

L'ALTERATION ET LA PRESERVATION DES PIERRES DANS LES MONUMENTS HISTORIQUES

I - INTRODUCTION

Les recherches sur les pierres calcaires se poursuivent au C.E.B.T.P. depuis plus de vingt ans* .

Ces recherches ont été conduites en vue de répondre à des problèmes différents.

Bien que les propriétés considérées dans chaque étude ne soient pas indépendantes, il est possible de distinguer trois domaines d'application distincts :

- 1° - Dans le but de proposer une méthode de classification, basée sur la détermination des propriétés intrinsèques du matériau des essais précis non destructifs ont été mis au point. L'application de cette méthode a été réalisée sur les 150 natures de pierre calcaire les plus utilisées en France actuellement.
- 2° - La récente campagne de ravalement des façades des bâtiments et des monuments de Paris nous a conduits à caractériser la nature de la surface des pierres exposées aux intempéries.
- 3° - Les effets du mouvement de l'eau dans les pierres ont des conséquences les plus importantes sur le comportement du matériau dans le temps. Une étude sur les gélivités des matériaux entreprise depuis plusieurs années, a nécessité la recherche de l'aptitude au mouvement de l'eau dans les pierres en fonction de la morphologie de leur structure.

Ces différentes recherches ont fait l'objet de publications détaillées dans les annales ; ce rapport est établi dans le but d'indiquer les méthodes d'essais utilisées et de montrer l'interprétation possible des résultats obtenus.

* voir bibliographie.

METHODE DE CLASSIFICATION DES PIERRES

Présentation de la méthode proposée.

Parmi les qualités que l'on exige des pierres calcaires et de leur emploi comme matériau de construction, figurent la résistance mécanique, la dureté superficielle et la compacité.

Dans la pratique, en vue de l'utilisation des pierres, se pose le problème de leur classement suivant une échelle s'étendant des plus tendres aux plus dures.

Le but essentiel de cette étude sera donc de pouvoir affecter à chaque nature de pierre un "numéro" qui la classera de la plus tendre à la plus rationnelle d'après ses qualités.

Nous avons donc été conduits à choisir les trois grandeurs physiques mesurables ci-dessous pour déterminer quantitativement les qualités :

- la vitesse de propagation du son ;
- la densité apparente ;
- la dureté superficielle.

Ces trois critères sont étroitement reliés aux propriétés mécaniques exigées ; en effet :

La vitesse de propagation du son est fonction directe des propriétés élastiques et de la résistance mécanique à la compression du matériau ; ce critère présente de plus l'avantage de permettre la détection de fissures ou défauts cachés diminuant l'honnêteté des pierres. Cette mesure est réalisable en carrière ou en œuvre, pour la classification ou le contrôle.

La densité apparente renseigne sur le volume total des pores ; on en déduit la porosité liée elle-même à tous les problèmes de circulation d'eau dans les pores.

La dureté superficielle déterminée par la mesure de la profondeur de la rayure obtenue sur la surface du bloc permet de donner une valeur comparative de la tenue de la roche à l'usure.

Pour une même nature de pierre, l'ordre de la classification obtenue avec chacun de ces critères pris isolément est en général le même, mais la valeur du numéro de classement n'est pas nécessairement la même.

Si donc on utilise le classement moyen des trois critères, il est possible d'obtenir un numéro de classement qui tienne compte des trois qualités.

Le classement ainsi obtenu est en corrélation avec celui qui est obtenu à partir de la notion de difficulté de taille qui conditionne les

prix de règlement, utilisés par la Série centrale des Architectes.

Ceci montre que la nouvelle méthode proposée, basée sur des critères essentiellement physiques, tient implicitement compte des qualités intrinsèques ayant conduit au classement empirique actuellement adopté.

Cette constatation est naturelle, puisqu'une roche plus résistante, plus compacte, plus dure, présente plus de difficultés d'extraction et de taille ; cependant, dans un faible nombre de cas particuliers, il peut y avoir un léger désaccord, en raison de caractères particuliers de la roche.

Une autre raison spéciale nous a conduit à proposer ces trois critères : leur détermination n'implique pas la destruction des éléments essayés, et ce fait permet la multiplication possible du nombre de mesures et l'obtention des valeurs moyennes avec plus de certitude.

D'autre part, ces mesures sont peu dispersées, les conditions des essais étant relativement simples, indépendantes de l'opérateur, la faible dispersion en résultant est presque uniquement due à l'hétérogénéité de l'échantillon.

La valeur de la contrainte de rupture en compression n'a pas été retenue, car au contraire, l'appareillage, les conditions d'essai sont difficiles à reproduire.

Parmi les causes d'erreurs les plus fréquentes, il faut noter : le centrage de l'éprouvette, le parallélisme et la planéité des faces en contact avec les plateaux. La grande dispersion des résultats provenant des conditions des essais, cette détermination ne peut donc donner une caractéristique assez précise des matériaux permettant son utilisation dans un classement. Cependant, comme la résistance à la rupture est une donnée nécessaire à l'utilisateur, nous verrons qu'il est possible d'obtenir à partir du numéro de classement, au moyen des critères non destructifs, une corrélation dans le sens statistique avec la contrainte de compression à la rupture sur cube de 7 cm.

2.2 - Description des méthodes d'essais.

2.21 - Mesures des vitesses de propagation du son :

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le temps qui s'écoule entre le passage d'un ébranlement en deux points distants d'une longueur connue. On obtient ainsi la vitesse de propagation du son à travers l'élément considéré.

On envoie sur un quartz une impulsion électrique, cet émetteur est placé sur une face du cube. Sur la face opposée un capteur à quartz détecte l'arrivée de l'impulsion.

Il ne reste plus qu'à évaluer le temps entre les deux impulsions. L'origine des mesures est déterminée en mettant en contact émetteur et récepteur d'impulsion.

Pour tenir compte de la dispersion des mesures de vitesse du son, il a été réalisé cinq déterminations dans la direction perpendiculaire au lit, et cinq autres dans la direction parallèle au lit.

Les valeurs prises en compte sont les moyennes arithmétiques de ces cinq valeurs : V_{α} pour le sens perpendiculaire au lit et V_{β} pour le sens parallèle au lit.

Les valeurs considérées (vitesses moyennes) sont les moyennes entre les vitesses perpendiculaires et les vitesses parallèles au lit.

Avant chaque mesure, les éprouvettes sont mises à l'étuve à 65° C jusqu'à poids constant.

2.22 - Mesures de la densité apparente.

La densité apparente a été déterminée par la méthode hydrostatique suivant les prescriptions de la norme B. 10.001.

La densité apparente est obtenue par le rapport du poids de l'éprouvette (exprimé en grammes) à son volume apparent (exprimé en centimètres cubes).

Le poids P_1 a été déterminé après dessiccation jusqu'à poids constant suivant les prescriptions de la norme B. 10.001.

Le volume a été déterminé par pesées hydrostatiques de la façon suivante :

Après dessiccation jusqu'à poids constant, les éprouvettes sont placées sous une cloche à vide ayant à sa partie supérieure un orifice qui permet l'introduction de l'eau. On effectue le vide à la trompe à eau que l'on maintient sous une pression d'une atmosphère pendant deux heures de manière à éliminer l'air contenu dans les vides de la pierre. Puis on fait pénétrer l'eau lentement de manière que les éprouvettes restent sous dépression constante ne soient pas totalement immergées avant quinze minutes.

Tout dégagement gazeux ayant cessé, on rétablit la pression atmosphérique et l'on maintient les éprouvettes immergées pendant vingt-quatre heures.

On effectue ensuite une pesée dans l'eau soit P_2 le poids de l'éprouvette immergée. Puis l'éprouvette étant essuyée on détermine le poids P_3 dans l'air de l'éprouvette saturée. On obtient la densité apparente en effectuant les calculs suivants :

$$\text{Volume des vides (cm}^3\text{)} = P_3 \text{ (g)} - P_1 \text{ (g)}$$

$$\text{Volume absolu (cm}^3\text{)} = P_1 \text{ (g)} - P_2 \text{ (g)}$$

$$\text{densité apparente} = \frac{\text{Poids dans l'air}}{\text{Volume apparent}}$$

$$\text{densité apparente} = \frac{\text{Poids dans l'air}}{\text{volume absolu} + \text{volume des vides}}$$

$$\text{densité apparente} = \frac{P_1}{(P_1 - P_2) + (P_3 - P_1)} = \frac{P_1}{P_3 - P_2}$$

2.23 - Mesure de la dureté superficielle (largeur de la rayure)

L'essai est effectué sur des cubes desséchés jusqu'à poids constant. La face d'essai est régularisée par rodage.

L'appareil utilisé est le scléromètre de Martens. Il se compose d'un petit chariot reposant sur deux roues et sur une pointe en acier traité.

Le chariot est chargé avec un poids de 3 kg, une poignée permet de tirer le chariot qui roule sur les deux roues et raye avec la pointe en acier la surface sur laquelle il se déplace. La partie à rayer est au préalable pochée au noir. Le contraste avec le ton clair de la pierre facilite la lecture. On réalise une rayure d'environ 6 cm de longueur dans la direction perpendiculaire au lit de carrière. Les rayures sont effectuées sur deux faces de chaque pierre (cinq par face). On lit les mesures de largeur d'une rayure tous les cinq millimètres. Ces lectures sont faites avec une lunette grossissante qui permet d'apprécier le 1/10 de millimètre.

Il y a donc dix lectures de largeur par rayure et cent lectures par pierre. Le résultat pris en compte est la médiane de ces cent lectures.

2.3 - Applications de la méthode.

Nous avons étudié la corrélation expérimentale entre les critères de mesures adoptés.

