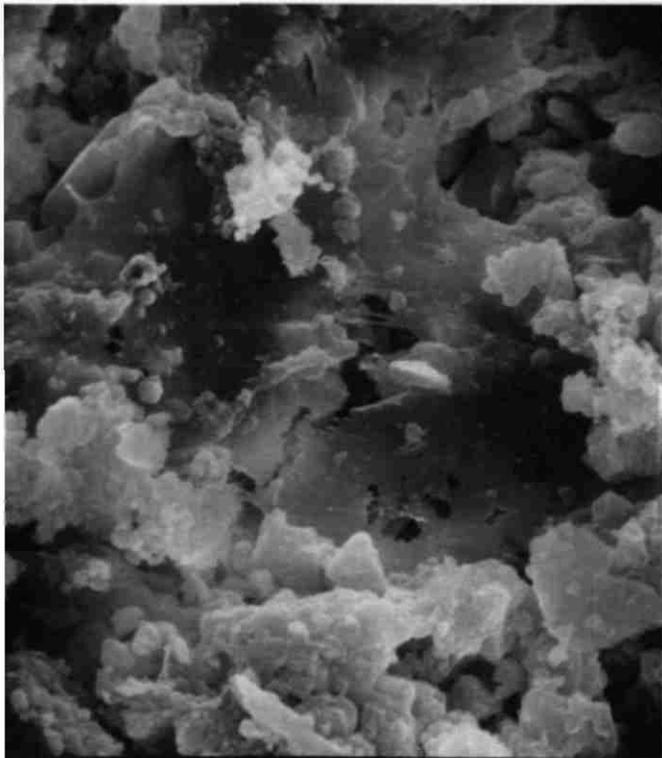
ECHANTILLON 11



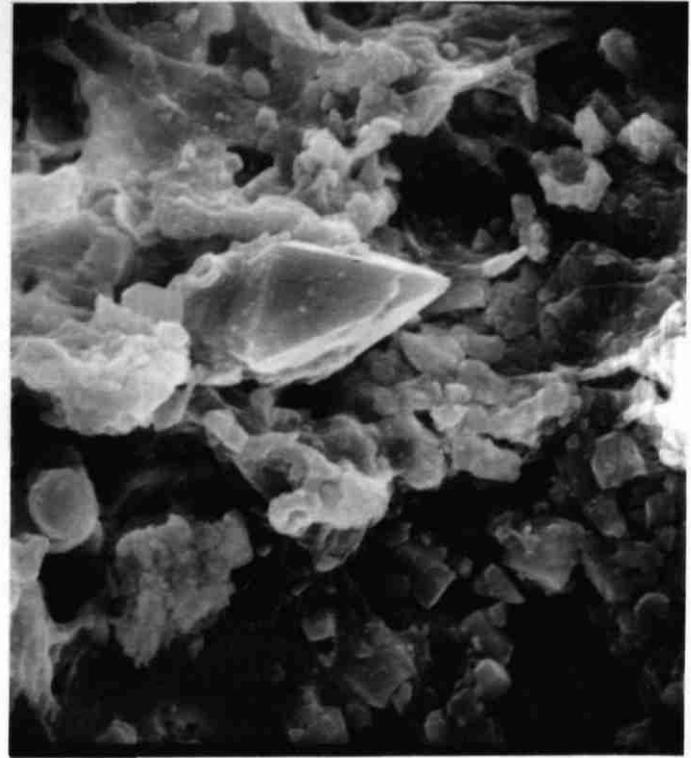
11-1-1 x 1000



11-1-2 x 3000

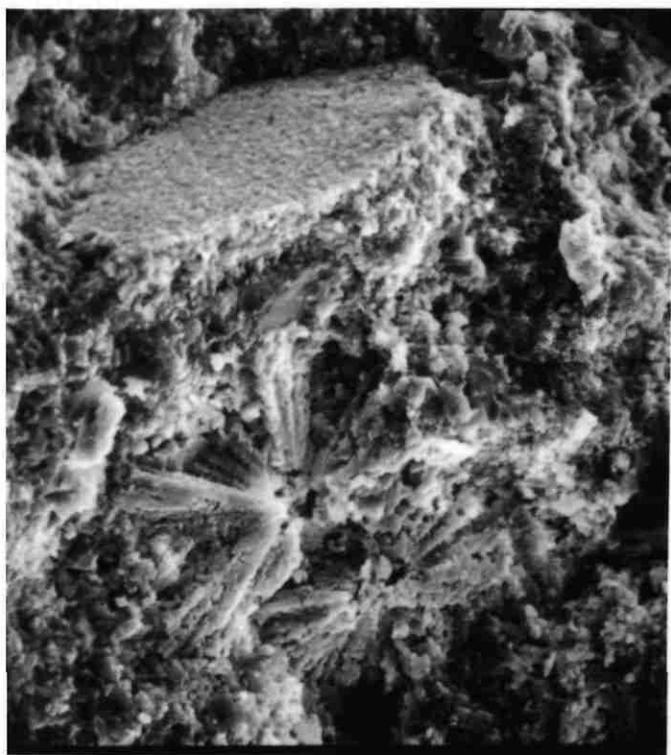


11-1-3 x 2000

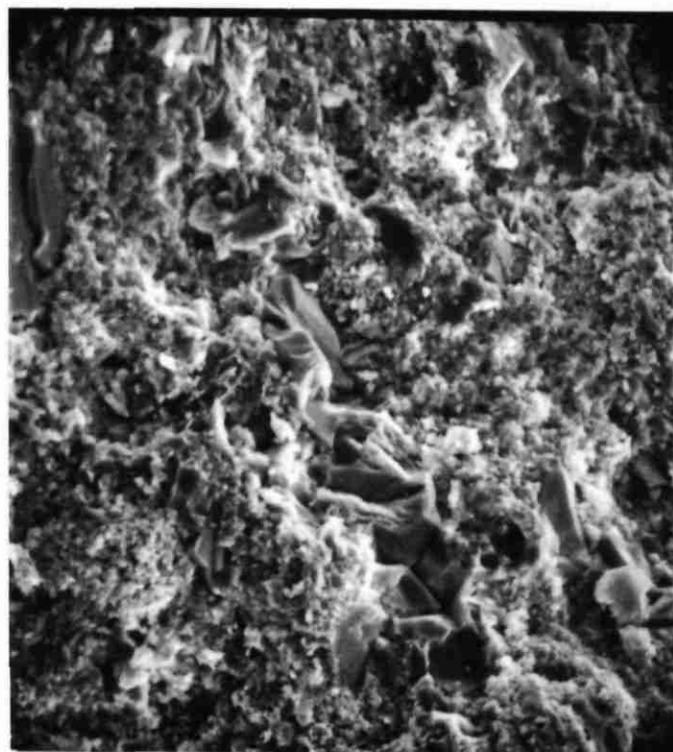


