



Caractérisation physique de sable de Kisangani dans les conditions édaphoclimatiques locales.

MOLINGA Bazin¹, ALONGO Sylvain¹⁻², NDJANGO Edouard¹⁻²

⁽¹⁾ Institut du Bâtiment et de travaux publics de Kisangani et apprenant au troisième cycle Institut facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi

⁽²⁾ Institut facultaire des sciences agronomiques de Yangambi (IFA – Yangambi), laboratoire de génie de chimie et microbiologie.

⁽²⁾ Institut facultaire des sciences agronomiques de Yangambi (IFA – Yangambi) ; Directeur technique de BECECO/RDC, laboratoire d'agroécologie et ingénierie de l'environnement (LAECOLIE) République démocratique du Congo de pédologie de l'IFA – Yangambi

RESUME

L'analyse granulométrique est une méthode utilisée pour déterminer la distribution des tailles des grains dans un échantillon de sable.

Elle permet de classer les sables en fonction de leur granulométrie (gros, moyen, fin) et d'évaluer ses propriétés importantes comme la compacité, la perméabilité ou la cohésion. Cette analyse se fait généralement par tamisage à sec ou par sédimentation pour les particules plus fines.

Les résultats sont présentés sous forme de courbes granulométriques qui permettent d'identifier si le sable est bien gradué (grains de taille proche).

Cette information est essentielle pour les applications en génie civil, bétons, routes ou fondations, filtration de l'eau, car elle influence directement la résistance mécanique et la stabilité des structures.

Mots-clefs: granulométrie, sable, conditions, edaphoclimatiques, Kisangani

Received 01 July., 2025; Revised 06 July., 2025; Accepted 08 July, 2025 © The author(s) 2025.

Published with open access at www.questjournals.org

I. Introduction

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules issues de la désagrégation de matériaux d'origine minérale (principalement des roches) ou organique (coquillages, squelettes coralliens...) dont la taille est comprise entre 0,063 (limon) et 2 mm (gravier). Elle peut révéler jusqu'à 180 minéraux de composition différente (quartz, micas et feldspaths) ainsi que des débris calcaires (Ademe, 2016). La fraction de sable est souvent subdivisée en sous fractions telles que le sable grossier, moyen, fin et très fin (Lal et al, 2004).

Les sols sableux, du fait de leur squelette rigide et de leur texture grossière se caractérisent par une structure très aérée à l'état naturel, ils sont filtrants, pauvres en matière organique et présentent une faible rétention en eau et en éléments fertilisants (Zhong et al., 2004 ; Ruelle et al., 2003)

La ville de Kisangani est très riche en sables sous différentes formes, la fraction sableuse peut être utile dans de nombreux usages comme dans l'édifice, dans l'industrie de ciment, dans la fabrication des craies, dans la filtration de l'eau, dans la fabrication des peintures et même dans la production agricole.

L'objectif poursuivi dans cette étude est de déterminer la courbe granulométrique de distribution des tailles des grains de sable, et de classer le matériau en sable fin, moyen, grossier afin d'identifier ce matériau pour une valorisation ultérieure dans la filtration de l'eau (génie chimique), dans la confection de béton (génie civil), et de connaître sa potentialité dans la production agricole.

La ville de Kisangani est située au cœur du bassin de la République Démocratique du Congo, combinant un climat équatoriale humide et des sols ferrallitiques caractéristiques des zones tropicales, localiser sur le fleuve Congo influent avec la rivière Tshopo, situé entre 0° 31'N, 25° - 11'E, altitude : environ 400m (Veshaegen, B.1976 & Maindo, A. N. 1997)



Figure 1 : Carte géographique de Kisangani

II. Matériels Et Méthodes

2.1. Matériels

Les matériels minéraux faisant l'objet de notre recherche sont constitués des sables prélevés dans différents gisements de Kisangani. Ces matériels sont appuyés par d'autres matériels de laboratoire comme la verrerie, l'appareillage et un GPS de marque Garmin « GPS MAP 62s, des pelles manuelles ; un téléphone intelligent pour photo numérique et des sacs pour le transport.

2.1.1. Prélèvement des échantillons

Les matériaux sableux ont été prélevés dans différents gisements d'exploitation de sable de Kisangani : Simi-simi (ESIM1), Tshopo rive droite (ETRD2), Route Kandangba (EMRK3), Tshopo rivière (ETR4), et le sable de la station de traitement des eaux de la Regideso/Kisangani comme traitement témoin prélever à de l'usine en provenance Kongo – Central.



Figure 2 : prélèvement d'échantillon des sables dans les gisements de Kisangani

Les coordonnées géographiques de sites de prélèvement sont présentées dans le tableau ci-dessous

Tableau 1 : sites d'échantillonnage et coordonnées géographiques

Sites	Code échantillons	Coordonnées géographiques
Témoins (Regideso)	ET0	Provenance (Cfr Regideso/Kis)
Simi simi	ESIM 1	35N 0290527 UTM 0058590 Altitude 1289ft
Tshopo rive droite	ETRD 2	35 N 0296897 UTM 0059493 Altitude 1425ft
Maleke (Route Kangangba)	EMRK 3	35N 0308684 UTM 0059493 Altitude 1425ft
Tshopo rivière	ETR 4	35 N 0297801

2.1.2. Méthode d'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la répartition dimensionnelle des particules d'un sol ou la distribution des tailles de particules dans un échantillon de sable (Boulonne, M & Lafaye, S. 2005).

Nous avons utilisé l'analyse par tamisage à sec où le sable est passé à travers une série de tamis de mailles décroissantes de 2000mm à 0,05mm pour un poids initial de 500g par échantillons de tamisage manuels effectués au laboratoire de l'IFA – Yangambi à Kisangani.

Mode opératoire



Figure 3 : Analyse granulométrique manuelle au laboratoire

Mode opératoire

- Utiliser une série de tamis avec des ouvertures décroissantes allant de 2mm à 0,05mm au total 15 tamis (2mm ; 1,95mm ; 1,9mm ; 1,85mm ; 1,55mm ; 1mm ; 0,95mm ; 0,75mm ; 0,55mm ; 0,45mm ; 0,35mm ; 0,25mm ; 0,15mm ; 0,1mm ; 0,05mm).
- Placer les tamis en ordre décroissant, le plus grand en haut
- Verser l'échantillon de sable sur le tamis supérieur et effectuer le tamisage (mécanique ou manuel) pendant environ 5 minutes
- Pesée le refus : masse totale du sable retenu sur chaque tamis en (g)
- Refus cumulé (g) : masse totale retenue à partir de tamis actuel vers le haut
- (%) refus cumulé : portion en (%) de l'échantillon retenue au-dessus de ce tamis
- (%) tamisant : portion (%) de l'échantillon passée à travers ce tamis (Delorme, A.2002).

a. Calcul des pourcentages de refus

- Pour chaque tamis, on calcule le (%) de refus en utilisant la formule :

$$(\%) \text{ refus} = \frac{\text{masse de refus de tamis}}{\text{masse totale de l'échantillon}} * 100 \text{ (1)}$$

- **Calcul de refus cumulés :**

- Additionner les masses des refus de tous les tamis supérieurs à celui considéré pour obtenir le refus cumulé

• **Calcul de % de refus cumulé**

$$\% \text{ refus cumulé} = \frac{\text{masse de refus cumulé}}{\text{masse totale de l'échantillon}} * 100 \text{ (2)}$$

b. Calcul des tamisants (passant)

Pour chaque tamis, le % de tamisant = 100 – % de refus cumulé (3)

c. Tableau granulométrique

Le tableau granulométrique comprend : le diamètre de tamis (en mm) utilisé de 2mm à 0,05 mm, le refus (en g) égal à la masse du matériau retenu sur chaque tamis, le refus cumulé (en g) égal à la masse totale retenue à partir des tamis actuels vers le haut, le (%) de refus cumulé égal à la portion de l'échantillon retenue au-dessus de ce tamis et le (%) de tamisant égal à la portion de l'échantillon passée à travers ce tamis.

d. Courbe granulométrique

La courbe granulométrique présente le résultat de (%) de passant cumulé en fonction du diamètre des grains (échelle logarithmique), permet de visualiser si un sol est bien classé (grains de tailles variées, bon compactage) et le sol mal classé (grains de taille homogène, risque de faible cohésion) (Braudeau, E. 1995).

e. Module de finesse

Le module de finesse est égal au 1/100^{ème} de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivante Dupain, et al. (2009) : 0,15 - 0,35 - 0,63 - 1,25 - 2 mm $Mf = \frac{1}{100} \sum \% \text{ refus cumulés en des tamis } 0,15; 0,35; 0,63; 1,55; 2mm.$ (4) (Ghomari, F., Bendi – Oies, A. et Dome Tine et al 2022).

f. Taux de fine

Le taux de fines représente la proportion de particules très fine, généralement inférieure à 0,063mm (ou 0,080mm) présent dans un échantillon de sable (Larrad, F. de 2000).

