

Effet de l'érosion hydrique sur les caractéristiques physico-chimiques du sol des zones d'érosion (dongas) dans la Commune de Karimama au Bénin

J. AVAKOUDJO¹, A. F. KOUELO², V. KINDOMIHOU¹, K. AMBOUTA³, B. SINSIN¹

¹Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

E-mail : julienavakoudjo@yahoo.fr

²Laboratoire de Microbiologie des Sols et d'Ecologie Microbienne, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin (LMSEM/FSA/UAC).

³Laboratoire des Sciences du Sol, Université de Tahoua, Niger

Soumis le : 29 / 12 / 2014

Accepté le : 17 / 09 / 2015

RESUME

L'érosion hydrique et éolienne, la dégradation chimique et physique ont été signalées comme étant les principaux types de dégradation du sol dans le monde. L'érosion hydrique est un processus majeur de dégradation des sols à Karimama au nord du Bénin. Elle entraîne la dégradation de la structure du sol, en particulier, les attributs fonctionnels des pores du sol, permettant de transmettre et de retenir l'eau afin de faciliter la croissance des racines. L'objectif de la présente étude est de faire ressortir les effets de l'érosion hydrique sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol. Pour atteindre cet objectif, des profils pédologiques ont été ouverts, aussi bien dans le Parc National du W que dans les terroirs. Des échantillons du sol ont été prélevés pour des analyses en laboratoire (i) à trois profondeurs du sol H₁ : 0 - 20 cm surface du sol, entre 20 et 50 cm (H₂) et au-delà (H₃ : > 50 cm), (ii) dans trois types de ravins (donga), du moins profond au plus profond, sur leur plateau proche et plateau éloigné. Les paramètres étudiés ont été l'acidité du sol, la granulométrie, le taux de carbone organique du sol, l'azote total, les phosphores assimilable et total, la somme des bases échangeables du sol et la capacité d'échange cationique. Le sol des deux sites a une texture argilo-sablo-limoneuse. L'érosion hydrique a commencé par le prélèvement sélectif de sables fins. Elle a significativement affecté la densité apparente et la porosité du sol. L'érosion acidifie le sol car le sol est plus acide au niveau des dongas qu'au niveau des plateaux. Au niveau des sites étudiés, la matière organique, déjà très faible dans le sol n'est pas significativement influencée par l'intensité de l'érosion. Cependant, l'érosion a réduit de façon significative la capacité d'échange cationique du sol soit une perte du sol en cations métalliques (Ca²⁺ surtout). Cette décalcification du sol explique son acidification sous l'effet de l'érosion. L'azote est aussi déficient, un élément nutritif qu'il convient d'apporter si l'on veut accroître les rendements agricoles de manière durable dans cette partie du nord Bénin.

Mots clés : Erosion hydrique, ravin (donga), caractéristiques physico-chimiques du sol, dégradation physique du sol, Bénin

ABSTRACT

EROSION EFFECT ON SOIL PROPERTIES IN KARIMAMA

Water erosion, chemical degradation, wind erosion and physical degradation have been reported as main types of soil degradation in the world. In Karimama district water erosion is a major process for soil degradation. Nevertheless, water erosion can be a consequence of degradation of the soil structure, especially the functional attributes of soil pores to transmit and retain water, and to facilitate root growth. The current study aims to find out water erosion effects on soil physical and chemical characteristics. Pedological soil profiles have been done both in W National Park and its peripheral land use areas. Soil samples are collected for laboratory analyses (i) in three depth H₁ : 0 - 20 cm top soil, H₂ : 20 - 50 cm and H₃ : > 50 cm (ii) in three types of gullies (dongas) from the less deep to the deeper one and on their plateau

(nearby and far from donga). Soil acidity, texture, organic carbon, total nitrogen, available and total phosphorous sum of exchangeable bases and cation exchange capacity are the studied parameters. Soil texture is clay-sandy-loamy in the W National Park and its periphery. The soil of the two sites has a clay-sandy loam texture. Water erosion began with the selective removal of fine sand. It significantly affects bulk density and soil porosity. The erosion acidifies the soil because the soil is more acidic in dongas than on plateaus. The organic matter contents on the studied soils are extremely low in the soil and are not significantly influenced by the erosion intensity. However, erosion has significantly reduced the cation exchange capacity of the soil or a loss of soil metal cations (especially Ca^{2+}). This decalcification of the soil explains soil acidification as a result of erosion. Nitrogen appears to be deficient element that must be given to the soil in order to increase crop yield in a sustainable way in this part of northern Benin.

Key words : Water erosion, gully (donga), physico-chemical properties, physical degradation, Benin.