11-1-4 x 2000

ECHANTILLON 11

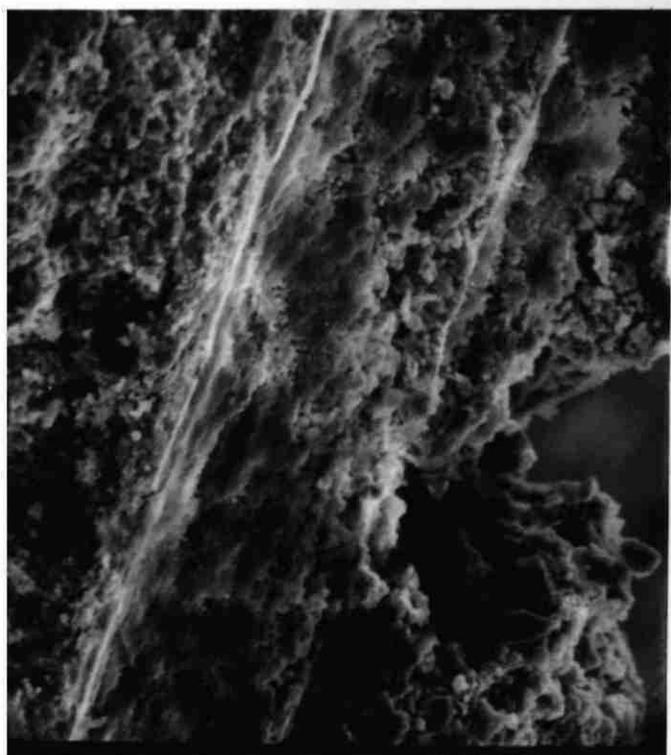


11-2-1 x 600

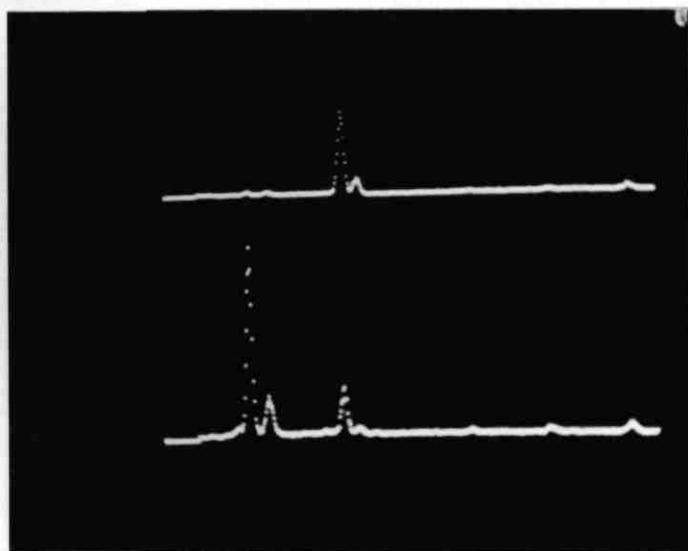


11-2-3 x 300

Face interne

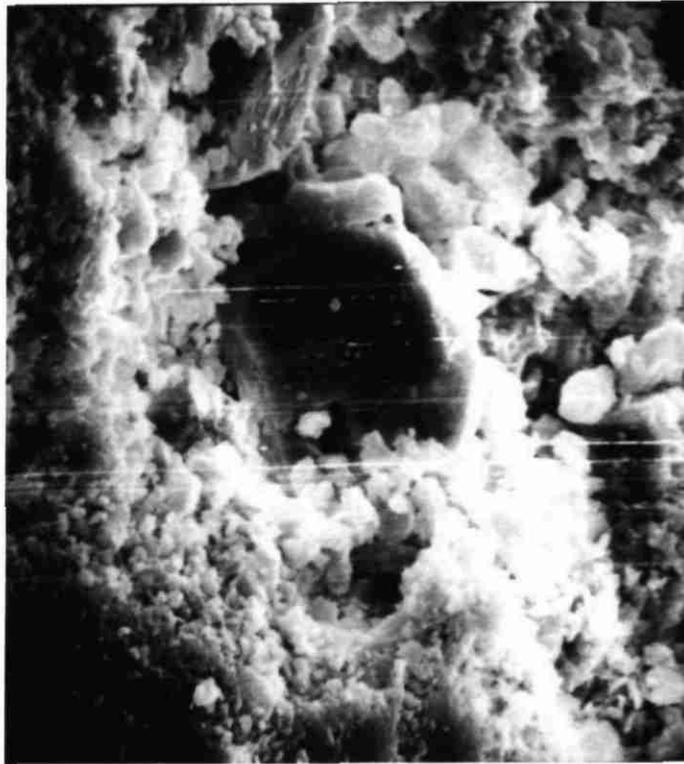


11-2-4 x 300
Coupe



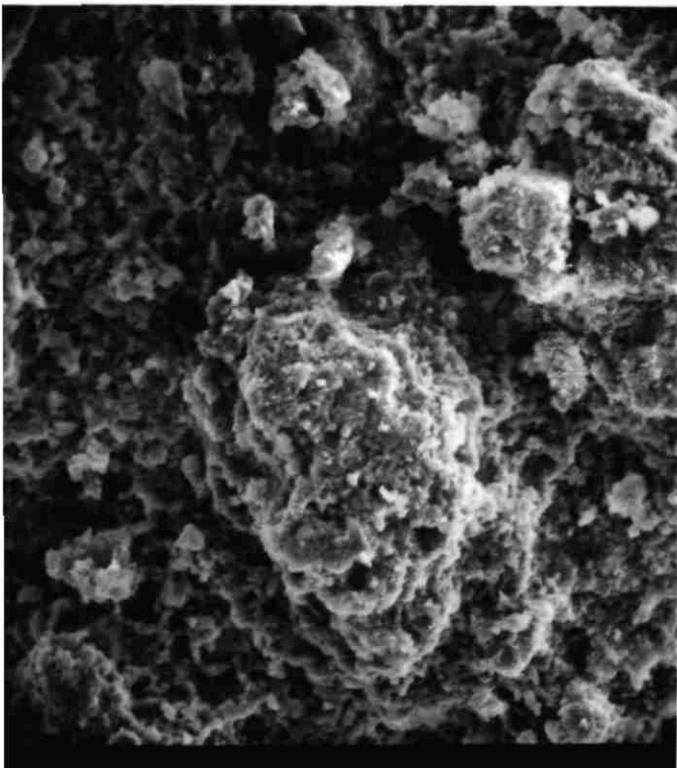