Nous avons observé que chaque variation d'un des trois critères entraîne la variation dans le même sens d'un des 2 autres.

A titre d'exemple, nous présentons sur la figure 1 la variation de la vitesse du son et de la résistance en compression.

Nous avons établi, par une étude statistique, qu'il était possible de déduire la résistance préalable d'une nature de pierre à partir de la connaissance de la vitesse de propagation du son.

De cette manière, on peut connaître la contrainte limite d'utilisation d'un matériau, à 10 % près, sans avoir à la détruire. Cette détermination peut être effectuée en carrière, sur un édifice, sans altérer le bloc considéré.

II - LES PROPRIETES DU CALCIN DES PIERRES CALCAIRES

3.1 - Généralités.

Le nettoyage des édifices et des monuments de Paris est à effectuer sur des pierres calcaires, conservées à l'extérieur depuis de nombreuses années ; aussi il est vraisemblable d'admettre que ces blocs sont recouverts de calcin, et selon la tradition ce "calcin protecteur" doit être respecté pour sauvegarder la longévité de la pierre.

Dans la littérature, le nombre d'analyses à partir de prélèvements systématiques permettant de caractériser la nature physique et chimique du calcin, est très limité.

Cette raison nous a conduit à déterminer par des mesures physiques et chimiques, les propriétés de cette pellicule. Dans les différents articles, les auteurs tentent d'expliquer la formation du calcin, sans connaître exactement la nature de cette peau. Deux explications sont les plus fréquentes :

1° - Après extraction de carrière, une pierre placée à l'air se recouvre peu à peu d'une couche dure appelée calcin.

2° - Sous l'action dissolvante des eaux de pluie très pures, acidifiées par le CO_2 ou le SO_2 de l'air, il se forme en surface des sels (carbonates ou sulfates).

Il semble qu'il ne pourra être répondu à ces questions que lorsque les propriétés du calcin seront déterminées. Il est vraisemblable que l'action des pollutions atmosphériques intervient et qu'en atmosphère rurale, la composition de cette peau sera différente de celle des atmosphères urbaines.

Dans ce premier stade, l'objet étant principalement de chercher les possibilités de nettoyage les mieux appropriées, l'étude du calcin a été effectuée sur des pierres saines, c'est-à-dire sans altération, en particulier l'adhérence du calcin à la masse était parfaite.

Les pierres prélevées en atmosphère urbaine, ont subi l'action des fumées et des pollutions, c'est en général l'état des édifices qui sont recouverts de "crasse" et sont à nettoyer.

3.2 - Propriétés physiques du calcin.

3.21 - La dureté superficielle :

L'un des arguments qui milite le plus en faveur de l'utilisation des pierres calcaires en parement exposé, est la possibilité d'auto-protection que lui confère le calcin.

La différence de difficulté de taille rencontrée par les tailleurs de pierres, suivant la durée d'exposition à l'air après extraction de la carrière a été de nombreuses fois signalée. Cependant, il n'était guère possible de savoir si les pierres étaient plus difficiles à tailler parce qu'elles avaient séché, c'est-à-dire par suite d'une perte d'eau globale, ou bien par suite d'un dépôt en surface qui rend le parement plus dur.

Dans le présent rapport, nous n'aborderons pas la question du bloc ayant durci en carrière, mais le cas du bloc de pierre en parement exposé.

Afin de caractériser par des chiffres, quelles valeurs nous devrions attribuer à la dureté du calcin, nous avons procédé à des essais de dureté superficielle, en effectuant des mesures de largeur de rayure.

Pour chaque prélèvement, les essais de dureté ont été effectués en surface sur le calcin, et sur échantillon prélevé dans la masse du même bloc de pierre.

Sur la figure 2, nous avons porté les différentes largeurs de rayures obtenues pour trois natures de pierre :

- Tendre
- 1/2 ferme
- Ferme

La différence entre la dureté du calcin et la dureté du cœur de la pierre, est très nette :

- pour la pierre tendre, la différence est de 50 %
- pour la pierre 1/2 ferme, cette différence est de 30 %
- et pour la pierre ferme, elle n'est plus que de 10 %

Ces résultats confirment que la surface de calcin des pierres, surtout pour les pierres très poreuses, est beaucoup plus dure à la rayure que la partie interne de la pierre.

3.22 - Densité du calcin :

Comme l'exposition des pierres pendant une longue durée provoque une modification de la dureté, donc de la structure, il a paru intéressant de chercher à évaluer la valeur de cette transformation dans l'épaisseur de la pierre à partir de la surface.

La mise au point récente par M. LACHAUD, Ingénieur au C.E.B.T.P., d'un appareillage et d'une méthode de mesure de la densité des matériaux par tranche de très faible épaisseur, nous a permis de mettre en évidence l'augmentation de la densité de la pellicule de calcin.

L'appareillage est présenté sur le schéma 3.

Le faisceau émis par la source radio-active est collimaté par des fentes de 0,7 mm de largeur.

La pierre à expérimenter est présentée dans l'entrefer et soumise par tranches de faible épaisseur au rayonnement de la source.

Les mesures ont été effectuées aux différentes profondeurs suivantes par rapport à la surface du calcin :
1 - 2 - 3 mm jusqu'à 50 mm.

Pour chaque nature de calcin, deux profils de densité, dans deux directions perpendiculaires ont été étudiés.

Les deux profils montrent une concordance suffisante, ce qui permet d'accorder une signification physique à leur moyenne.

L'interprétation des résultats doit être effectuée en considérant que par cette méthode le volume pris en considération pour chaque mesure, est de 1 cm^3 ; en conséquence, à cette échelle, l'hétérogénéité locale du matériau affecte d'une manière sensible le résultat.

Sur la figure 4, nous avons porté les résultats obtenus, en ordonnées les densités de chaque tranche de pierre, et en abscisses, la profondeur par rapport à la surface.

Sur ce graphique nous voyons que pour la pierre O la densité moyenne au coeur de la pierre est de 1,75, elle atteint 2,1 en surface, l'augmentation est donc très importante.

Par contre, pour les autres natures de pierre, l'augmentation de densité en surface est nettement moins marquée.

Suivant la porosité des pierres, l'orientation d'exposition, l'augmentation de densité en surface varie.

Pour les pierres tendres, l'accroissement de densité peut atteindre 20 %.

Pour les pierres 1/2 ferme, cet accroissement n'est que de 5 à 10 %, tandis que pour les pierres fermes, l'augmentation de densité varie de 1 à 5 %.

En général, cette variation est visible dans les premiers millimètres à partir de la surface.

3.23 - Perméabilité du calcin à l'eau.

L'imperméabilité à l'eau est une qualité primordiale exigée des murs en pierre, destinés à rester sans enduit. Il importe de savoir si le calcin est étanche ou bien perméable, nous avons donc étudié la perméabilité du calcin à l'eau.

Le but des essais est de déterminer la perméabilité à l'eau, d'une part d'un échantillon de pierre prélevé à la surface d'un bloc,

et d'autre part, à l'intérieur de ce bloc, pour effectuer la comparaison.

Les essais ont été réalisés après nettoyage à l'eau de la surface de calcin recouverte de crasse.

Ils ont été effectués sur des cubes de 7 cm d'arête qui sont au préalable desséchés jusqu'à poids constant dans une étuve maintenue à 80°C . Au milieu de la face supérieure, on scelle verticalement par collage, un tube en verre. Cette face est ensuite enduite de paraffine, afin d'éviter l'évaporation.

On doit déterminer la quantité d'eau qui pénètre en fonction du temps. A intervalle de temps régulier, on ajoute une quantité d'eau connue pour maintenir le niveau constant.

Les résultats des essais sont présentés sur le graphique 5.

En abscisses nous avons porté la durée de l'essai (en mm) et en ordonnée la quantité d'eau qui s'écoule (en cm^3 par cm^2).

Deux natures de pierres ont été essayées :

- une pierre dont la porosité est de 31 %
- une pierre plus dure, de porosité 26 %

On remarque très nettement l'influence du calcin sur la perméabilité à l'eau.

- sur la pierre la plus poreuse, le débit sur la partie interne tombe de $2 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{h}$ à $0,7 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{h}$ sur le calcin, soit une diminution de perméabilité de 60 %.

- sur l'autre nature de pierre, le débit sur la partie interne, passe de $1,5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{h}$ à $0,7 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{h}$ sur le calcin, soit une diminution de perméabilité de 50 %.

On observe, ce qui est normal, que sans calcin, la perméabilité est plus forte pour la pierre la plus poreuse, tandis que sur la surface recouverte de calcin la porosité naturelle de la pierre ne semble pas avoir d'influence.

L'amélioration de l'imperméabilité due à la présence du calcin est plus marquée sur la pierre tendre.

Il est intéressant de noter que le calcin n'est pas complètement imperméable à l'eau.

3.24 - Influence du calcin sur l'évaporation.

La propriété du calcin de permettre au matériau de respirer est souvent énoncée comme une caractéristique fondamentale et indispensable. C'est pour cette raison qu'en matière d'imperméabilisation de murs en pierre, l'emploi d'hydrofuges de surface, sous forme de membranes artificielles étanches, risquant le colmatage des pores, ce qui maintiendrait l'eau à l'intérieur, est

proscrit. Il nous est apparu que les résultats d'essais sur cet aspect de la question ne sont pas nombreux, et c'est dans le but de mettre en évidence cette propriété du calcin que nous avons effectué des essais d'évaporation.

