

2^{ème} Colloque Africain sur la Recherche en Informatique
12-18 octobre 1994

**APPLICATION DU TRAITEMENT D' IMAGE A LA CARACTERISATION
DES ENROBES DRAINANTS.**

MAGHRAOUI A. Doctorant.

FAURE R.M. Professeur habilité.

Departement Mecanique et informatique E.N.T.P.E.
2 Rue Maurice Audin Vaulx En Velin 69120 France.

Resumé.

A partir des nombreuses études d'absorption acoustique des enrobés drainants il ressort que le taux d'absorption dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels on peut citer : Le pourcentage de leurs vides, La tortuosité, La forme géométrique de ces vides et leur degré d'interconnexion. On peut aussi citer la texture de leur surface et leur épaisseur .

Certain de ces paramètres ne peuvent pas être accessibles directement par les mesures traditionnelles. Pour appréhender directement les valeurs de ces paramètres nous avons fait appel aux techniques de traitements d'images.

Mots-clés: interconnectivité, dimension fractale, granulométrie, enrobé drainant, rugosité, indice des vides, covariancé.

I.Introduction

1.1-Les revêtement drainants.

Les revêtements des chaussées drainantes sont des enrobés drainants à plus de 20 % de teneur en vide qui ont été conçus pour un drainage rapide des eaux de ruissellement. En plus de leur qualité drainante, ces enrobés drainants provoquent une diminution du bruit de roulement de l'ordre de 2 à 6 décibels. Cette diminution peut être expliquée d'une part, par la diminution du bruit de contact pneumatique/chaussée, mais aussi également par l'effet d'absorption que présente ce type de revêtement.

Ce phénomène d'absorption est dû principalement au fait que l'onde acoustique produite par l'ensemble des organes du véhicule (pneumatique, moteur échappement....) pénètre dans la structure drainante, s'y propage à l'intérieur jusqu'à ce qu'elle trouve une couche acoustiquement réfléchissante. Tout au long du trajet, l'onde perd de son énergie. Plus la longueur du trajet est grande et meilleur est le coefficient d'absorption de cet enrobé . Or le trajet de l'onde dans le

matériau dépend de l'épaisseur de cet enrobé, de son pourcentage de vide et du degré d'interconnection des vides entre eux.

Pour comparer l'efficacité d'absorption de différents types d'enrobés drainants il est donc nécessaire de définir et d'évaluer des paramètres caractérisant au mieux le réseau des vides ces enrobés drainants.

1.2-La méthodologie d'étude :

Pour atteindre et quantifier les les paramètres mis en évidence la séquence utilisée est la suivante :

- 1-) On prélève un certain nombre d'échantillons sur chantier appelés carottes.
- 2-) Ces carottes sont passées au scanner médical afin d'obtenir des images de coupes horizontales et verticales.
- 3-) A partir de ces images et après leur traitements, un certain nombre de paramètres géométriques permettent de caractériser ces enrobés drainants.
- 4-) Dans une dernière étape une corrélation avec les propriétés acoustiques mesurées par ailleurs est établie.

II-1-Acquisition d'images .

Dans un premier temps nous ne disposions que de clichés négatifs obtenus à l'aide d'un scanner médical. Ces clichés correspondent à des coupes horizontales et verticales prises tous les millimètres. Pour traiter ces images nous devons procéder à leur numérisation au moyen d'une carte de digitalisation dans notre cas la "PC_OEIL" de la société M.I.S.I.S . Après digitalisation nous disposons d'images 512X512 pixels codés sur 256 niveaux de gris.

Cette technique d'acquisition d'images présente cependant de grands inconvénients à savoir :

1-)Lors de la digitalisation les clichés étaient posés sur une table lumineuse (négaton). Cette table était composée d'un plexiglas blanc éclairé par en dessous par une série de barrettes de néon. Ceci a pour effet de donner une dérive lumineuse . C'est à dire que certaines régions de l'image sont plus éclairées que d'autres.

