

Reconstruction de courbes granulométriques à partir d'un scanner à plat

Elias Daïch¹, Mélanie Vah¹, Armelle Jarno¹, François Marin¹

¹LOMC, UMR 6294 CNRS, Université Le Havre Normandie, Normandie Université

53 rue de Prony, 76600 Le Havre France

RESUME Une façon simple de caractériser une distribution granulométrique est d'établir sa courbe granulométrique par tamisage. Cependant, lorsque les échantillons sont de très petite taille où qu'une colonne de tamis n'est pas disponible, comme sur un chantier, cette technique n'est plus utilisable. Dans cette étude, des échantillons de sables et d'autres matériaux, naturels ou synthétiques sont utilisés pour tester la robustesse d'une méthode d'analyse d'images basée sur l'utilisation d'un scanner 2D pour reconstruire une distribution granulométrique telle que fournirait une colonne de tamis. L'étude concerne la gamme de 100 μm à 3000 μm . Basé sur l'écart quadratique entre distribution granulométrique par analyse d'images et colonne de tamis, un bon accord est trouvé pour des distributions de sables homogènes, hétérogènes voir bimodaux. Les limites d'application de la technique sont également abordées. Sa facilité de mise en œuvre, sa rapidité et son faible coût, font de la méthode de reconstruction par analyse d'images, une méthode alternative intéressante.

Mots-clefs Analyse d'images, Tamisage, Distribution granulométrique

I. Introduction

Que ce soit dans l'étude des reconnaissances géotechniques du sous-sol, des éco-géo-matériaux de construction (Li et al, 2023), des milieux poreux (Hammadi et al., 2017) ou du transport sédimentaire (Vah et al., 2020 ; Durafour et al, 2015), la connaissance de la distribution des diamètres des grains ainsi que leurs formes sont des données essentielles pour la compréhension fine des phénomènes. Pour les obtenir, il existe différentes méthodes de laboratoire qui fournissent une caractérisation différente et complémentaire des populations de grains. La méthode la plus traditionnelle est sans aucun doute le tamisage vibré du matériau à travers une colonne de tamis normalisés. Elle permet en appliquant un protocole défini par la norme AFNOR EN 933-2 de connaître rapidement la distribution en masse des diamètres apparents de grains de taille supérieure à 63 microns sans information sur leur forme. La granulométrie à diffraction laser basée sur la diffraction de la lumière par les particules offre quant à elle la possibilité de caractériser des échantillons de grains de plus faibles dimensions, la gamme couverte étant de 0,5 à 3000 microns, elle permet d'étendre par exemple à la caractérisation granulométrique des argiles. La dispersion des grains est assurée en voie liquide pour permettre leur analyse. A nouveau, aucune information sur la forme des particules n'est fournie grâce à cette technique et le nombre de particules analysée est faible. La tomographie à rayons X constitue une approche puissante pour caractériser une

population de grains car c'est une approche 3D. Elle nécessite un protocole complexe pour fixer les grains séparément dans une résine avant de pouvoir effectuer les scans 2D de l'échantillon et de reconstruire l'image 3D. L'analyse granulométrique tri-dimensionnelle bien que plus pertinente pour connaître précisément la distribution des tailles réelles des grains et de leurs formes s'avère cependant coûteuse en termes de temps et d'argent et ne permet pas d'obtenir rapidement une connaissance statistique de la distribution des formes de grains.

Lorsqu'on se limite à des vues 2D des grains, l'acquisition d'images et l'analyse associée peut permettre d'avoir une connaissance de populations de grains en fournissant dans chaque plan visé des informations de dimension et de forme. Sur ce principe, la granulométrie à analyse d'images dynamique est une technique simple dans sa mise en œuvre qui permet l'étude d'échantillons de grains dont la forme peut être approchée à partir de $5,5\ \mu\text{m}$ par un choix de lentille adaptée. L'échantillon sec est dispersé puis chute dans une zone d'observation éclairée par une source de lumière pulsée visée par une caméra haute vitesse et haute résolution. Cette technique est efficace pour une étude statistique des échantillons mais elle est coûteuse et n'est pas envisageable sur un chantier.