11-2-5 - Si - Ca

ECHANTILLON 12

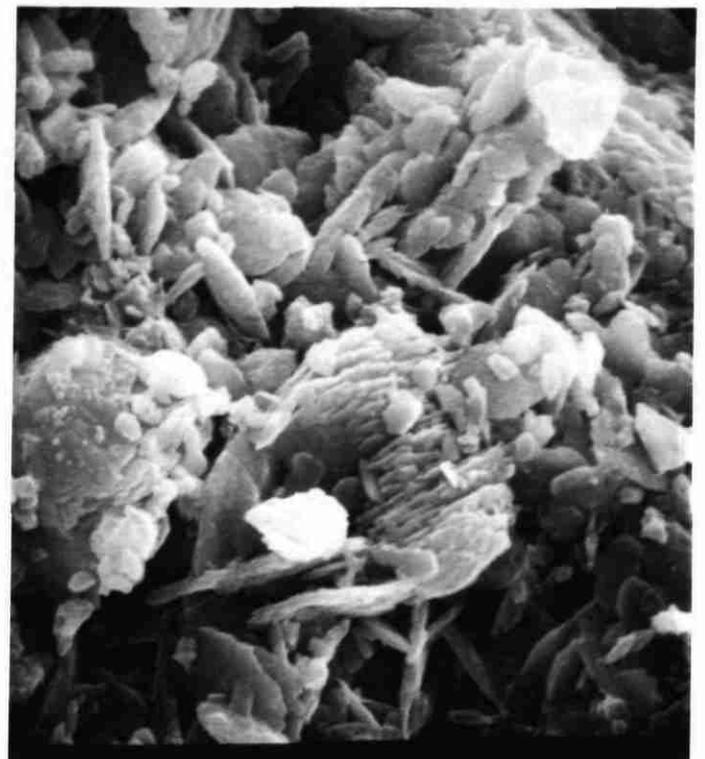


12-1-1 x 1000

Face interne



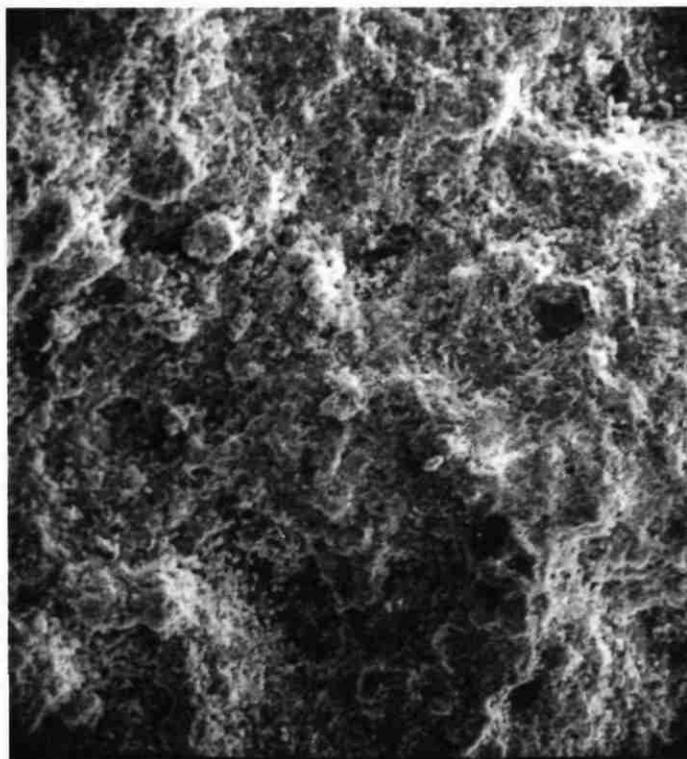
12-2-2 x 300



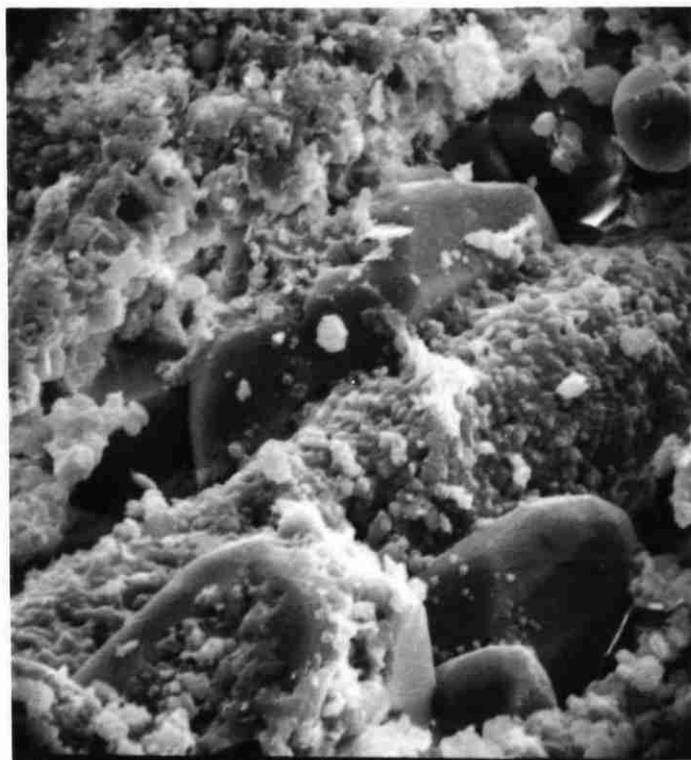
12-2-1

Face externe