Les essais ont été effectués sur des cubes de 7 cm d'arête qui sont au préalable desséchés jusqu'à poids constant dans une étuve maintenue à 80° C. Les cubes sont ensuite immergés complètement dans l'eau à 20° pendant 48 heures. Après avoir noté le poids de ces éprouvettes, elles sont recouvertes de paraffine sur 5 faces afin de permettre l'évaporation que par 1 face. Pour les cubes prélevés en surface des blocs, pris sur édifice, la face recouverte de calcin est laissée libre afin de permettre l'évaporation. La crasse et les salissures sont au préalable enlevées de cette surface par un nettoyage à l'eau pure accompagné d'un brossage. Ce lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'état de propreté soit satisfaisant. L'essai consiste à suivre, en fonction du temps, la perte d'eau par différence de poids. Les éprouvettes sont placées dans les mêmes conditions d'évaporation - hygrométrie relative de l'air 50 % - température 20° C. Sur la figure 6 nous avons porté la quantité d'eau évaporée exprimée en % du poids d'eau absorbée en fonction du temps.

Les essais ont été exécutés sur deux natures de pierre.

On voit que pour la pierre 1/2 ferme on obtient la même évaporation sur l'échantillon prélevé en surface et l'échantillon prélevé dans la masse.

Pour la pierre tendre, la différence d'évaporation est nettement marquée. L'eau de l'échantillon prélevé dans la masse s'évapore presque deux fois plus vite que pour l'échantillon prélevé en surface. Le calcin diminue donc considérablement l'évaporation d'une pierre poreuse.

Ce résultat confirme les différences observées sur les densités et les duretés superficielles entre la surface et la masse de la pierre.

Les modifications de structures entre la "peau" des pierres et la partie interne sont très marquées sur les pierres poreuses.

3.25 - Propriétés chimiques du calcin.

Les analyses chimiques ont été réalisées sur 9 échantillons de pierre. Les prélèvements ont été effectués à trois profondeurs différentes du parement, de la façon suivante :

- 1° - A la surface du calcin par grattage avec une lame bien aiguisée
- 2° - A 1 mm de la surface
- 3° - A 6 mm de la surface

De l'analyse, nous avons exploité seulement un des composants : le sulfate de calcium.

Sur la figure 7, nous avons porté la variation des teneurs en sulfate de calcium ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en fonction de la profondeur du prélèvement.

On remarque d'une manière générale que la forte proportion de sulfate de calcium existant en surface diminue très rapidement, dès que l'on pénètre au coeur de la pierre.

Corrélation entre la densité des pierres et la teneur en sulfate de calcium et carbonate de calcium :

Sur la figure 8, nous avons examiné la variation de teneur en sulfate de calcium en surface, en fonction de la densité apparente des pierres. Nous voyons très nettement que la plus forte teneur en sulfate de calcium est obtenue pour les pierres de plus faible densité, c'est-à-dire pour les plus poreuses, tandis que sur les pierres très dures, la teneur en sulfate de calcium sera plus faible.

Dans les mêmes conditions d'exposition, on obtient 20 % de sulfate de calcium sur la surface d'une pierre de densité 2,3, alors qu'une pierre de 1,7 de densité en contient 40 à 50 %.

L'appauvrissement en surface en carbonate de chaux en fonction de la densité des pierres peut être observé sur la figure. Les pierres les plus tendres perdent beaucoup de chaux qui se transforme en sulfate de calcium. La teneur en carbonate de calcium en surface peut diminuer de 75 % par rapport à la teneur à 6 mm.

Le calcium des pierres calcaires exposées à l'atmosphère urbaine n'est pas constitué de carbonate de calcium pur :

Ces résultats expérimentaux permettent d'envisager quelques hypothèses sur la formation du calcin, sur son rôle et sur les causes possibles de son altération.

Il ne semble pas possible d'expliquer la formation d'un tel calcin par l'évaporation de l'eau de carrière. L'eau interstitielle ne contient que quelques centièmes de g de sulfate par litre, quantité nettement insuffisante pour expliquer les teneurs en sulfate de calcium observées dans nos prélèvements. Il n'est pas possible d'admettre qu'en atmosphère urbaine, l'eau de pluie se charge uniquement de l'acide carbonique de l'air. Selon cette hypothèse, au cours de sa pénétration, puis de son évaporation, cette eau dissout le carbonate de chaux (sous forme de bicarbonate de calcium). Sur les surfaces d'évaporation le CO_2 se dégage et le carbonate de chaux se dépose dans les pores de la couche superficielle de la pierre.

Nos résultats infirment les possibilités de validité de cette hypothèse : la teneur en carbonate de chaux, au contraire, décroît

vers la surface.

L'origine du calcin ne peut être attribuée qu'aux agents extérieurs, eaux de pluie, gouttelettes de brouillard, flocons de neige chargés de quantités variables de SO_2 , d'anhydride sulfureux.

L'anhydride sulfureux se dissout dans l'eau pour donner un acide faible, l'acide sulfureux (SO_3H_2).

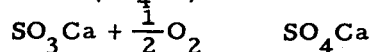
On a :



L'acide sulfureux réagit avec le carbonate de calcium pour former un composé relativement insoluble, le sulfite de calcium (SO_3Ca)



Le sulfite de calcium se combine avec l'oxygène pour former le sulfate de calcium (SO_4Ca)



Le sulfate de calcium est très soluble dans l'eau (2,4 g/1 d'eau) et il se cristallise à partir de sa solution en gypse ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Il convient de signaler que les dosages importants de sulfate de calcium observés sur nos prélèvements ne concernent que les paraments recouverts de calcin dur, sans déchirure, c'est-à-dire apparemment sains, sans lésion.

Le rôle et le comportement dans le temps d'une pellicule de cette nature ne peuvent être rationnellement établis qu'après une étude complète, il nous semble pour notre part, prématuré de vouloir conclure. Cependant, il serait intéressant pour faire le point de la question d'examiner les résultats et les opinions de quelques auteurs sur ce problème.

3.3 - Interprétation des résultats.

En conclusion, les méthodes d'essais adoptées pour l'étude des propriétés des surfaces des pierres permettent de répondre actuellement aux questions suivantes :

1° - Quelle est la nature et les propriétés du calcin des pierres conservées en atmosphère urbaine ?

- Dureté :

Le calcin, surtout pour les pierres poreuses, est beau-

coup plus dur que la partie interne de la pierre.

L'augmentation de dureté peut atteindre 60 %.

- Densité :

La densité du calcin est beaucoup plus importante que celle de la partie sous-jacente.

L'augmentation de densité peut atteindre 25 %.

Comme pour la dureté, l'augmentation est toujours plus importante sur les pierres poreuses.

- Perméabilité :

La présence de calcin à la surface d'un bloc diminue la perméabilité à l'eau de 50 %.

Cependant, le calcin n'est pas complètement imperméable.

- L'évaporation :

Le calcin n'arrête pas mais diminue l'évaporation.

Dans le cas de pierres les plus poreuses, le calcin est très compact. Il peut réduire les possibilités d'évaporation de la pierre de 50 %.

- Propriétés chimiques du calcin :

Nos prélèvements effectués en atmosphère urbaine montrent nettement que le calcin est une croûte composée de sulfate de calcium.

L'origine de cette formation est à attribuer à la pénétration de l'eau de pluie chargée d'anhydride sulfureux.

Cette formation en surface entraîne un appauvrissement en carbonate de calcium, qui est préjudiciable au bon vieillissement de la pierre.

IV - PROPRIETES DES MATERIAUX LIEES AUX MOUVEMENTS DE L'EAU.

4.1 - La porosité.

Parmi les propriétés des matériaux directement liées aux mouvements de l'eau, il convient de retenir tout d'abord la porosité. Celle-ci exprime le pourcentage volumique des pores, en fonction du volume apparent de substance. Cette caractéristique expri-

me le volume global des pores ouverts à l'eau lors d'une imbibition sous vide. La porosité ouverte varie énormément selon les matériaux. Cette détermination du volume total des vides permet de sélectionner grossièrement les matériaux à employer. Pour les soubassements et murs de sous-sol enterrés par exemple, les pierres utilisées ne doivent pas présenter une porosité supérieure à 15 %. Cependant, nous avons constaté que pour deux pierres possédant la même porosité, mais des pores différents, les mouvements de l'eau étaient différents. Il s'avère donc évident que l'expression totale du volume des vides ne suffit pas à établir un classement et des propriétés précises.

Les recherches se sont donc orientées depuis plusieurs années vers l'étude de la distribution des pores : la POROMETRIE.

4.2 - Classification des pores.

C'est un chercheur américain WASHBURN qui, en 1921, a commencé à considérer la morphologie des structures poreuses.

Il semble que l'on puisse distinguer six catégories principales de pores que l'on peut, en schématisant, classer comme nous l'avons présenté sur la figure 9. (d'après B. BUTTERWORTH: Bricks and Modern Research).

- Les pores canaux
- les pores circuits
- les impasses
- les poches
- les pores fermés
- les micropores

Les difficultés rencontrées pour remplir de liquide les pores des matériaux résident dans le fait que tous les espaces sont divisés en très nombreux et très fins canaux déjà remplis d'air. L'air et l'eau lors de leur rencontre s'opposent mutuellement et se bloquent. Il n'y a donc pour l'air aucune possibilité de s'échapper tout du moins instantanément. Avec le temps, cet air se dissout dans l'eau et s'échappe partiellement.

1.3 - Subsistance de l'air dans les pores.

Cette présence d'air permet d'expliquer par un schéma très simple pourquoi l'immersion d'un corps poreux ne suffit pas à le saturer.

Considérons sur la figure 10 un fragment du système poreux fermé par un pore canal aboutissant à un pore circuit et à un pore poche.

Supposons que l'eau s'infilte par capillarité dans le sens de la flèche.