2-) Un autre défaut lié à la digitalisation sur table lumineuse à trait à la prise en compte ou non des liants. En effet les liants bitumineux étant des matériaux faiblement absorbants des rayons X, leur codage sur l'image est représenté par des valeurs très faibles (entre 20 et 40). Or la digitalisation à partir de clichés sur

table lumineuse donne une valeur de la fonction de gris rarement inférieure à 30. Le fond de l'image et les vides sont codés par des valeurs oscillant entre 30 et 40. Les liants sont donc mal pris en compte lors de la digitalisation par cette méthode puisque leur codage sur l'image à même valeur que ceux des vides et du fond de l'image.

L'image ED24I1.IMA représente la digitalisation sur table lumineuse de la carotte de 4 cm d'enrobé drainant. Nous remarquons sur cette image que la partie enrobé drainant située à gauche de l'image est presque indiscernable .

Sur l'image ED24I1.PRF se trouve le profil d'une ligne relatif à l'image mentionné ci dessus . La valeur de la fonction de niveau de gris relatif au fond et au vide est de 31 alors qu'elle devrait être nulle puisque les vides n'absorbent pas les rayons X. Nous observons aussi un lissage trop accentué de la fonction de niveau de gris ce qui donne un flou à l'image. La dynamique de l'image est trop faible (compris entre 39 et 159). Une partie de l'information est perdue.

3-)L'autre problème rencontré lors de l'utilisation. de cette technique c'est la présence de reflets dus à la matière plastique réfléchissante dont sont faits les clichés.

Pour résoudre ces problèmes nous avons décidé de récupérer les images sous forme de fichier numérique directement à partir du scanner. Ainsi:

1-)Le problème de la dérive lumineuse (éclairage non homogène sur toute l'image) a disparu .

2-)La différenciation liant-agrégat est possible puisque toute l'information obtenue par les capteurs du scanner est entièrement retranscrite dans le fichier image. Les vides n'atténuant pas les rayons X sont alors codés sur l'image par une valeur nulle contrairement à la digitalisation par caméra où les vides sont codées par une valeur proche ou égale à celle des liants .

Sur l'image ED1E4I1.IMA nous voyons la digitalisation directe à partir du scanner de la carotte de 4 cm d'E.D et sur l'image EDE4I1.IMA le profil d'une ligne de cette image . Nous constatons en premier lieu la netteté de l'image par rapport aux images digitalisées sur table lumineuse. En effet nous avons une courbe non lissée avec des pics. La dynamique de l'image est bien comprise entre 0 et 255 c'est à dire que la totalité de l'information est restituée.

Ici le fond de l'image et les vides ont une fonction de niveau de gris nulle ou très proche de la valeur zéro (à cause des bruits électroniques des capteurs) comme il fallait s'y attendre puisque les vides n'atténuent pas les rayons X.

3-)Les bruits dus à la reflexion de la lumière ambiante ont disparu des images.

Après nous être assuré de la qualité des images obtenues nous pouvons aborder le traitement d'image.

III-PRINCIPAUX PARAMETRES MIS EN EVIDENCE.

Nous décrivons ci-après les différents coefficients obtenus par traitement d'image.

III -1-Coefficient d'homogénéité

Les vides existant à l'intérieur des enrobés drainants sont dus en grande partie à l'agencement des granulats entre eux et à la granulométrie de ces derniers. Nous avons cherché à caractériser par un coefficient la distribution spatiale des granulats et à relier ce coefficient aux autres paramètres acoustiques. Ce coefficient nous l'avons appelé coefficient d'homogénéité. Il traduit une disposition homogène des granulats dans l'espace.

Le principe retenu pour déterminer ce coefficient est de comparer la distribution des centres de gravités des granulats à une distribution de référence. La distribution de référence choisie est une grille de points régulièrement espacés dont la trame est égale au diamètre moyen des granulats composant l'enrobé drainant.

Par définition la grille de référence aura un coefficient d'homogénéité égal à un. On balaye l'image contenant les centres de gravités des granulats avec la grille de référence et ce jusqu'à trouver la position de la grille pour laquelle la somme des carrés des distances des centres de gravité aux points de la grille de référence soit minimum.

Pour cette position de la grille on calcule la distance moyenne d_{moy} des centre de gravité à la grille de référence. Si d_g représente la distance entre points de la grille de référence le coefficient d'homogénéité est par définition:

$$CH=1-2*d_{moy}/d_g$$

le facteur 2 tient compte du fait que par raison de symétrie on a $d_{moy} \leq d_g/2$.