ECHANTILLON 13 - Face externe

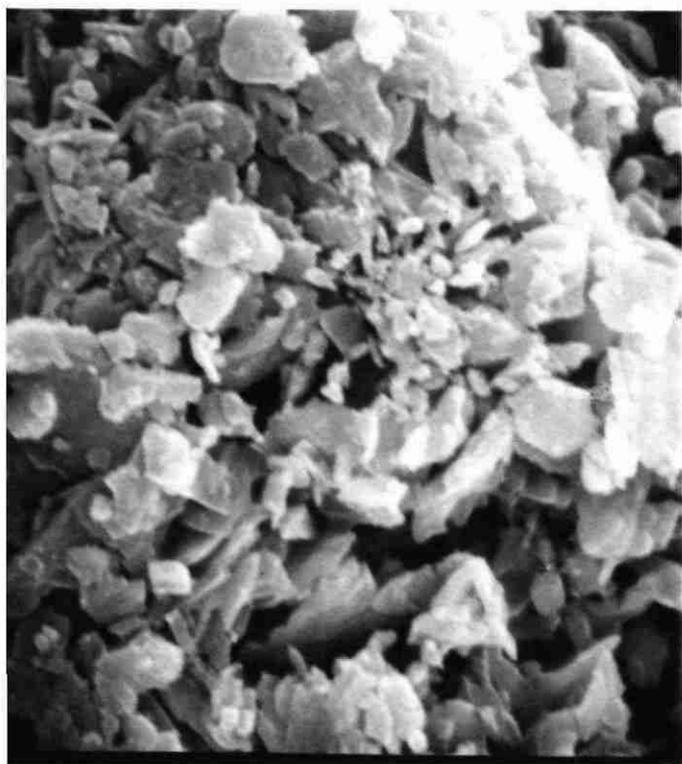


13-2-2 x 100



13-2-1 x 1000

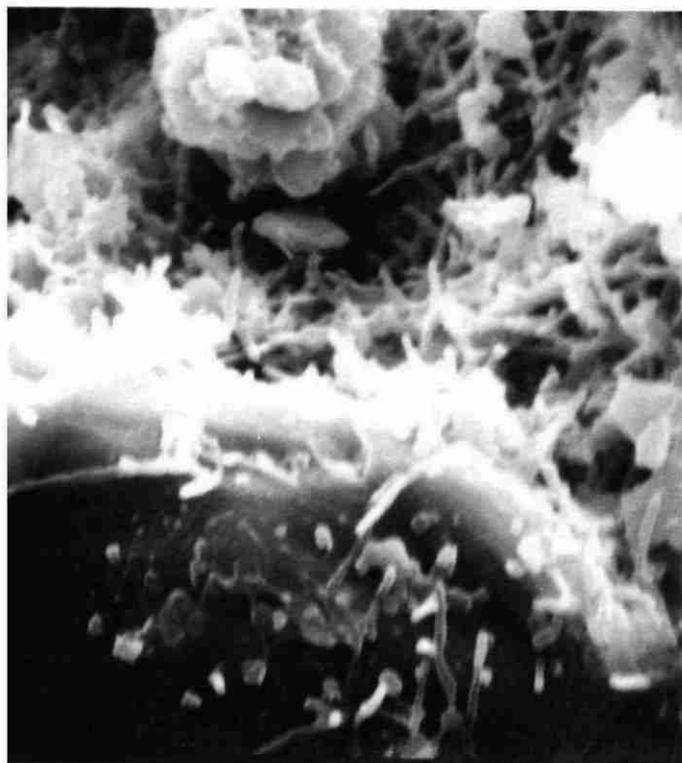
ECHANTILLON 13 - Face interne



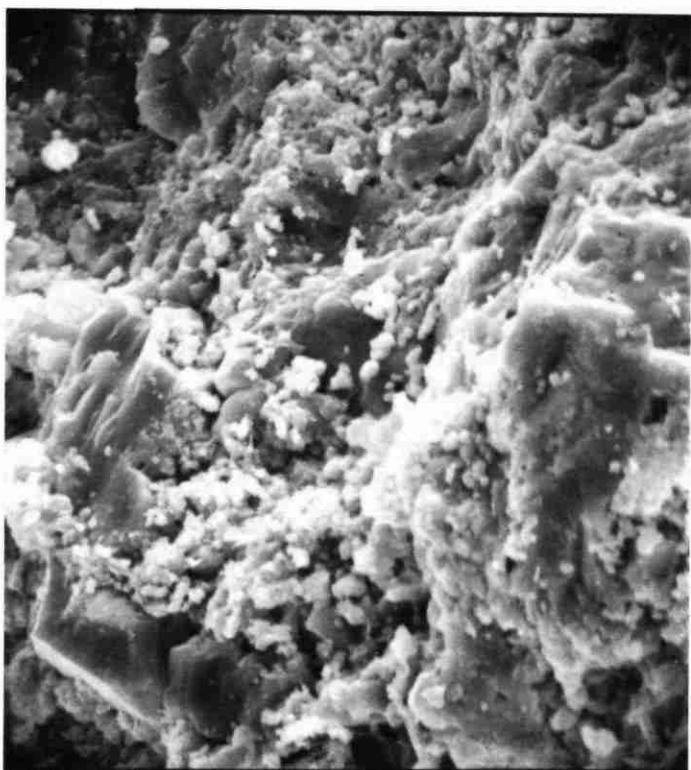
13-1-1 x 100