$$Tf = \frac{\% \text{ passant en } (0,063mm)}{mi} * 100 \text{ (5) ,}$$

Nous avons utilisé le (%) passant en 0,1mm ; car les tamis des diamètres de 0,063 et 0,080mm ne sont pas disponible au laboratoire et nous avons estimé le % de passant au diamètre de 0,1mm

g. Paramètres granulométriques caractéristiques importants

Ce sont des paramètres statistiques utilisés dans l'analyse granulométrique, les principales sont :

- **Médiane :**

Correspond à l'abscisse (diamètre des grains) pour laquelle la courbe granulométrique atteint 50% de passage cumulé, on cherche la taille correspondant à 50% tamisant et on interpole linéairement en échelle logarithmique. (Lambe, T.W & Whitman, Robert whitman : 1969) :

$$D_{50} = D_1 + \left(\frac{P - P_1}{P_2 - P_1} \right) * (D_2 - D_1) \text{ (6)}$$

- **Diamètre effectif**

Diamètre de particules pour lequel 10% de sable est plus fin, utilisée pour déterminer la taille effective dans la filtration de l'eau (ASTMD422, 2007) : On cherche la taille correspondant à 10% de tamisant dans le tableau et on interpole linéairement en échelle logarithmique

$$D_{10} = D_1 + \left(\frac{P - P_1}{P_2 - P_1} \right) * (D_2 - D_1) \text{ (7)}$$

- **Coefficient d'uniformité (Cu)** Coduto, D, P. (2010) : mesure la taille de distribution,

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \text{ (8)}$$

- **Coefficient de courbure (Cc)** : Caractérise la distribution des tailles de grains, il est calculé à partir de la courbe granulométrique obtenue par tamisage ou sédimentation (Holtz, R, D. 2011). $Cc = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})}$ (9)

h. Calcul de percentiles clés (en interpolation)

Consiste à déterminer le diamètre D_5 (5% de tamisant) D_{16} (16% de tamisant), D_{25} (25% tamisant) D_{50} (médiane 50% de tamisant), D_{75} (75% detamisant), D_{84} (84% de tamisant), et D_{95} (95% de tamisant).

- **Moyenne pondérée en granulométrie**

Pour calculer la moyenne granulométrique (diamètre moyen pondéré), on utilise : le diamètre de chaque tamis (d) et le % de retenu ou fraction massique (pi)

$$D_{moy} = \sum_{i=1}^n D_i (P_i - P_{i-1}) \text{ (10)}$$

Tableau 2. Calcul de la moyenne granulométrique pondérée

Intervalle (mm)	% passant	Masse % (ΔP)	Di (diamètre moyen en mm)
-----------------	-----------	------------------------	---------------------------

Source : Folk & Ward 1957

- Sorting (tri l'écart – type (σ), en base logarithmique :

- Le Sorting (tri ou écart – type), l'approche standardisée de Folk & Ward (1957) est la dispersion des tailles de grains autour de la taille moyenne ; il indique à quel point les grains de sable sont uniformes ou varie en taille ; elle est calculée à partir des percentiles granulométriques selon la formule

$$\sigma = \left[\frac{(\text{Log}D_{84} - \text{Log}D_{16})}{2} \right] \quad (11)$$

- Asymétrie de Skewness (Sk)

Fait référence à la forme de la distribution des tailles de particules d'un échantillon. Cette notion est appelée Skewness en anglais ou coefficient d'asymétrie. Il mesure la dissymétrie d'une distribution par rapport à une distribution normale (ou symétrique).

L'asymétrie (Sk) peut être calculé à partir des percentiles (D_{16} , D_{50} , D_{84}) dans une distribution granulométrique, par exemple avec la formule de Folk & Ward :

$$Sk = \left[\frac{(\text{Log}D_{16}) + (\text{Log}D_{84}) - 2(\text{Log}D_{50})}{2((\text{Log}D_{84} - (\text{Log}D_{16}))} \right] \quad (12)$$

- Kurtosis (ou coefficient d'aplatissement)

Une mesure statistique utilisé en granulométrie pour indiquer si la distribution granulométrique est concentrée autour de la médiane ou étalée (plus moins pointue). La formule de Kurtosis (K) en granulométrie logscale s'inspire de la méthode Folk & Ward (1957) et de Blott, S.J., & Pye, K. (2001). On détermine les tailles de particules à D_5 , D_{25} , D_{75} et D_{95} de tamisant. Le Kurtosis (K) mesure une distribution plus au moins que la normale.

$$K = \frac{(D_{95} - D_5)}{2,44((D_{75} - D_{25}))} \quad (13)$$

III. Résultat

3.1.1. Résultat de l'analyse granulométrique de sable ET0 (Regideso)

Le résultat de l'analyse granulométrique de sable de (ET0) avec un poids initial de 500g de sable est présenté dans le tableau, ci – dessous :

Tableau 3 : Echantillon de sable de Régideso (ET0) : poids initial 500g

N°	Tamis (mm)	Masse de refus (g)	Masse de refus cumulé en (g)	% de refus cumulé	% de tamisant
1	2	31,39	31,39	6,3092941	93,690706
2	1,95	23,47	54,86	11,0266924	88,973308
3	1,9	5,7	60,56	12,172375	87,827625
4	1,85	3,14	63,7	12,8035054	87,196495
5	1,55	73,97	137,67	27,6712494	72,328751
6	1	84,09	221,76	44,5730825	55,426918
7	0,95	100	321,76	64,672777	35,327223
8	0,75	93,04	414,8	83,3735327	16,626467
9	0,55	23,39	438,19	88,0748513	11,925149
10	0,45	12,12	450,31	90,5109342	9,4890658
11	0,35	9,44	459,75	92,4083454	7,5916546
12	0,25	11,53	471,28	94,7258402	5,2741598
13	0,15	15,69	486,97	97,8794822	2,1205178
14	0,1	5,93	492,9	99,0713941	0,9286059
15	0,05	4,62	497,52	99,8675178	0,1324822
16	< 0,05	0,66	498,18	100	0

Il ressort de ce tableau que, le (%) de refus cumulé est de 83,3 % à un tamis 0,75mm est plus élevé ce qui signifie qu'une grande proportion de grains à un diamètre supérieur à celui de 0,75 mm, et les grains ont une taille supérieure à 0,75mm.

Pour le (%) tamisant 16,7 % indique la finesse des grains signifie que la majorité des grains sont plus petits que l'ouverture du tamis 0,75mm, 16,7 % tamisé à 0,75 mm, les particules ont une taille inférieure à 0,75mm.

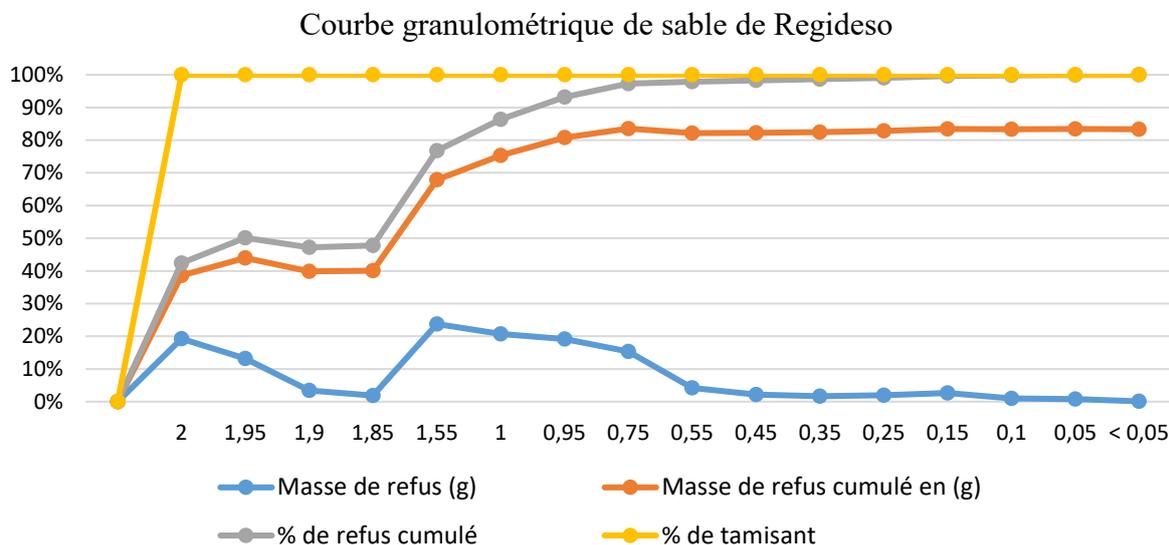


Figure 4 : courbe granulométrique de sable de Regideso

La courbe granulométrique est continue bien étalée, pas de discontinuité, $D_{10} = 0,45\text{mm}$, la granulométrie est bien étalée (bon mélange de tailles), elle est inclinée, sable semi étalé, c.à.d. la courbe est étalée modérément ce qui ne montre pas une cassure nette, donc pas de séparation entre sable et gravier par exemple, il ne s'agit ni d'un sable trop fin ni trop grossier idéal pour la filtration de l'eau. Le sable de Regideso, avec ces paramètres caractéristiques, montre une courbe granulométrique régulière, bien équilibrée avec une répartition harmonieuse des tailles, peu de fine, pas de manques ou de creux majeurs.