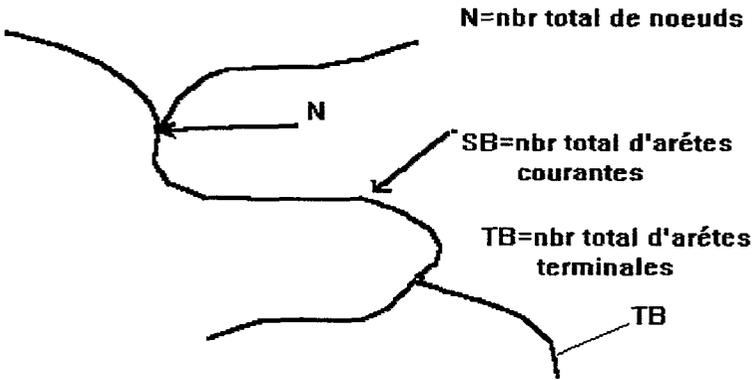
III--2-Coefficient d'interconnectivité.

Plus les vides de l'enrobé drainant communiquent entre eux et plus est forte l'absorption acoustique de cet enrobé. En effet le volume qui sera disponible lors d'un cycle de compression détente de l'air sera sensiblement égal à la somme des volumes des vides qui communiquent entre eux.

HAM et HOLMES [1992] du centre médical de l'université de Californie étudiant le problème de l'interconnexion des pores dans certains biomatériaux dans le but de les substituer dans des greffes osseuses ont proposé un paramètre pour quantifier cette interconnexion.

Ce paramètre est défini de la façon suivante en considérant le squelette du réseau de pores (voir fig ci-après):

$$ICI=(N*SB)/(T*(TB+1))$$



T=Nombre d'arbre.

Pour quantifier l'interconnectivité des vides des enrobés drainants nous avons repris cet indice en le modifiant sous la forme:

$$CIV=N*SB/(TB+1)$$

En effet lorsque nous nous trouvons en présence de certains vides très petits et isolés ne participant pas aux phénomènes d'absorption ceux-ci sont comptés comme étant un objet et donc le nombre d'arbre était incrémenté d'autant. Cette seconde formule donne des résultats réalistes.

III-3-Granulométrie des vides.

Dans une analyse granulométrique le critère étudié est généralement la taille (aire, diamètre de Férêt, le plus petit diamètre). On distingue deux types d'analyse granulométriques:

- 1-) Une analyse granulométrique en nombre
- 2-) une analyse granulométrique en mesure.

1-) Dans l'analyse granulométrique en nombre on considère les particules une par une afin d'établir une statistique d'un paramètre caractéristique de la taille. La valeur moyenne de ce paramètre sera prise avec une règle de pondération uniforme pour toutes les particules..

2-) Dans l'analyse granulométrique en mesure on pèse le refus de chaque tamis puis on reporte sur un graphe la variation du contenu de chaque tamis en fonction de la taille du tamis. On attribue à chaque particule une valeur qui est proportionnelle à sa taille" .

Dans le cas présent des structures qui nous intéressent, la phase à étudier est celle des vides intergranulaires. Ces vides ont des formes complexes et sont interconnectés entre eux. Une analyse en nombre de ces vides n'a pas de sens. Seule une analyse granulométrique en mesure qui présente un caractère beaucoup plus général peut être utilisée ici.

Granulometrie par ouverture bidimensionnelle.

L'ouverture morphologique par des éléments structurants de taille croissante est un procédé qui permet de trier les composantes de l'image en fonction de leur taille et de leur forme. En effet au fur et à mesure que l'on fait croître la taille de l'élément structurant, les formes sont lissées, s'amenuisent pour disparaître finalement [COSTER 1989].

Si on appelle $O^{\lambda B}(X)$ l'ouvert de X par l'élément structurant B de taille λ . La fonction de distribution est donnée par:

$$G(\lambda) = \frac{A(X) - A(O^{\lambda B}(X))}{A(X)} \quad A(X) = \text{Aire de } (X).$$

En analyse locale on a:

$$G(\lambda) = \frac{A_A(X) - A_A(O^{\lambda B}(X))}{A_A(X)}$$

La granulométrie par ouverture permet l'étude des grains et celle des pores.

