

Influence de la Dimension Fractale sur la Perméabilité

Hacène Belmihoub, Bachir Melbouci, Ali Hamza

Université Mouloud Mammari, Tizi-Ouzou, Algérie

Résumé. La perméabilité est un critère de sélection important dans le choix des sables utilisés comme matériaux de drainage ou de filtration. On se sert également de la valeur de la perméabilité pour évaluer les débits d'infiltration sous les digues et les barrages en terre et pour choisir un système de pompage chargé de maintenir à sec certaines zones des travaux. La perméabilité agit aussi sur le tassement des sables. En effet, la vitesse de tassement est fonction de la vitesse d'expulsion de l'eau des vides du sol, laquelle dépend la perméabilité. Pour mieux comprendre comment varie la perméabilité dans les matériaux sableux, il faut tenir compte de plusieurs facteurs à savoir la dimension, la forme, l'étalement granulométrique, la composition chimiques des grains des sables utilisés. La présente étude a pour objectif, de donner un aperçu général et le rôle que joue la forme des grains exprimée par la dimension fractale dans la perméabilité des sables. Trois formes différentes de sable (arrondie, carrée, triangulaire) sont caractérisées par leurs dimensions fractales. Les échantillons sont ensuite, soumis à des essais de perméabilité au perméamètre à charge constante. La première partie de ce travail est consacrée à la caractérisation de la forme des grains constituant nos sables utilisés, la deuxième partie de ce travail est une étude expérimentale sur la perméabilité au perméamètre à charge constante. L'influence de la dimension fractale (la forme des grains) sur la perméabilité fait l'objet de cette partie, tout en mettant l'accent sur la dimension fractale des grains. Les résultats obtenus sur les différentes formes de sable, ont permis de mettre en évidence que la dimension fractale a un rôle important dans l'évolution de la perméabilité.

Mots clés : Forme des grains, Dimension fractale, perméabilité, sables.

Abstract. The permeability is an important selection criteria in the choice of the sands used like materials of drainage or filtration. One also uses the value of the permeability to value the debits of infiltration under the dams and the dams in earth and to choose a system of pumping loaded to maintain to dry some zones of works. The permeability also acts on the jamming of the sands. Indeed, the speed of jamming is function of the speed of expulsion of the water of the soil emptiness, which depends on the better perméabilité. For to understand how varies the permeability in the sandy materials, it is necessary to take into account several factors to know the dimension, the shape, the display granulométrique, the composition chemical of the grains of the utilisés. La sands presents survey has for objective, to give a general preview and the role that the shape of the grains expressed by the dimension fractale in the permeability of the sables. Trois shapes different of sand plays (rounded, breve, triangular) are characterized by their measurements fractales. The samples are then, submitted to tests of permeability to the perméamètre to constant load. The first left from this work is dedicated to the characterization in the shape of the grains constituting our used sands, the second part of this work is an experimental survey on the permeability to the permeametre to constant load. The influence of the dimension fractale (the shape of the grains) on the permeability makes the object of this part, while putting the accent on the dimension fractale of the grains. The results gotten on the different shapes of sand, permitted to put in evidence that the dimension fractale has an important role in the evolution of the permeability.

Key words: Shape of the grains, Dimension fractale, permeability, sands.

1. Introduction

Les matériaux granulaires (sables) sont très utilisés dans les ouvrages de Génie Civil tel que : ouvrages linéaires autoroutiers et ferroviaires, ouvrages maritimes, barrages et digues, etc..., demandent une meilleure maîtrise de ces matériaux, afin de développer des méthodes de conception et de réalisation plus performantes, pour avoir un meilleur contrôle des risques.

La durée de vie des ouvrages de génie civil dépend essentiellement du comportement des matériaux utilisés comme couche d'assise ou matériaux de construction, vis-à-vis des sollicitations extérieures engendrées par l'ouvrage lui-même ou les phénomènes naturels tels que le séisme et les intempéries. Pour cela, il faut tenir compte de plusieurs facteurs à savoir : la forme, la granulométrie, le degré de saturation, la teneur en eau, la perméabilité et l'indice des vides de ces sables.