- Module de finesse

$$MF = \frac{6,3092941+27,671249+83,373533+92,408345+97,879482}{100} = \frac{307,641}{100} = 3,08$$

- Taux de fine : Le taux de fine de la maille de 0,1 mm est de 0,93 %, acceptable car le taux de fines est inférieur à 10% (AFNOR, 1990).

- Taille médiane : $D_{50} = 0,98729\text{mm}$,

- Diamètre effectif $D_{10} = 0,45\text{mm}$

- Coefficient d'uniformité (Cu) : on calcul D_{60} en interpolation, $D_{60} = 1,1488\text{mm}$

$$\rightarrow (Cu) = \frac{1,1488\text{mm}}{0,45\text{mm}} = 3,30$$

- Coefficient de courbure (Cc) : on calcule le D_{30} en interpolation $D_{30} = 0,89\text{mm}$

$$\rightarrow Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} = \frac{(0,89305\text{mm})^2}{(0,45\text{mm} * 1,15\text{mm})} = \frac{0,9}{0,51696} = 1,74$$

- Calcul de percentiles clés

Nous déterminons les diamètres correspondant au 5% tamisant, 16% tamisant, 25% tamis, 50% tamisant, 75 % tamisant, 84% tamisant et 95% tamisant en interpolation.

- Moyenne granulométrique pondérée

$$\text{Moyenne pondérée (Dmoyen)} = \sum_{i=1}^n \frac{D \times \Delta P}{100} = \frac{82,0837594}{100} = 0,82 \text{ mm}$$

- Sorting (tri, écart – type)

$$\sigma = \left[\frac{0,2528 - (-0,124)}{2} \right] = 0,1884$$

- Coefficient d'asymétrie (Skewness, Sk)

$$Sk = \left[\frac{-0,124 + 0,2528 - 2(-0,0088)}{2(0,2528 - (-0,124))} \right] = 0,19 \approx 0,2$$

- Coefficient d'aplatissement de Kurtosis (K)

$$K = \frac{2 - 0,242}{2,44 * (1,60 - 0,84)} = 1,156 \approx 1,16$$

3.1.2. Résultat de l'analyse granulométrique de sable ESIM1

Le résultat de l'échantillon de sable de ESIM1 pour un poids initial de 500g de sable est présenté dans le tableau, ci – dessous :

Tableau 4 : résultat de l'analyse de l'échantillon (ESIM1)

N°	Tamis (mm)	Masse de refus (g)	Masse de refus cumulé en (g)	% de refus cumulé	% de tamisant
1	2	49,36	49,36	9,872	90,128
2	1,95	17,45	66,81	13,362	86,638
3	1,9	3,52	70,33	14,066	85,934
4	1,85	1,26	71,59	14,318	85,682
5	1,55	32,98	104,57	20,914	79,086
6	1	19,64	124,21	24,842	75,158
7	0,95	22,46	146,67	29,334	70,666
8	0,75	37,33	184	36,8	63,2
9	0,55	23,09	207,09	41,418	58,582
10	0,45	35,9	242,99	48,598	51,402
11	0,35	65,82	308,81	61,762	38,238
12	0,25	92,72	401,53	80,306	19,694
13	0,15	76,11	477,64	95,528	4,472
14	0,1	13,16	490,8	98,16	1,84
15	0,05	6,7	497,5	99,5	0,5
16	< 0,05	0,8	498,3	99,66	0,34

Il ressort de ce tableau que, le (%) de refus cumulé de 36,8 % à un tamis 0,75mm est plus petit signifie qu'une petite proportion de grains à un diamètre inférieur à celui de 0,75 mm, et les grains ont une taille inférieure à 0,75mm.

Pour le (%) tamisant 63,2 %, indique la finesse des grains signifie que la majorité des grains sont plus gros que l'ouverture du tamis 0,75mm, 63,2 % tamisé à 0,75 mm, les particules ont une taille supérieure à 0,75mm.

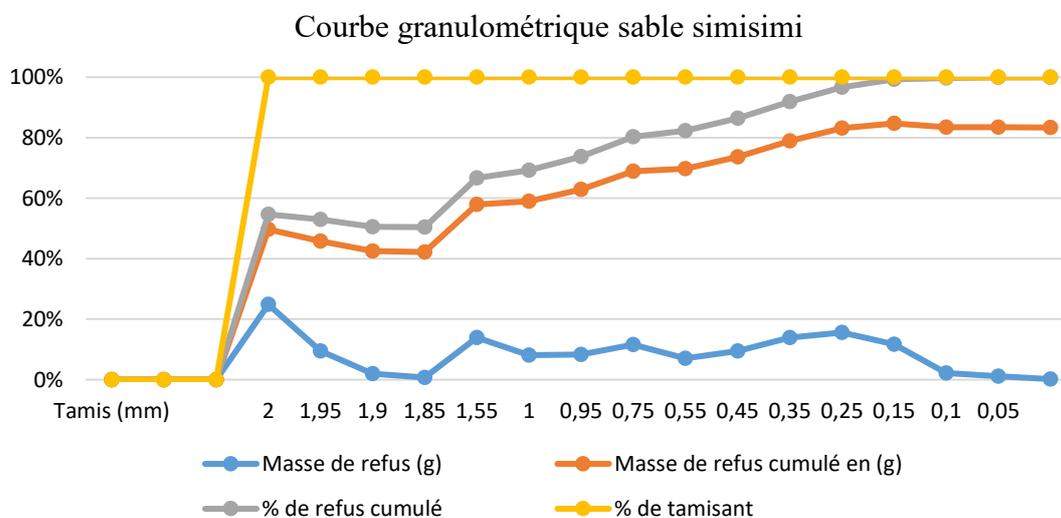


Figure 5 : courbe granulométrique de sable de Simisimi

La courbe granulométrique montre une gradation modérément uniforme, avec un diamètre moyen de D_{50} de 0,439mm, ce qui classe ce sable parmi les « sables moyens », le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure indique une bonne distribution des tailles de grains, la faible teneur en fines reflète une bonne perméabilité tandis que la courbe est légèrement asymétrique à droite révélant une proportion un peu plus élevée de grains fins.

- **Module de finesse: (MF)** = $\frac{9,872+20,914+36,8+61,752+95,528}{100} = \frac{224,876}{100} = 2,24876\text{mm}$

- **Taux de fine** : le taux de fine au maille de 0,1mm égal à 1,84% un taux de fine inférieur à 10% (AFNOR, 1990).

- **Taille médian** : en interpolation : $D_{50} = 0,4393\text{mm}$,

- **Coefficient d'uniformité (Cu)** : on calcule le D_{10} et D_{60} en interpolation $D_{10} = 0,1869\text{mm}$ et en interpolation $D_{60} = 0,6114\text{mm}$, $(Cu) = \frac{0,6114\text{mm}}{0,1869\text{mm}} = 3,271$

- **Coefficient de courbure (Cc)** : on calcule le diamètre D_{30} en interpolation , $D_{30} = 0,3039\text{mm} \rightarrow Cc = \frac{(0,3039\text{mm})^2}{(0,1869\text{mm} * 0,6114\text{mm})} = \frac{0,09235521}{0,11427066} = \frac{0,1}{0,1} = 1$

- **Calcul de percentiles clés**

Nous déterminons : D_5 (5% tamisant) ; D_{16} (16% de tamisant), D_{25} (25 % tamisant), D_{50} (50% de tamisant, médiane), D_{75} (75 % tamisant), D_{84} (84% de tamisant) et D_{95} (95 % tamisant) en interpolation et on convertie en échelle logarithmique,

- **Moyenne granulométrique pondérée**

Calcul de la moyenne pondérée $D_{moyen} = \sum_{i=1}^n \frac{D \times \Delta P}{100} = \frac{44,5123}{100} = 0,44 \text{ mm}$

- **Sorting (tri, écart – type)** : $\sigma = \left[\frac{0,25 - (-0,65)}{2} \right] = 0,081$

- **L'asymétrie (Skewness, Sk)** : $\left[\frac{-0,65 + 0,25 - 2(-0,36)}{2(0,25 - (-0,65))} \right] = 1$

- **Coefficient d'aplatissement de Kurtosis (K)**

$K = \frac{D_{95} - D_5}{2,44 * (D_{75} - D_{25})}$; $K = \frac{2 - 0,226}{2,44 * (1 - 0,28)} = 1,2319 \approx 1,24$

3.1.3. Résultat de l'analyse granulométrique de sable ETRD2 (Tshopo rive droite)

Le résultat de l'échantillon de sable de ETRD2) avec un poids initial de 500g de sable est présenté dans le tableau ci – dessous :

Tableau 6 : résultat de l'analyse de l'échantillon (ETRD2)

N°	Tamis (mm)	Masse de refus (g)	Masse de refus cumulé en (g)	% de refus cumulé	% de tamisant
1	2	31,91	31,91	6,382	93,618
2	1,95	20,2	52,11	10,422	89,578
3	1,9	3,03	55,14	11,028	88,972
4	1,85	1,62	56,76	11,352	88,648
5	1,55	35,27	92,03	18,406	81,594
6	1	25,03	117,06	23,412	76,588
7	0,95	28,02	145,08	29,016	70,984
8	0,75	44,91	189,99	37,998	62,002
9	0,55	24,25	214,24	42,848	57,152
10	0,45	29,77	244,01	48,802	51,198
11	0,35	44,9	288,91	57,782	42,218
12	0,25	64,43	353,34	70,668	29,332
13	0,15	92,85	446,19	89,238	10,762
14	0,1	33,26	479,45	95,89	4,11
15	0,05	17,65	497,1	99,42	0,58

16	< 0,05	1,4	498,5	99,7	0,3
----	--------	-----	-------	------	-----

Il ressort de ce tableau que, le (%) de refus cumulé de 37,9 % à un tamis 0,75mm est plus petit signifie qu'une petite proportion de grains à un diamètre inférieur à celui de 0,75 mm, et les grains ont une taille inférieure à 0,75mm.