Les méthodes par tamisage et analyse d'images diffèrent dans leur principe. En effet le tamisage fournit directement des distributions en masse alors que l'analyse d'images fournit des distributions en nombre de particules. Il est nécessaire d'estimer correctement le volume des particules par l'analyse d'image pour atteindre la distribution des tailles de particules par rapport à la masse (Maiti et al., 2017). Cette estimation nécessite une représentation 3D du grain et les images traitent uniquement les données dans un plan. Dans le cas des sables, la troisième dimension n'est pas directement mesurable vu la taille des grains. L'utilisation d'un scanner à plat (Lira et Pina, 2007) est parfois envisagée. Ainsi, il a été utilisé pour divers types de sables où les informations de couleur sont également traitées pour classer les différentes origines minérales de sédiments, mais la distribution de la taille des particules n'a pas été étudiée plus avant. Une autre méthode proposée par Kumara et al. (2012), appliquée à un échantillon de graviers, consiste à peser les graviers et à relier les informations de masse à leur forme. La détermination de la troisième dimension des particules est obligatoire mais pas suffisante pour estimer la distribution de la masse des particules : la masse de chaque particule et la longueur D des particules contrôlant le passage à travers les tamis carrés assimilés au diamètre 'équivalent' ou 'apparent' des particules sont également requises. Lira et Pina (2007) postulent une forme de particule sphérique pour tous les grains mais l'accord entre analyse d'images et tamisage n'est pas toujours très bon. Selon Arasan et al. (2011) ainsi que Kumara et al. (2012) travaillant sur des échantillons de cailloux, une forme ellipsoïdale est plus réaliste et donne une masse des particules plus proche de l'observation. Concernant la longueur D des particules, Fernlund (1998) a remarqué que la forme des particules influence les résultats du tamisage. Le tamisage ne sépare pas les particules selon leur volume ou leur masse, mais est contrôlé par la forme des particules. En effet, des particules de différentes formes aux volumes variés peuvent ainsi être présents dans un même tamis (Arasan et al., 2011). Différentes définitions du diamètre des particules qui doit être utilisé pour la comparaison avec la taille de tamis sont proposées : le diamètre minimum de Feret défini comme la distance la plus proche entre les deux tangentes parallèles de la particule pour les particules inférieures à 20 mm

(Maiti et al., 2017 ; Ferrer et al., 2021), un pourcentage de l'axe intermédiaire pour Mora et al. (1998) ou un diamètre basé sur la plus petite surface des particules orientées le long de la diagonale du tamis (Kumara et al., 2012).

La colonne de tamis est une technique simple à utiliser qui sert de base à la construction des courbes granulométriques des matériaux de construction et aux modèles de transport sédimentaire. Cependant, en particulier sur le chantier, une colonne de tamis n'est pas toujours disponible. De plus, les échantillons de sable à caractériser peuvent être dans le cas du transport sédimentaire, de petites tailles (quelques grammes) ce qui exclut le passage des échantillons par une colonne de tamis.

L'objectif de l'étude est de tester la robustesse d'une technique de reconstruction de la courbe granulométrique des sables que fournirait une colonne de tamis à partir d'images de grains acquises sur un scanner 2D. La technique est détaillée avant d'être utilisée sur des sables roulés et concassés ainsi que sur d'autres matériaux granulaires, pour tester la polyvalence de la technique et comprendre ses limites.

II. Méthodes et sédiments considérés

Différents sédiments, naturels ou artificiels, sont considérés dans cette étude. Tous les échantillons ont été préalablement lavés et séchés à l'air libre. Pour chaque type de sédiment, deux échantillons ont été collectés : un pour l'analyse par tamisage et un pour l'analyse d'images.

A. Analyse par tamisage

Une tamiseuse mécanique (SYSMO 3R) utilisant un mouvement alternatif sinusoïdal avec une fonction de pause programmée (simulation de chocs) et inversion du cycle de rotation est utilisée conformément à la norme AFNOR EN 933-5. Les tamis ont une maille carrée avec les diamètres de tamis suivants : 63 μm , 80 μm , 100 μm , 125 μm , 160 μm , 200 μm , 250 μm , 315 μm , 400 μm , 500 μm , 630 μm , 800 μm , 1000 μm , 1250 μm , 1600 μm , 2000 μm , 2500 μm et 3150 μm . Le tamisage est réalisé conformément à la norme AFNOR EN ISO 17892-4. Le contenu de chaque tamis est pesé avec une précision de $\pm 0,1$ g. Une procédure de quartage est utilisée pour extraire un échantillon représentatif des différents sédiments utilisés. La courbe granulométrique est construite sous la forme d'une courbe cumulative de masses. Les diamètres spécifiques, D_{xx} , correspondent à la taille de grains telle que xx % en masse de l'échantillon soit supérieure à ce diamètre. Pour la présente étude, différents diamètres sont considérés suivant les applications envisagées. L'étude introduit les diamètres D_{10} , D_{16} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , D_{84} et D_{90} .