La perméabilité est un critère de sélection important dans le choix des sables utilisés comme matériaux de drainage ou de filtration. La forme des grains de ces sables joue un rôle très important sur leur perméabilité.

L'objectif de cette étude est d'analyser la forme des grains en les caractérisant par la dimension fractale qui est une notion généralisée de la dimension euclidienne qui permet d'évaluer la perméabilité des sables de forme arrondi, carrée et triangulaire à l'aide des essais de perméabilité au permeamètre.

2. Description des sables choisis

Dans cette étude, les facteurs importants sont la porosité, l'indice des vides, les poids volumiques des différents échantillons, la forme des grains et la granulométrie. Pour la forme des grains constituant les sables, on compare entre les figures 1 et 2 de référence et les photos réalisées pour les grains choisis. A partir de cette comparaison, on peut conclure que les échantillons considérés présentent des grains bien arrondis pour le sable de mer et anguleux pour le sable d'oued.

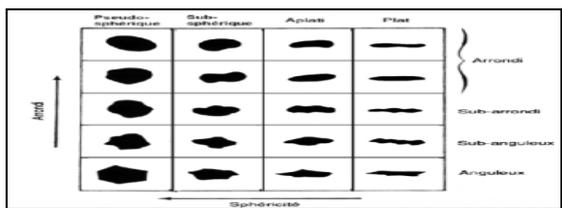


Fig.1. Descripteurs de l'arrondi et de la phéricité

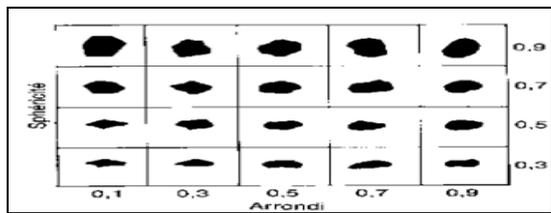
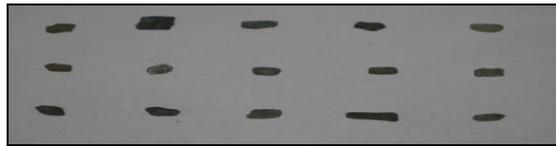


Fig.2. Indices d'arrondi et desphéricités



Forme arrondie



Forme carrée



Forme triangulaire

Photos : Grains des sables étudiés classés par forme

Trois formes les plus répétées dans les sables étudiés ont été sélectionnées. En comparant les formes choisies par rapport aux formes citées ci-dessus (voir figures 1 et 2), nous remarquons qu'il y a une ressemblance sur le plan sphéricité pour ce qui concerne la forme arrondie. Cette ressemblance nous permet d'attribuer un indice de sphéricité et d'arrondissement de 0.9 pour la forme arrondie.

En ce qui concerne, la forme carrée comparée aux figures 1 et 2, nous remarquons qu'elle ressemble à la forme sub-angulaire ayant comme indice de sphéricité et d'arrondissement 0.5.

Pour la forme triangulaire comparée aux mêmes figures de référence 1 et 2, nous pouvons la classer dans la forme anguleuse et ayant un indice de sphéricité et d'arrondissement de 0.3.

3. Origines de prélèvement des échantillons de l'étude

Les sables utilisés dans cette étude proviennent de deux origines différentes à savoir : sable de forme arrondie : le prélèvement est situé à la plage qui se trouve à proximité de la gare routière de KHAROUBA (ALGER).

Pour le sable anguleux d'oued : le prélèvement est situé à l'oued de sidi khelifa à une distance de quinze kilomètres au Nord Est d'Azeffoun.

4. Identification des matériaux d'étude

Les échantillons ont été soumis au séchage dans une étuve à la température de 105°C pendant 24 heures. Par la suite, une étude d'identification a été réalisée qui comporte les essais suivants :

- Analyse granulométrique, teneur en eau, masses volumiques, indice des vides, porosités et degré de saturation

4.1 Analyse granulométrique

Cette analyse est faite sur des échantillons globaux (0/8 mm) à sec à l'aide d'un vibro-tamis selon la norme NF P 94-09 (octobre 1993). Le but est de déterminer la répartition en poids des grains suivant leurs grosseurs.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes granulométriques sur la figure 3.