III-4-Etude de la dispersion spatiale des vides

La répartition spatiale des vides joue un rôle important dans le phénomène d'absorption acoustique des bruits. Nous allons quantifier l'état de dispersion de

ces vides au moyen de la fonction de covariance. La fonction de covariance donne des informations non seulement sur la répartition spatiale mais aussi sur la taille des vides.

Définition de la fonction de covariance.

Soit $B_h = \{0, h\}$ un élément structurant constitué par l'union des deux extrémités du vecteur Oh (De module h et direction α). voir figure 1 :

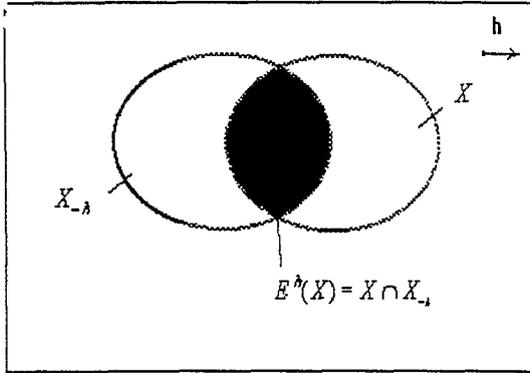


figure 1: Schémas montrant l'érodé de X par $B_h = \{0, h\}$

Considérons une composante connexe de la phase à étudier et soit x un point de cette phase. Quand on s'écarte de ce point x dans la direction α d'une certaine distance h , nous trouvons le point $x+h$.

Deux cas peuvent alors se présenter :

- 1-) Le point x et le point $x+h$ sont tous deux situés dans la même phase.
- 2-) Le point x et le point $x+h$ appartiennent à deux phases différentes.

Considérons l'événement $\{ x \in X, x+h \in X \}$. Pour que cet événement soit possible il faut que x appartienne à l'érodé de X par l'élément structurant $\{0, h\}$. Si nous appelons $E^h(X)$ l'érodé de X par l'élément structurant B_h

La probabilité pour que $x \in E^h(X)$ est égale au pourcentage d'espace occupé par la phase $E^h(X)$, c'est à dire à sa teneur.

On appelle covariance $C(X,h)$ l'aire de l'ensemble X érodé par Bh .

En analyse local la covariance est donnée par:

$$C(X, h) = \frac{A(E^h(X) \cap E^h(Z))}{A(E^h(Z))}$$

Z : représente le masque de mesure.

III-5-Rugosité des enrobés drainants: Analyse profilométrique par la méthode fractale.

Etant donné un profil transversal de la surface d'un enrobé drainant considérons la partie de la ligne du profil en contact avec l'air et sur une profondeur égale au diamètre moyen des granulats. Cette partie du profil sera utilisée pour la caractérisation de la rugosité de la surface de l'enrobé à étudier.

Pour caractériser le profil ainsi délimité nous utiliserons sa dimension fractale.

La dimension fractale d'une ligne est donnée par :

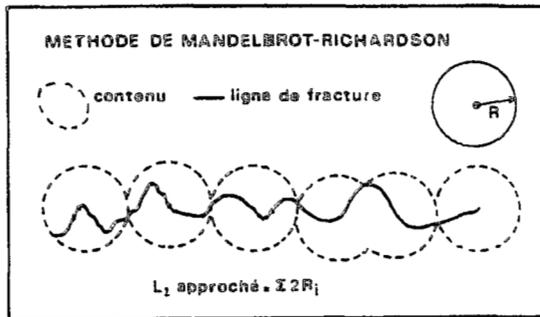
$$D=1-\text{Log}(L)/\text{Log}(\lambda).$$

L =périmètre approché de la ligne du profil.

λ =l'ouverture du "compas" ayant servi à mesurer ce périmètre approché.

La dimension fractale du profil est calculé par les techniques d'analyses d'images .

Pour cela la technique de recouvrement utilisée est celle de Minkowski.



D'après Coster et Chermant.