B. Analyse des images

La capture d'images a été réalisée à l'aide d'un scanner à plat haute résolution (Epson Perfection V850 Pro) sur lequel est placé une feuille plastique transparente A4. De petites pincées de grains sont extraites des échantillons, de manière aussi aléatoire que possible, et déposées avec précaution sur la feuille plastifiante. La séparation des grains est facilitée par la dispersion électrostatique

naturelle. Les images sont acquises avec une résolution de 9600 dpi en niveaux de gris puis sauvegardées par zones d'images de 5cm x 5cm car il s'agit de la limite de taille d'image pour cette résolution. La taille du pixel est de 2,625 μm pour cette résolution ce qui est compte-tenu de la gamme de tailles des grains de sable une très grande précision. Une résolution de 4800 dpi (5,25 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) serait suffisante pour acquérir les données géométriques recherchées dans le cadre de cette étude sur la granulométrie de particules de tailles supérieures à 63 microns. L'échantillon étudié par analyse d'images pèse en moyenne quelques grammes, ce qui correspond en moyenne à 3000 grains,

Le logiciel open-source ImageJ est utilisé pour binariser les images en appliquant un seuil automatique via l'option de seuillage par défaut, basé sur un algorithme Isodata pour séparer les grains du fond. Bien que la concentration en grains soit modérée, un travail à la main est nécessaire pour éliminer les quelques grains touchant partiellement d'autres grains. L'ordre de grandeur du pourcentage de grains à supprimer manuellement par image est de l'ordre 5% des grains déposés. Cette opération ne prend qu'une à deux minutes. Parallèlement, les particules touchant le bord de l'image sont automatiquement éliminées. L'analyseur de particules d'ImageJ est ensuite utilisé pour mesurer, pour chaque grain, les paramètres suivants : l'aire visible, A et les deux axes, respectivement a et b , décrits comme le grand axe et le petit axe de l'ellipse d'ajustement optimal ayant la même aire que le grain observé dans le plan scanné. Cependant, étant donné que les particules sont censées se trouver dans une position stable, le petit axe est en fait l'axe intermédiaire de l'ellipsoïde (Kumara et al., 2012).

C. Sédiments étudiés

Les sédiments utilisés proviennent soit d'environnements marins (3 sables), fluviatiles (1 sable) et de carrières (2 sables). Il y a également dans la liste étudiée des matériaux granulaires qui ne sont pas des sables (urée, PMMA et grignons d'olive). Les particules étudiées sont répertoriées dans le Tableau 1. Les diamètres médians estimés par tamisage se situent dans la plage de 100 à 2050 μm . Dans le Tableau 1, l'échantillon de sable sous-marin S_{m3} est un prélèvement de surface collecté dans la zone subtidale.

L'échantillon S_{c1} a été réalisé en mélangeant des sables de carrière pour étendre artificiellement l'hétérogénéité en taille des grains et voir l'efficacité de la méthode sur un sable bimodal. Les échantillons M_{u1} , M_{u2} et M_{PMMA} sont des matériaux synthétiques dérivés du plastique et ont subi une opération de concassage ou de broyage (Zafar, 2020). L'échantillon O_1 est composé de grignons d'olives. Il s'agit d'un sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive, se composant essentiellement de pulpe et des morceaux des noyaux. La fraction coquillée, F_c , de chacun des sédiments marins a été obtenue par calcimétrie suivant la norme NF P94-048. La densité, ρ_s , de chacun des échantillons est aussi précisée dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Liste des sédiments et matériaux étudiés.

Nom	Provenance	Origine	Composition	ρ_s (kg/m ³)	Type de grain
S _{c1}	Carrière	Hostun et inconnu	Silice	2650	Roulé
S _{c2}	Carrière	Sable normalisé (EN 196-1)	Silice	2650	Roulé
S _r	Rivière	Ikopa - Madagascar	Silice	2650	Roulé
S _{m1}	Plage	Puerto del Carmen – Lanzarote, Canaries	Sable volcanique – F _c = 23%	2650	Roulé
S _{m2}	Plage	Houlgate - France	Silice – F _c = 39%	2650	Roulé
S _{m3}	Subtidal	Museo Atlantico – Lanzarote, Canaries	Sable volcanique – F _c = 72%	2650	Roulé
M _{u1}	Recyclage	Entreprise Dieblast	Résines urée-formol (urée formaldéhyde)	1470	Concassé
M _{u2}	Recyclage	Entreprise Dieblast	Résines urée-formol (urée formaldéhyde)	1470	Concassé
M _{PMMA}	Recyclage	Entreprise MicroPolymers	PMMA (Polyméthacrylate de méthyle)	1190	Broyé
O ₁	Végétale	Tunisie	Grignon d'olive	1250	Broyé

III. Résultats et post-traitement

A. Procédure de calibration

Afin d'obtenir une courbe granulométrique par analyse d'images, il est nécessaire de déterminer la masse et le diamètre de chacune des particules à partir d'informations géométriques sur les grains. Une calibration a été préalablement effectuée à l'aide de cinq sables de carrière dans la gamme 400 μ m -3150 μ m en appliquant la procédure proposée par Kumara et al. (2012) pour une gamme de tailles plus élevée (graviers).