13-1-2 x 3000

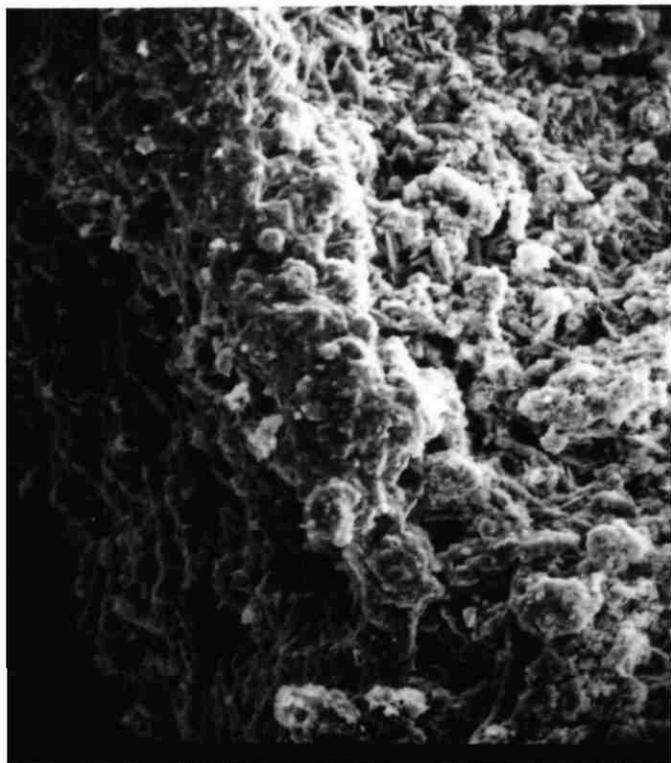


13-1-3 x 3000

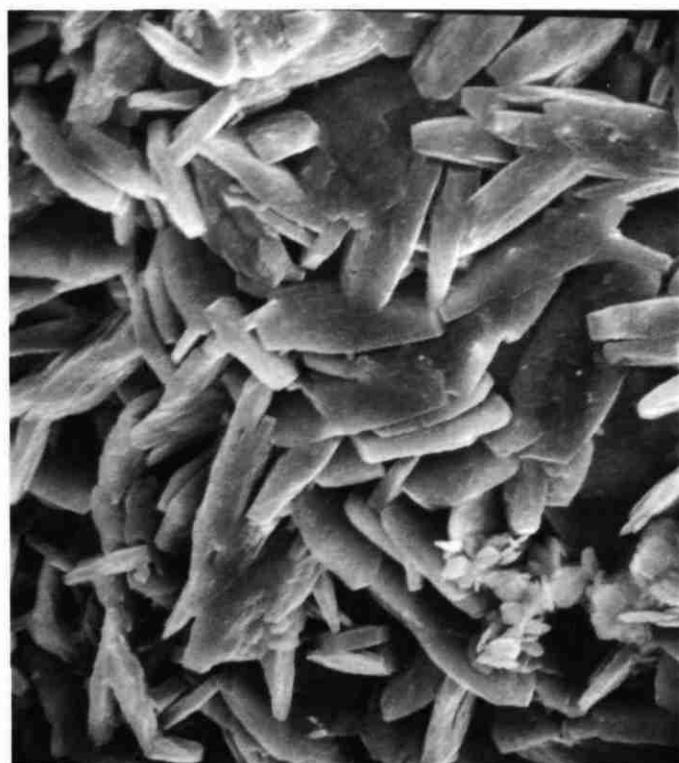


13-1-4 x 1000

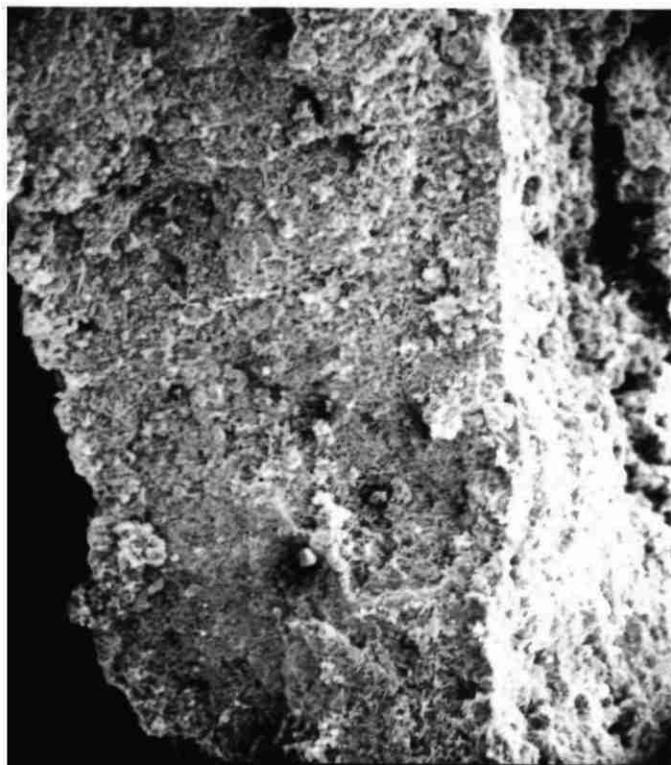
ECHANTILLON 14



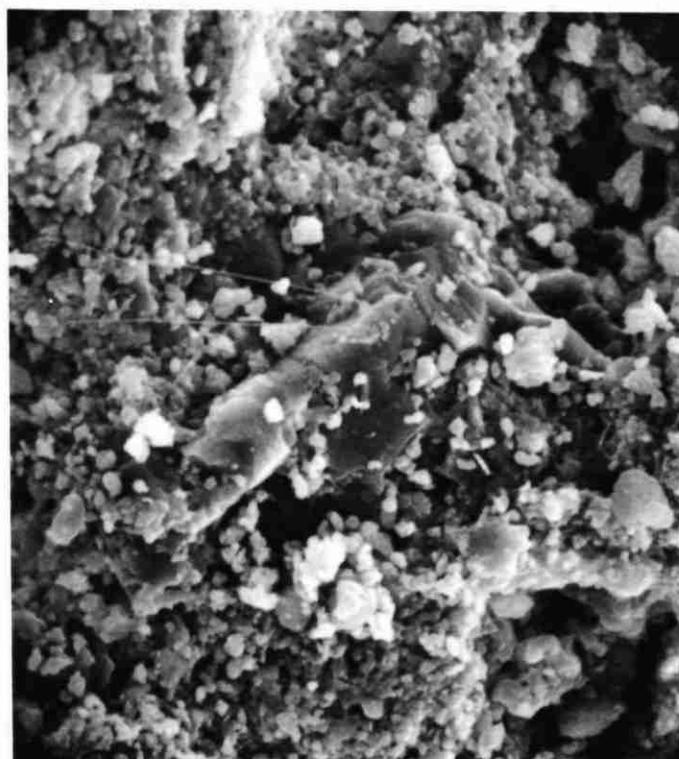