Pour le (%) tamisant 62,1 %, indique la finesse des grains signifie que la majorité des grains sont plus gros que l'ouverture du tamis 0,75mm, 63,2 % tamisé à 0,75 mm, les particules ont une taille supérieure à 0,75mm.

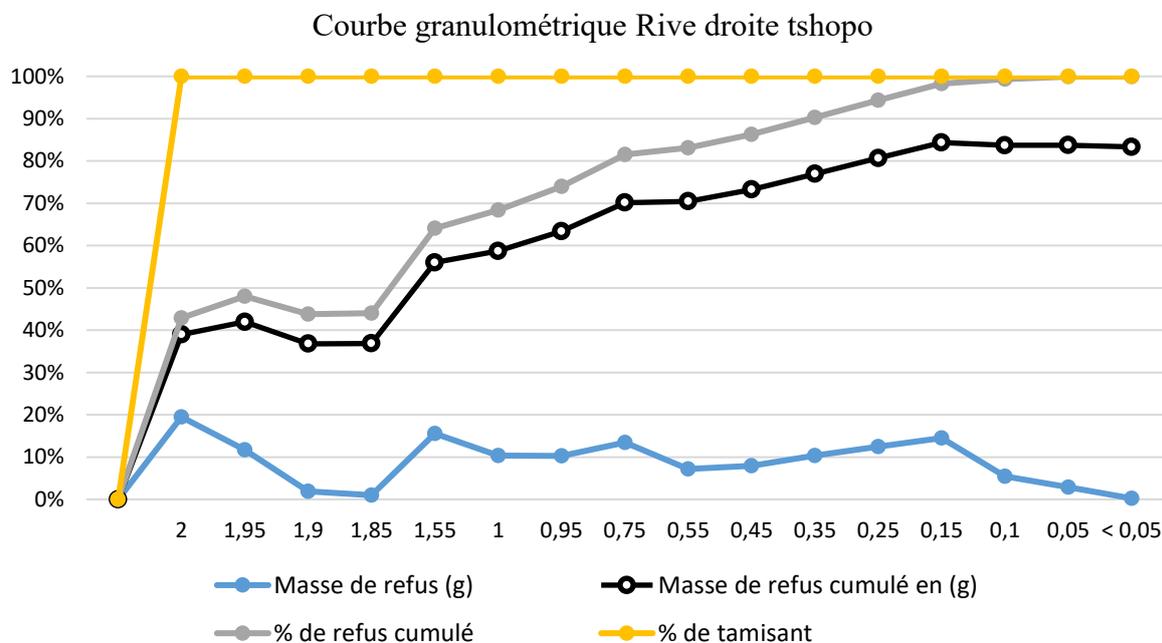


Figure 6 : courbe granulométrique de sable Tshopo rive droite

La courbe granulométrique est progressive et bien étalée ($D_{10} = 0,15\text{mm}$), indique un sable bien gradué, mais avec une distribution asymétrique vers les fines, suggère un manque de courbure moyenne, donne une courbe un peu creusée, cela reflète un mélange de particules fines et grossiers, utile pour certaines applications.

- **Module de finesse :** $MF = \frac{6,382+18,406+37,998+57,782+89,238}{100} = \frac{209,806}{100} = 2,09806$

- **Taux de fine :** le taux de fine au maille de 0,1mm égal à 4,11%, un taux de fine inférieur à 10% (AFNOR, 1990)

- **Taille médiane :** en interpolation $D_{50} = 0,437\text{mm}$,

- **Le Coefficient d'uniformité (Cu) :** calcul en interpolation $D_{10} = 0,15\text{mm}$ et $D_{60} = 0,66754\text{mm}$
 $\rightarrow (Cu) = \frac{0,66754\text{mm}}{0,15\text{mm}} = 4,450$.

- **Le Coefficient de courbure (Cc),** on calcule en interpolation le diamètre $D_{30} = 0,29816\text{mm}$ et le $Cc = \frac{(0,29816\text{ mm})^2}{(15\text{mm} * 0,66754\text{ mm})} = 0,88899$

- **Les percentiles :** on détermine le diamètre (en mm) correspondant à 5% de tamisant, 16% de tamisant, 25 % de tamisant, médiane 50% de tamisant, 75% tamisant, 84% de tamisant, 95% de tamisant.

- **Moyenne granulométrique pondérée**

la moyenne pondérée $D_{moyen} = \sum_{i=1}^n \frac{D \times \Delta P}{100} = \frac{47,0713}{100} = 0,47\text{mm}$

- **Sorting (tri, écart - type), $\sigma = \left[\frac{(\text{Log}D_{84} - \text{Log}D_{16})}{2} \right]$** avec $D_{84} = 1,66\text{mm} \rightarrow \text{Log}D_{84} = \text{Log}1,66 = 0,22$ et $D_{16} = 0,18\text{mm} \rightarrow \text{Log}D_{16} = \text{Log}0,18 = -0,77$

$\rightarrow \sigma = \left[\frac{0,22 - (-0,77)}{2} \right] = 0,495 \approx 0,5$

- **Coefficient d'asymétrie (Skewness, Sk), $Sk = \left[\frac{(\text{Log}D_{16}) + (\text{Log}D_{84}) - 2(\text{Log}D_{50})}{2((\text{Log}D_{84} - (\text{Log}D_{16}))} \right] =$**

Avec $D_{84} = 1,66\text{mm} \rightarrow \text{Log}D_{84} = \text{Log}1,66 = 0,22$; $D_{16} = 0,18\text{mm} \rightarrow \text{Log}D_{16} = \text{Log}0,18 = -0,77$, et $D_{50} = 0,44\text{mm} \rightarrow \text{Log}0,44 = -0,36$,

$\rightarrow Sk = \left[\frac{-0,77 + 0,22 - 2(-0,36)}{2(0,22 - (-0,77))} \right] = 0,0858 \approx 0,086$

- Coefficient d'aplatissement de Kurtosis

$$K = \frac{D_{95} - D_5}{2,44 * (D_{75} - D_{25})} \text{ avec } D_{95} = 2\text{mm} ; D_5 = 0,106\text{mm} ; D_{25} = 0,23\text{mm} \text{ et } D_{75} = 0,086\text{mm}$$

$$K = \frac{2 - 0,106}{2,44 * (0,086 - 0,23)} = -5,39$$

3.1.4. Résultat de l'analyse granulométrique sable EMRK3 (Maleke/route kandangba)

Le résultat de l'échantillon de sable de (EMRK3), avec un poids initial de 500g de sable est présenté dans le tableau, ci – dessous :

Tableau 8 : résultat de l'échantillon (EMRK3)

N°	Tamis (mm)	Masse de refus (g)	Masse de refus cumulé en (g)	% de refus cumulé	% de tamisant
1	2	17,91	17,91	3,582	96,418
2	1,95	4,59	22,5	4,5	95,5
3	1,9	3,34	25,84	5,168	94,832
4	1,85	0,17	26,01	5,202	94,798
5	1,55	8,17	34,18	6,836	93,164
6	1	8,43	42,61	8,522	91,478
7	0,95	13,24	55,85	11,17	88,83
8	0,75	34,59	90,44	18,088	81,912
9	0,55	25,85	116,29	23,258	76,742
10	0,45	32,58	148,87	29,774	70,226
11	0,35	58,23	207,1	41,42	58,58
12	0,25	109,19	316,29	63,258	36,742
13	0,15	126,13	442,42	88,484	11,516
14	0,1	31	473,42	94,684	5,316
15	0,05	22,33	495,75	99,15	0,85
16	< 0,05	2,01	497,76	99,552	0,448

Il ressort de ce tableau que, le (%) de refus cumulé de 18,08 % à un tamis 0,75mm est plus petit signifie qu'une petite proportion de grains à un diamètre inférieur à celui de 0,75 mm, et les grains ont une taille inférieure à 0,75mm.

Pour le (%) tamisant 81,9 %, indique la finesse des grains signifie que la majorité des grains sont plus gros que l'ouverture du tamis 0,75mm, 81,9 % tamisé à 0,75 mm, les particules ont une taille supérieure à 0,75mm.