- En A elle se divise en deux courants dont l'un sort du canal principal. Ces deux courants sous l'effet de l'absorption capillaire progressent et compriment l'air.

- En B le canal principal est rempli, mais il reste une bulle d'air emprisonnée, l'eau n'ayant parcouru qu'une fraction de circuit.

- On conçoit de la même façon que lorsque le cheminement de l'eau aura dépassé le point C (à l'entrée du pore poche) il est peu probable que l'air enfermé ait le temps de s'échapper.

Cette image extrêmement simplifiée donne une idée de l'explication possible de la présence de bulles d'air dans une structure soumise à l'humidification.

En conclusion, la proportion d'espace poreux se remplissant d'eau peut varier de 50 à 90 % du volume total des pores suivant la distribution et la dimension de ceux-ci.

4.4 - Le porosimètre à mercure.

Présenté sur la figure 11, il permet de mesurer d'une manière précise la dimension des différents pores constituant un matériau (exception faite des pores fermés). Le principe expérimental consiste à envoyer du mercure sous pression dans ces pores. Les forces de tension superficielle s'opposent à la pénétration du mercure, qui est un liquide non mouillant (l'angle de contact liquide - solide est supérieur à 90°). Ces forces d'opposition ne sont vaincues qu'en appliquant sur ce mercure une pression d'autant plus importante que le rayon des pores est plus petit. Le schéma du principe de l'appareil est représenté figure 12. Une pompe volumétrique permet sous chaque pression de déterminer le volume de mercure envahissant les pores et par là même leur rayon. L'appareil développe une pression maximum de 1.000 kg/cm² sur le mercure, c'est-à-dire qu'il nous donne la possibilité de détecter des pores inférieurs à 1/100^e de micron.

La figure 13 représente, sous forme d'histogramme, des valeurs de porométrie obtenues sur différentes natures de pierres. Nous avons porté en abscisses les dimensions de pores et en ordonnées les pourcentages des vides correspondant à chaque catégorie de pores.

Nous observons sur ce graphique que la pierre de Tervoux est constituée de pores qui dans l'ensemble sont inférieurs à 5 , par contre la pierre de Savonnières est constituée de gros pores compris entre 4 et 40 .

Cette importante quantité de gros pores permet d'expliquer la plus faible absorption de la pierre de Savonnières par rapport à la pierre de Tervoux, qui est pourtant beaucoup moins poreuse.

En effet, l'eau par capillarité monte plus facilement dans les structures à canaux fins.

Le cheminement capillaire dans les matériaux, imputable à la force d'attraction du ménisque d'eau, est fonction du rayon moyen des capillaires.

L'essai de capillarité met en évidence le pouvoir d'absorption ou de succion des matériaux. On détermine la quantité d'eau absorbée en fonction du temps, et on mesure la hauteur de montée d'eau dans un cube dont la base est alimentée. La figure 14 représente les résultats obtenus avec différentes pierres calcaires. En abscisses nous avons porté le temps en minutes, et en ordonnées la hauteur de remontée d'eau atteinte par la frange. Sur ce graphique, nous avons en outre indiqué la porosité totale de chaque pierre.

Ces résultats conduisent aux deux remarques suivantes :

1° - Dans l'ensemble, les pierres les plus poreuses absorbent plus rapidement de l'eau. Dans le même temps, la hauteur d'ascension d'une pierre de 36 % de porosité est le double de celle d'une pierre n'ayant que 23 % de porosité.

2° - Cependant, le volume total des vides n'est pas le seul facteur affectant le mouvement de l'eau. La pierre de Savonnières (36 % de vide, constituée de gros pores) permet une ascension capillaire plus faible que la pierre de Tervoux, de porosité 23 %, mais constituée de pores très fins.

En résumé, deux facteurs entrent en ligne de compte dans l'ascension capillaire : la porosité et la dimension des pores. Nous devons donc prendre en considération cette notion nouvellement mesurable, la détermination du diamètre des pores, pour expliquer d'une manière plus complète le mouvement de l'eau dans les matériaux.

4.5 - Conséquences pratiques des mesures du volume et de la dimension des pores pour le choix des matériaux.

Il semble que les matériaux comprenant de nombreux pores ouverts de dimensions inférieures à 5μ sont non enduits, trop capillaires. Les matériaux contenant des cavités fermées forment une classe excellente.

Par exemple, la pierre de Savonnières, la pierre ponce, constituent des matériaux dont la saturation en eau s'avère très difficile. Dans ces roches, l'immersion dans l'eau laisse subsister l'air dans 30 à 40 % du volume des vides.

Les actions du gel sont extrêmement dangereuses sur les matériaux à pores fins ouverts qui très facilement peuvent se sa-

turer et atteindre ainsi la teneur en eau critique provoquant l'éclatement du matériau lors de l'expansion de l'eau se transformant en glace.

Il convient de ne pas utiliser, pour l'emploi en soubassement de murs fortement exposés, les matériaux destinés à être non enduits, dont la porosité est supérieure à 20 %.

V - CONCLUSIONS

De nombreuses études et recherches ont été consacrées à des observations sur les altérations des pierres des monuments.

Différentes hypothèses sont présentées pour tenter d'expliquer les causes diverses de dégradations, de manière générale, elles sont basées sur l'un des processus suivants :

- mécanisme physique
- mécanisme chimique
- mécanisme biologique

Si aucune des explications fournies ne permet d'expliquer l'origine des différents cas d'altérations observés avec des arguments irréfutables, tous les chercheurs sont unanimes et conviennent que la présence d'humidité est indispensable pour engendrer le développement des dégradations.

Il s'avère nécessaire pour aborder l'étude du phénomène, d'examiner le mouvement de l'eau en fonction de la morphologie de la structure poreuse de chaque matériau altéré.

L'action des intempéries et des atmosphères polluées est certaine, cependant le phénomène n'est pas régulier, il dépend de la nature du matériau.

Le respect de l'utilisation de nature de pierres dont les propriétés sont appropriées aux qualités exigées selon la position dans l'édifice intervient d'une façon déterminante sur la tenue dans le temps.

La connaissance des propriétés globales du matériau, à partir de l'utilisation de critères de mesure précis et non destructifs, semble être un élément d'investigation approprié aux recherches sur l'altération des pierres des monuments historiques.

M. MAMILLAN

BIBLIOGRAPHIE

- DORIAN Ch. - Corrosion de la pierre - Où en est-on ? Comment y remédier ? Essais en cours - Corrosion et Anti-corrosion - Vol.9 N° 12 - Décembre 1961 - page 396.
- ROMANOVSKY, V. - Etudes sur les pierres calcaires des monuments Corrosion et Anti-corrosion - Vol.3 n° 3 - Mai-Juin 1955.
- MAMILLAN, M. - Recherches récentes sur le nettoyage des façades en pierre calcaire - Annales ITBTP - Juillet-Août 1964 - n° 199-200.
- SCHAFFER, R. J. - The weathering of natural building stones Building Research, Special Report n° 18.
- CAMERMAN, C. (†) - Les pierres naturelles de construction Annales des Travaux Publics de Belgique - N° 4 - 1960-61.
- PATWARDHAN, N.K. and TANEJA, C.A. - Durability of sandstones Bulletin of the Central Building Research Institute ROORKEE - Vol.3 n° 2 - December 1955 page 1.
- GUILLOT, M. et HALOT, D. - Sur le problème de la maladie des pierres - Compte-rendus des Séances de l'Académie des Sciences - Tome 252 - n° 4 - 23 Janvier 1961.
- BOURCART, J. - NOETZLIN, J. - Docteur POCHON et BERTHELIER, S. - Etude des détériorations des pierres des monuments historiques - Annales ITBTP - Décembre 1949, n° 108.
- CAMERMAN, C. (†) - Sur les cas d'altération des pierres de taille par les fumées. Annales ITBTP - Mars 1948 n° 14.
- FLORENTIN - Altération des pierres dans les grands centres urbains. Compte-rendu de séance.
- KAUFFMANN, J. - Corrosion et protection des pierres calcaires des monuments. Corrosion et Anti-Corrosion, Vol.8 n°3 - Mars 1960 - page 87.
- FEVRE, J. - Conservation et choix de la pierre (1937) Rapport sur l'étude de la Maladie de la Pierre 1931-1954 Centre de Recherches sur les Monuments Historiques.

- ANONYME - Compte-rendu du Comité d'Etude sur l'altération des matériaux (15 Février 1946) Rapports sur l'étude de la maladie de la pierre 1931-1954.
- POCHON, J. - Recherches sur les processus biologiques d'altération des pierres (10 Décembre 1946) - Rapports sur l'étude de la Maladie de la Pierre - Centre de Recherches sur les Monuments Historiques.
- BOURCART, J. - Recherches sur la maladie des pierres (1946-1947) Rapports sur l'étude de la Maladie de la pierre 1931-1954 Centre de Recherches sur les Monuments Historiques.
- KAUFFMANN, J. - Rôle des bactéries nitrifiantes dans l'altération des pierres calcaires (1952-1953) Rapports sur l'étude de la Maladie de la pierre (1931-1954) Centre de Recherches sur les Monuments Historiques.
- ROMANOVSKY, V. - Rapport sur l'étude du calcin des pierres calcaires (1953) Rapports sur l'étude de la Maladie de la pierre (1931-1954) Centre de Recherches sur les Monuments Historiques.
- FEVRE, J. - Conservation, emploi, détérioration, remplacement des pierres - Exposé du 10 Mai 1957 au Congrès International des Monuments Nationaux à Paris.
- HERRERO, J.I. - Altération des calcaires et des grès utilisés dans la construction. Publication du Ministère de l'Education Nationale. Direction Générale des Beaux-Arts - Madrid 1961.
- CAMERMAN, C. (†) - Les pierres de taille calcaires - Leur comportement sous l'action des fumées - Annales des Travaux Publics de Belgique - du 1er au 6è fascicule - 1951 et 1er fascicule 1952.
- RUY JOSE GOMES - Nota sobre o Problema da alteração da pedra em monumentas de interesse histórico e artístico. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil - Memoria n° 165 Lisboa 1961.
- SUESS, E. - Die Baumaterialien Wiens. Schriften des Vereines zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse. Wien, Z, 1863.