La méthode théorique consiste à remplacer chaque point par un cercle et à prendre l'union de ces cercles. Ceci n'est autre que la dilatation de la ligne par ce même cercle

Sur les images digitalisées le cercle est remplacée par un élément structurant convexe B

La dilatation par un élément structurant convexe B est utilisée pour estimer le périmètre approchée pour un pas de dilatation donnée.

si (λ) est le nombre de pas de dilatation, le périmètre approchée de X est donnée par :

$$L(X) = \frac{\text{Aire}(D^{\lambda B}(X))}{2\lambda}$$

$$D^{\lambda B}(X) = \text{dilaté de X par B } \lambda \text{ fois.}$$

La dimension fractale est alors obtenue par : $D=1-\text{Log}(L(X))/\text{Log}(\lambda)$.

IV-RESULTATS OBTENUS

Les résultats obtenus ci-après correspondent à deux campagnes d'essai faite par une société routière. Il ne sont représentatifs que du type d'enrobé mis en oeuvre lors de ces campagnes et sont rapportés ici pour montrer l'intérêt des méthodes de traitement d'images.

IV-1-Résultats relatifs à l'analyse granulométrique des vides

Nous avons procédé à une analyse granulométrique par ouverture bidimensionnelle des carottes de 8 , 6 et 4 cm d'épaisseur :

On a porté sur le graphe G864.xls les courbes granulométriques moyennes des 3 types de carottes de la campagne n° 1.

Sur le graphe MG864NOV.XLS nous avons reportés les moyennes relatifs aux trois types de carottes de la campagne n° 2..

Pour l'ensemble de ces graphes nous avons porté en abscisse le pas d'ouverture exprimé en pixel et en ordonnée la valeur de la fonction de distribution G(λ) donnée par :

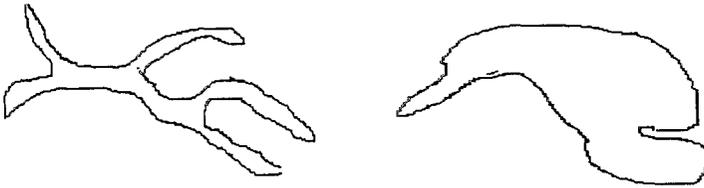
$$G(\lambda) = \frac{A_A(X) - A_A(O^{\lambda B}(X))}{A_A(X)}$$

En examinant ces courbes on peut distinguer 2 régions en fonction du pas de l'ouverture λ .

Pour un pas d'ouverture compris entre 1 et 5 les 3 courbes sont pratiquement égales. Cette région correspond à des vides isolés, de petit volume.

Pour un pas d'ouverture supérieur à 5 la courbe granulométrique moyenne relative aux carottes de 6 cm croit plus vite que les deux autres courbes et pour un pas d'ouverture de 12 pixels il ne reste pratiquement pas de vide sur les images de la carotte de 6 cm. Ceci peut être expliqué par le fait que les vides de la carotte de 6 cm sont plus fins, c'est à dire plus allongés et plus ramifiés.

En effet si on examine les deux formes ci dessous qui sont sensiblement égales en surface une opération d'ouverture de 5 pixels aura pour conséquence de faire disparaître la forme de gauche tandis que celle de droite ne sera que partiellement amputée des parties saillantes dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 2×5 pixels.



Si on compare les courbes granulométriques des carottes de 8 et 6 cm on constate qu'elles sont légèrement différentes dans l'intervalle (5..8) pixels.

La courbe granulométrique de la carotte de 4 cm d'ED pour des valeur du pas d'ouverture supérieur à 5 pixels se détache nettement des deux autres courbes Ceci confirme les résultats obtenus par analyse des covariogrammes à savoir que les carottes de 8 et 6 cm ont des vides qui ont des formes plus fines et plus allongées que ceux de la carotte de 4 cm.

IV-2 Résultats relatifs au coefficient d'homogénéité.

Ces résultats sont consignés dans les tableaux récapitulatifs. Ce coefficient exprime l'importance des vides et leur degré d'interconnection. En effet plus le squelette comporte de noeuds et d'arêtes courantes plus nous avons de ramifications et de poches de vides.

La constatation que l'on peut faire sur ce coefficient est qu'il est plus élevé pour les enrobés drainants de 8 cm que pour ceux de 6 cm et de 4 cm .