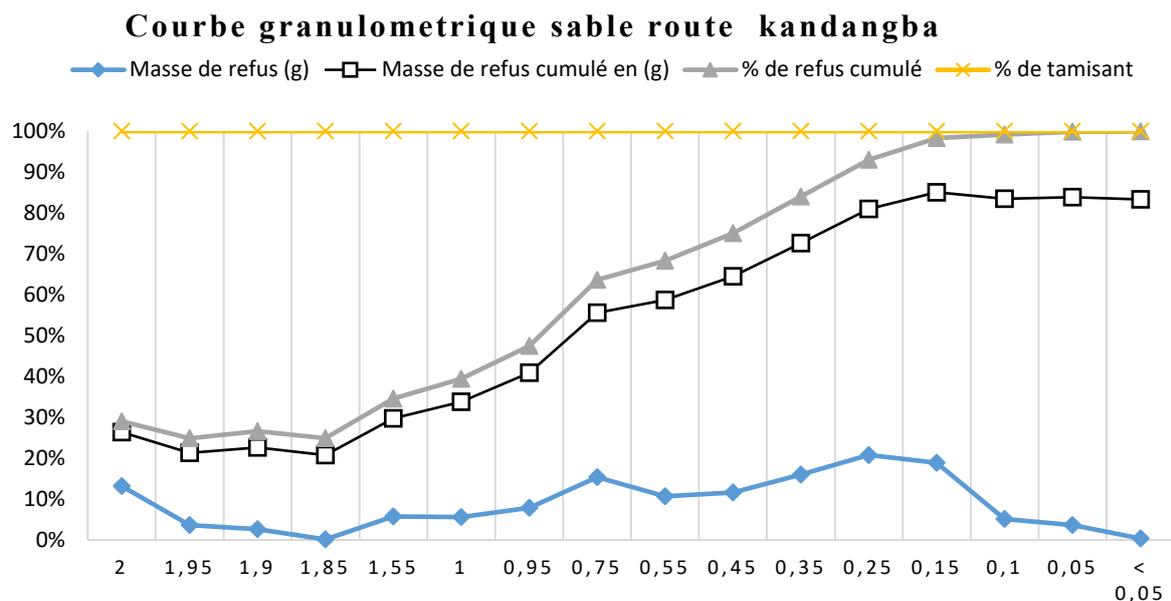


Figure IV: courbe granulométrique de sable route kandongba

Figure 7 : courbe granulométrique de sable route kandongba

La courbe granulométrique est progressive et bien étalée, indiquant un sable bien gradué, mais avec une distribution asymétrique vers les fines, suggère un manque de courbure moyenne, donne une courbe un peu creusée, cela reflète un mélange de particules fines et grossiers,

- **Module de finesse** : $MF = \frac{3,582+6,836+18,088+41,42+88,484}{100} = \frac{158,41}{100} = 1,5841$

- **Taux de fine** : le taux de fine maille de 0,1mm est de 5,3 % un taux de fine inférieur à 10% (AFNOR, 1990).

- **Taille médiane** : en interpolation est $D_{50} = 0,31mm$,

- **Coefficient d'uniformité (Cu)**, et en interpolation $D_{10} = 0,1377mm$ et $D_{60} = 0,362mm$, $\rightarrow (Cu) = \frac{0,362mm}{0,1377} = 2,628 \rightarrow Cu = 2,62 < 4$

- **Coefficient de courbure (Cc)**, on calcule en interpolation $D_{30} = 0,223mm$

$\rightarrow Cc = \frac{(0,223mm)^2}{(0,137mm * 0,362mm)} = 0,999$

- **Percentiles clés**

On détermine le diamètre (en mm) de 5% de tamisant, 16% de tamisant, 25 % de tamisant, 50% de tamisant (médiane), 75% tamisant, 84% tamisant et 95 % tamisant.

- **Moyenne granulométrique pondérée (Dmoyen)** $= \sum_{i=1}^n \frac{D_i \times \Delta P_i}{100} = \frac{40,8995}{100} = 0,405995mm$

- **Le sorting (tri, écart – type)**, $\rightarrow \sigma = \left[\frac{(\text{Log}D_{84} - \text{Log}D_{16})}{2} \right]$, Avec $D_{84} = 0,81mm \rightarrow \text{Log}D_{84} = \text{Log}0,81 = -0,0915$ et $D_{16} = 0,17mm \rightarrow \text{Log}D_{16} = \text{Log}0,17 = -0,76955$

$\sigma = \left[\frac{-0,0915 - (-0,76955)}{2} \right] = 0,3390$

- **L'asymétrie (Skewness, Sk)**, $Sk = \left[\frac{(\text{Log}D_{16}) + (\text{Log}D_{84}) - 2(\text{Log}D_{50})}{2((\text{Log}D_{84} - (\text{Log}D_{16}))} \right]$, avec $D_{84} = 0,81mm \rightarrow \text{Log}D_{84} = \text{Log}0,81 = -0,0915$; $D_{16} = 0,17mm \rightarrow \text{Log}D_{16} = \text{Log}0,17 = -0,76955$ et

$D_{50} = 0,31mm \rightarrow \text{Log}0,31 = -0,5086 \rightarrow Sk = \left[\frac{-0,76955 - 0,0915 - 2(-0,5086)}{2(-0,0915 - (-0,76955))} \right] = 0,11514 \approx 0,12$

- **Le coefficient d'aplatissement de Kurtosis**

$K = \frac{D_{95} - D_5}{2,44 * (D_{75} - D_{25})}$ avec $D_{95} = 1,91mm$; $D_5 = 0,97mm$; $D_{25} = 0,20mm$ et $D_{75} = 0,53mm$

$K = \frac{1,91 - 0,97}{2,44 * (0,53 - 0,20)} = 1,167 \approx 1,17$

3.1.5. Résultat de l'analyse granulométrique de sable ETR4 (Tshopo Rivière)

Le résultat de l'échantillon de sable de (ETR4) avec un poids initial de 500g de sable est présenté dans le tableau, ci – dessous :

Tableau 9 : résultat de l'échantillon (ETR4)

N°	Tamis	Masse de refus (g)	Masse de refus cumulé en (g)	% de refus cumulé	% de tamisant
1	2	0,2	0,2	0,04	99,96
2	1,95	0,11	0,31	0,062	99,938
3	1,9	0	0,31	0,062	99,938
4	1,85	0	0,31	0,062	99,938
5	1,55	0,44	0,75	0,008	99,992
6	1	0,65	1,4	0,28	99,72
7	0,95	1,69	3,09	0,618	99,382
8	0,75	8,35	11,44	2,288	97,712
9	0,55	11,01	22,45	4,49	95,51
10	0,45	22,78	45,23	9,046	90,954
11	0,35	182,42	227,65	45,53	54,47
12	0,25	192,4	420,05	84,01	15,99
13	0,15	69,23	489,28	97,856	2,144
14	0,1	6,85	496,13	99,226	0,774
15	0,05	0,48	496,61	99,322	0,678
16	< 0,05	0	496,61	99,322	0,678

Il ressort de ce tableau que, le (%) de refus cumulé de 2,28 % à un tamis 0,75mm est plus petit ce qui signifie qu'une petite proportion de grains à un diamètre inférieur à celui de 0,75 mm, et les grains ont une taille inférieure à 0,75mm.

Pour le (%) tamisant 97,71%, indique la finesse des grains et signifie que la majorité des grains sont plus gros que l'ouverture du tamis 0,75mm, 97,71 % tamisé à 0,75 mm, les particules ont une taille supérieure à 0,75mm.

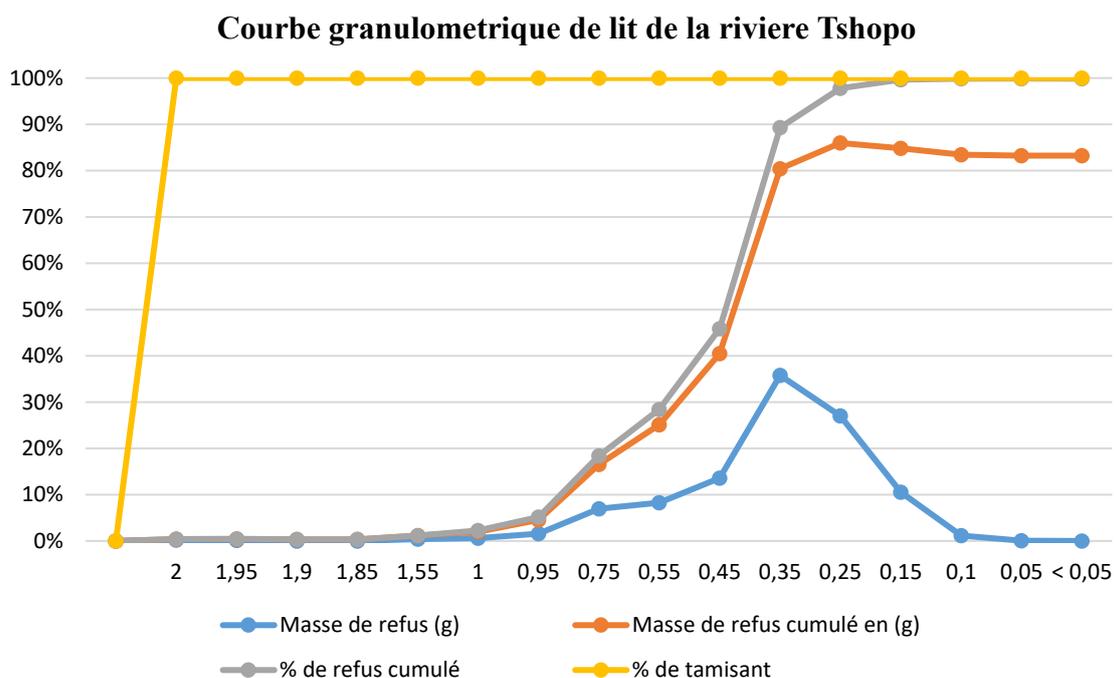


Figure 9 : courbe granulométrique de sable Tshopo rivière

La courbe granulométrique montre une très forte montée entre 0,25mm et 0,45mm (passage de 16% à 91%), une forte majorité de grains on des tailles entre 0,3mm et 0,5mm, peu de fines et peu de très gros grains, la courbe indique un tri très élevé donc un sable (mal gradué), la granulométrie est bien étalée (bon mélange de tailles), il s'agit d'un sable fin

- **Module de finesse : MF** = $\frac{0,04+0,008+2,288+45,53+97,856}{100} = \frac{145,722}{100} = 1,45722$

- **Taux de fine** : Le taux de fine de maille de 0,1mm égal à 0,78 %, le taux de fine est inférieur à 10% (AFNOR, 1990).

