



Caractérisation sédimentologique des horizons superficiels des sols dans le bas-Ferlo (Louga, Sénégal) dans un contexte de dynamique érosive

Gallo Niang^{1✉}, Amadou Abou Sy², Guilgane Faye²

¹ Laboratoire de climatologie et de l'environnement, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

² Laboratoire de géomorphologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal

Résumé. Le bas-Ferlo est marqué par l'exacerbation des phénomènes d'érosion qui remet en cause la préservation du potentiel productif des sols. L'objectif de cet article est de caractériser les sédiments des horizons superficiels des sols du bas-Ferlo. Des échantillons ont été prélevés en surface des sols alluviaux (H 0 cm) puis, en deux horizons de surface (H 0 cm et H 40 cm) des sols de l'erg selon des transects perpendiculaires à la vallée. 13 échantillons sont traités par tamisage à sec. Les résultats montrent une granulométrie hétérogène et variable entre les unités morpho-pédologiques. Le matériau des sols hydromorphes de la vallée est grossi par les apports éoliens locaux. Les sols dunaires de l'erg présentent, en commun, un grain moyen plus gros en surface qu'en profondeur, témoignant une dynamique érosive. Les indices texturaux (Mz, σ_i , Sk et K_G) indiquent une variation spatiale des environnements sédimentaires. Enfin, l'analyse des courbes granulométriques caractérisent les sols de la vallée comme des matériaux déposés en vrac et les sables éoliens l'erg comme des sédiments transités, de façon sélective, par saltation et par suspension.

Mots-clés: bas-Ferlo, distribution granulométrique, unité morpho-pédologique, dynamique érosion, transport bimodal.

Abstract. The Bas-Ferlo is marked by the exacerbation of erosion phenomena which calls into question the preservation of the productive potential of the soils. The objective of this article is to characterize the sediments of the superficial horizons of the soils of the Bas-Ferlo. Samples were taken from the surface of the alluvial soils (H 0 cm) and then from two surface horizons (H 0 cm and H 40 cm) of the erg soils along transects perpendicular to the valley. 13 samples are treated by dry sieving. The results show a heterogeneous and variable granulometry between the morpho-pedological units. The material of the hydromorphic soils of the valley is coarsened by local aeolian inputs. The dune soils of the erg have, in common, an average grain size larger at the surface than at depth, reflecting an erosive dynamic. Textural indices (Mz, σ_i , Sk and K_G) indicate spatial variation in sedimentary environments. Finally, particle size curve analysis

CORRESPONDENCE:

✉ Lansar km 15 route de Rufisque, Bp 20037, Dakar, Senegal.

✉ gallonhio@gmail.com (G.N)

ARTICLE HISTORY:

Received: 5 October 2022

Received in final form: 27 December 2022

Accepted: 29 December 2022

characterizes the valley soils as bulk deposited material and the eolian sands the erg as sediment transited, selectively, by saltation and suspension.

Keywords: bas-Ferlo, grain size distribution, morpho-pedological unit, erosion dynamics, bimodal transport.

Introduction

Dans le Sahel sénégalais (région nord), une situation de déséquilibre population-ressources naturelles est articulée avec les suppressions relatives aux mutations des activités agricoles et pastorales (Sy, 2008). Les effets de ce déséquilibre sont déjà aggravés par un déficit pluviométrique persistant depuis les années 1970 (Ndong, 1995) ayant provoqué la migration des isohyètes vers le Sud (Sambou, 2015). Les sociétés autochtones, fractionnées et très défavorisées, voient leurs ressources foncières se dégrader. Or, l'insécurité foncière n'est pas favorable à l'investissement pour la conservation ; elle crée plutôt une spirale de dégradation.

Dans les zones arides et semi-arides du Sahel sénégalais, les processus morphodynamiques, constituent à la fois facteurs et conséquences de la dégradation environnementale. En effet, l'exacerbation des phénomènes d'érosion qui en résulte provoque une dégradation continue, voire irréversible du potentiel biologique productif. Dès lors, la compréhension des processus morphodynamiques constitue une étape essentielle dans l'adoption des stratégies de lutte contre la dégradation environnementale qui est une priorité des programmes nationaux de gestion des ressources naturelles pour combattre la pauvreté et l'insécurité alimentaire.

Dans le bassin du Ferlo, plus particulièrement dans sa partie avale appelée « bas-Ferlo », les processus sédimentaires sont présidés par une dynamique double. D'une part, la dynamique éolienne modèle le paysage complexe, constitué de dunes émoussées et réorientées, de dépressions inter-dunaires aplanies par colmatage et d'une prolifération de nebkas dans les aires de dessertes sableuses. Cette dynamique éolienne est ainsi marquée par l'ensablement et la réactivation, la remise en mouvement et le remodelage des formations dunaires (Niang, 2008). A l'image du bassin arachidier où la vulnérabilité des sols à l'érosion éolienne est élevée à extrêmement élevée durant quasiment toute l'année (Cissokho, 2011), le vent reste le principal agent de la dynamique sédimentaire dans le bassin du Ferlo, encore appelé zone sylvopastorale. D'autre part, la morphodynamique pluviale se manifeste par l'édification de diverses formes structurales dans le paysage morphologique tels les ravins décamétriques à hectométriques à l'échelle des versants, des rigoles métriques dans les champs et aires de pâturage et de phénomènes d'ensablement des mares par divers dépôts solides. Contrairement à l'amont du bassin du Ferlo où le ravinement est plus dangereux que les inondations dans les fonds de vallées (Sow, 2017), le bas-Ferlo connaît une morphodynamique hydrique par ravinement de moindre ampleur associé à une forte expression de l'érosion diffuse de versant. Ces processus éoliennes

et hydriques, bien que s’alternant saisonnièrement, régissent les mouvements sédimentaires dans le bas-Ferlo et commandent la distribution granulométrique entre les différentes unités morpho-pédologiques. Ils laissent voir, de facto, une parenté génétique entre les populations granulométriques des différentes unités morpho-pédologiques.

La présente étude cherche à comprendre la disposition des grains sédimentaires à la surface des sols dans un contexte de dynamique érosive. L’analyse granulométrique permet de quantifier la distribution sédimentaire par classes de diamètres en vue de comparer les tissus sédimentaires échantillonnés et d’en déduire la parenté génétique.

1. Cadre géographique

Le bas-Ferlo est un espace géographique particulier du bassin versant du Ferlo qui couvre une surface de 41049 Km², soit 21 % du territoire nationale. Localisé entre les latitudes 15° 27' N et 16° 02' N et entre les longitudes 15° 58' W et 16° 04' W, il est situé sur la marge occidentale du bassin du Ferlo et est partagé administrativement entre deux départements et concerne six communes (figure 1).