Trois hypothèses sont appliquées. On suppose :

- Une forme ellipsoïdale de chacun des grains de volume $V = \frac{4}{3} A \frac{c}{2}$ où A et c sont la surface du grain dans le plan du scanner et c le petit axe de l'ellipse,
- Un positionnement préférentiel stable des grains sur la surface du scanner permettant par analyse d'images d'extraire le grand axe a et l'axe intermédiaire b de chaque grain,
- Et un passage préférentiel des grains selon la diagonale des mailles des tamis permettant la détermination du diamètre équivalent des grains par la relation :

$$D = \sqrt{\frac{b^2 + c^2}{2}} \quad (1)$$

Après tamisage des sables de calibration, est extrait de chaque contenu de tamis un sous-échantillon qui est pesé et analysé avec le logiciel *ImageJ*. Les dimensions a et b de chaque grain ainsi que A , surface du grain dans le plan du scanner sont récupérés. Le nombre N de grains analysés permet de relier par sable et par tamis, la masse moyenne de chaque population de grains obtenue par pesée aux volumes des grains issus de l'analyse d'images suivant la relation : $\bar{m} = \rho \frac{\sum gr V}{N}$. La dimension moyenne \bar{c} des grains par sable et par classe de tamis est alors calculable par la relation :

$$\bar{c} = \frac{3 \bar{m}}{2 \rho N} \sum gr \frac{1}{A} \quad (2)$$

Les sables se distinguent par leur morphologie. Il est ensuite recherché le meilleur ajustement de la forme des grains à travers la recherche d'une expression de la dimension c des grains, pour atteindre le meilleur accord entre masse mesurée par pesée et masse issue de l'analyse d'images pour l'ensemble des sables et des classes de taille de grains.

Cet ajustement a conduit à l'expression suivante de c appliquée à chaque grain :

$$c = \frac{\sqrt{ab}}{A_r^{2,75}} \quad (3)$$

où $A_r = a/b$ désigne le rapport d'aspect de l'ellipse.

La masse associée à chaque grain est alors donnée par :

$$m = \frac{4}{3} \rho A \frac{\sqrt{ab}}{2 A_r^{2,75}} \quad (4)$$

B. Méthodologie permettant d'obtenir la courbe granulométrique à partir de l'analyse d'images

A partir de l'analyse d'images, la procédure de post-traitement effectuée avec le logiciel Matlab est la suivante :

- Pour chaque particule, la longueur c est déterminée en utilisant l'équation 3 à partir des longueurs a et b . L'équation 4 permet de lui attribuer une masse et l'équation 1 un diamètre.
- Chaque particule est ensuite placée dans un tamis fictif et sa masse permet d'incrémenter la masse présente dans ce tamis ainsi que la masse totale de l'échantillon. Les tamis fictifs ont les mêmes dimensions de mailles que pour la colonne de tamis utilisée pour le tamisage.
- La courbe granulométrique est ensuite construite de la même manière que pour un tamisage.

Afin d'assurer qu'un nombre suffisant de grains a été considéré pour représenter l'échantillon. La convergence de l'information D_{xx} est recherchée pour tous les diamètres entre D_{10} et D_{90} . La convergence est considérée comme atteinte lorsque l'écart relatif sur le D_{xx} est inférieur à $\pm 3\%$.

IV. Discussion

A. Comparaison entre analyse d'images et tamisage

Pour comparer les deux méthodes et valider la robustesse de la technique basée sur l'analyse d'images, les valeurs des diamètres D_{10} , D_{16} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , D_{84} et D_{90} obtenus par tamisage et par analyse d'images sont comparés. Par ailleurs, d'autres paramètres sont introduits. En transport sédimentaire, Soulsby (1997) caractérise l'hétérogénéité sédimentaire à l'aide de l'écart-type géométrique $\sigma_g^2 = D_{84}/D_{16}$. Si $\sigma_g^2 < 2$, le sédiment est très bien trié. En plus de ce paramètre, on peut définir, en particulier dans le cadre de la géotechnique et de la caractérisation granulométrique des sols, le coefficient d'uniformité (C_u) et le coefficient de courbure (C_c) qui sont respectivement un indice d'irrégularité de la distribution de la taille des particules, défini par $C_u = D_{60}/D_{10}$ et un indice pour décrire la forme de la courbe granulométrique entre D_{10} et D_{60} défini par $C_c = (D_{30})^2/(D_{10} \times D_{60})$. Si $C_u < 3$, la granulométrie est uniforme ou encore serrée. Si $C_u > 3$, la granulométrie est variée ou encore étalée. Lorsque $1 < C_c < 3$, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Un C_c trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D_{10} et D_{60} . Les figures 1.A et 2.B montrent la comparaison des diamètres contrôlés (D_{10} , D_{16} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , D_{84} et D_{90}) ainsi que des coefficients C_u , C_c et σ_g^2 (Moulay Omar et al., 2022).