- SÜESS, E. - Über Baugesteine. Mitteilungen des k.k. österreichischen Museums für Kunst und Industrie. Wien, 1867.
- KAISER, E. - Über eine Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine in Vergleich mit der in der freien Natur. Chemie der Erde, 1929, IV, p.291.
- KIESLINGER, A. - Zerstörungen am Steinbauten. Leipzig et Vienne 1932.
- HIRSCHWALD, J. - Handbuch der Bautechnischen Gesteinsprüfung.
- KETTENACKER, L. - Über die Feuchtigkeit von Mauern. Der Gesundheitsingenieur, 53, H 45 1930, Cité par Kieslinger.
- KNAPEN - Le problème de la conservation des matériaux. Mem.soc.Ing.Civils de France, 1911.
- ANONYME - Report Building Research Board for 1929.
- ANONYME - Report Building Research Board for 1928.
- ERLENMEYER, H. - Bemerkungen über die Entstehung von Salzlagerstätten. Chemie der Erde VI, 1931, p. 390.
- BLANCK, E. - Handbuch der Bodenlehre. Tome II - Berlin, 1929
- BLANCK, E. - RIESER, A. - Über Verwitterungserscheinungen am Bremer Rathaus. Chemie der Erde, IV, 1929, p.138.
- LAURIE, A.P. ; MILNE, J. - The evaporation of water and salt solutions from surfaces of stone, brick and mortar. Proceed.R. Soc.Edimburg, 47, 1926, p.52.
- LINCK, G. - Die Schutzrinden. Handbuch der Bodenlehre, Blanck III, pp.490-505.
- ZAHN, G.W. - Wüstenrinden am Rande der Gletscher. Chemie der Erde IV, 1929, p. 155.
- KIESLINGER, A. - Das Volumen des Eises. Geologie und Bauwesen, 1931, H4, p.199.
- HIRSCHWALD, J. - Z. prak. Geol. 1908, 16 p.257. Cité par Kieslinger.
- DIETZEL, A. - Frostbeständigkeit. Veröffentlichungen aus dem Max-Planck. Institut für Silikatforschung. Würzburg, 60, 1956.
- BREYER, H. - Die Frostprüfungbestimmungen der neuen Ziegelnormen sind unzulänglich Ziegelindustrie, 1955, 6 p. 824.
- BERGMANN, K. - Über die Prüfung der Frostbeständigkeit von Ziegeleierzeugnissen. Ziegelindustrie, 1955, 8, p. 466.
- MAACK, P. - Zur Bildung des S-Wertes als Kriterium der Frostbeständigkeit grob-keramischer Scherben, Ziegelindustrie, 1955, 8, p.52.
- NORTH, F.J. - Limestones. Their origin, distribution and uses Londres 1930.
- WICHMANN, A. - Über gelenkige Kalksteine und Dolomite. Zeitschr. Deutsche Gebl. Ges. 1927, 79 p. 197. Cité par Kieslinger.
- SAUER, A. - Erläuterung der geologischen Specialkarte des Grossherzogtums Baden. Oberwolfacht-Schanken-zell. Cité par Kaiser.
- HETTNER, A. - Die Felsbildung des Sächsischen Schweiz. Geogr. Ztschr. 1903, p. 611. Cité par Kaiser.
- HETTNER, A. - Gebirgsbau und Oberflächgestaltung der Sächsischen Schweiz. Forschungen zur deutschen Landes- und Volkskunde, 2, 1888, p. 292.
- ANONYME - Solubility of limestones in rain water. U.S. Bureau of Standards Technical News Bulletin, 1928 130, p.19.
- BLANCK, E. - Über die petrographischen und Bodenverhältnisse der Buntsandsteinformation Deutschlands. Jahr.d. Vereins f. Naturkunde i. Württemberg 1910, 9 p. 66.
- BEYER, O. - Aleun und Gips als Mineralneubildung und als Ursache der chemischen Verwitterung in der Quadersandstein der Sächsischen Kreidsgewirges. Ztschr.d.Deutsch.geo. Gesal, 1911-12, 63, p.447. Cité par Blanck.
- HABERLE, D. - Die Gitter-Netz- und Wabenförmige Verwitterung der Sandsteine. Geol. Rundschau, VI, 1915.
- KLANDER - Über die im Buntsandstein wandernden Verwitterungslosungen in ihrer Abhängigkeit von äusseren Einflüssen. Chemie der Erde, 1926, VI, p. 49.
- BLANCK, E. v. ZAPFF - Über Tiefenverwitterungserscheinungen in Mittleren Buntsandstein des Rheinhardswaldes. Chemie der Erde, 1926, II, p.455.
- BLANCK, R. v. RIESER, A. - Über Verwitterungs- und Umwandlungserscheinungen der eozänen Kalkstein von Heluan in der ägyptische Wüste. Chemie der Erde, 1926, II, p. 489.

- BLANCK, E : RIESER, A. - Beitrag zu den vergleichenden Untersuchungen über die Verwitterung von Gesteinen unter abweichenden Klimatischen Verhältnissen. Chemie der Erde, 1928, p.437.
- BLANCK, E : THERALITZ - Zweiter und letzter Beitrag zu der vergleichenden Untersuchungen über die Verwitterung von Gesteinen unter abweichenden Klimatischen Verhältnissen. Chemie der Erde, 1934, IX, p. 529.
- LINCK - Über Schutzrinden. Chemie der Erde, 1929, V. p. 67.
- BLANCK, E SEIFERT, A : GIESECKE, F. - Über eigenartig gefärgte Ausblühungen und Inkrustationen im Elbsandsteingebirge. Chemie der Erde, 1932, p.35.
- SCHMOLZER, A. - Zur Entstehung der Verwitterungskulpturen an Bausteinen. Chemie der Erde, 1936, X, p. 408.
- STORZ, M - Die Bedeutung der Chloride für die Chemische Verwitterung und der Wassertoff-Ionenkonzentrations messung für die Geologie. Chemie der Erde, 1938, XI, p. 485.
- SEIFERT, B. - Die Chemischen Vorgänge bei Ausblühungen auf Ziegelerzeugnissen - Tonindustrie Zeitung, 1949, 73, p.61.
- KUHN, K. - Über die Entstehung von Ausblühungen an Ziegelerzeugnissen. Tonindustrie Zeitung, 1950, 74, p. 177.
- BLANCK, E. EVLIA - Ein Beitrag zur Frage nach der Herkunft der im Gestein und Boden zirkulierenden Lösungen, sowie zum Kreislauf der Schwefels in der Natur. Chemie der Erde, 1932, VII, p.299.
- DAWIHL - Zur Frage der Wirkung löslicher Salze im Mauerwerk, Tonindustrie Zeitung, 1932, p.434.
- BLANCK, E RIESER, A. - Über die chemische Veränderung des Granits unter Moorbedeckung. Chemie der Erde, 1925, II, p.470.
- ENGELHART, W. - Zur Bildung von Gips aus Anhydrit. Chemie der Erde, 1945, XV, p.424.
- RIPPEL - Handbuch der Bodenlehre, Blanck, 1929, VIII.
- LETHABY, W.R. - Westminster Abbey and the King's craftsman. A study of mediaeval Building. Londres 1906, Cité par Kieslinger.
- ZALL, M. - Photometric determination of Chlorides in water. An. Chem. 1956, p.1665.
- LEHMANN, H. - Entstehung und Wirkung von Ausblühungen Ziegelindustrie, 1953, p.411.
- GROSSER, G. - Die Verfahren und graphischen Darstellung der chemischen Gesteinverwitterung. Chemie der Erde, 1932, VII, p.131.
- DE SESA - Spectrophotometric and Polarographic Determinations of soluble silicate. An. Chem. 1954, 26, p.1250.
- TOENMIES - Photoephelometric Microdetermination of sulfate and organic Sulfur. An. Chem. 1953, 1, p. 161.
- CHARLOT, G ; GAUGUIN, R. - Dosages colorimétriques. Paris, 1952, p.104.
- MAMILLAN - Dix ans de Recherches sur les pierres de taille Annales I.T.B.T.P. - Février 1954 - N° 74.
- MAMILLAN - Méthodes de Classification des Pierres. Annales I.T.B.T.P. - Mai 1958 - N° 125.
- VIRONNAUD, BROCARD, MAMILLAN - Etat actuel de quelques Recherches concernant les maçonneries. Annales I.T.B.T.P. - Janvier 1966 - N° 217.
- L'HERMITE ET FERET - Essais et Recherches sur les pierres de taille. Circulaire de l'Institut Technique série D N° 6 1943.