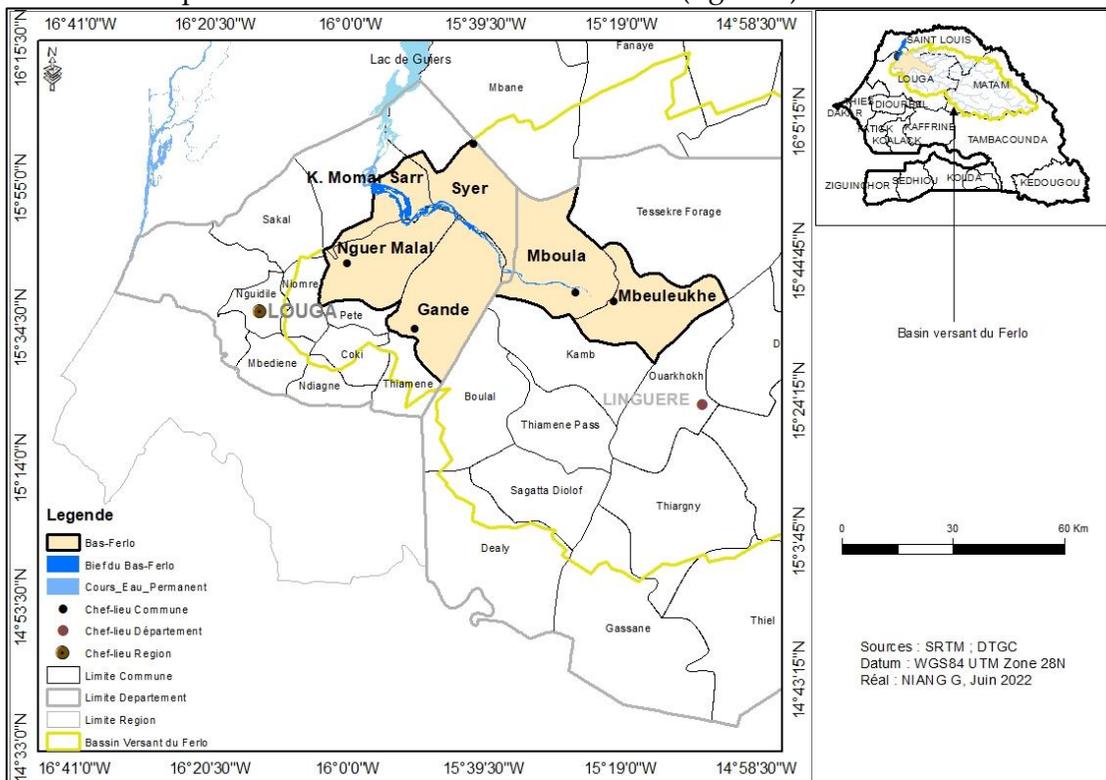


Figure 1. Localisation du Bas-Ferlo

Source: Auteurs

Ces territoires ont eu à bénéficier des tentatives de revitalisation de la vallée fossile entre les années 1994 et 2000. C'était dans le cadre du programme de revitalisation, qui a été l'œuvre de la mission d'étude et d'aménagement des vallées fossiles (MEAVF, 1994), que le bas-Ferlo a été isolé du reste du bassin qui s'inscrit dans le contexte sahélien aride.

Le bas-Ferlo repose sur un substrat géologique constitué de dépôts sédimentaires constitués de faciès sablo-gréseux à intercalation de calcaires marneux et superposés en couches d'âges variant de l'Eocène inférieur à l'Holocène (Niang, 2021). Le paysage géomorphologique apparaît comme un bas-plateau dominé par des dunes rouges ogoliennes et entaillé en deux lambeaux par la vallée du Ferlo suivant son tracé méandrique allant du Sud-est au Nord-ouest. Les sols sont des formations superficielles héritées du Quaternaire. Principalement constitués par des dépôts de sables ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés et bruns rouges subarides, ils sont facilement désagrégés sous l'effet des températures variant de 20,9 °C et 35 °C et de la pluviométrie dont le cumul annuel moyen est de 411 mm entre 1981 et 2010 (Niang, 2021). Dès lors, ces sols, mis en valeur par une agriculture itinérante et un élevage de pâturage, deviennent meubles et très vulnérables à l'érosion. Les formations végétales qui les couvrent sont plus ou moins disparates en dépit de l'impact du bief semi-permanent. Ce sont des steppes arbustives et arborées qui ont subi de profondes mutations consécutives aux séries de sécheresses des années 1970 et 1980 et à la pression agropastorale croissante.

2. Matériel et méthodes

L'échantillonnage de sédiments a été effectué au courant de la saison sèche (mois de juin) à travers des puits creusés. Des échantillons ont été prélevés sur cinq unités morpho-pédologiques et dans huit sites différents selon des transects perpendiculaires à la vallée (figure 2). Ces prélèvements ponctuels ont été positionnés par un récepteur GPS map76CSx/GARMIN. A l'exception du fond de la vallée, l'échantillonnage se fait à deux horizons de surface afin de déterminer la dynamique sédimentaire : 0-40 cm (H0) et 40-80 cm (H40). Sur le fond de la vallée, les prélèvements sont effectués sur l'horizon 0 cm en raison du caractère récent de la sédimentation, Au total 13 échantillons ont été prélevés dans huit sites différents positionnés sur cinq localités (Tableau 1).

Au laboratoire, un tamisage à sec a été réalisé à l'aide d'une colonne de quinze tamis de la série AFNOR dont le diamètre des mailles s'échelonne de 2 millimètres à 0,080 millimètres. Chaque échantillon est lavé et séché, puis du sommet vers le bas de la série, le refus de chaque tamis est pesé et rapporté au poids initial de l'échantillon.

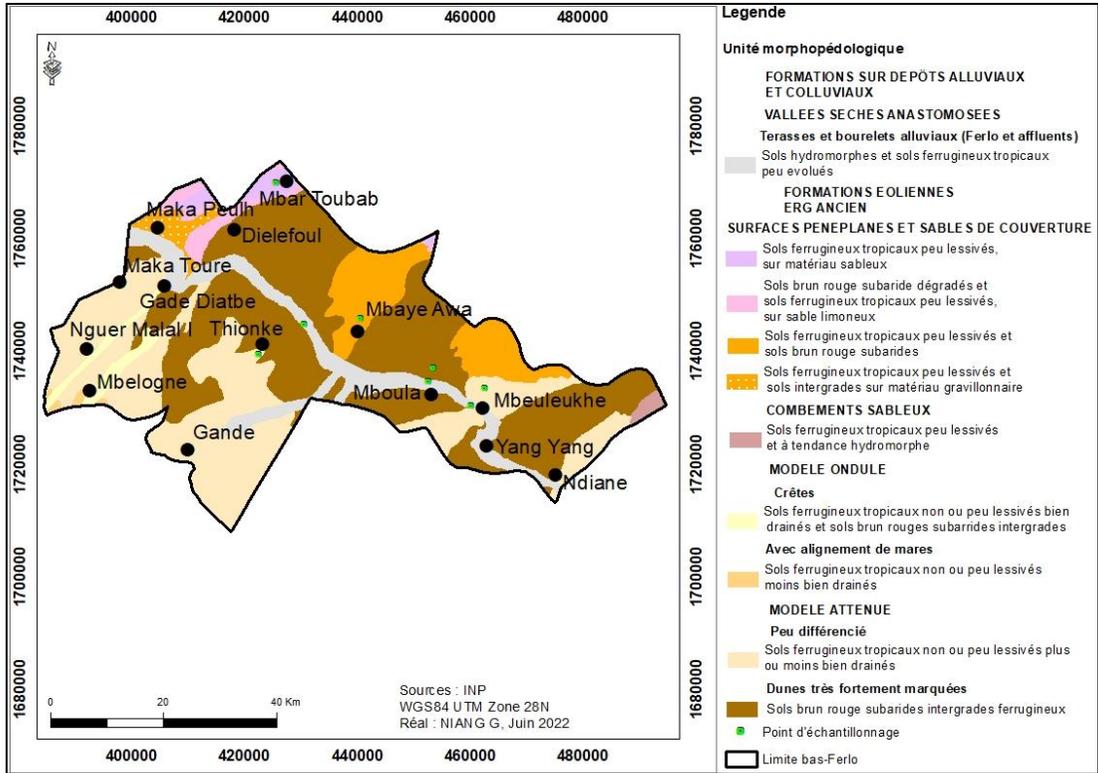


Figure 2. Echantillonnage sur diverses unités morfo-pédologiques du bas-Ferlo

Source: Auteurs

Tableau 1. Sites d'échantillonnage

Localités	Coordonnées des sites d'échantillonnage (en DMS)		Altitude (m)	Pente (%)	Occupation du Sol	Echantillons/Horizon	
	X	Y				0cm	40cm
Mbeuleukhé	15°38'42"N	15°21'7"O	11	11	Sol nu	X	
	15°38'47"N	15°20'43"O	38	5	Culture pluviale	X	X
Mboula	15°40'53"N	15°25'58"W	9	12	Sol nu	X	
	15°40'58"N	15°25'53"W	50	23	Culture pluviale	X	X
Mbaye-Awa	15°45'48"N	15°33'11"W	38	5	Pâturage	X	X
Thionky	15°50'55"N	15°44'3"W	7	14	Sol nu	X	
	15°50'55"N	15°44'41"W	32	5	Pâturage	X	X
Mbar-Toubab	16°01'38"N	15°40'11"W	38	3	Pâturage	X	X
Nombre d'échantillons						13	

Source: relevés de terrains, juin 2017

Les pourcentages des refus et ceux des passants sont ensuite cumulés. Les données obtenues ont permis d'analyser la distribution dimensionnelle des grains et de comparer les sédiments. A cet effet, le poids des différents refus a été saisi dans le

logiciel GRADISTAT Version 4.0 développé par Simon Blott en 2001 (<http://www.kpal.co.uk/gradistat.html>). Ce logiciel calcule automatiquement les pourcentages pondéraux de chaque fraction granulométrique et les paramètres statistiques suivant la méthode des moments dans le langage de programmation Microsoft Visual Basic et celle de Folk et Ward (1957).