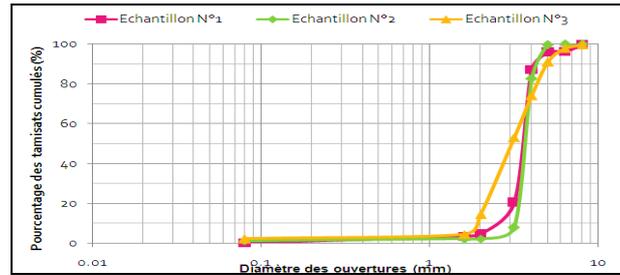


Fig .3. Courbes granulométriques des trois types de sables étudiés

Echantillon N°1 : $C_u = 1.42$, $C_c = 1.06$

Echantillon N°2 : $C_u = 1.12$, $C_c = 1.05$

Echantillon N°3 : $C_u = 1.78$, $C_c = 0.34$

Classification des trois échantillons sableux :

C_u : coefficient d'uniformité

C_c : coefficient de courbure

L'échantillon N°1 : $C_u = 1.42 < 2$ et $1 < C_c = 1.06 < 3$, selon le système unifié de classification des sols granulaires, le sable est bien gradué de symbole (SW).

L'échantillon N°2 : $C_u = 1.12 < 2$ et $1 < C_c = 1.05 < 3$, selon le système unifié de classification des sols granulaires, le sable est bien gradué de symbole (SW)

L'échantillon N°3 : $C_u = 1.78 < 2$ et $C_c = 0.34 < 1$, selon le système unifié de classification des sols granulaires, le sable est mal gradué de symbole (SM)

D'après les courbes d'analyse granulométrique des trois types de sable, on peut conclure que l'échantillon N°3 est plus uniforme et mal gradué que l'échantillon N°1 et N°2. L'étalement de la courbe entre le diamètre 0 / 8 mm de l'échantillon N°3 permet de juger que celui-ci est moins résistant que l'échantillon N°1 et N°2.

5. Récapitulation des différentes caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des sables utilisés sont résumées dans le tableau N°1

Tableau .1. Indices des vides, porosités et degré de saturation en (%), les masses volumiques en (g/cm^3) des échantillons étudiés

Ech N°	W (%)	ρ_d	ρ_s	ρ_h	e (%)	Sr (%)	n (%)
1	5.44	1.69	2.55	1.78	0.5	27.74	0.33
2	6.16	1.63	2.44	1.73	0.49	30.67	0.32
3	6.38	1.61	2.66	1.71	0.58	29.26	0.36

6. Préparation des échantillons

Dans chaque échantillon préparé, quinze grains ont été choisis pour évaluer leur dimension fractale et ceci pour chacune des trois formes considérées, voir figure (4, 5, 6, 7, 8, 9).

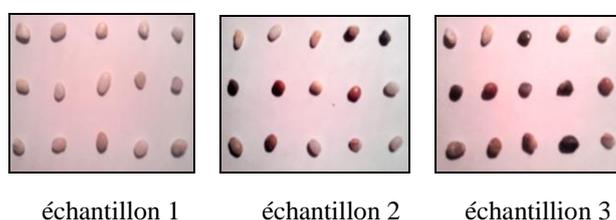
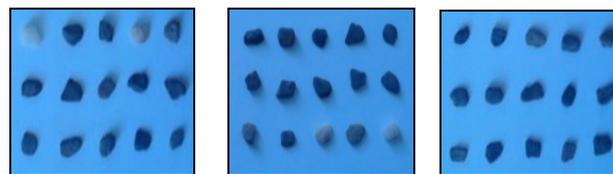


Fig .4. Forme arrondie (0/8)