NOMENCLATURE DES PIERRES PORTEES SUR

LE GRAPHIQUE 1

RELATION ENTRE LA VITESSE DE PROPAGATION DU SON ET LA RESISTANCE RUPTURE EN COMPRESSION

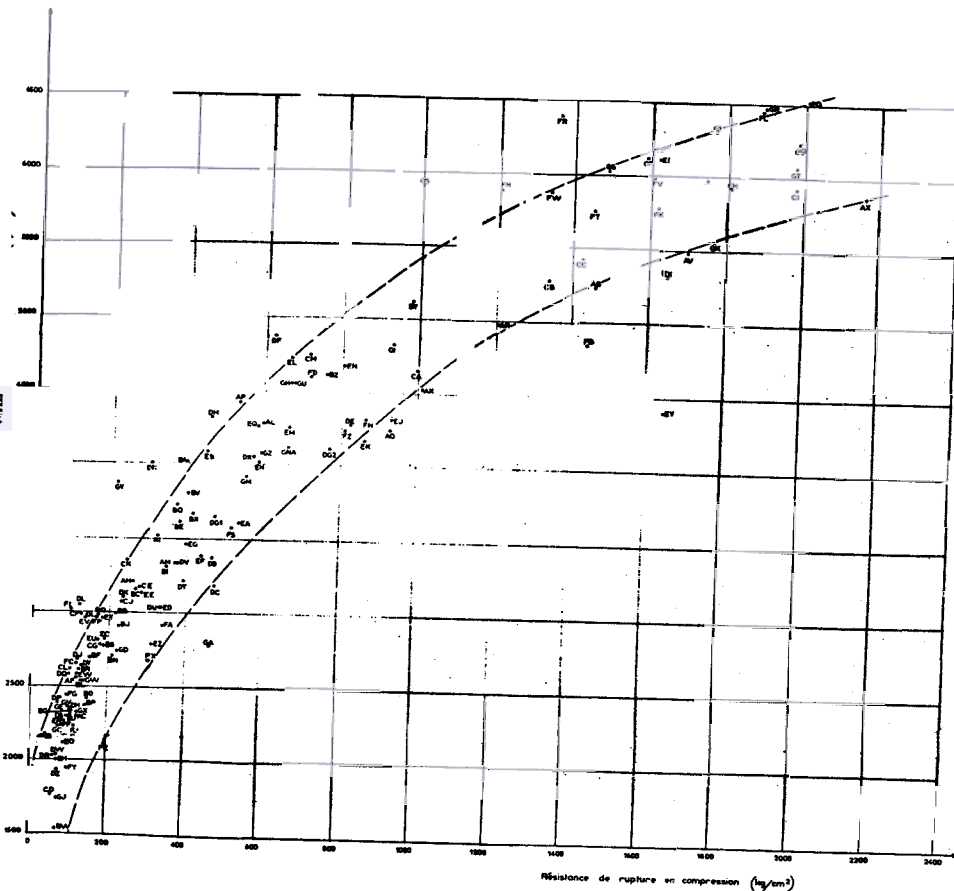


Fig.1.

Code	Nature de la pierre	Code	Nature de la pierre
CM	AMPILLY LE SEC jaune	BA	CHAUVIGNY Roche
GF	ANCY LE FRANC marbré	AX	CHOMERAC
DC	ANSTRUDES roche blanche	GZ	CLAMART liais (dit Cliquant)
AD	ANSTRUDES roche jaune	GY	CLAMART Roche
CK	ANTEOR	CI	COMBLANCHIEN
DI	ARUDY	FS	COURVILLE Liais
FP	BEUCAIRE demi-ferme	FZ	COURVILLE Roche
BQ	BEUCAIRE doux	BS	ESPEIL Roche
DY	BELFONT	EC	ESTAILLADES
DZ	BILLY banc royal	AS	ETROCHEY Jaune
BN	BONNILLET clair (ter-voux)	CE	EUVILLE Roche
CL	BRACOLE pierre de vers	EQ	FONTAINES
DL	BRAUVILLIERS doux 1/2 fin	FD	FONTAINE Liais
CG	BRAUVILLIERS doux fin	BR	FONTVIEILLE Tendre
DK	BRAUVILLIERS liais	AI	GARCHY
ET	BRAUVILLIERS liais marbrier	FU	GRAND CORENT
AM	BROUZET	CH	HAUTEVILLE
EH	BROUZET granité	FR	HYDREQUENT
AR	BUXY	CJ	JAUMONT
EZ	CAEN	FC	LA BOULOYE Banc Royal
FA	CAEN franc banc	BL	LA BOULOYE Banc Franc
EI	CASSIS	EW	LACOSTE
DO	CASTILLON du Gard	EV	LACOSTE SAINT VERAN
DG	CHAMESSON demi ferme	GT	LADOIX
AO	CHAMESSON Roche	GC	LAIGNEVILLE
DG	CHAMESSON Volotte	CC	LARRYS Dur Moucheté
GX	CHANCELADE 1/2 ferme fine	EJ	LARRYS Blanc dur
GU	CHANCELADE dur	EK	LARRYS Roche blanche
BI	CHANRENTENAY	CB	LARRYS Moucheté
BP	CHARENTIGNY	CA	LARRYS sous-moucheté
FK	CHASSAGNE MONTRACHET	FJ	LA ROCHEBEAUCOURT
FW	CHATEAU LANDON	GR	LA TURBIE
CD	CHAUSSY	BO	LAVOUX à grains
DD	ANSTRUDES roche claire	EF	LAVOUX Fin construction
		EG	LAVOUX Fin Sculpture
		EA	LENS
		FH	LE PULEY
		GA	LEROUVILLE Gris
		GB	LEROUVILLE Roche
		GG	LES ABROTS
		DQ	LES BAUX

Code	Nature de la pierre	Code	Nature de la pierre
FO	LOMPNES	FG	SAINT VAAST LES MELLO
AP	MAGNY Roche		Banc Royal Construction
DF	MAGNY LAMBERT Roche		SAINT VAAST LES MELLO
AH	MALVAUX		Roche 1/2 ferme construc-
BZ	MASSANGIS Liais Jaune		tion
BY	MASSANGIS Roche Jaune		SAINT VAAST LES MELLO
DE	MASSANGIS Liais Blanc		Roche 1/2 ferme fine
FX	MECRIN	FF	SAINT VAAST LES MELLO
EU	MENERBES		roche douce construction
GM	MEREUIL	FE	SAINT VAAST LES MELLO
DS	MERY Banc Franc		roche douce fine
DR	MERY Banc Royal	GL	SAINT VIVIEN
		DJ	SAVONNIERES 1/2 Ferme
BB	MIGNE les LOURINES fin		choix
GJ	MIREMONT	CF	SAVONNIERES 1/2 fine
ER	NERSAC	FY	SIREUIL 1/2 Ferme
BD	NOYANT Banc Franc	BU	SIREUIL dit ferme
DW	NOYANT Banc Royal	GS	SOUPPES
GW	PAUSSAC	EX	TAVEL Blanc
GNA	POUILLENAY (Rose, beige et gris)	EY	TAVEL Bleu
FT	PREMEAUX	BC	TERCE Construction
BX	RAVIERES	DU	TERCE à grains
GD	RICHEMOND	DT	TERCE Jaune
FL	ROCHERET	DV	TERCE Sculpture
FQ	ROCHERONS	EE	TERVOUX Construction
FI	ROGNES	ED	TERVOUX Sculpture
FV	ROMANECHÉ	ES	TOURRIS
FB	ROQUEMAILLÈRE	BW	TUFFEAU TOURAINE
GK	SAINTE CORNEILLE	GV	VASSENS Banc Franc
	Aurore	DH	VASSENS Banc Royal
EO	SAINT LEU	AK	VERGER non marbré
AC	SAINT LEU Banc Franc	DN	VERNON Franc Banc
FN	SAINT MARTIN BELLE	DM	VERNON Gros lien
	ROCHE	DP	VERS
DX	SAINT MAXIMIM liais très dur	BH	VIERZY
BG	SAINT MAXIMIM Roche 1/2 Ferme	EN	VILHONNEUR Dur
BE	SAINT MAXIMIN Roche dure	EM	VILHONNEUR Marbrier
BF	SAINT MAXIMIN Roche ferme	EL	VILHONNEUR Roche
AF	SAINT MEME	AV	VILLEBOIS
EB	SAINT PIERRE AIGLE Roche dure	GE	VILLIERS ADAM
BJ	St PIERRE AIGLE Roche fine 1/2 dure		
BV	SAINT QUENTIN ROCHE dure Construction		