Les fractions granulométriques

Le programme GRADISTAT classe les grains en fonction de l'échelle de Wentworth (1922). En fonction du diamètre (d) du grain, les fractions granulométriques sont réparties comme suite :

- **Blocs** : $1024 \text{ mm} \geq d > 64 \text{ mm}$;
- **Graviers** : $64 \text{ mm} > d > 2 \text{ mm}$
- **Sables** : $2 \text{ mm} > d > 63 \mu\text{m}$
- **Limons** : $63 \mu\text{m} > d > 2 \mu\text{m}$
- **Argiles** : $d < 2 \mu\text{m}$

Dans cette étude, les échantillons de sédiments fins ($d < 2 \text{ mm}$), plus manifestes dans les mouvements sédimentaires, sont analysés au laboratoire et interprétés dans le tableau 2.

Tableau 2. Fractions granulométriques selon la terminologie de Wentworth (1922)

Phi (Φ)	mm/ μm	Interpretation
$4 > d > 3$	$2 \text{ mm} > d > 1 \text{ mm}$	Sable très grossier (STG)
$3 > d > 2$	$1 \text{ mm} > d > 500 \mu\text{m}$	Sable grossier (SG)
$2 > d > 1$	$500 \mu\text{m} > d > 250 \mu\text{m}$	Sable moyen (SM)
$1 > d > 0$	$250 \mu\text{m} > d > 125 \mu\text{m}$	Sable fin (SF)
$0 > d > -1$	$125 \mu\text{m} > d > 63 \mu\text{m}$	Sable très fin (STF)
< -1	$d < 63 \mu\text{m}$	Limon et argile (LG)

Les paramètres granulométriques

Les paramètres granulométriques calculés selon la méthode de Folk et Ward sont pris en compte dans cette étude. Il s'agit d'un paramètre de position (moyenne- M_z), d'un indice de dispersion (Sorting- σ_i), d'un indice de forme ou d'asymétrie (Skewness- Sk) et d'un indice d'acuité (Kurtosis- K_G). Leur utilisation repose sur la notion de phi (φ) qui est un logarithme de base 2 de la dimension millimétrique du grain (d) : $\varphi = -\log_2 d$. Ces indices caractérisent la répartition granulométrique du sédiment étudié (Roger et al., 1987). Leur interprétation renseigne sur les conditions dynamiques au moment de la mise en place des sédiments et donc sur l'environnement de dépôt dans le bas-Ferlo.

Les **paramètres de position** décrivent la tendance centrale de l'échantillon ou plus simplement la taille des particules majoritaires dans la population granulométrique (Melcion, 2000). Le **mode** est la valeur la plus fréquente de la

distribution. Une distribution peut avoir un seul mode ou plusieurs modes (distribution bimodale ou trimodale). Le mode est déterminé par le point ou les points d'inflexion d'une courbe cumulative ou d'un histogramme de fréquence. Il indique ainsi le tri granulométrique. La **médiane** correspond au diamètre équivalent pour lequel la valeur de la distribution cumulée est de 50 %. Il donne en intégrant toutes les classes granulométriques une estimation de la grossièreté moyenne du sédiment (Fournier et *al.*, 2012).

Le **diamètre moyen** (moyenne- M_z) dépend de la grandeur prise en compte : longueur, surface ou volume. Lorsque l'échelle des dimensions est logarithmique, on parle alors de moyenne géométrique ou logarithmique. La moyenne (M_z) est calculée à partir de la formule ci-dessous et interprétée dans le Tableau 3.

$$M_z = \frac{\emptyset 16 + \emptyset 50 + \emptyset 84}{3}$$

Tableau 3. Interprétation de M_z selon la terminologie de Folk et Ward (1957)

Phi	Interpretation
$M_z \leq -1$	Sable très grossier (STG)
$0 \geq M_z \geq -1$	Sable grossier (SG)
$1 \geq M_z \geq 0$	Sable Moyen (SM)
$2 \geq M_z \geq 1$	Sable fin (SF)
$3 \geq M_z \geq 2$	Sable Très fin (STF)
$4 \geq M_z \geq 3$	Limons et Argiles (L-A)

L'**indice de dispersion** (σ_i) est un indicateur dynamique important qui rend compte de l'intensité du triage des matériaux détritiques. Le σ_i , qui indique sur la capacité de transport et de triage de l'agent érosif est interprété par Tableau 4.

$$\sigma_i = \frac{(\emptyset 84 - \emptyset 16)}{4} + \frac{(\emptyset 95 - \emptyset 5)}{6,6}$$

Tableau 4. Interprétation du Sorting (σ_i) selon terminologie de Folk et Ward (1957)

$\sigma_i < 0,35$	Très bien classés
$0,35 < \sigma_i < 0,5$	Bien classés
$0,50 < \sigma_i < 0,7$	Assez bien classés
$0,7 < \sigma_i < 1$	Modérément classés
$1 < \sigma_i < 2$	Mal classés
$2 < \sigma_i < 4$	Très mal classés
$4 < \sigma_i$	Extrêmement mal classés

L'indice d'asymétrie (Sk) mesure l'écart entre le mode et la médiane qui sont confondus dans une distribution normale où la courbe est symétrique (Niang A. J., 2008). Lorsque la distribution s'écarte d'une courbe normale, la différence entre le mode et la médiane varie de -1 à + 1 (Tableau 5). Il est obtenu à par de la formule suivante:

$$Sk = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - \phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Tableau 5. Interprétation du Skewness (Sk) selon la terminologie de Folk et Ward (1957)

1,0 > Sk > 0,3	Très asymétrique vers les fins
0,3 > Sk > 0,1	Asymétrique vers les fins
0,1 > Sk > -0,1	Presque symétrique
-0,1 > Sk > -0,3	Asymétrique vers les grossiers
-0,03 > Sk > -0,1	Très asymétrique vers grossiers

L'indice d'acuité K_G mesure le rapport du triage des extrêmes (5 % et 95 %) et apparaît comme un test de normalité d'une distribution (Tableau 6). Il est donné par la formule suivante:

$$Sk = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

Tableau 6. Interprétation du kurtosis K_G selon la terminologie de Folk et Ward (1957)

$K_G < 0,67$	Courbe très platycurtique
$0,67 < K_G < 0,90$	Courbe platycurtique
$0,90 < K_G < 1,11$	Courbe mesocurtique
$1,11 < K_G < 1,50$	Courbe leptocurtique
$1,50 < K_G < 3,00$	Courbe très leptocurtique
$3,00 < K_G$	Courbe extrêmement leptocurtique

Dans la terminologie de Folk et Ward l'indice d'acuité d'une courbe gaussienne typique est de 1 ; cette distribution normale est dite mésokurtique. En deça de 1, la distribution aplatie est dite platikurtique et en dessus de 1, la distribution pointue est dite leptokurtique. Ces valeurs qui s'écartent de la normale indiquent des stocks ayant achevé leur triage dans un milieu de haute énergie puis dans un autre où des mélanges ont eu lieu.