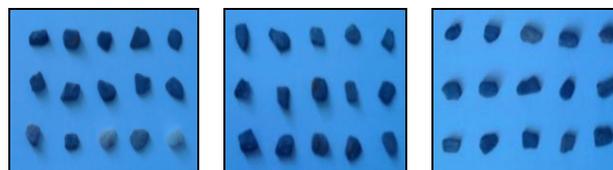
échantillon 1 échantillon 2 échantillon 3

Fig .5. Forme arrondie (3/5)



échantillon 1 échantillon 2 échantillon 3

Fig .6. Forme carrée (0/8)



échantillon 1 échantillon 2 échantillon 3

Fig .7. Forme carrée (3/5)



échantillon 1 échantillon 2 échantillon 3

Fig .8. Forme triangulaire (0/8)



échantillon 1 échantillon 2 échantillon 3

Fig .9. Forme triangulaire (3/5)

Pour calculer la dimension fractale des grains, on utilise la formule suivante :

$$D = \frac{\log P}{0.5 \log A + \log C}$$

Dans cette équation C : valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale C= 1.77.

P : le périmètre du grain.

A : la surface du grain.

D : la dimension fractale moyenne de la rugosité des grains caractérisant l'irrégularité du contour de grain. Théoriquement, elle vaut 1 pour des contours lisses et réguliers tels que les cercles.

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux ci-dessus 2 et 3 :

Tableau 3 : Calcul de la dimension fractale pour les trois formes de classe 3/5

classe 3/5

Forme	Ech	N°	Numéro de grain														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Forme arrondie	Ech 1	D	1.207	1.193	1.213	1.252	1.208	1.204	1.212	1.231	1.208	1.232	1.223	1.207	1.216	1.199	1.208
	Ech 2	D	1.222	1.197	1.213	1.244	1.216	1.234	1.220	1.207	1.214	1.211	1.976	1.204	1.207	1.215	1.206
	Ech 3	D	1.226	1.194	1.207	1.213	1.219	1.211	1.215	1.202	1.221	1.223	1.221	1.202	1.220	1.214	1.207
Forme carrée	Ech 1	D	1.217	1.241	1.212	1.280	1.278	1.217	1.252	1.250	1.218	1.228	1.301	1.221	1.267	1.220	1.243
	Ech 2	D	1.288	1.209	1.231	1.227	1.213	1.229	1.254	1.227	1.287	1.254	1.205	1.224	1.287	1.287	1.242
	Ech 3	D	1.250	1.220	1.220	1.247	1.243	1.254	1.271	1.258	1.276	1.257	1.250	1.245	1.229	1.227	1.220
Forme triangulaire	Ech 1	D	1.228	1.264	1.304	1.317	1.291	1.244	1.252	1.249	1.195	1.270	1.214	1.213	1.244	1.242	1.271
	Ech 2	D	1.257	1.215	1.238	1.249	1.299	1.280	1.204	1.238	1.234	1.227	1.235	1.244	1.225	1.260	1.263
	Ech 3	D	1.257	1.261	1.277	1.281	1.233	1.212	1.261	1.241	1.292	1.293	1.217	1.209	1.240	1.248	1.218

Tableau 2 : Calcul de la dimension fractale pour les trois formes de classe 0/8

classe 0/8

Forme	Ech	N°	Numéro de grain														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Forme arrondie	Ech 1	D	1.191	1.193	1.182	1.195	1.183	1.186	1.193	1.184	1.184	1.690	1.177	1.188	1.184	1.186	1.177
	Ech 2	D	1.181	1.214	1.210	1.223	1.220	1.211	1.211	1.223	1.220	1.217	1.224	1.213	1.156	1.213	1.214
	Ech 3	D	1.248	1.238	1.247	1.222	1.227	1.227	1.262	1.220	1.236	1.214	1.210	1.221	1.205	1.223	1.252
Forme carrée	Ech 1	D	1.215	1.196	1.227	1.183	1.222	1.219	1.209	1.207	1.240	1.205	1.199	1.226	1.223	1.244	1.245
	Ech 2	D	1.231	1.222	1.218	1.214	1.216	1.216	1.249	1.235	1.264	1.235	1.211	1.233	1.251	1.256	1.268
	Ech 3	D	1.336	1.226	1.264	1.250	1.249	1.219	1.240	1.268	1.271	1.259	1.253	1.247	1.243	1.267	1.268
Forme triangulaire	Ech 1	D	1.292	1.261	1.277	1.347	1.266	1.227	1.258	1.254	1.215	1.287	1.227	1.210	1.271	1.230	1.221
	Ech 2	D	1.253	1.224	1.218	1.231	1.247	1.297	1.261	1.240	1.251	1.209	1.275	1.236	1.250	1.263	1.271
	Ech 3	D	1.265	1.267	1.270	1.284	1.270	1.272	1.288	1.264	1.284	1.283	1.264	1.256	1.291	1.266	1.273