En conséquence on peut dire que les vides des enrobés drainants de 8 cm sont plus interconnectés entre eux que ceux des deux autres types d'enrobé et que les enrobés de 6 cm d'épaisseur ont à leur tour des vides plus interconnectés que ceux des enrobés de 4 cm.

IV-3-Résultats relatifs à la dispersion spatiale des vides.

En ce qui concerne le pourcentage des vides le graphe 52 nous montre que l'ED de 6 cm d'épaisseur a un pourcentage plus élevée que celui de 8 cm qui est lui meme plus élevé que l'ED de 4 cm.

En ce qui concerne les pentes à l'origine des covariogrammes: les enrobés drainants de 8 cm et 6 cm d' épaisseur possèdent la pente la plus élevée (Voir tableau récapitulatif). Ceci signifie que les structures sont plus fines c'est à dire que pour un volume des vides de même ordre de grandeur les vides sont plus étirés , donc présentent des trajets plus grands ce qui est favorable au phénomène d'absorption acoustique. Ceci à été confirmé par les mesures acoustiques effectuées sur les différents types d'enrobés(voir tableau synthétique des résultats). Ce sont les enrobés de 8 cm et 6 cm ayant la plus grande pente à l'origine qui atténuent le plus de bruit.

IV--4- Résultats relatifs à la rugosité.

Les résultats relatifs aux différentes carottes sont reportés sur les graphes ED864.xlc et MR864j93.xlc.

Le graphe ED864.xlc récapitule les moyennes relatives aux 3 types de carottes de la première campagne et le graphe MR864j93.xlc ceux de la seconde campagne.

Sur les graphes ainsi obtenus on peut remarquer que pour les 3 types de carotte les courbes sont légèrement horizontales pour des pas de dilatation faibles, (pas de dilatation dont le logarithme est compris entre 0 et 1.5). Ceci signifie une absence ou une faible microtexture des granulats.

Lorsque le logarithme du pas de dilatation est supérieur à 1.5 la courbe s'incline par rapport à l'horizontale et devient presque une droite. Pour cette partie de la courbe nous calculons sa pente p par la méthode des moindres carrés ensuite nous en déduisons sa dimension fractale par:

$$D=1-p$$

Cette dimension fractale est caractéristique à chaque profil. Plus la dimension fractale d'un profil est élevé et plus grande est sa rugosité.

Si nous examinons les graphes ED864.xlc et MR864.xlc récapitulant les moyennes des 3 types de carotes nous constatons que l'enrobé drainant de 8 cm possède la plus grande dimension fractale donc présente la plus grande rugosité, suivi par l'enrobé drainant de 6 cm et finalement l'enrobé de 4 cm présente la plus faible rugosité.

Nous pouvons dire que les 3 types d'enrobé ont des rugosités de même ordre de grandeur mais peuvent cependant être classés par ordre de rugosité.

(Rg 8 cm>Rg 6 cm>Rg 4 cm).

Conclusion.

Les techniques d'analyses d'image permettent de quantifier des paramètres de formes complexes, aussi bien en surface qu'en linéaire. L'application présentée ici permet aux fabricants d'enrobés drainants de mieux connaître leur produit mis en place. Ils peuvent donc choisir leur formulation et leur technologie de mise en oeuvre en ayant un moyen fiable de mesure. Cet outil est disponible sur PC486 et peut être appliquée à d'autres structures de la matière.

Bibliographie :

- COSTER, M et CHERMANT, J.L. Précis analyse d'images. Editions du CNRS, 1989.
- COSTER, M Morphological tools for non planar surfaces analysis. Acta stereologica 1992 p639-650
- CHASSERY, J.M, et MONTANVERT, A. Géométrie Discrète en analyse d'images, Paris : HERMES, 1991.
- DELANNE Y. Les enrobés drainants: analyse de leurs propriétés vis à vis du bruit de roulement et de l'adhérence des pneumatiques des véhicules de tourisme. Bulletin de liaison LCPC 182 Juil-Août 1989.
- FLOOK, A.G. The caractérisation of texture and structured particles profiles by automated measurement of their fractal dimension Proc. Partikel technologie, Nuremberg, RFA, 1979 p 591-599.
- HAMET, J.F. Le bruit de contact pneumatique/chaussée, Recherche Transport Sécurité N°32 décembre 1991.
- HOLMES, HAM.L, E. SHORS. Computerized quantitative analysis of interconnectivity of porous biomaterials. Acta stereologica 1992, p 267-272.
- JOURLIN, M et al. Contrast definition and contour detection for logarithmic images. Journal of Microscopy, 1988, 149, p.21-35.