Le Tableau 2 regroupe toutes les données.

L'analyse des résultats montre que, pour les sables naturels ainsi que les matériaux synthétiques, quelle que soit leur origine et leur niveau d'hétérogénéité, la différence sur ces données est inférieure à 10% en ce qui concerne les diamètres dans la gamme D_{10} à D_{60} . Seul S_{m3} (Sable Museo) et O_1 (Grignon d'olive) présentent des écarts plus importants. Concernant les coefficients C_u et C_c ,

seuls les échantillons S_{m2} . (Houlgate) et O_l présentent des erreurs supérieures à 10 % malgré une bonne correspondance sur le σ_g^2 . L'erreur quadratique moyenne calculée pour tous les diamètres entre D_{10} et D_{90} adimensionnée par le diamètre médian obtenu par tamisage, notée RRMSE (Tableau 2) établie entre les résultats de l'analyse d'images et du tamisage fournit le résultat suivant : Les valeurs de RRMSE sont pour tous les matériaux étudiés inférieure à 10 % sauf pour S_r qui reste raisonnable avec 11,1 % et largement supérieure à 10 % pour S_{m3} et O_l avec respectivement 49,4 % et 19,3 %. La figure 3 montre les distributions granulométriques obtenues avec les deux méthodes pour chacun des sédiments considérés et confirme les résultats obtenus avec le RRMSE qui semble être un très bon indicateur pour comparer et valider globalement les résultats.

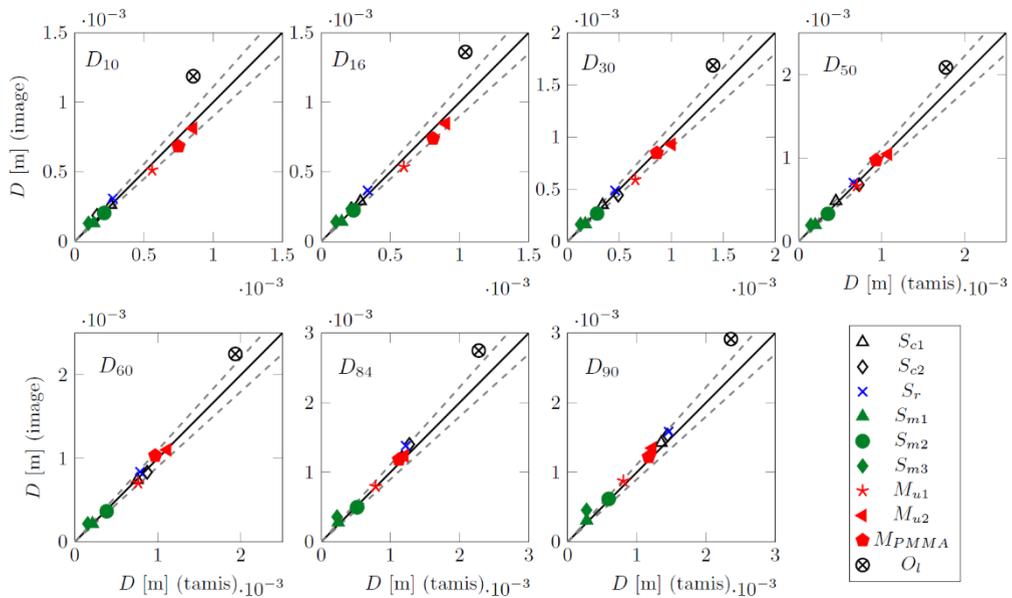


FIGURE 1.A. Comparaison des D_{10} , D_{16} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , D_{84} et D_{90} obtenus par tamisage et par analyse d'images. Les lignes correspondent à un accord parfait et les lignes pointillées à $\pm 10\%$