Les résultats de la dimension fractale obtenus pour les différentes formes sont représentés dans les histogrammes ci-dessous (voir figures 10).

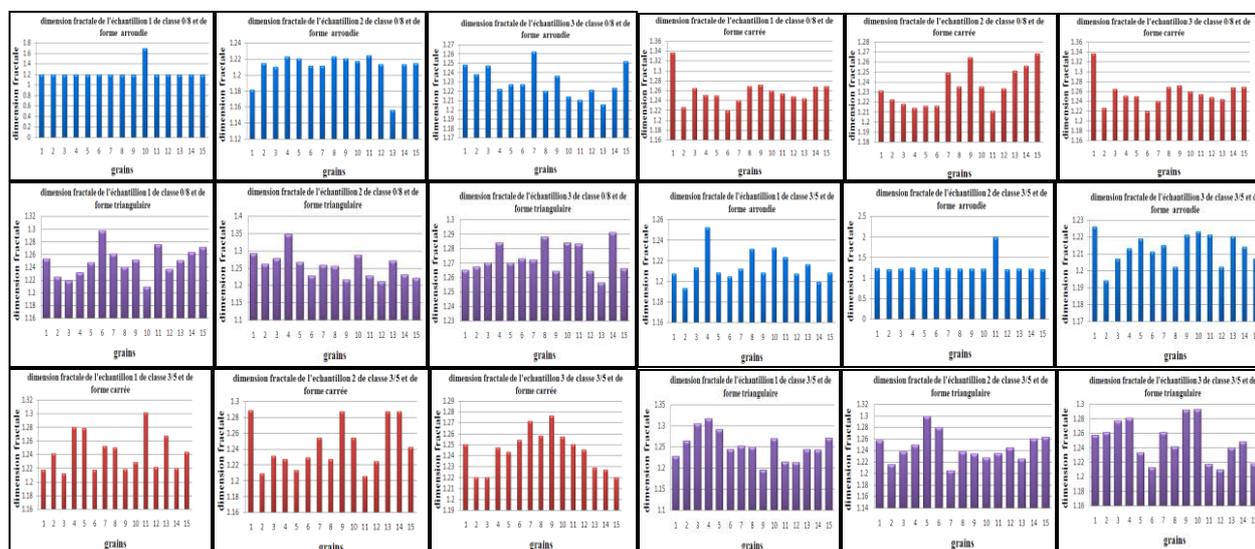


Fig. 10. Représentation graphique de la dimension fractale obtenue pour les différents échantillons

7. l'essai de perméabilité à charge constante

Les essais de perméabilité sont effectués sur les différentes formes de grains, sable de forme carrée, arrondie et triangulaire aux états sec et compacte. Ils ont été réalisés au laboratoire de recherche L.E.G.A de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. L'essai de perméabilité à charge constante convient aux sols assez perméables comme les sables. Suivant la norme ASTM D2434 qui le décrit, cet essai doit satisfaire les conditions suivantes :

- L'écoulement d'eau à travers l'échantillon de sable est laminaire et permanent, de telle sorte que la vitesse d'écoulement de l'eau reste proportionnelle au gradient hydraulique i .
- L'échantillon de sable est saturé et ne subit pas de changement de volume durant l'essai.
- La perte de charge Δh demeure constante.