3. Résultats

3.1 Distribution de la taille des grains

Le diamètre des grains se situant essentiellement entre 2 mm et 0,008 mm, les sols bas-Ferlo sont constitués essentiellement de sédiments sableux et sableux limoneux d'origine éolienne. La distribution spatiale des fractions granulométriques renseigne sur la dynamique sédimentaire entre les unités morpho-pédologiques.

3.1.1 Les sols hydromorphes et sols ferrugineux tropicaux de la vallée du Ferlo

La Figure 3 montre que les dépôts alluviaux du lit de la vallée, constituant des sols hydromorphes évolués en apports éoliens, se caractérisent par une variation spatiale de la distribution des grains. En effet, dans les sites de Mbeuleukhé et de Thionky, le faciès dominant est le SF ($0,25 \text{ mm} > d > 125 \mu\text{m}$) qui représente respectivement 54,1 % et 55,9 % des refus ; alors que dans le site de Mboula, le SM ($0,5 \text{ mm} > d > 0,25 \text{ mm}$) concentre 50 % des refus. Les concentrations non négligeables de particules fines telles que les Limons ($d < 63 \mu\text{m}$) et les STF ($125 \mu\text{m} > d > 63 \mu\text{m}$) attestent que ces sols alluviaux ont une structure assez compacte. Toutefois, les concentrations très variables de particules grossières telles que les SG ($1\text{mm} > d > 500 \mu\text{m}$) et les STG ($2 \text{ mm} > d > 1\text{mm}$), aussi faibles soient-elles, indiquent l'importance des apports éoliens à partir des formations de l'erg ancien. Cette hétérogénéité du matériel, très variable dans l'espace, témoigne d'une plus ou moins grande variation dans la compétence des agents de transport (vents et ruissellement).

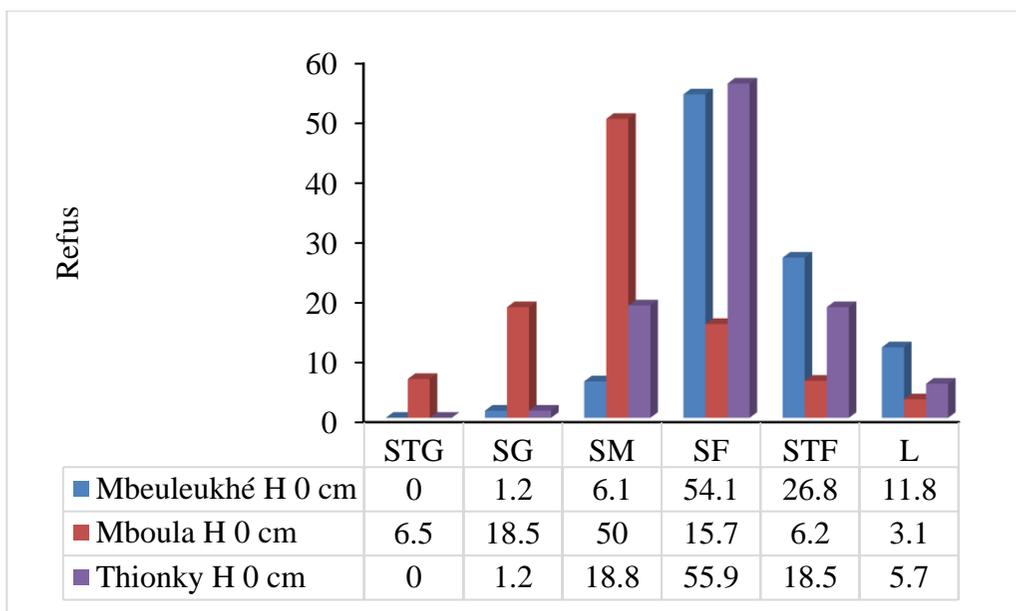


Figure 3. Répartition granulométrique des échantillons de sols hydromorphes la vallée
Source: Auteurs

3.1.2 Les formations éoliennes de l'erg ancien

L'erg ancien se caractérise par une diversité de paysages morpho-dynamiques. Celle-ci est le résultat d'un processus sédimentaire dont la dynamique peut être déterminée par l'analyse des nuances texturales entre les horizons superficiels (H 0 cm) et sub-superficiels (H 40 cm).

Les sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés moins bien drainés du modelé atténué

La distribution granulométrique est partout dominée par le SF ($0,25 \text{ mm} > d > 125 \text{ }\mu\text{m}$) avec des concentrations qui dépassent 40 % des refus (figure 4). Celles-ci sont plus importantes à l'horizon 0 cm qu'à l'horizon 40 cm où les particules fines (STF : $125 \text{ }\mu\text{m} > d > 63 \text{ }\mu\text{m}$ et Limons : $d < 63 \text{ }\mu\text{m}$) ont des proportions relativement plus élevées. Ces caractéristiques granulométriques, marquées par un grossissement du sédiment superficiel, attestent une perte continue de volumes de sols relative à une compétence accrue des agents érosifs.

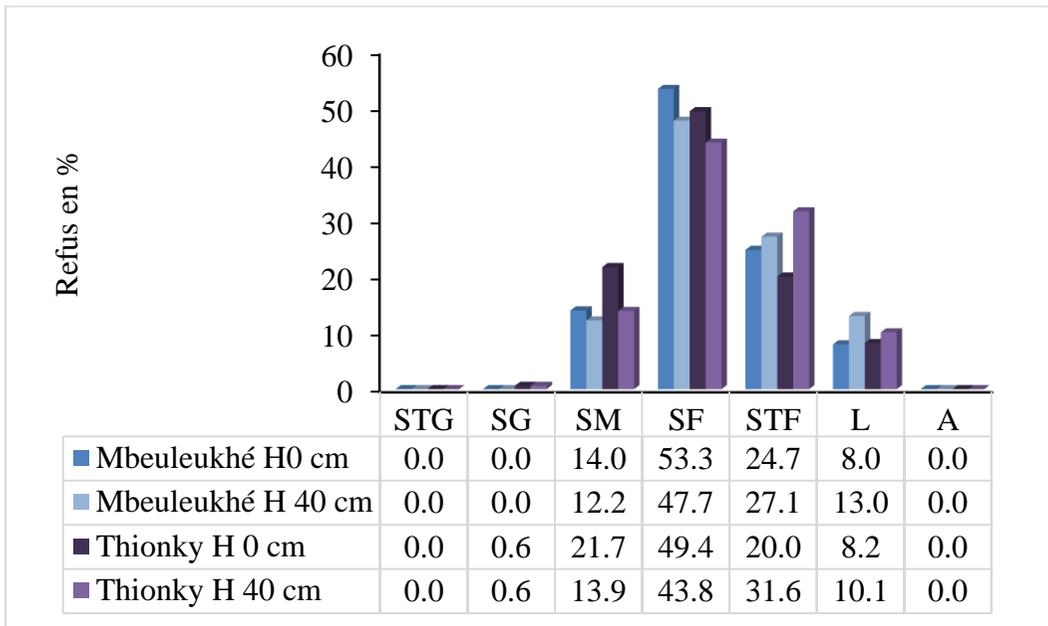


Figure 4. Fractions granulométriques des échantillons de sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés moins bien drainés

Source: Auteurs

Les sols bruns rouges subarides intergrades ferrugineux des dunes très fortement marquées

Le faciès sédimentaire se caractérise par une granulométrie fine et concentrée entre $125 \text{ }\mu\text{m}$ et $63 \text{ }\mu\text{m}$. Cette finesse du sédiment traduit la grande compétence des vents. Plus les grains sont fins et pulvérulents, plus l'énergie éolienne a la capacité de les décrocher et de les déplacer. C'est pour cette raison que ces sols dunaires sont des zones source d'érosion et de déflation. En outre, la distribution granulométrique est bimodale. Dans l'échantillons de surface, le SF ($0,25 \text{ mm} > d > 125 \text{ }\mu\text{m}$) représente 49,3 % des refus et le STF ($125 \text{ }\mu\text{m} > d > 63 \text{ }\mu\text{m}$) 39,4 % des refus. Dans l'échantillons de l'horizon 40 cm, le STF concentre 50,9 % des refus et le SF 28,4 % des refus (figure

5). Cette inversion du mode principale et du mode secondaire entre les échantillons de H 0 cm et de H 40 cm avec un sédiment plus fin en profondeur reflète l'augmentation dans le temps de la compétence du vent.