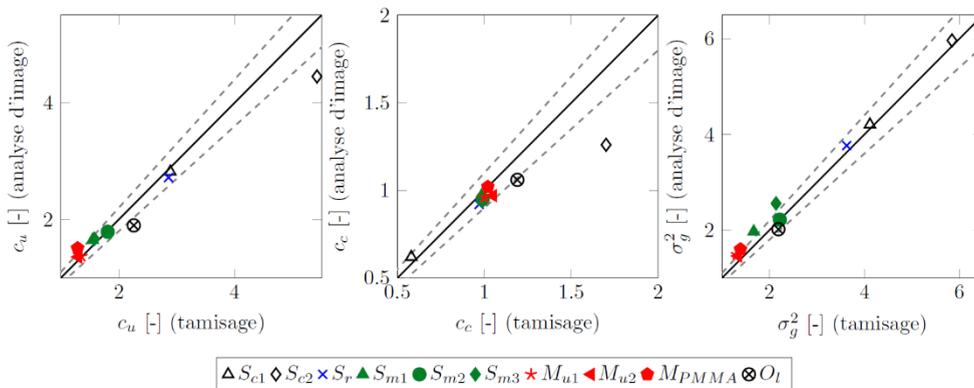


FIGURE 1.B. Comparaison de C_u , C_c et σ_g^2 obtenus par analyse d'image et analyse par tamisage. La ligne noire représente un accord parfait. Les lignes pointillées correspondent à $\pm 10\%$

TABLEAU 2. Valeurs de D_{xx} , C_c , C_u et σ_g^2 obtenues lors de l'analyse par tamisage et par analyse d'images pour tous les sédiments et matériaux. La valeur du RRMSE entre les méthodes est aussi indiquée.

	S_{c1}	S_{c2}	S_r	S_{m1}	S_{m2}	S_{m3}	M_{u1}	M_{u2}	M_{PMMA}	O_i
Tamisage										
D_{10} (μm)	261	161	275	138	213	100	559	857	750	856
D_{16} (μm)	284	218	336	148	234	107	598	901	809	1042
D_{30} (μm)	337	488	458	170	285	125	652	1003	860	1401
D_{50} (μm)	448	727	659	200	353	146	702	1077	933	1773
D_{60} (μm)	753	872	787	214	385	157	763	1115	969	1934
D_{84} (μm)	1169	1275	1221	247	520	230	786	1204	1124	2277
D_{90} (μm)	1353	1445	1460	276	594	274	806	1226	1172	2361
c_c (-)	0,6	1,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,2
c_u (-)	2,9	5,4	2,9	1,5	1,8	1,6	1,4	1,3	1,3	2,3
σ_g^2 (-)	4,1	5,8	3,6	1,7	2,2	2,1	1,3	1,3	1,4	2,2
Analyse d'images										
D_{10} (μm)	263	187	309	131	205	131	513	813	683	1187
D_{16} (μm)	289	235	367	142	224	141	536	848	740	1361
D_{30} (μm)	349	443	488	167	268	163	590	930	848	1686
D_{50} (μm)	484	680	704	197	331	195	667	1046	972	2084
D_{60} (μm)	742	834	839	216	367	218	705	1102	1034	2251
D_{84} (μm)	1217	1402	1382	279	498	360	797	1238	1183	2749
D_{90} (μm)	1425	1534	1585	307	618	457	876	1348	1219	2915
c_c (-)	0,6	1,3	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1
c_u (-)	2,8	4,5	2,7	1,6	1,8	1,7	1,4	1,4	1,5	1,9
σ_g^2 (-)	4,2	6,0	3,8	2,0	2,2	2,6	1,5	1,5	1,6	2,0
RRMSE (%)	7,4	8,0	11,1	6,3	5,1	49,4	6,3	4,4	5,9	19,3

Les valeurs obtenues grâce au tableau 2 montrent que les échantillons sont pour la plupart très homogènes. Le plus hétérogène est le sable normalisé avec $\sigma_g^2 = 6$. Ils ont tous une granulométrie uniforme, sauf le sable normalisé car $C_u < 3$, et régulière car $1 < C_c < 3$. Les courbes granulométriques en non cumulatif entre l'analyse des images et le tamisage pour M_{u1} et M_{u2} (Urée fin et Urée gros) ont une grosse différence de hauteur de pic. On peut expliquer cette différence par le peu de classes

de grains pour ces matériaux, ce qui rend la courbe très serrée. Il est envisageable d'augmenter le nombre de tamis virtuels de l'analyse d'images pour obtenir plus de classes de grains et obtenir une meilleure représentation de la courbe granulométrique. Pour l'analyse d'images, il suffit juste de définir davantage de tamis virtuels. Par ailleurs, l'accord sur toutes les courbes granulométriques en cumulatif et en non cumulatif entre l'analyse des images et le tamisage est confirmé, sauf pour S_{m3} et O_i , qui mettent en évidence que la méthode à des limites.