LARGEUR DE LA RAYURE

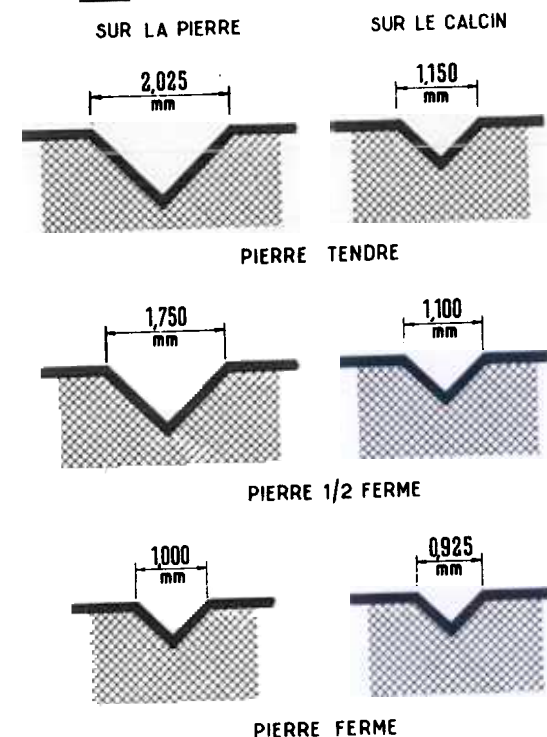


Fig.2

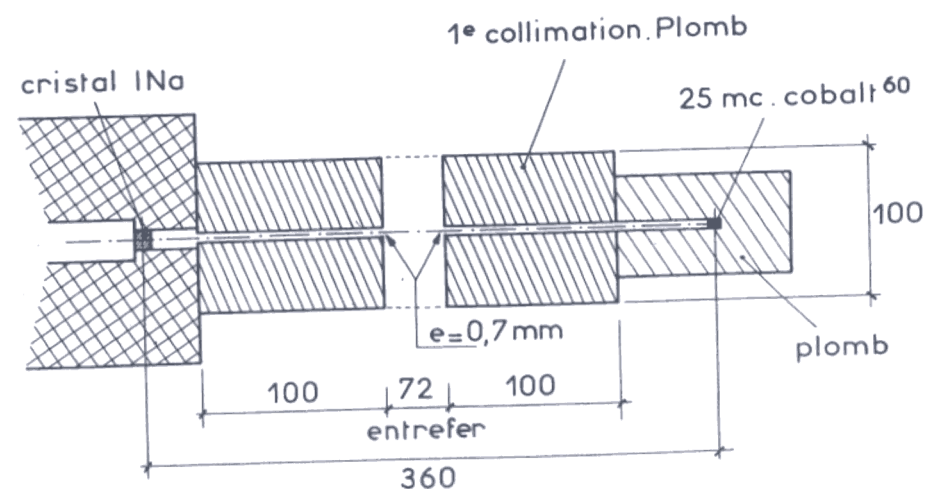


Fig.3

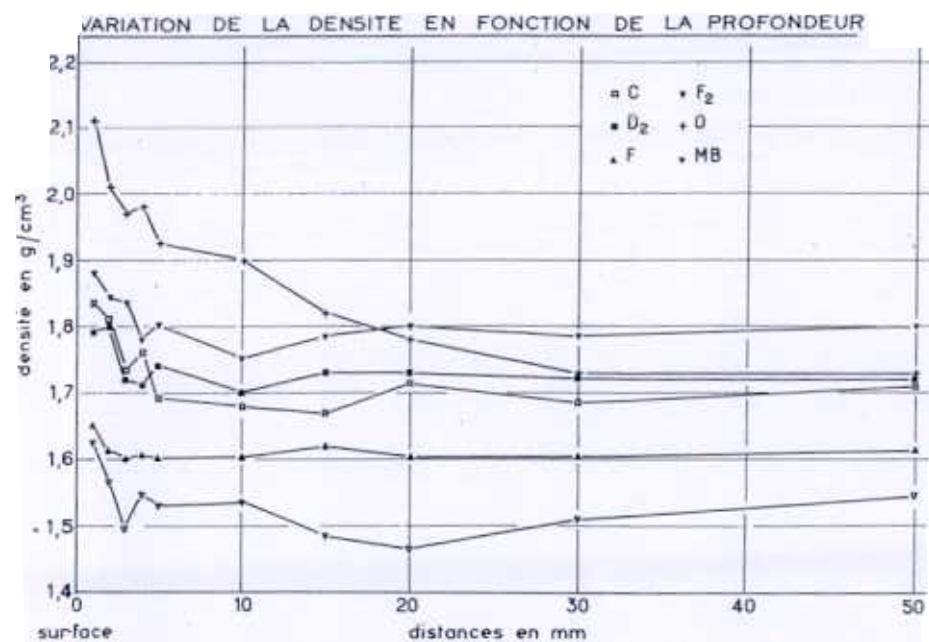


Fig.4.
PERMEABILITE

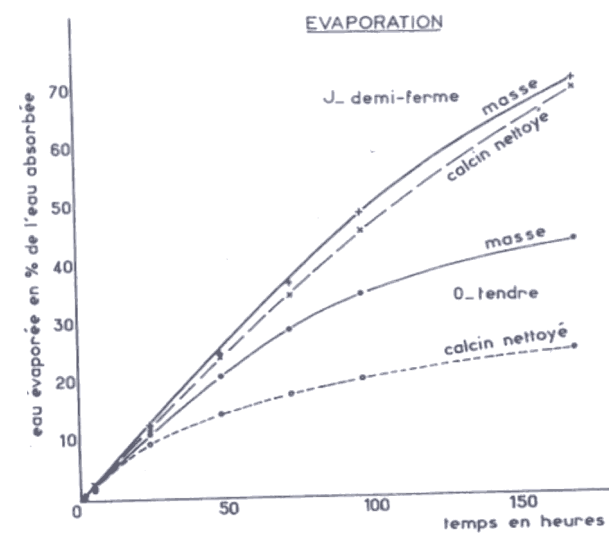
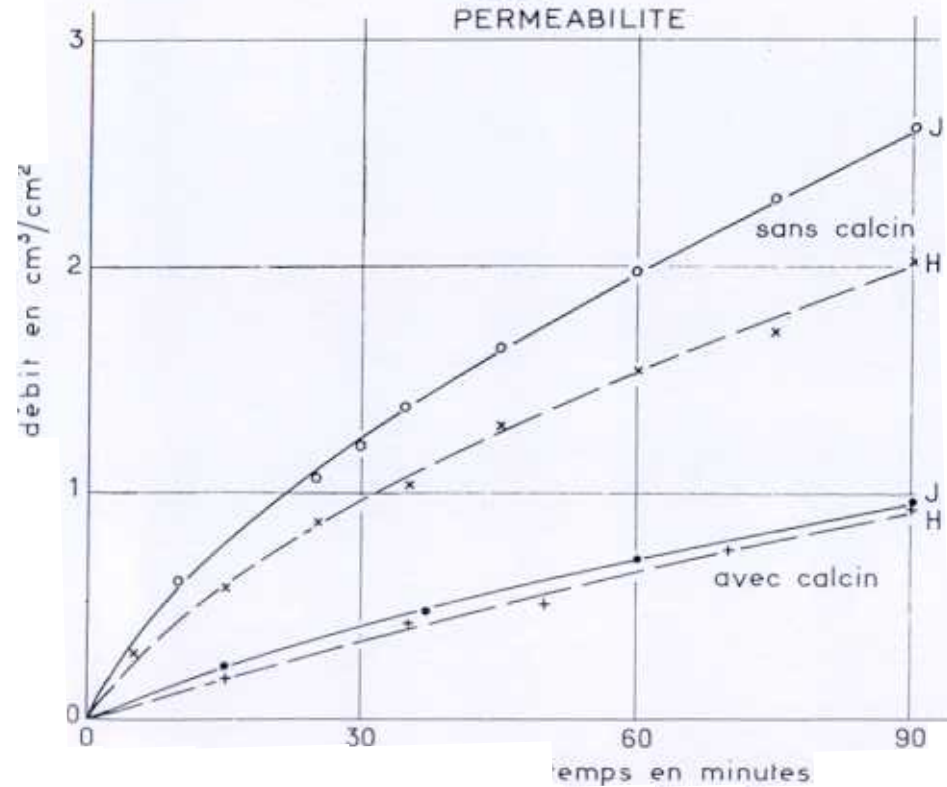


Fig.6.

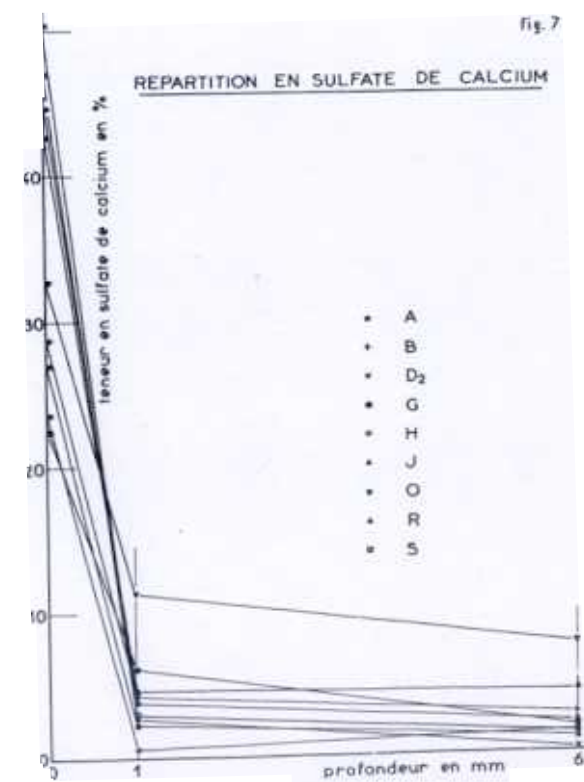


Fig.7.

VARIATION DE LA TENEUR EN SULFATE DE CALCIUM

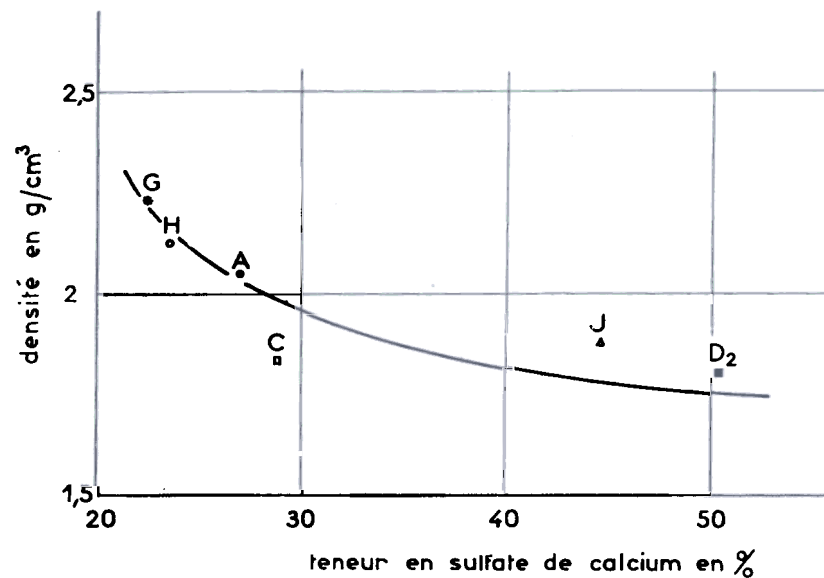


Fig. 8.