- **La taille médiane** : en interpolation est de $D_{50} = 0,338\text{mm}$,

- **Coefficient d'uniformité (Cu)** : , on calcule D_{10} en interpolation $D_{10} = 0,20\text{mm}$ et $D_{60} = 0,365\text{mm}$

→ $(Cu) = \frac{0,365\text{mm}}{0,20\text{mm}} = 1,825$

- **Coefficient de courbure (Cc)**, on calcule D_{30} en interpolation est $D_{30} = 0,036\text{mm}$ → $Cc =$

$\frac{(0,036\text{mm})^2}{(0,20\text{mm} * 0,365\text{mm})} = \frac{0,001296}{0,073} = 0,018$

- **Percentiles clés** : on détermine le diamètre (en mm) de 5% de tamisant, 16% de tamisant, 25% de tamisant, 50% de tamisant (médiane), 75% de tamisant, 84% de tamisant et 95% de tamisant.

- **Moyenne granulométrique pondérée (Dmoyen)** = $\sum_{i=1}^n \frac{D \times \Delta P}{100} = \frac{36,3373}{100} = 0,363373\text{mm}$

- **Sorting (tri ou écart – type) σ** = $\left[\frac{(\text{Log}D_{84} - \text{Log}D_{16})}{2} \right]$ avec $D_{84} = 0,43\text{mm}$ → $\text{Log}D_{84} = \text{Log}0,43 = -0,366$ et $D_{16} = 0,23\text{mm}$ → $\text{Log}D_{16} = \text{Log}0,23 = -0,638$

→ $\sigma = \left[\frac{-0,366 - (-0,638)}{2} \right] = 0,136$

- **Coefficient d'asymétrie (Skewness, Sk)**, $Sk = \left[\frac{(\text{Log}D_{16}) + (\text{Log}D_{84}) - 2(\text{Log}D_{50})}{2((\text{Log}D_{84} - (\text{Log}D_{16})))} \right]$ avec $D_{84} = 0,43\text{mm}$ →

$\text{Log}D_{84} = \text{Log}0,43 = -0,366$, $D_{16} = 0,23\text{mm}$ → $\text{Log}D_{16} = \text{Log}0,23 = -0,638$ et $D_{50} = 0,34\text{mm}$ → $\text{Log}0,34 = -0,468$

→ $SK = \left[\frac{-0,366 - 0,638 - 2(-0,468)}{2(-0,366 - (-0,638))} \right] = -0,0339$

- **Le coefficient d'aplatissement de Kurtosis (K)** : $K = \frac{D_{95} - D_5}{2,44 * (D_{75} - D_{25})}$ avec $D_{95} = 0,53\text{mm}$, $D_5 = 0,17\text{mm}$, $D_{25} = 0,27\text{mm}$ et $D_{75} = 0,40\text{mm}$

$K = \frac{0,53 - 0,17}{2,44 * (0,40 - 0,27)} = 1,13493 \approx 1,14$

IV. DISCUSSION

4.1. Sable ET0 (Regideso)

a. Classification du sable

Selon la taille médiane ($D_{50} = 0,98\text{mm}$) avec une moyenne ($D_{\text{moy}} = 0,82\text{mm}$), le sable de Regideso est classé comme « **sable moyen** » selon ASTM/AFNOR,

Selon le module de finesse élevé, ($MF = 3,08 < 3,1$) et le taux de fines faible ($TF = 0,9\%$), rapproche ce sable à un « **sable grossier** »,

En suivant la classification de la norme ASTM sur le trois critère : médian, moyenne et module de finesse, nous classons le sable de Regideso comme un « **sable moyen à grossier** » bien équilibré vers le haut de la plage moyenne.

a. Paramètres caractéristiques,

✓ Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,45\text{mm}$) début de la courbe, indique un sable plutôt grossier pour la filtration

✓ Le coefficient d'uniformité ($Cu = 3,30$), montre une distribution modérément uniforme, un classement semi étalé avec gradation moyen, le sable ont des grains très proche en taille, le sable est granuleux avec une répartition continue des tailles, donne un sable utilisé dans la filtres à pression ou gravitaire où le diamètre D_{10} compris entre 0,35 à 0,55mm.

✓ Le coefficient de courbure ($Cc = 1,57$), très bon, valeur proche de 1 à 3, indique une bonne courbure avec une répartition équilibrée des tailles.

✓ L'écart – type ($\sigma = 0,1884 < 0,35$), faible dispersion autour de la moyenne, montre une distribution resserrée, la qualité de classement de sable est bien classée, très bien trié (well sorting), la classification est très homogène, les grains sont très proches en tailles, avec peu de variation.

✓ Le coefficient d'asymétrie Skewness ($Sk = 0,2$), légèrement asymétrique vers la gauche, cela suggère une proportion un peu plus importante de grains fins, indique une faible asymétrie, donc le sable est quasi symétrique avec légère dominance de grains fin que de grossiers,

✓ Le coefficient d'aplatissement de Kurtosis ($K = 1,16$), indique une distribution pointue ou (leptokurtique) valeur légèrement supérieur à 1, le sable est modérément bien classé (grains proches de tailles), une distribution assez homogène.

b. Utilisation en filtration

Avantages : taux de fines faible (MF= 0,9%) ce qui réduit le colmatage, le coefficient d'aplatissement ($K > 1$), pics centré, bon pour retenir les impuretés, le coefficient de courbure ($C_c=1,57$), excellente répartition granulométrique et le coefficient d'asymétrie ($Sk= 0,2$), faible pas de forte dissymétrie.

Inconvénients : le diamètre effectif ($D_{10} = 0,45\text{mm}$) trop élevé pour une filtration d'eau potable (normes recommandent souvent D_{10} entre $0,15 - 0,35\text{mm}$) ; le coefficient d'uniformité ($C_u = 3,3$) acceptable pour filtration grossière, filtration lente ou gravitaire, mais à condition de vérifier les pertes de charge.

b. Utilisation dans la confection de béton

Avantages : pour le module de finesse (MF 3,08) idéal pour le béton (2,3 – 3,2), le coefficient ($C_c=1,57$) indique une bonne compacité, faible taux de fines (TF=0,9%) pas de risque de colmatage bonne répartition granulométrique permet un béton dense, stable, résistance mécanique élevée attendue, bonne maniabilité.

4.2. Sable ESIM1 (Simisimi)

a. Classification de sable

Le diamètre médian $D_{50} = 0,439\text{mm}$ la taille médiane des 50% passant, ce sable est un « **sable moyen** » car le diamètre moyen pour la moyenne = $0,44\text{mm}$ confirme la position de sable moyen, selon AFNOR/ASTM pour la médiane et la moyenne

- Le module de finesse (MF = 2,24), le sable est « **moyennement fin à moyen** »,
- Le taux de fine (TF= 1,84) faible inférieur 5%, bonne qualité, peu de fines, adapté au béton,

En suivant la classification de la norme ASTM sur les trois critères : médian, moyenne et module de finesse, nous qualifions le sable de Simisimi comme étant « **sable moyen fin à moyen** » bien gradué, bonne répartition des grains.

b. Paramètres granulométriques caractéristiques

- Le diamètre effectif, ($D_{10} = 0,1869\text{mm}$), utile en filtration influence sur la perméabilité,
- Le coefficient d'uniformité ($C_u 3,27$) montre sable bien gradué, bonne répartition et le coefficient de courbure ($C_c = 1$) proche de 1, bonne courbure de la courbe granulométrique,
- L'écart type (0,081) une faible dispersion montre une distribution homogène,
- Le coefficient d'asymétrie de Skewness ($Sk = 1$), positif montre une asymétrie à droite présence de fines,
- Le coefficient d'aplatissement Kurtosis ($K = 1,24$) indique une distribution pointue ou (leptokurtique) le sable est modérément bien classé (grains proches de tailles), une distribution assez homogène.

c. Utilisation en filtration

Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,1869\text{mm}$), un critère principal pour les filtres à sable, qui se situe dans la plage typique pour la filtration d'eau potable (0,15 à 0,35mm), par contre pour l'eau industrielle, le D_{10} peut aller jusqu'à 0,6mm ; le coefficient d'uniformité ($C_u = 3,27$), donc le sable de simisimi est bien adapté pour des filtres à sable lent de traitement d'eau.

d. Utilisation en béton

Le module de finesse (MF = 2,24) est dans la plage optimale (entre 2,2 et 3,2) recommandée pour le béton, une teneur en fines inférieure à 5% conforme (aux normes NF EN 12620/ASTM C33), sable bien gradué ($C_u > 2$ et $C_c=1$), favorise la compacité et réduit le besoin en ciment, donc un sable adapté à la confection de béton.