Image ED2E4I1.PRF

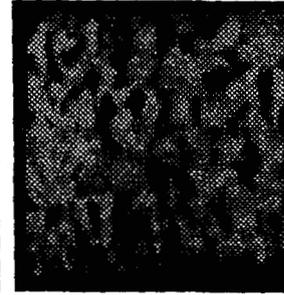


Image ED2E4I1.IMA

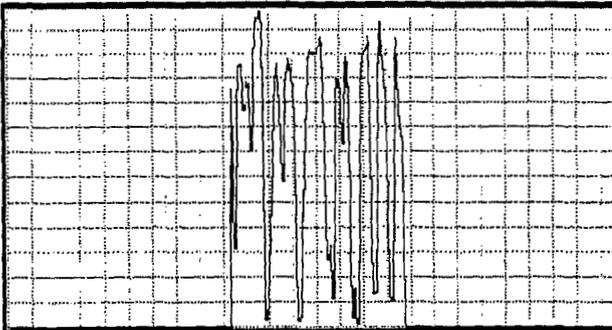


Image ED1E4I1.PRF

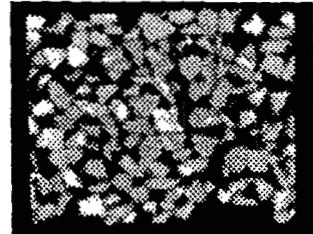
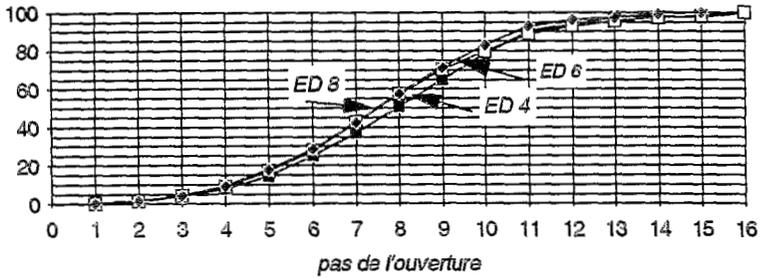


Image ED1E4I1.IMA

graphe G864.xls: GRANULOMETRIE Moyenne des ED 8 6 4 cm
campagne 1



graphe MG864NOV.xls: GRANULO METRIE moyenne des ED 8,6
et 4 cm campagne 2

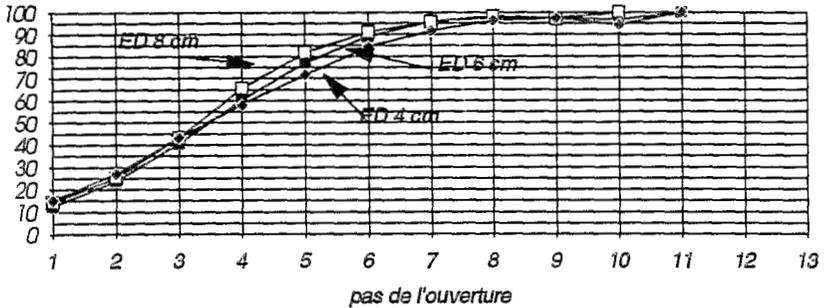
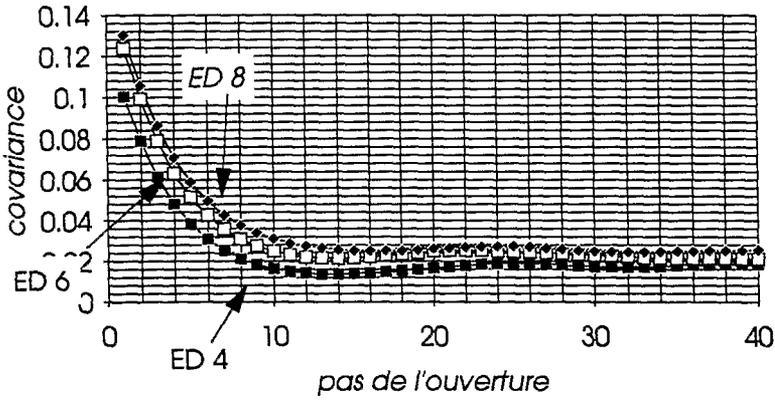