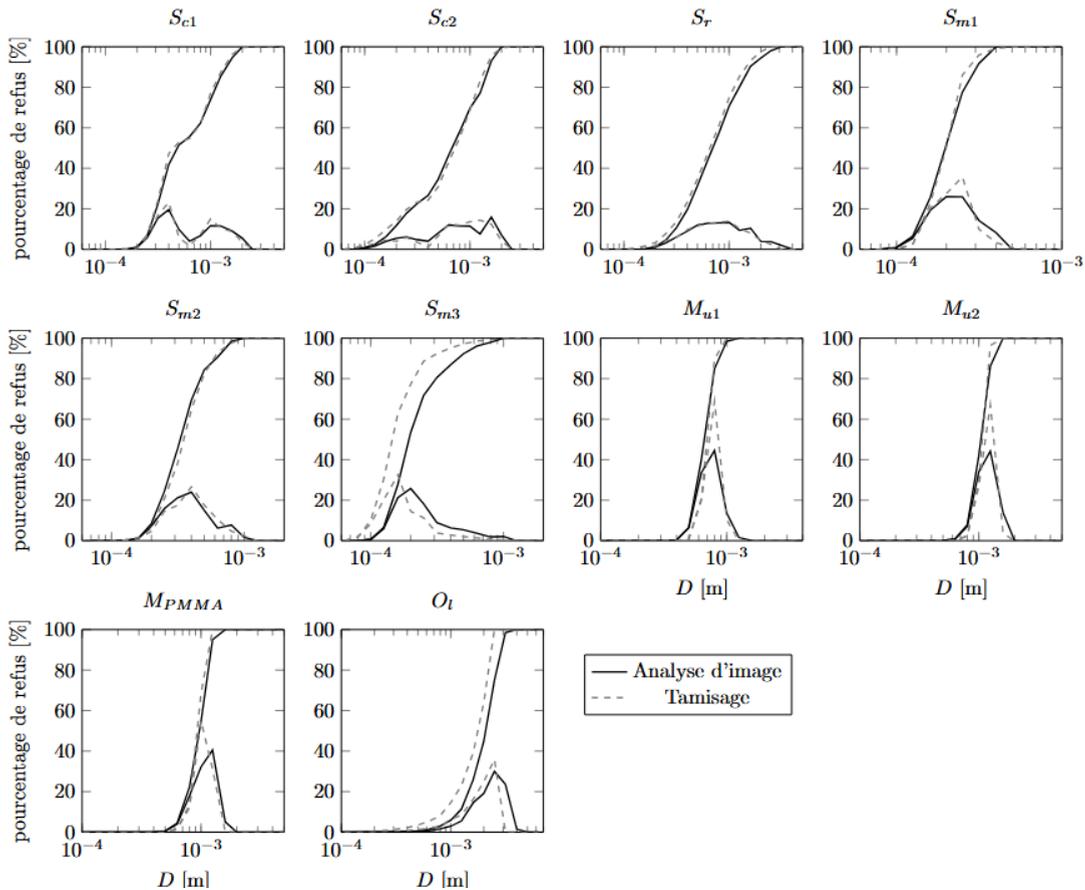


FIGURE 2. Distributions cumulatives et non cumulatives des tailles de particules issues du tamisage et de l'analyse d'images

B. Limitation de la méthode

Les limitations de la méthode proposée sont énumérées comme suit.

- La densité du matériau doit impérativement être la même sur toutes les classes granulométriques. Si cette condition n'est pas validée, la reconstruction de la courbe granulométrique à partir de l'analyse d'images sera médiocre. C'est le cas pour l'échantillon O_i . En effet, l'observation des grignons d'olives permet de mettre en évidence que ces 'déchets' sont constitués à la fois de petits fragments de pulpe d'olives et de morceaux de noyaux. L'hypothèse d'une densité du matériau uniforme sur toutes les classes granulométriques n'est certainement pas vérifiée

- La méthode s'appuie sur l'hypothèse que tous les sables et grains qui les composent partagent la même forme ellipsoïdale. Bien qu'un accord raisonnable ait été observé pour un sable naturel partiellement composé de coquilles, cette forme présumée serait certainement inappropriée si la proportion de coquilles augmente ou en présence de grains non naturels comme le montre l'échantillon S_{m3} (72 % coquillés).
- Dans le modèle, on suppose que les grains demeurent en position stable avec leurs deux plus grandes dimensions visibles dans le plan du scanner ce qui n'est pas forcément le cas.