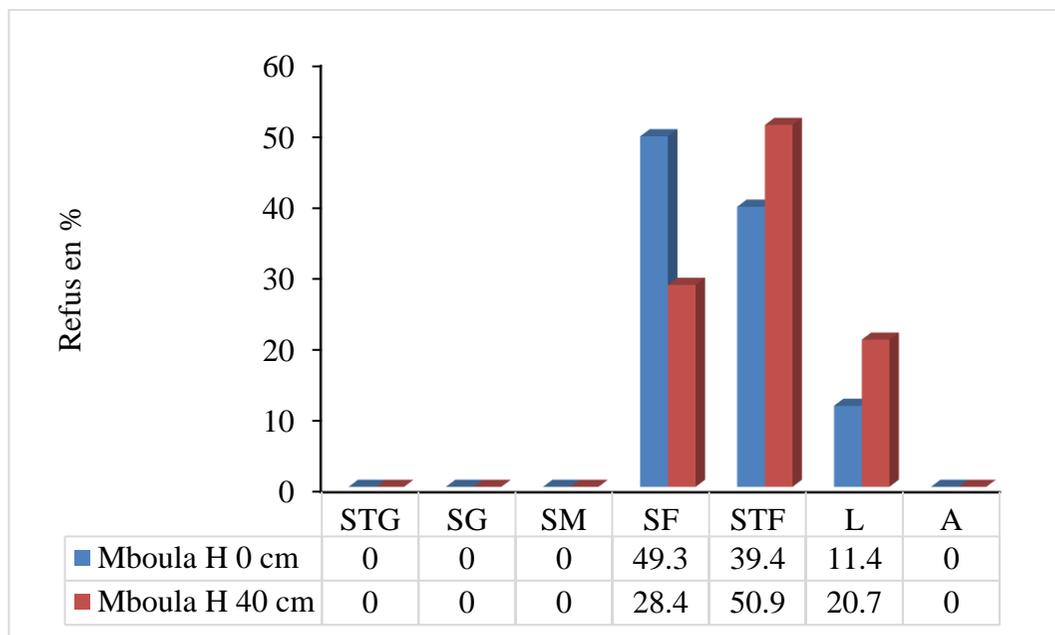


Figure 5. Fractions granulométriques des échantillons de sols bruns rouges subarides intergrades ferrugineux

Source: Auteurs

Les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et sols bruns rouges subarides de surfaces pénéplaines

Les échantillons de Mbaye-Awa révèle des distributions étalées entre 1 mm et 63 μm . Cette hétérogénéité indique une variété des sources sédimentaires et une faible remobilisation des dépôts. La distribution granulométrique est marquée par une bimodalité (figure 6). A l'horizon 0 cm, le mode principal équivaut au diamètre su SM (0,5 mm > d > 0,25 mm) qui concentre 48,3 % des refus et le mode secondaire au SF (0,25 mm > d > 125 μm) qui représente 38,7 % des refus. A l'horizon 40 cm, le mode principal correspond au SF qui représente 46,6 % des refus et le mode secondaire au SM qui représente 33,3 % des refus. Ce grossissement du sédiment superficiel atteste une tendance érosive de ses sols.

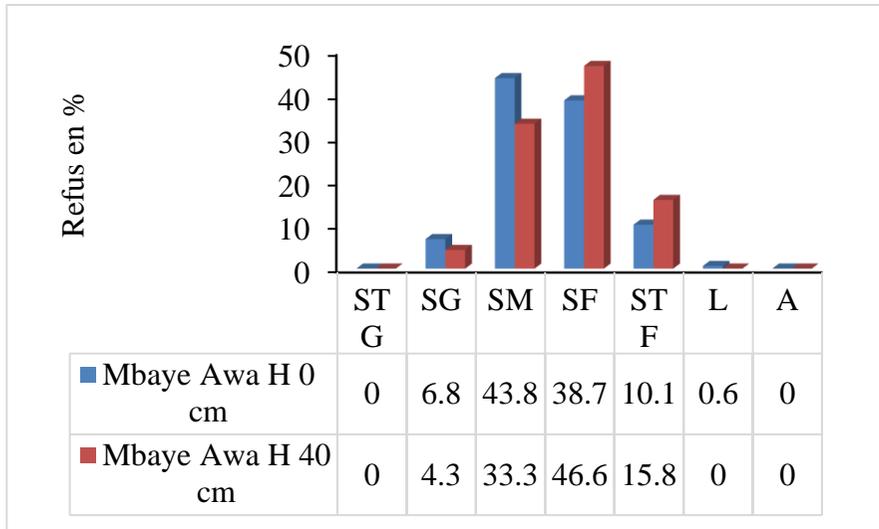


Figure 6. Fractions granulométriques des échantillons de sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et sols bruns rouges subarides des surfaces pénéglaïnes
Source: Auteurs

Les sols ferrugineux tropicaux sur matériau sableux de surfaces pénéglaïnes

Ils se caractérisent par une granulométrie étalée entre 1 mm et 63 µm. Cette hétérogénéité du matériel granulométrique indique que ces sols sont enrichis par des apports externes. Les refus sont dominés par les concentrations de SM (47,7 %) et de SF (42,9 %) à l’horizon 0 cm et par celles de SF (53,3 %) et de SM (28,6 %) (Figure 7). Ainsi le sédiment grossier de surface atteste une forte remobilisation des dépôts.

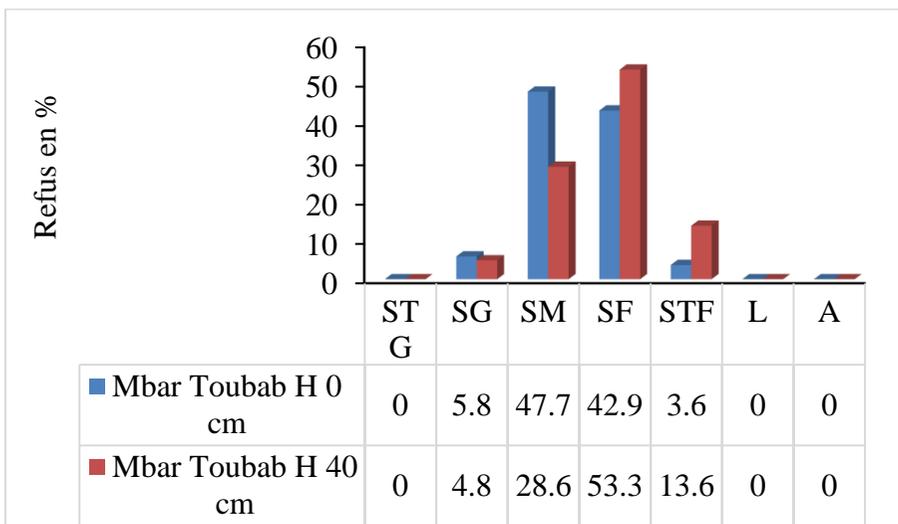


Figure 7. Fractions granulométriques des échantillons de sol ferrugineux tropicaux sur matériau sableux de surfaces pénéglaïnes
Source: Auteurs

L'analyse de la distribution des fractions granulométriques des échantillons prélevés a permis de déterminer la dynamique sédimentaire entre les différentes unités morpho-pédologiques du bas-Ferlo. Pour mieux caractériser les distributions sédimentaires et d'en saisir leurs variations spatiales, les paramètres statistiques sont calculés et interprétés.

3.2 Les paramètres granulométriques

Les paramètres granulométriques sont une expression numérique des caractères des distributions granulométriques qui est basée sur l'utilisation de l'échelle ϕ . Leur interprétation permet de caractériser et de comparer les distributions sédimentaires.