8. Les étapes de déroulement des essais

L'essai s'effectue en trois étapes qui sont :

a - la mise en place de l'échantillon de sable dans le moule de perméamètre.

b - la saturation de l'échantillon de sable.

c - la détermination du coefficient de perméabilité.

- *mise en place de l'échantillon de sable dans le moule du perméamètre*

On effectue l'essai de perméabilité à charge constante sur des échantillons de sable représentatif (de forme arrondie, carrée, triangulaire), séché à l'air libre. Afin que soient limités les effets de la migration des particules fines, les échantillons ne doivent pas contenir plus de 10% des particules inférieures à 80 μm . Les particules supérieures à 20 mm sont éliminées au départ (classe 0/8, 3/5) afin d'éviter la formation des vides importants le long de la paroi du perméamètre.

On dépose un papier filtre à la base du moule du perméamètre, dans le but de limiter l'érosion potentielle causée par le passage de l'eau.

On place notre échantillon de sable dans le moule du perméamètre à charge constante sous forme de couches de 2 cm d'épaisseur avec un léger compactage manuelle.

On complète le montage en insérant la tête du perméamètre (moule) et en fixant fermement celle-ci avec des écrous.

On met le tout dans un autre moule de volume supérieur au premier.

- *saturation de l'échantillon de sable*

La présence des bulles d'air dans les vides des échantillons de sable, compte tenue des faibles dimensions de l'échantillon dans le perméamètre, a pour effet d'abaisser la valeur de coefficient de perméabilité. Pour éliminer ces bulles, on doit saturer l'échantillon de sable. Quand le perméamètre est installé, on branche son entrée d'eau au réservoir à charge constante et on complète la saturation en ouvrant la valve d'alimentation.

pour remplir le réservoir à charge constante et la valve de purge pour chasser l'air du tuyau d'entrée d'eau. Dès que l'eau commence à jaillir hors de la valve de purge, on referme celle-ci.

- *détermination du coefficient de perméabilité*

Lorsque l'échantillon de sable est saturé, on dégage avec précaution la pince qui bloque la sortie d'eau, puis on règle la valve d'alimentation afin d'obtenir un écoulement stable à travers l'échantillon de sable. On mesure ensuite la perte de charge (Δh) en tenant compte des caractéristiques de montage du perméamètre utilisé.

Pour déterminer le débit de l'écoulement, on mesure le temps requis (Δt) pour recueillir un volume d'eau donné (v) par l'intermédiaire d'un récipient gradué d'au moins 250 ml placé directement sous la sortie d'eau.

9. Appareillage

La figure 11 représente un ensemble coulissant monté sur glissière, comprenant un réservoir d'eau avec trop-plein et alidade (règle graduée) de repérage pour la charge constante et d'un tube en verre de section calibrée pouvant être alimenté jusqu'à la hauteur désirée à l'aide du réservoir.

- Lecture des variations du niveau d'eau à l'aide d'un réglelet de 1,5 m équipé d'un curseur.
- Circuits correspondants aux 2 types d'essais isolés grâce à 2 robinets à 3 voies.
-



Fig .11. Perméamètre de laboratoire

10. Mode opératoire

- On commence par amener l'échantillon à la saturation.
- Ouvrir le robinet du perméamètre
- Rajout d'eau pour garder le niveau d'eau constant.
- Après quelques minutes, on arrête le chronomètre et on mesure le volume de l'eau ayant traversé l'échantillon ; ce qui permettra la lecture des hauteurs h_1 , h_2 et h_3 .

11. Courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale

Les résultats de la variation du coefficient de perméabilité en fonction de la dimension fractale pour les différentes formes et les différentes classes sont représentés dans les courbes ci dessous

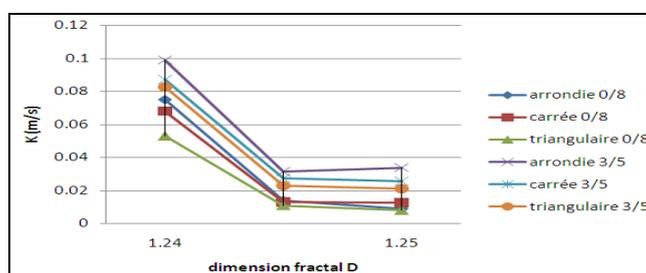


Fig .11. Courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale

12. Interprétation des résultats

Les principales observations et conclusions tirées des courbes de perméabilité en fonction de la dimension fractale sont :

La perméabilité décroît avec l'augmentation de la taille des grains (classe granulaire). En effet, pour la classe 3/5 les pores constitués entre les grains sont très importants (classe serrée) ; alors que pour la classe granulaire étalée (0/8), le pourcentage de fines est important et celles-ci occupent les vides de cette classe.

La perméabilité diminue en fonction de l'augmentation de la dimension fractale pour les deux classes granulaires (0/8, 3/5) et pour les différentes formes de sables (arrondie, carrée, triangulaire). Ce qui montre que la dimension fractale caractérise la rugosité et l'état de surface des grains. La forme arrondie pour les deux classes (0/8, 3/5) est caractérisée par un coefficient de perméabilité élevé, par rapport aux autres formes (carrée et triangulaire). Cela est évident puisque la forme arrondie a moins de rugosité et d'irrégularité, ce qui engendre une valeur de la dimension fractale plus faible et l'écoulement des eaux est plus rapide, qui se traduit par un coefficient de perméabilité élevé. Donc, la perméabilité dépend fortement de la forme des grains constituant les sables choisis ainsi que de leur état de surface.

La forme triangulaire pour les deux classes (0/8 et 3/5) est moins perméable des trois formes. Cela peut s'expliquer par la rugosité et l'angularité importantes qui caractérisent cette forme. L'enchevêtrement des grains, dans ce cas, réduit les vides existants dans la matrice sableuse.

13. Conclusion

La perméabilité des sables dépend essentiellement de la forme des grains qui le constitue. La forme triangulaire est la moins perméable des trois et cela quelque soit la classe granulaire.

La forme arrondie est la plus perméable par rapport aux deux autres formes (carrée et triangulaire), et cela quelque soit la taille des grains constituant les sables et elle est la plus utilisée dans les filtres des barrages et les couches drainantes.

Cette étude a montré que la perméabilité diminue avec l'augmentation de la dimension fractale des grains du sable choisi.

14. Bibliographies

J. Agnolin, J.N. Roux, P. Maassad, X. Jia et P. Mills ; Sound wave velocities in dry and lubricated granular packing: numerical simulations and experiments, *Powders and Grains* édité by R, (2005).

L. Ait saadi ; Considération générale sur les sols fins, géotechnique, p45-49 (2005).

E. Alonson ; A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, n°40, vol 3, p 405 -430 (1990).

K. Chouicha ; Identification de la compacité par la dimension fractale, *Proceeding du Séminaire National de Génie Civil*, Editions Dar El Gharb, ENSET Oran, p 28–29, (Algérie 2006).

P. Claudin ; Physique des tas de sable. Les Ulis : EDP Science (1999)

F. Cruz ; Ecoulements de grains secs : frottement et blocage, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (2004).

C.I. Feng, A.b .Yu ; Effect of liquid addition on the packing of mono-sized coarse spheres. *Powder Technology*, 99, 22-28, (1998).

V. Guerin ; Prédiction et compréhension de la densification des poudres commerciales d'alumine et de fer grâce à une approche par réseaux de neurones artificiels. Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, (2004).

B. Mandelbrot ; The fractal geometry of nature w.h.freeman and company, New York (1983).



B. Mandelbrot ; Les objets fractals : forme, hasard et dimension, Paris (France), Edition Flammarion, (1975).

B. Mandelbrot ; Self Affine fractal sets. Fractal in Physics. Pietronero & fractal dimension. Science, (1986).

B. Meng ; Determination and interpretation of fractal properties of the sandstone pore system Materials and Structures, 195–205, (1996)