14-2-1 x 50



14-2-3 x 1000
Face interne

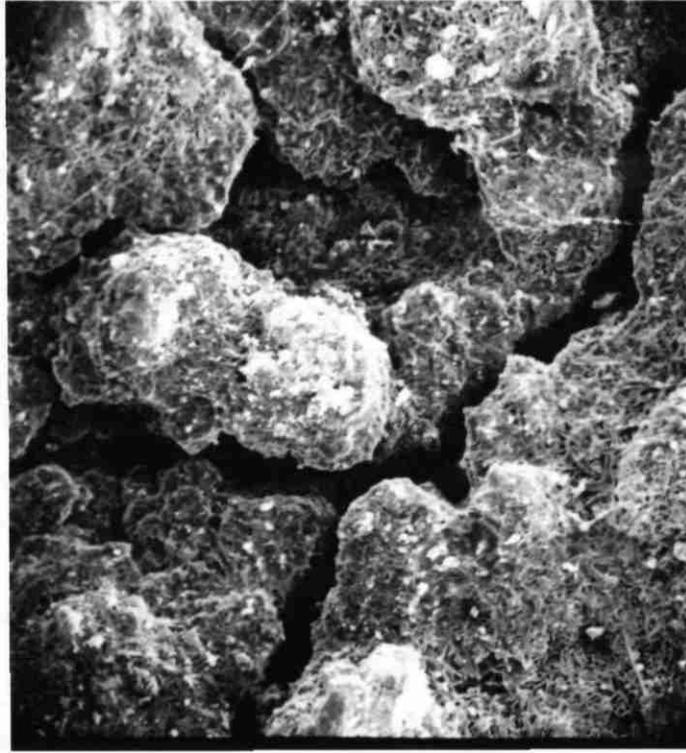


14-2-2 x 50
Coupe

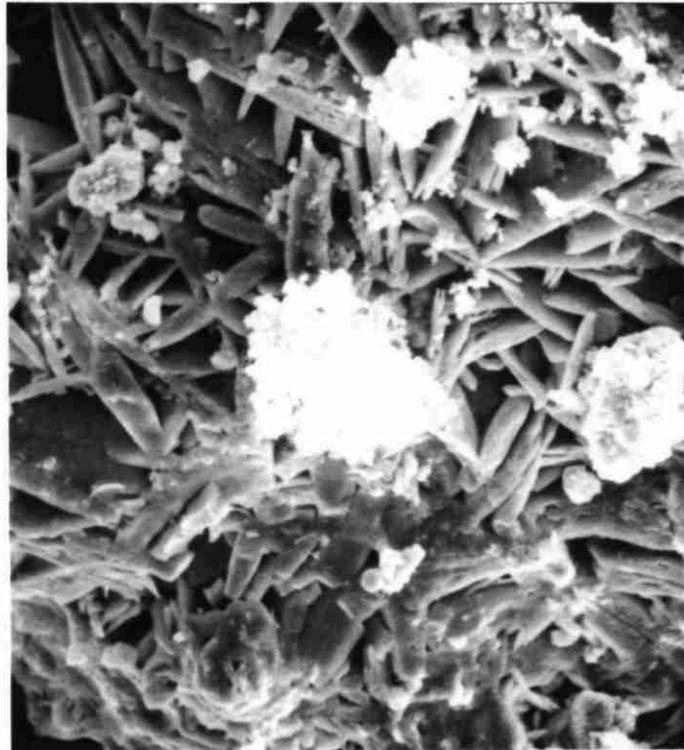


14-2-4 x 1000
Face interne

ECHANTILLON 14 - Face externe

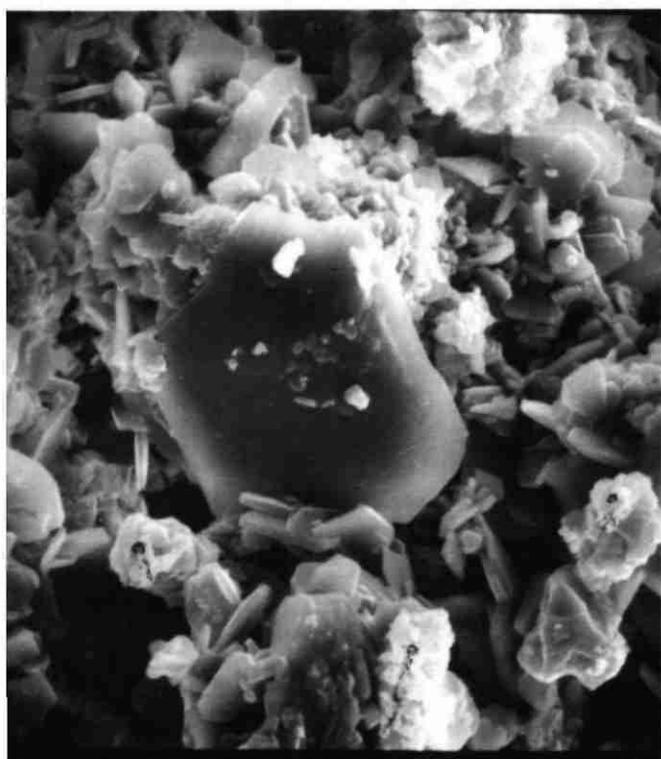