3.2.1. Le paramètre de position : La moyenne (M_z)

La distribution du diamètre moyen (M_z) met en exergue l'importance du SF dans les faciès sableux des horizons superficiels des sols du bas-Ferlo (Figure 8). Néanmoins, dans les sols hydromorphes de la vallée fossile anastomosée, la moyenne granulométrique est située entre le SM et le SF ; dans les sols bruns rouges subarides et intergrades ferrugineux des dunes très fortement marquées, M_z révèle un faciès de STF. Ces nuances indiquent une dynamique d'échanges sédimentaires et une parenté génétique entre les unités morpho-pédologiques. Ces échanges sont régis par les vents, qui, pendant la saison sèche mobilisent les SG et SM des sommets et versants dénudés des dunes et les déposent en vrac dans le lit de dépressions adjacentes. La distribution de M_z révèle également un affinement du grain moyen de l'horizon 0 cm à l'horizon 40 cm des sols. Cet état de fait traduit par ailleurs une compétence accrue des agents d'érosion à la surface des sols du bas-Ferlo.

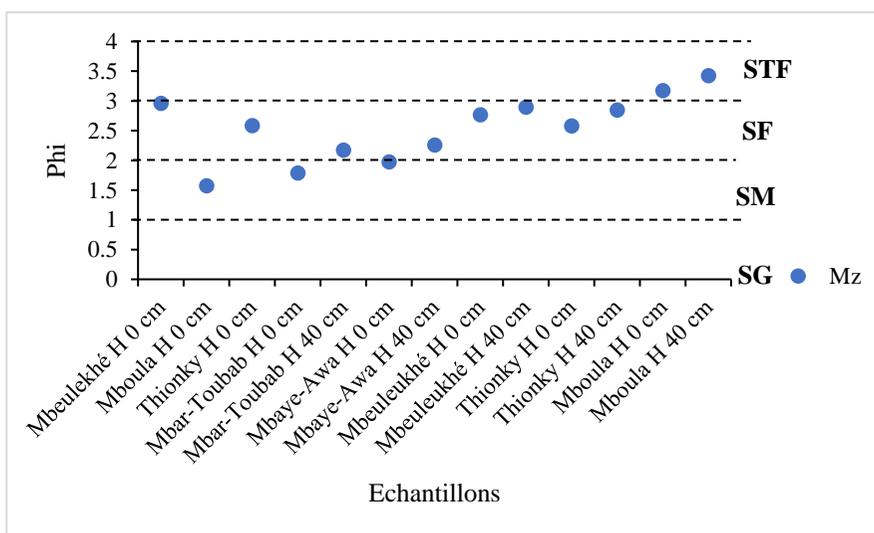


Figure 8. Le grain moyen (M_z) des sédiments des échantillons de sols du bas-Ferlo
Source: Auteurs

3.2.2 L'indice de dispersion (σ_i)

Le σ_i est l'hétérométrie du sédiment qui montre une dispersion ou un regroupement des classes granulométriques (Niang, 2008). Un σ_i élevé indique un mauvais triage et une distribution trop dispersée. Tandis qu'un σ_i faible traduit un bon tri.

La distribution du σ_i révèle que les sables des différentes unités morphopédologiques du bas-Ferlo sont pour la plupart modérément classés (figure 9). Seuls les sols hydromorphes et ferrugineux tropicaux du lit de la vallée présentent un mauvais classement à Mboula. Les sables sont aussi assez bien classés sur l'horizon 0 cm des surfaces pénéplaines couvertes de sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à Mbar-Toubab où et sur les dunes très fortement marquées de l'erg ancien à Mboula.

Ces disparités indiquent une dynamique différente entre les unités morphopédologiques. L'hétérogénéité du matériel dans le lit de la vallée à Mboula et le classement modéré des sédiments sableux sont caractéristiques des environnements de dépôts éoliens d'origine locale. En effet, les dunes de l'erg ancien, qui dominent le paysage morphologique, constituent les zones-source potentielles comme l'atteste le classement assez bien des sédiments sableux du sommet de la dune de Mboula.

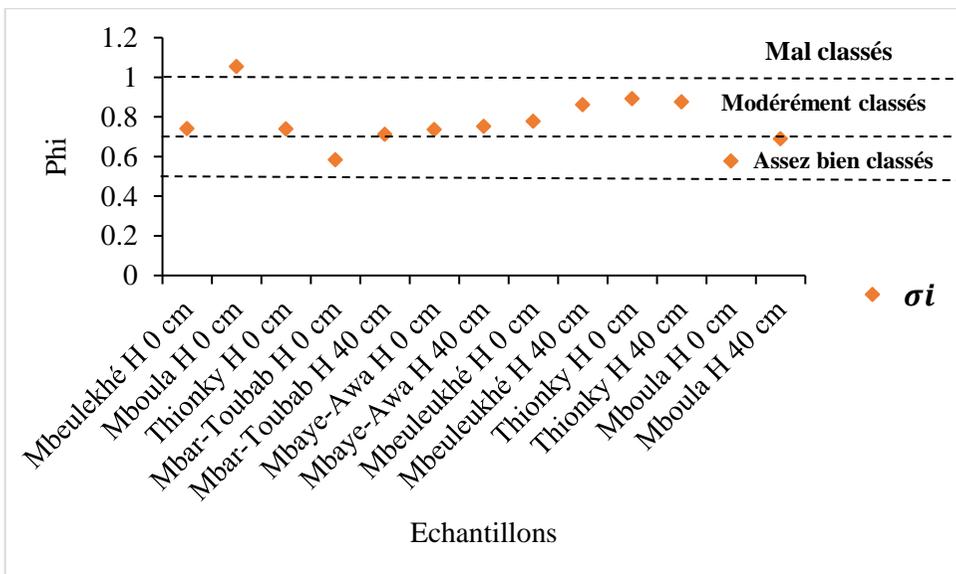


Figure 9. L'indice de classement des sédiments des échantillons de sols du bas-Ferlo
Source: Auteurs

3.2.3 L'indice d'asymétrie : le skewness (Sk)

Les sols sableux du bas-Ferlo se caractérisent le plus souvent par une asymétrie vers les fins ou une tendance presque symétrique (figure 10). Néanmoins, il n'est pas rare de trouver des sables caractérisés par une asymétrie vers les très fins ou une asymétrie vers les très grossiers. Cette disparité dans la distribution du skewness témoigne de l'influence de plusieurs sources d'apports sédimentaires avec des

courants de différentes intensités. La morphologie du paysage de l'erg ancien, marquée par l'alternance de dunes de sables, des surfaces pénéplaines et de dépressions alluviales, renforce l'efficacité morphologique des vents et du ruissellement des eaux pluviales. Elle entraîne des changements d'abrupt dans la vitesse de circulation des courants morphogéniques et donc des variations dans leur compétence. Cette situation favorise des variations de niveaux de sables fin, moyen et grossier.