4.3. Sable ERDT2 (Tshopo Rive droite)

a. Classification du sable selon la granulométrie

- Le diamètre médian $D_{50} = 0,4373\text{mm}$ correspond au diamètre moyen ($D_{moy} = 0,47\text{mm}$) ce qui confirme un « **sable moyen** », selon AFNOR/ASTM,
- Le module de finesse (MF = 2,09), légèrement inférieur à la norme pour le béton (2,2), le sable est « **moyennement fin** »,
- Le teneur en fines (TF = 4,11%), relativement élevée mais acceptable (<5%) selon les normes NF EN 12620 qui est la limite acceptable pour le béton
- Selon ASTM/AFNOR (1990) sur les trois critères : médian, moyenne et module de finesse, nous qualifions le sable de rive droite Tshopo un « **sable moyennement fin** » bien gradué avec un large étalement.

a. Paramètres granulométriques caractéristiques

- Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,15\text{mm}$) diamètre effectif pour la filtration,
- Le coefficient d'uniformité ($C_u = 4,45$), bien > 2 sable indique un sable bien gradué avec un large étalement.
- Le coefficient de courbure ($C_c = 0,9$) proche de 1, montre la forme d'une courbe normale, donc bonne distribution.
- L'écart type ($\sigma = 0,5$) très élevé indique une grande dispersion des tailles de grains,
- Le coefficient d'asymétrie de Skewness ($Sk = 0,086$) montre une légère asymétrie positive (quasi symétrique) distribution équilibrée
- Le coefficient d'aplatissement de Kurtosis ($K = -5,39$) indique une très faible distribution très aplatie beaucoup de grains éloigné de la moyenne, présence de grains extrêmes (fins et grossiers).

b. Utilisation en filtration de sable de Tshopo rive droite,

Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,15\text{mm}$), valide pour filtre à sable lent, pour une eau potable (typique : $0,15 - 0,3\text{mm}$), bonne perméabilité,

Un coefficient d'uniformité ($C_u = 4,45$) élevé permet un bon drainage, une valeur inférieure au seuil critique de 5%, indique un bon étalement pour filtration,

Inconvénients : taux de fines élevé ($TF = 4,11\%$) risque de colmatage si non préfiltré

Nous pouvons dire que le sable de la rive droite Tshopo est bien adapté pour les filtres à sable lent (eau potable, assainissement), un bon choix pour la filtration.

c. Utilisation en béton :

Le sable de rive droite Tshopo avec un module de finesse ($MF = 2,09$) est légèrement faible par rapport à la norme recommandée (2,2 à 3), pour le béton peut nécessiter un ajout de sable plus grossier et le taux de fines ($TF = 4,11\%$) valeur acceptable ($<5\%$), mais peut contenir les argiles ou impuretés ; avec une bonne gradation ($C_u=4,45$) et ; ($C_c = 0,9$) favorise la compacité, bonne gradation, convient aux bétons courants ou armés

L'écart – type élevé et kurtosis très faible indique une hétérogénéité élevée, ce qui peut poser des problèmes pour la régularité du béton (risque de ségrégation).

Le sable de Tshopo rive droite, peut être utilisé pour le béton non structurel ou courant, mais pas idéal pour béton à haute performance ou armé sans correction granulométrique.

4.4. Sable EMK3 (Route Kandangba)

a. Classification du sable selon la granulométrie

- Le diamètre médian ($D_{50} = 0,31\text{mm}$), le sable est un sable moyen (plutôt à tendance fine) car le diamètre moyen ($D_{\text{moy}} = 0,47\text{mm}$), confirme la position de sable moyen selon AFNOR/ASTM (1990).

- Le module de finesse ($MF = 1,58$), très bas montre un sable fin, peu adapté au béton sans correction,

- Le teneur en fines ($TF = 5,3\%$), légèrement au – dessus de la limite recommandée (5%) risque de gonflement ou mauvaise adhérence dans le béton,

En suivant la classification de la norme ASTM/ AFNOR (1990) sur le trois critère : médian, moyenne et module de finesse, nous classons le sable de de Kandangba comme un « **sable moyen plutôt à tendance fine** » bien gradué, bonne répartition des grains

b. Paramètres granulométriques caractéristiques de sable

- Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,1377\text{mm}$) critère principal utilisé en filtration.

- Le coefficient de conformité ($C_u = 2,628 > 2$) montre un sable bien gradué (bonne répartition)

- Le coefficient de courbure ($C_c = 0,999 \approx 1$), indique une courbe granulométrique équilibrée.

- L'écart – type ($\sigma = 0,339$), montre un modéré dispersion des grains (distribution acceptable),

- Le coefficient d'asymétrie de Skewness ($Sk = 0,12$), indique une légère asymétrie à droite un peu plus de fines que la moyenne,

- Le coefficient d'aplatissement de Kurtosis ($K = 1,17$), donne une distribution aplatie c'est – à – dire présence de grains hors normes (extrêmes).

c. Utilisation en filtration de l'eau,

✚ Filtration de l'eau bonne homogénéité, facilite la filtration, faible taux de fines, faible colmatage, le coefficient d'uniformité ($C_u = 2,628$) conforme (valeur requise pour la filtration (entre 2 et 5), limite la couche de filtration, moins progressive à combiner avec graviers supports.

✚ Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,1377\text{mm}$), est bon pour filtres à sable lent (eau potable) car D_{10} typique : $0,15\text{mm}$. Le sable de route Kandangba convient bien pour la filtration de l'eau potable (filtres lents).

d. Utilisation en béton,

Sable a une bonne compacité grâce au module de finesse élevé ($MF = 1,58$), trop fin pour le béton courant son inconvénient est que le sable est peu gradué, risque de ségrégation, nécessite un complément de sable plus fin ou granulats intermédiaires. Le taux de fines ($TF = 5,3\%$), juste au – dessus du seuil de 5% (selon EN 12620), n'est pas conforme à la fabrication de béton sans lavage ou correction. Une granulométrie équilibrée ($C_u > 2$, $C_c \approx 1$), bon mais présence excessive de fines. Le sable de Maleke route Kandangba est inadapté seul pour la confection de béton mais peut être utilisé en mélange avec un sable grossier pour rééquilibrer.

4.5. Sable ETR4 (Tshopo rivière)

a. Classification du sable

-Selon le diamètre médian ($D_{50} = 0,338\text{mm}$), le sable c'est un « **sable moyen** » avec une moyenne granulométrique pondérée ($D_{\text{moy}} = 0,3633\text{mm}$), confirme la classe de sable moyen.

Le module de finesse ($MF = 1,45$), très faible, classe le sable à un « **sable fin** », un peu adapté au béton sans correction, le taux de fines ($TF = 0,78\%$), taux très faible excellent, pas de risque d'argile ou d'impuretés,

En suivant la classification de la norme ASTM/ AFNOR (1990) sur le trois critère : médian, moyenne et module de finesse, nous qualifions le sable de la rivière Tshopo comme un « **sable moyen fin** » mal gradué, avec distribution uniforme insuffisante.

b. Paramètres granulométriques caractéristiques

- Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,20\text{mm}$) paramètre clé en filtration,
- Le coefficient de conformité ($C_u = 1,825 < 2$) sable mal gradué, avec une distribution uniforme insuffisante,
- Le coefficient de courbure ($C_c = 0,018$) très faible avec une courbe irrégulière, faible diversité des tailles.
- L'écart-type, ($\sigma = 0,136$) une valeur faible avec une distribution resserrée, homogène,
- Le coefficient d'asymétrie de Skewness ($Sk = -0,034$) proche de 0, indique une distribution symétrique (équilibrée entre fines et grossiers),

Le coefficient d'aplatissement de Kurtosis ($K = 1,14$ faible < 3), montre une distribution aplatie peu de pics de concentration de tailles spécifiques

c. Utilisation en filtration de sable de rivière Tshopo,

Le diamètre effectif ($D_{10} = 0,20\text{mm}$) est conforme à la plage typique des filtres à sable lent (entre $0,15 - 0,35\text{mm}$), compatible avec les couches filtrantes, très faible taux de fines (0,78%) risque de colmatage faible,

Limite : mal gradué mais à couplé avec gravier support pour amélioration le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,825$), valeur trop faible par rapport aux normes recommandées (C_u entre 2 et 5), ce qui montre un sable trop uniforme, peu efficace pour la filtration, car il ne permet pas une bonne stratification du filtre.