14-1-2 x 50

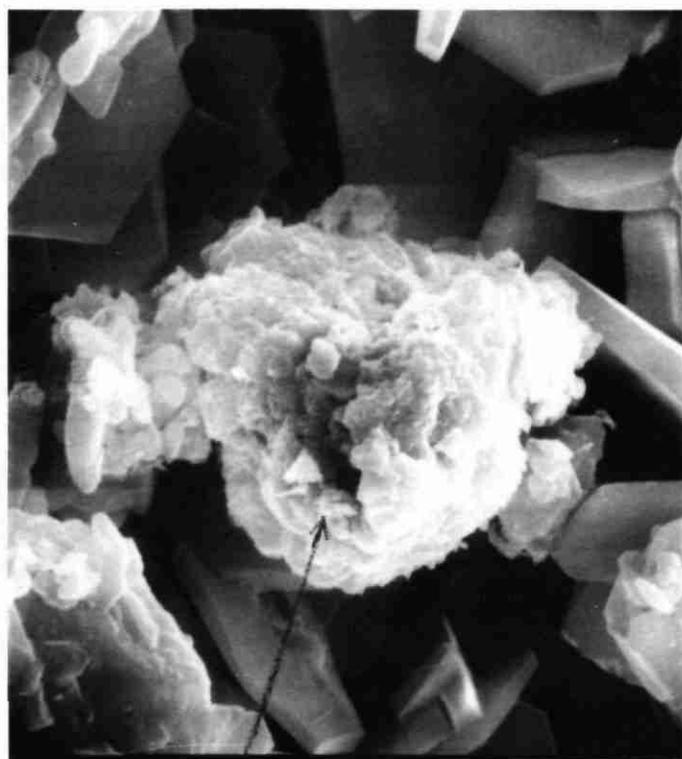


14-1-1 x 400

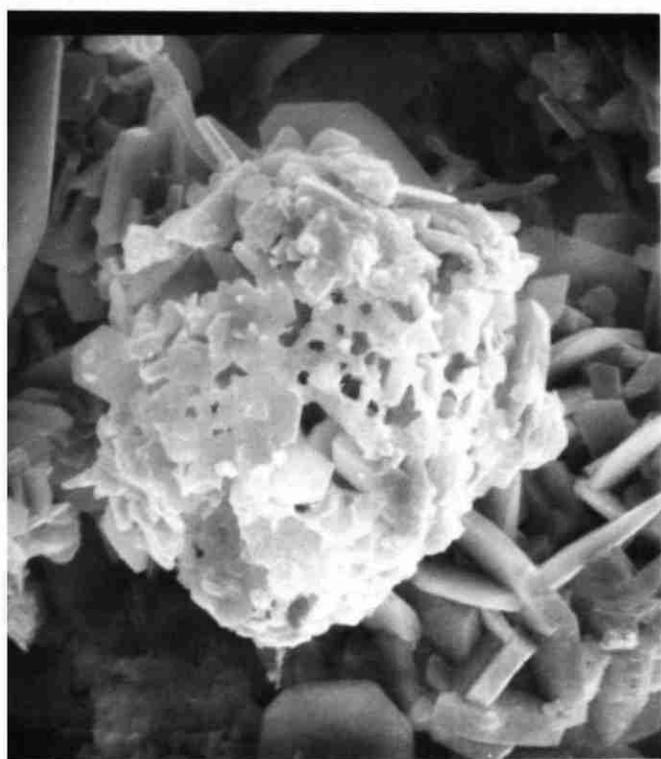
ECHANTILLON 15



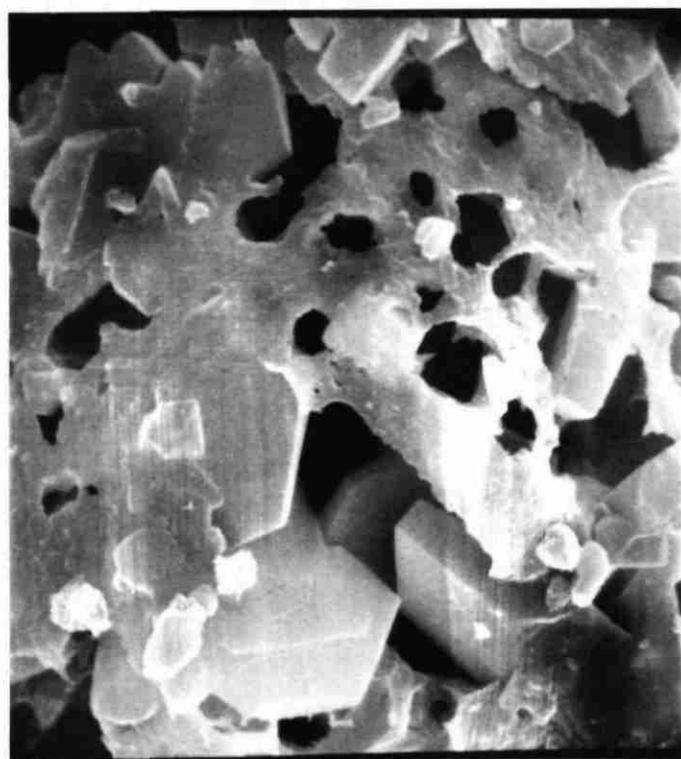
15-2-2 x 1000



15-2-1 x 3000

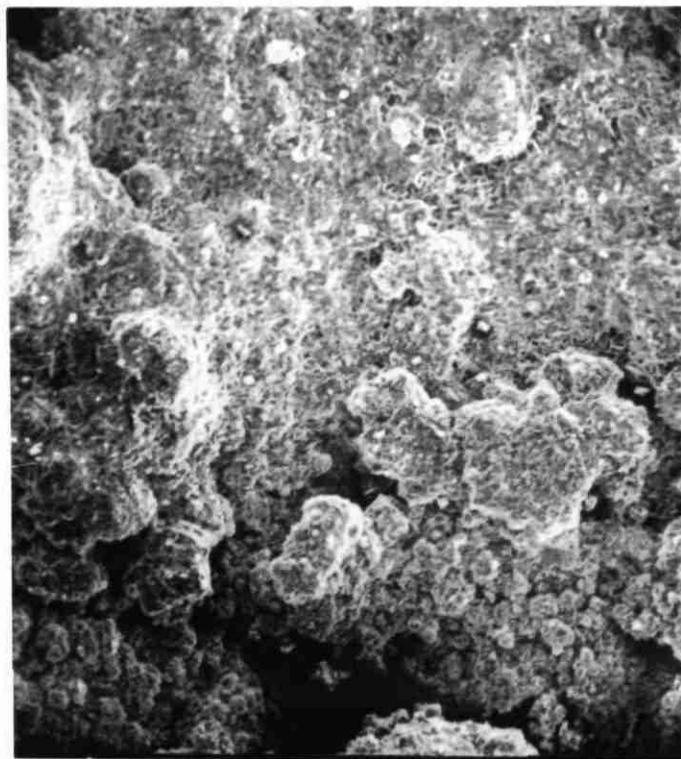