Dans le but de minimiser les erreurs lors de la comparaison de plusieurs distributions de tailles de grains, il est impératif qu'elles soient toutes calculées en utilisant la même méthode.

V. Conclusion

Après une phase de calibration, un modèle basé sur une forme d'ellipsoïde des grains et un passage préférentiel de ceux-ci selon la diagonale des mailles des tamis est établi, permettant le passage d'une description des grains par analyse d'images à une description par tamisage. La gamme de diamètres est de $63\mu\text{m}$ à $3150\mu\text{m}$. Il est obtenu à partir d'un critère de convergence des D_{xx} minimum et maximum de la distribution. L'erreur relative quadratique moyenne RRMSE calculée sur les distributions granulométriques issues du tamisage et de l'analyse d'images dans la gamme D10-D90 ne dépasse pas 11,1% ce qui valide statistiquement la méthode à la fois sur des sables naturels roulés et sur des sables de carrière issus d'un concassage, que ceux-ci soient homogènes ou hétérogènes, voire bimodaux. Outre les sables, la méthode est validée sur des grains plastiques concassés.

Par sa facilité de mise en œuvre, sa rapidité de réalisation, son faible coût et la petite taille des échantillons à analyser (quelques grammes) cette mesure simple pourrait être intégrée aux analyses effectuées sur chantier en laboratoire mobile. Il suffit de prévoir un scanner à plat du commerce de résolution 4800 dpi qui est tout à fait suffisante pour caractériser la dimension de particules à partir de 63 microns et un ordinateur avec un logiciel de traitement d'images et un tableur. En outre, la méthode fournit des informations sur la forme des grains et leur état de surface qui constituent des indicateurs importants pour par exemple qualifier la qualité du contact dans un matériau de construction.

Une des limites de son application est la nature obligatoirement homogène du matériau sur toute la classe des tailles de l'étendue granulométrique. Ceci exclut de l'appliquer à des agglomérats comme les grignons d'olives composés de mélanges de morceaux de noyaux et de pulpe ou encore les sables très fortement coquillés dont la masse volumique et la forme peut varier en fonction de la classe granulométrique.

REFERENCES

Arasan, S., Akbulut, S., and Hasiloglu, A. S. (2011). Effect of particle size and shape on the grain-size distribution using image analysis. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 1(4):968-985.

Durafour, M., Jarno, A., Le Bot, S., Lafite, R., Marin, F. (2015) Bedload transport for heterogeneous sediments. *Environmental Fluid Mechanics*, 15 (4), pp. 731-751. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9380-1>

Fernlund, J.M.R., (1998). The effect of particle form on sieve analysis: a test by image analysis. *Eng. Geol.* 50, 111–124. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00004-0)

Hammadi A, Ahfir N-D, Alem A, Wang HQ (2017) Effects of Particle Size Non-Uniformity on Transport and Retention in Saturated Porous Media. *Transp. Porous Med*, Vol 118, 85–98 <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0848-6>

J. Kumara., (2012). Image Analysis Techniques on Evaluation of Particle Size Distribution of Gravel. *Int. J. Geomate*. <https://doi.org/10.21660/2012.5.1261>

Lira, C., Pina, P., in: Martí, J., Benedí, J.M., Mendonça, A.M., Serrat, J. (Eds.) (2007), Pattern Recognition and Image Analysis, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, *Sedimentological Analysis of Sands*, Berlin, Heidelberg, pp. 388–395. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72849-8_49

Maiti, Abhik, Debashish Chakravarty, Kousik Biswas, et Arpan Halder (2017). -- Development of a Mass Model in Estimating Weight-Wise Particle Size Distribution Using Digital Image Processing. *International Journal of Mining Science and Technology* 27, 3: 435-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.03.015>

Moulay Omar, H., Mekerta, B., Jarno, A., Imanzadeh, S., Alem, A., Taibi, S., (2022). Optimization of dune sand-based mixture material for pavement design. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 26, 4952–4972. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1877827>

Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. 415 *Thomas Telford*²

Vah, M., Jarno, A., Le Bot, S., Ferret, Y., Marin, F. 2020 Bedload transport and bedforms migration under sand supply limitation. *Environmental Fluid Mechanics*, 20 (4), pp. 1031-1052. <https://doi.org/10.1007/s10652-020-09738-6>

Zafar, M.S., (2020). Prosthodontic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update. *Polymers* 12, 2299. <https://doi.org/10.3390/polym12102299>

Z. Li, H. Souli, J-M. Fleureau, J-J. Fry, S. Taibi, T. Ouahbi. (2023) Effect of internal stability on the failure properties of gravel-sand mixtures. *Computers and Concrete* 2023. <https://doi.org/10.12989/cac.2023.31.5.395>