Donc le sable de rivière Tshopo est un sable limité pour la filtration, il est trop uniforme, non recommandé seul, mais peut être utilisé en mélange pour ajuster la granulométrie.

d. Utilisation de sable de rivière Tshopo dans la confection de béton,

- Le module de finesse ($MF = 1,45$), une valeur trop faible, indique que le sable est trop fin pour béton, sauf correction par ajout de sable grossier, et pour le taux de fines ($TF = 0,78$) un très bon point, faible teneur en fines, pas de risque de mauvaise adhérence.
- Le coefficient d'uniformité ($C_u < 2$), montre que le sable n'est pas assez gradué, taille des grains trop uniforme, mauvaise compacité,
- Le coefficient de courbure ($C_c = 0,018$) très faible, indique une distribution mal équilibrée, qui peut nuire aux performance du béton. Donc, le sable de rivière Tshopo, ce sable est non adapté seul pour la confection de béton, mais peut servir en mélange avec un sable grossier pour rééquilibrer.

V. CONCLUSION

Notre étude concerne la caractérisation physico – chimique de sable de Kisangani, dans les conditions édaphoclimatiques locales, nous avons prélevés les échantillons dans les différents gisements de la région de Kisangani : Simi-simi (ESIM1), Tshopo rive droite (ETRD2), Maleke Route Kandangba (EMRK3), Tshopo rivière (ETR4), et le sable de la station de traitement des eaux de la Regideso/Kisangani comme traitement témoin (ET0), d'après les analyses physiques (granulométriques) effectués au laboratoire sur les échantillons nous avons aboutie aux résultats ci – après :

❖ **Le sable de Regideso** est un « **sable moyen à grossier** » bien équilibré vers le haut de la plage moyenne, ne pas bien adapté à la filtration fine (eau potable), il est très bon pour la filtration grossière, préfiltration, les filières de traitement des eaux usées, et une couche de support dans un filtre multicouche. Il est bon pour la confection de béton, pas de risque de colmatage avec bonne répartition granulométrique permet un béton dense, stable, résistance mécanique élevée attendue, bonne maniabilité.

❖ **Le sable de Simisimi** est un « **Sable moyen** », bien gradué, à grains moyen à gros légèrement asymétrique à droite, convient très bien à la fabrication de béton, bonne compacité, faible teneur en fines avec une granulométrie équilibrée notamment si on veille à équilibrer les proportions de fines ou d'ajouter des sables plus fins si nécessaire et il convient bien à la filtration de l'eau potable (sable filtrant).

❖ **Le sable de la rive droite Tshopo**, c'est un « **Sable moyen** », bien gradué mais assez hétérogène, peut être utilisée en béton, mais un ajustement avec du sable plus grossier est recommandé, convient mieux au béton de propreté ou béton de structurel, tandis que pour la filtration de l'eau le sable est très bien adapté à la filtration de l'eau potable à cause de son diamètre effectif et son coefficient d'uniformité (D_{10} et C_u sont bien positionnés).

❖ **Le sable de Maleke (Route Kandangba)** est un « **sable moye fin** », bien gradué, riche en fines, il est non recommandé seul dans la confection de béton à cause de sa granulométrie fine et excès de fines, à corriger par mélange ou lavage, c'est un bon sable filtrant, adapter aux filtres lents pour le traitement d'eau potable.

❖ **Le sable de rivière Tshopo** est un sable « **sable moyen fin** », non adapté pour la confection de béton non adapté seul à cause de module de finesse faible et coefficient d'uniformité trop bas (MF faible C_u bas), pour la filtration, le diamètre effectif est bon mais le coefficient d'uniformité trop faible), il faut une correction possible surtout mélange avec sable grossier (pour béton) ou plus gradué (pour filtration).

Références

- [1]. ADEME 2016 : Agence de l'environnement et de maitrise de l'Energie, Académie Rennes Education nationale, ECHOS D'ESCALE TARAEXPEDITION, la malle à souvenir de TARA PACIFIC, sable blanc et sable noir : Papeete – France,
- [2]. ASTM D6913M – 17 : standard test methods for partile – size distribution (gradation of soils using sieve analysis ASTM international 34p ; methode officielle pour déterminer D_{10} , D_{60} et Cu,
- [3]. ASTM D422 2007 : standard test method for particle size analysis of soils American society for testing and materials décrit les méthodes de mesure de D_{10} , D_{30} , D_{60} et l'usage des Cu et Cc.
- [4]. AFNOR, 1990 : NF P 18 – 560 : granulats – analyse granulométrique p15 – 25 ; décrit la méthode de calcul de module de finesse donne les seuils de taux de fines (passant au tamis 0,063mm) outil de référence pour les essais au laboratoire. (Test à NaOH), utilisée pour évaluer la propreté du sable destiné au béton.
- [5]. Blott, S.J., & Pye, K 2001 : gradistat : a grain size distribution and statistics package for the analysis of inconsolidated sediments. Earth surface processes and land forms, 26(11),1237 – 1248 : fournit des outils d'analyse avancée pour la skewness et d'autres paramètres granulométriques).
- [6]. Boulonne, M & Lafaye, S. 2005 : granulométrie des sols : méthodes et interprétation, édition lavoisuer, Paris 156p, ISBN :978-2-7430-0849-2
- [7]. Braudeau, E. 1995 : Structure et fonctionnement des sols, Ed. Harmattan, Paris 272p, ISBN : 2-7384-3553-3 : ce livre traite de principes de l'analyse granulométrique, des méthodes de classement (selon USAID, FAO, etc.), de la présentation sous de tableau et courbe granulométrique, des implications pour les propriétés physiques du sol.
- [8]. Coduto, D, P., & Yeung,M.R, &Kitch,W.A. 2010 : géotechnical engineering principles and practices (2 ed) Pearson : excellente présentation des concepts granulométriques y compris D_{10} et Cu.
- [9]. Das, M., 2019 : principal of geotechnical engineering cengage Learning, dernière édition : référence classique expliquant en détail l'analyse granulométrique, Cu, Cc et D_{10})
- [10]. Delorme, A.2002 : mécanique des sols – Tome1 : caractérisation des sols, presses de l'école Nationale de Ponts et chaussées, paris 273p.ISBN : 2-85978-373-5 : ce livre aborde, les méthodes de mesure granulométrique (tamisage, sédimentation), les courbes granulométriques, l'interprétation en termes de classement des sols (bien classé, mal classé), les implications pour la perméabilité, et l'usage en génie civil
- [11]. Dupain, R., & Saint-Arroman, J.-C. 2009 : Granulats, sols, ciments et bétons Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, 4^{ème} édition, 240 pages.
- [12]. Dome, T. et al 2022 : caractérisation granulométrique et dynamique sédimentaire dans les plages septentrionales des rivières du Sud : cas de la basse casamance : Afrique Science 21(3) 157 – 173).
- [13]. Folk, R.L., & Ward, W.C. 1957 : Brazos river bar : a study in the significance of grain size parameters journal of sedimentary research. 27(1) 3 – 26 : introduit des mesures statistiques comme le skewness (symétrie), Kurtosis dans les distributions granulométriques en classement et description de tri des grains.
- [14]. Ghomari, F., Bendi – Oies, A. 2022 : méthode couramment utilisé sur les sables en fonction de leur finesse ou grossièreté, analyse granulométrique Academia.ed.
- [15]. Hillel D., 1998- Environnemental Soil Physics. New York, Academic Press, 771p.
- [16]. Holtz, R, D., kovacs, W.D., & Sheahan,T.C. 2011 : An Introduction to geotechnical Engineering (2nd ed) pearson education : présente la théorie granulométrique et les interprétations pratiques de Cu, Cc et D_{10} .
- [17]. Kabamba, J.R & Mavambou B. 2018 : Caractérisation granulométrique de dépôts sableux des rivières de la région de Kinshasa, Laboratoire de Sédimentologie et Géologie des terrains superficiels, Département des Géosciences, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, RD Congo).
- [18]. Lambe, T W, & Whitman, R.V. 1969 : soil Mechnaics. New York. John Wiley & son 553p, ce livre traite des propriétés physiques et mécaniques des sols, incluant les particules fines (argiles, limons), leur structures, porosité, perméabilité, etc.
- [19]. Lal R., & Shukla M.K., 2004 : Principles of soil Physics. New York, Marcel Dekker, 682p
- [20]. Larrad, François de 2000 : structure granulaires et formulation des bétons ; presses de l'ENPC, p255 (module de finesse et taux de fines – 6 pages). ISBN : 978 – 2859783603, aborde les concepts avancés de granularité, traite de la formulation optimale à partir du module de finesse, de taux de fines et de l'analyse granulométrique
- [21]. Veshagen, B. 1977 & Maindo A. 1997 : Histoire d'une ville universitaire du zaïre, étude approfondie sur l'évolution historique de Kisangani depuis sa formation en 1876 jusqu'à 1976, Harmattan 1990, & combat pour la survie, voter en temps de guerre Kisangani RD Congo 1997 : quête de légitimité et conquête de l'espace politique, Harmattan, 2001 : examen des élections locales à Kisangani, dans un contexte de conflit armé
- [22]. Zhong, Y.S, Zhao H.L., Zhang X.Y.Z., 2004- Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China. Soil et Tillage Research, vol.75, n°1, pp. 27–36