15-2-3 x 1000

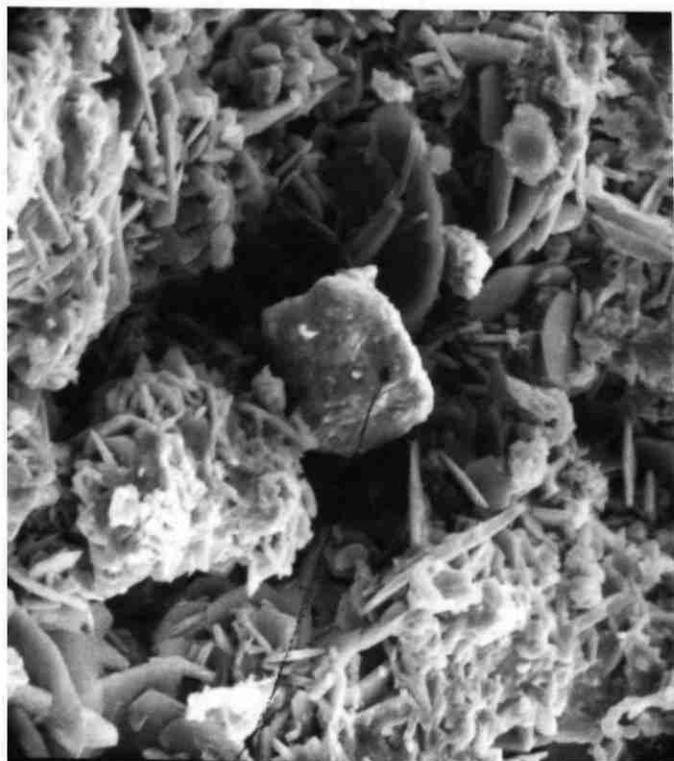


15-2-4 x 3000

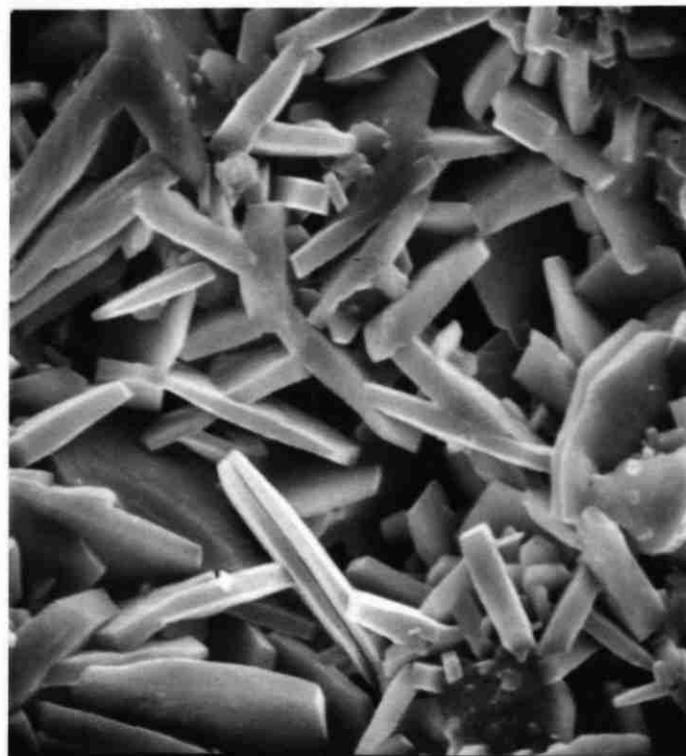
ECHANTILLON 15



15-1-1 x 50
Face externe



15-1-3 x 400
Face externe grain de quartz



15-1-2 x 1000
Face externe