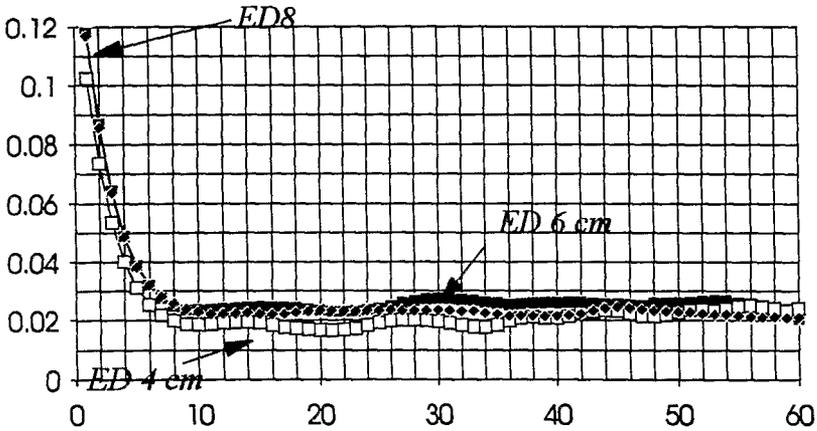
TABLEAU RECAPITULATIF

Paramètre	Campagne2			Campagne2		
	4	6	8	4	6	8
Épaisseur	4	6	8	4	6	8
Lpmax	74.4	72	70	75.5		
Rs	2.5	1.3	1			
péerméabilité	3.1	4.3	4.5			
% Vide	29.8	30.5	32.7			
%Vide commu	3.6	5.6	24.8			
Tortuosité	1.85	1.48	1.42	1.88	1.64	1.48
écart type	0.23	0.08	0.058	0.05	0.08	0.1
Coef. d'intercon.	47.61	160.8	182.4	67.53	127.1	197.1
écart type	20.39	36.76	61.53	0.21	26.04	49.31
coef. d'homogé.	0.34	0.325	0.32	0.332	0.315	0.325
Rugosité	1.104	1.114	1.118	1.13	1.124	1.146
Pente à l'origine	0.023	0.026	0.026	-0.02	-0.023	-0.022

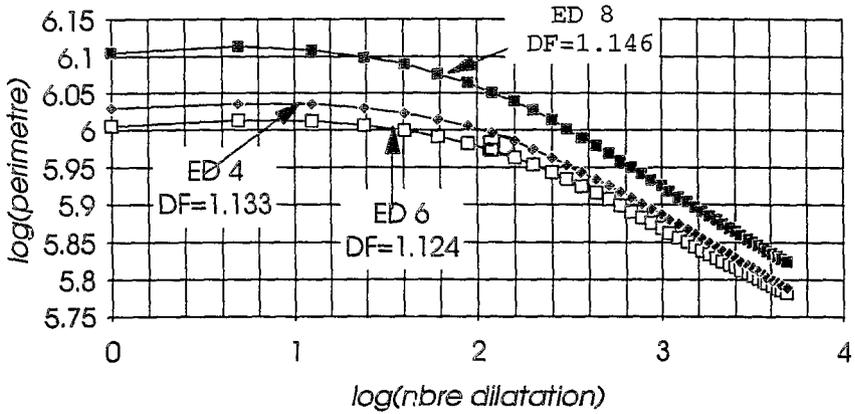
graphe 52: Covariogramme des moyennes des ED 8 6 et 4 cm campagne2



Covariogramme des moyennes des ED 8 6 et 4 cm d'épaisseur campagne 1



*graphe ED864.xls: analyse de la rugosité par la méthode de la dimension fractale :
 moyenne des rugosité des ED 8 6 et 4 cm campagne 1*



*graphe MR864.xls: analyse de la rugosité par la méthode de la dimension fractale : moyenne des rugosités des ED 8,6,4 cm
 Campagne 2*