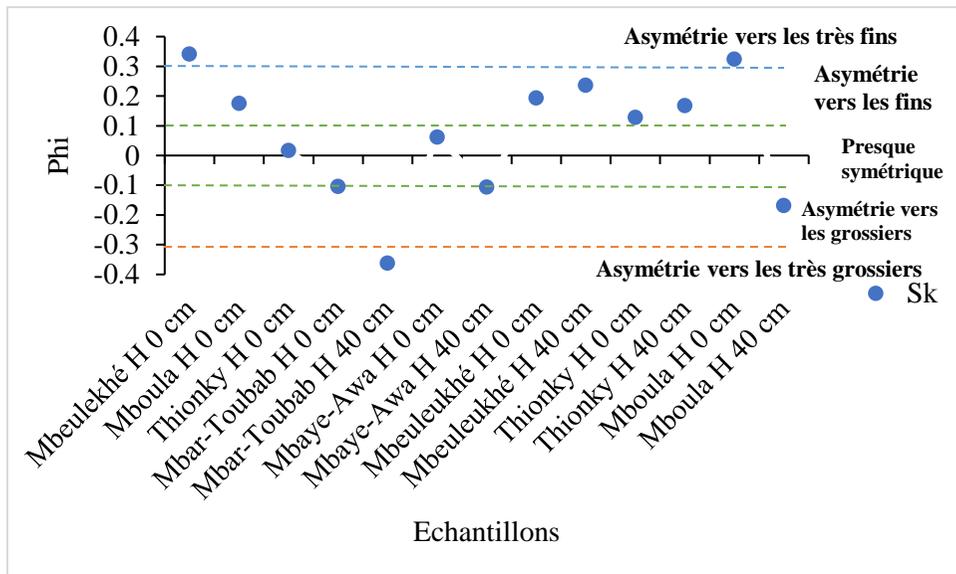


Figure 10. L'indice d'asymétrie des sédiments des échantillons de sols du bas-Ferlo
Source: Auteurs

3.2.4 L'indice d'acuité : le Kurtosis (K_G)

Le kurtosis montre que la plupart des échantillons de sols sableux présentent une distribution mésokurtique (figure 11). Cependant, de nombreux échantillons ont des valeurs qui s'écartent de la loi normale gaussienne. Ceux de sols hydromorphes de la vallée présentent une distribution leptokurtique voire très leptokurtique ; ceux de sols ferrugineux tropicaux de surfaces pénéplaines et ceux de sols bruns rouges couvrant les dunes ont plutôt une distribution platikurtique. Ces valeurs indiquent sur la variation dans la compétence et sur la diversité des agents morphogéniques. Cette situation peut aussi être liée à l'alternance saisonnière de la dynamique éolienne et de la dynamique hydrique.

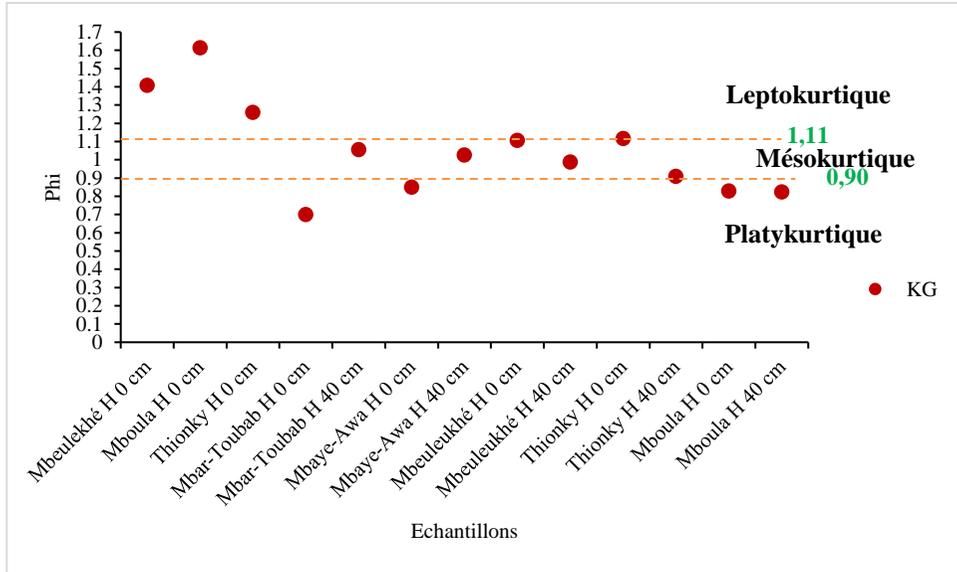


Figure 11. L'indice d'acuité des sédiments des échantillons de sols du bas-Ferlo
Source: Auteurs

3.3 Le mode de transport

Le contraste existant entre les courbes cumulatives (figure 12) des différents échantillons de sols indique une différence d'intensité de la dynamique ayant présidé la mise en place des sédiments. Les faciès de sable fin et très fin des sols bruns rouges subarides de dunes surélevées (Mboula), qui tendent vers des courbes hyperboliques, sont caractéristiques d'une accumulation sélective d'éléments fins par un transport bimodal : saltation (entre 77 % et 50 %) et suspension (entre 33 et 50 %). L'origine de ces sables continentaux peut être expliquée par des phénomènes de la déflation tels les brumes de sables et de poussières, les tempêtes de sables et de poussières et tourbillons de sables. Tandis que, les faciès hétérogènes de sables des sols hydromorphes de la vallée (Mboula, Mbeuleukhé et Thionky), matérialisés par des courbes associant des caractères de type sigmoïde et de type logarithmique, sont le résultat de dépôts en vrac. Ainsi, les variations dans l'espace des conditions de dépôt dans le lit de la vallée sont matérialisées par l'écart entre les courbes. A Mbeuleukhé et à Thionky, le matériel est déposé selon un mode en saltation (69 % à 81 %) et en suspension (31 % à 19 %). Dans le site de Mboula, 51 % du matériel est transité plutôt par roulage, 35 % par saltation et 14 % par suspension.

Cependant, les courbes des échantillons de sols des surfaces pénéplaines sont superposées, attestant des intensités similaires de la dynamique de leur mise en place. Ces unités morpho-pédologiques, caractérisé par un matériau de sable fin sont édifiés par saltation entre 65 % et 75 %, par suspension entre 21 % et 33 % et par roulage entre 4 % et 5 %.

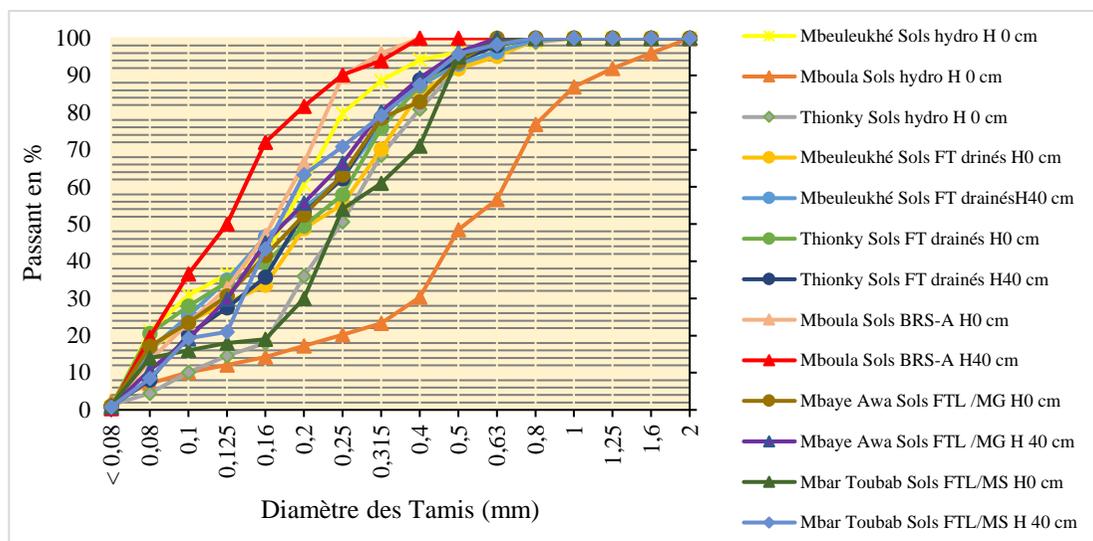


Figure 12. Courbes cumulatives des échantillons de sols du bas-Ferlo

Source: Auteurs

4. Discussion

La caractérisation sédimentologique des horizons superficiels des sols du bas-Ferlo a révélé une dynamique d'échanges sédimentaires entraînant une morphogenèse active des formations éoliennes. Les sols hydromorphes et sols ferrugineux tropicaux de la vallée du Ferlo, dominés tantôt par le SF avec 54,1 % et 55,9 % des refus, tantôt par le SM avec 50 % des refus, sont caractéristiques des environnements de dépôts. Cette variation spatiale de granulométrie fine à moyenne est attestée par l'alternance de sédiments modérément classés et de sédiments mal classés, d'une asymétrie évoluant entre les sables très fins et les sables moyens (presque symétrique), d'un kurtosis leptokurtique voire très leptokurtique, mais aussi par les différents modes de transports ou de dépôt. Les différents apports éoliens et hydriques à partir de dunes voisines et des surfaces pénélaines sableuses expliquent le caractère hybride des sols de la vallée. Les sols hydromorphes originels sont altérés et deviennent des sols intermédiaires hydromorphes et ferrugineux tropicaux. La terminologie locale les désignant « *Dek-Dior* » est témoin d'une connaissance empirique des faciès de sols intermédiaires, résultant d'un enrichissement en texture grossière et révélant la dégradation des sols de la vallée par vannage éolien. Il a été démontré dans les travaux de Sy B. A. (2008) que les sols de la dépression du Diahel et des cuvettes du Delta du Sénégal (plus au nord) subissent une dégradation liée au vannage éolien.