DIFFERENTES CATEGORIES DE PORES

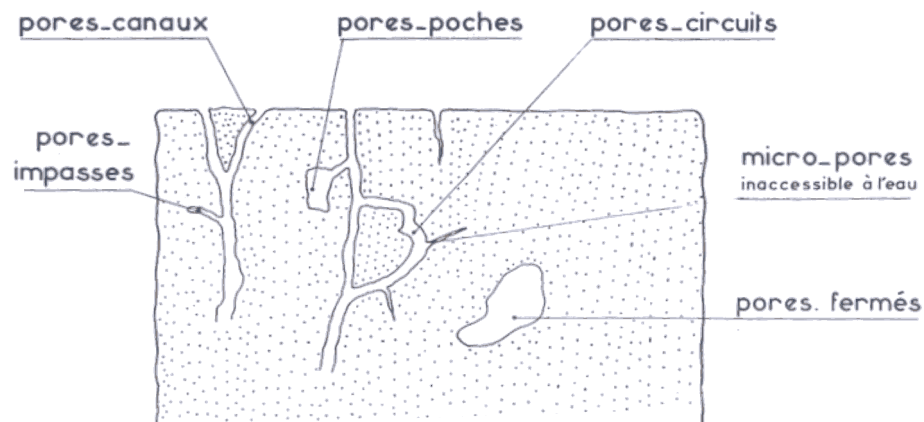


Fig. 9.

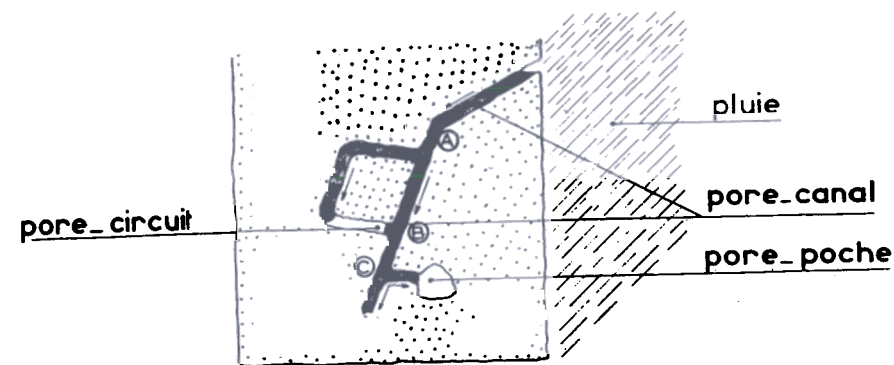


Fig. 10

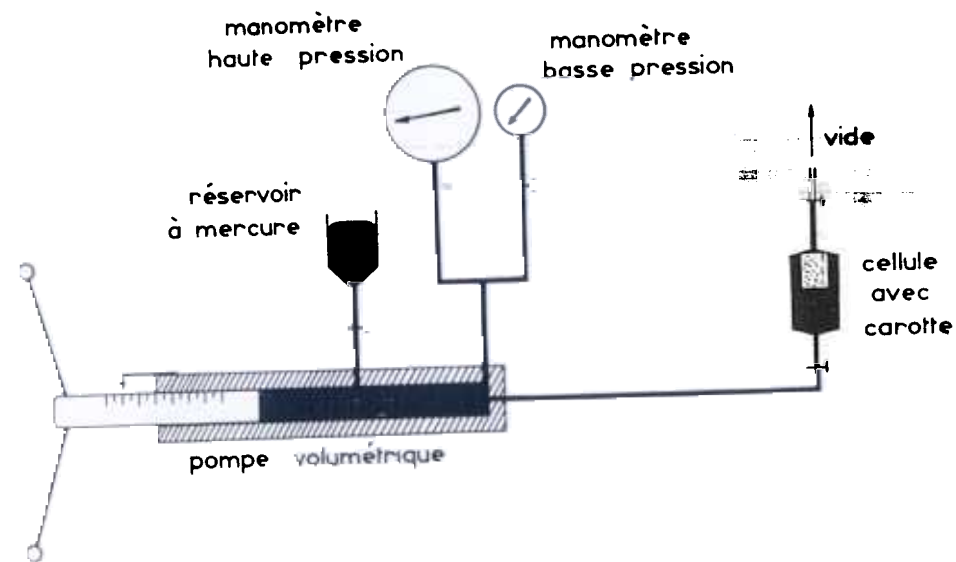


Schéma de principe du Purcell

Fig. 11.

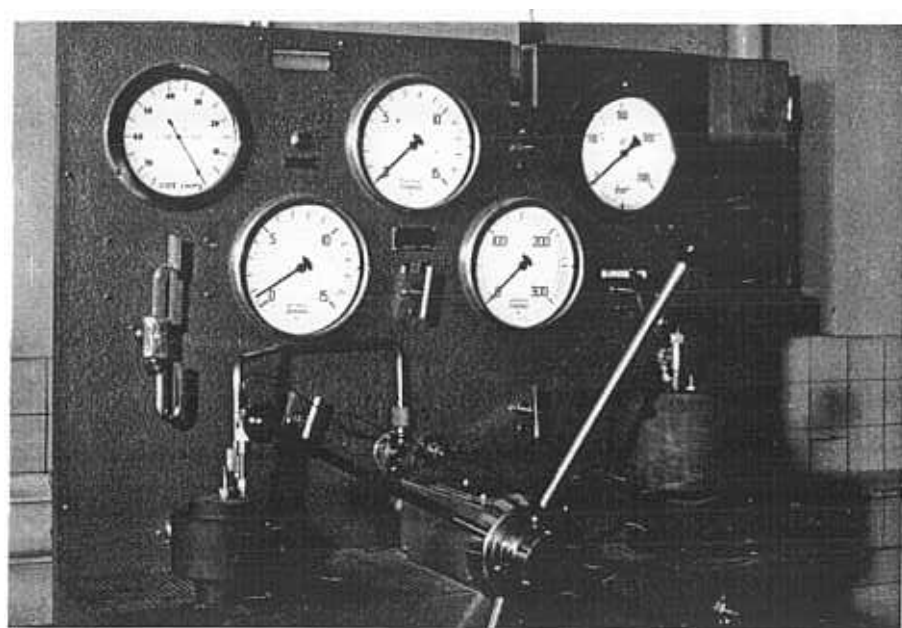


Fig.12.

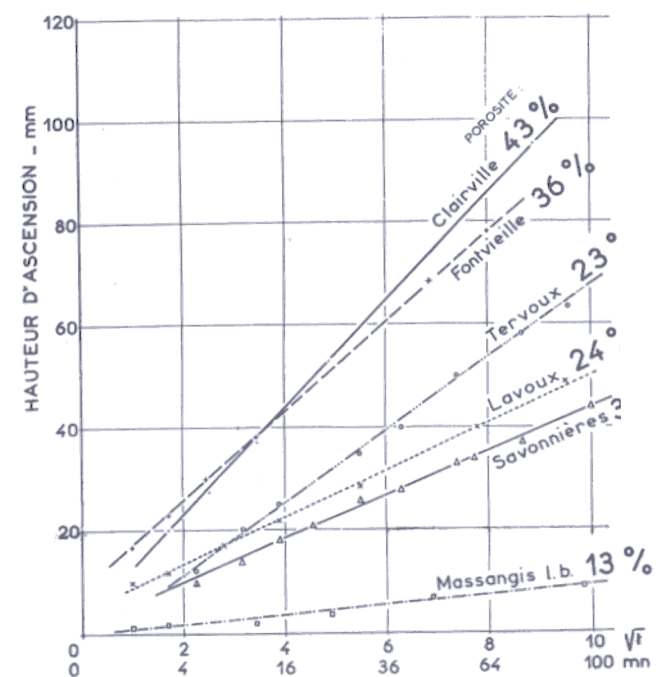
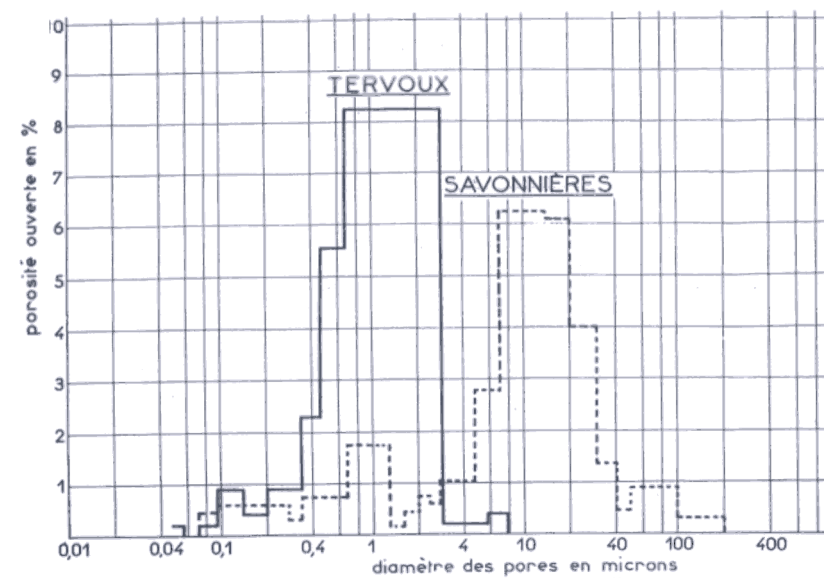


Fig.14.