Les sols sableux des dunes très marquées et des surfaces pénélaines de l'erg ancien dont la texture laisse apparaître un grossissement du sédiment de l'horizon 40 cm à l'horizon 0 cm, sont caractéristiques des environnements sédimentaires où l'érosion est très active. Néanmoins, les indices granulométriques et les courbes

cumulatives ont révélé des similitudes et des contrastes dans les caractéristiques sédimentologiques de ces différents sols. Le diamètre moyen (Mz) se situe souvent aux dimensions du SF ($0,25 \text{ mm} > d > 125 \text{ }\mu\text{m}$). La domination des SF dans les sols du Ferlo a été démontré par Zante & Dièye (1985) dans leurs travaux sur les sols sableux du Ferlo. Leur plus forte concentration traduit une forte sensibilité à la déflation (Sy, 2008). Toutefois, le Mz évolue quelquefois entre les valeurs du STF ($125 \text{ }\mu\text{m} > d > 63 \text{ }\mu\text{m}$) et celles du SM ($0,5 \text{ mm} > d > 0,25 \text{ mm}$). De ce fait, la granulométrie apparaît, par endroits, soit plus fine soit plus grossier. Ces caractères sédimentologiques peu distincts traduisent des fluctuations significatives dans la compétence du vent, mais aussi une alternance de vents de directions et de dynamiques différentes (Niang, 2008). Ils montrent aussi que les sites ne répondent pas de la même manière aux actions du vent et du ruissellement. La couverture végétale plus ou moins faible, la pression agropastorale plus ou moins persistante dans l'espace et les variations topographiques relatives à la succession de dunes élevées, dunes remaniées, surfaces d'aplanissement et déprimées (Niang, 2021) constituent autant de facteurs agissant sur l'action des agents érosifs.

Les valeurs des indices de dispersion (σ_i), d'asymétrie (S_k) et d'acuité (K_G) confirment la granulométrie hétérogène à domination de sables fins des sols de l'erg ancien. Les courbes cumulatives montrent des changements fréquents dans la compétence des agents érosifs. Ces résultats rejoignent les conclusions des travaux de Niang (2008) et ceux de Sy (2008) réalisés sur le système ogolien de l'erg ancien.

Conclusion

La caractérisation des sédiments superficiels des sols du bas-Ferlo a mis en exergue une distribution granulométrique hétérogène dominée par le SF et le SM. Il existe une différence dans la distribution des fractions granulométriques. En effet, les échantillons de sols de la vallée anastomosée se caractérisent par un faciès de sables limoneux, hétérogènes et dominés par le SF et, par endroits, par le SM. Les échantillons de sols des dunes et des surfaces pénéplaines présentent une distribution étalée le plus souvent entre le SG et le limon grossier. Ils sont prédominés par le SM à la surface et le SF à l'horizon 40 cm de profondeur, ce qui indique une dynamique sédimentaire à tendance érosive. Ainsi, des échanges s'effectuent entre les sols sableux éoliens de massifs dunaires et de surfaces aplanies et les sols alluviaux. En effet, les vents et le ruissellement diffus, en arrachant les SF des sols éoliens de l'erg ancien, alimentent les sols hydromorphes de la vallée en sables ferrugineux tropicaux qui évoluent ainsi en sols intermédiaires.

Dans ce contexte de dynamique érosive sur les formations éoliennes de l'erg ancien et, par ricochet, d'une tendance accumulative sur les formations de dépôts alluviaux de la vallée sèche anastomosée, la mise en œuvre d'un plan de gestion et de

restauration des sols devient une nécessité pour le maintien et la pérennité des activités agropastorales.

Déclaration de divulgation

Aucun conflit d'intérêts potentiel n'a été signalé par les auteurs.

ORCID

Gallo Niang  0000-0003-1193-5728

Références bibliographiques

- Cissokho, R. (2011). Développement d'un indice de vulnérabilité à l'érosion éolienne à partir d'images satellitales dans le bassin arachidier du Sénégal : cas de la région de Thiès. Université de Montréal, Département de Géographie. Montréal: Faculté des arts et sciences
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos rivers bar:a study in the. *Journal. Sc. Petrol.*(27), pp. 13-26.
- Fournier, J., Bonnot-Courtois, C., Paris, R., & Le Vot, M. (2012). *Analyses granulométriques : Principes et méthodes*. CNRS
- ISO. (2017). *Reconnaissance et essais géotechnique - Identification et classification des sols*. 2e édition
- Lake, L.-A., Ndour, N., Thiombane, M., Diouf, B. S., Sagna, P., Ba, M. B., . . . Touré, K. (2000). *Ecogrophie du Sénégal subsaharien et développement, dynamique des espaces ruraux des années 1950 à 2015*. UCAD-Université de Sherbrooke. Dakar: IFAN Laboratoire de Géographie-CARTEL
- Laval, M., Ferry, L., Coulibaly, N., Martin, D., & Muther, N. N. (2012). Évaluation et analyse de la dynamique sédimentaire dans le barrage-réservoir de Sélingué (Mali). *Revue de Géographie de Ouagadougou*, pp. 45-68
- MEAVF. (1994). *Programme de revitalisation des vallées fossiles*. Notes de présentation. Ministère de l'hydraulique, Dakar
- Melcion, J.-P. (2000, mai). *La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention*. INRA Prod(13), pp. 81-97
- Ndong, J.-B. (1995). L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la Sécheresse récente sur l'environnement. *Revue de Géographie de Lyon*, 70(3-4), pp. 193-198
- Niang, A. J. (2008). *Les processus morphodynamiques, indicateurs de la désertification dans sud-ouest de la Mauritanie*. Approche par anlyse multisource. Thèse de doctorat, Université de Liège
- Niang, G. (2021). *Etude comparative des bassins versants de la basse vallée du Ferlo et du lac de Guiers : Dynamique actuelle de l'érosion, impacts et stratégies de lutte*. Thèse de doctorat, UCAD, Département de géographie
- Roger, B., & Robbe, D. (1987, Mai). *Logiciel de présentation et d'interprétation des granulométrie obtenues par diffraction laser associée ou non à un tamisage*. Rapports des laboratoires, IFFSTAR, Science de la terre

- Sambou, P. C. (2015). Evolution climatique récente, impacts et stratégies d'adaptation dans les arrondissements de Sakal et de Ndande dans la région de Louga. FLSH, Deprt Géographie, UCAD. Dakar: UCAD
- Sow, S. A. (2017). Morphodynamique hydrique par ravinement et ses conséquences dans le bassin versant de Ourosogui, Nord du Sénégal. Thèse de Doctorat, Université Gaston Berger, Saint-Louis
- Sy, B. A. (2008). Milieux, Sécheresse climatique et érosion éolienne. Etude géomorphologique du Sahel sénégalais. UGB
- Wentworth, C. K. (1922). A scal of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*(30), pp. 377-392
- Zante, P., & Dièye, K. (1985). Caractéristiques hydriques des sols de trois types de parcours du Ferlo. ORSTOM, Dakar