INTRODUCTION

La perte de sol à la surface de la terre par l'érosion hydrique et éolienne a été identifiée comme l'un des éléments majeurs de la dégradation des sols cultivables. De ce fait, elle peut affecter négativement les attributs fonctionnels des pores de transmission et de conservation de l'eau et constituer un obstacle majeur pour produire suffisamment de nourriture pour satisfaire la demande alimentaire de la population mondiale en croissance (Pimentel, 2006). Les caractéristiques climatiques, pédologiques et topographiques déterminent le ruissellement et les risques d'érosion des terres agricoles. Les principaux facteurs à l'origine de l'érosion des sols peuvent être divisés en trois groupes ; les facteurs d'énergie : la violence des pluies, le volume des eaux de ruissellement, la force du vent, la pente locale, l'inclinaison et la longueur du versant ; les facteurs de protection : la densité de population, la couverture végétale, la valeur d'agrément (pression à l'emploi) et de gestion des terres ; et les facteurs de résistance : l'érodibilité du sol, la capacité d'infiltration et de gestion des sols. Le degré d'érosion du sol dans une zone climatique est toujours le résultat d'une combinaison des facteurs tels que le type de sols, l'utilisation des terres et les conditions socio-économiques particulières. Il n'est pas facile d'isoler un seul facteur (Lujan, 2003). Cependant, ce sont les propriétés physiques du sol qui déterminent le processus d'érosion des sols, car la détérioration des propriétés physiques du sol se manifeste par des problèmes interdépendants de scellement de surface, de croûtes, de compaction du sol, d'un mauvais drainage, de la croissance entravée des racines, d'un ruissellement excessif et de l'érosion accélérée.

Au Bénin, l'érosion hydrique est un processus majeur de dégradation des sols. Malgré le relief

relativement plat du pays, la dégradation des sols y est un problème considérable, car l'intensité des précipitations et des systèmes agricoles à faibles intrants sont répandus. La dégradation des sols est aggravée par une expansion rapide des terres agricoles, résultant de la croissance de la population, y compris la migration, le faible recours aux pratiques de conservation des sols et l'augmentation de la variabilité des précipitations, en raison du changement climatique (Hiepe, 2008). Dans la zone d'étude, la Commune de Karimama, au Nord-Ouest du Bénin, la dégradation des sols est marquée par le phénomène d'effondrement du sol et de perte massive des terres, appelée « donga » (Toko et Sinsin, 2008, Avakoudjo *et al.*, 2013). Ce phénomène frappe aussi bien le Parc National du W que ses terroirs riverains. Il s'agit de l'érosion hydrique en nappe, liée au splash et au ruissellement, de l'érosion en filets, de l'érosion due au ruissellement dans les rigoles et de l'érosion par ravinement. Les dongas représentent de vastes zones érodées, de formes diverses, mais souvent circulaires, de plusieurs dizaines de mètres de diamètre, et de profondeur variable (Avakoudjo *et al.*, 2013). Il est très important de connaître les effets de ces formes d'érosion sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol afin de comprendre les dangers occasionnés sur la productivité du sol. C'est ce qui justifie, cette étude entreprise, visant à évaluer l'effet de l'érosion sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol de deux différents sites dans le nord du Bénin. De façon spécifique, il s'agit de comparer les propriétés physiques et chimiques du sol à trois niveaux de dégradation du sol. Le premier niveau, plateau éloigné, est un sol non érodé ou très faiblement érodé. Le second niveau plateau proche est un sol sous l'érosion diffuse faible intensité et le troisième niveau donga est un ravin, donc, un sol fortement érodé.

MATERIEL ET METHODES

ZONE D'ETUDE

L'étude a été réalisée dans la zone soudanienne sèche du Bénin dans la Commune de Karimama latitude 11° 26' - 12° 26' N ; longitude 2° 17' - 3° 05' E. Les expériences ont été conduites sur des profils pédologiques, aussi bien dans le Parc National W que dans ses terroirs riverains. (Figure 1), caractérisés par le phénomène de « donga ». Les dongas, étant de vastes dépressions dominées par des parois abruptes,

de profondeurs comprises entre 0,20 et 8,5 m, (Avakoudjo *et al.*, 2011) et de superficies variant entre 0,50 et 3,50 hectares (Toko et Sinsin, 2008). Leur présence est accentuée par la dégradation de la végétation et la vulnérabilité du sol à l'érosion, due à l'agressivité des pluies, à la structure du sol peu développée, à l'écoulement souterrain, au vent, au surpâturage et aux feux tardifs, non contrôlés (Toko et Sinsin, 2008). En fonction de la résistance des matériaux à l'érosion, trois types de dongas se sont distingués à savoir : les dongas à fond sableux, les dongas à reg et les dongas à butte.

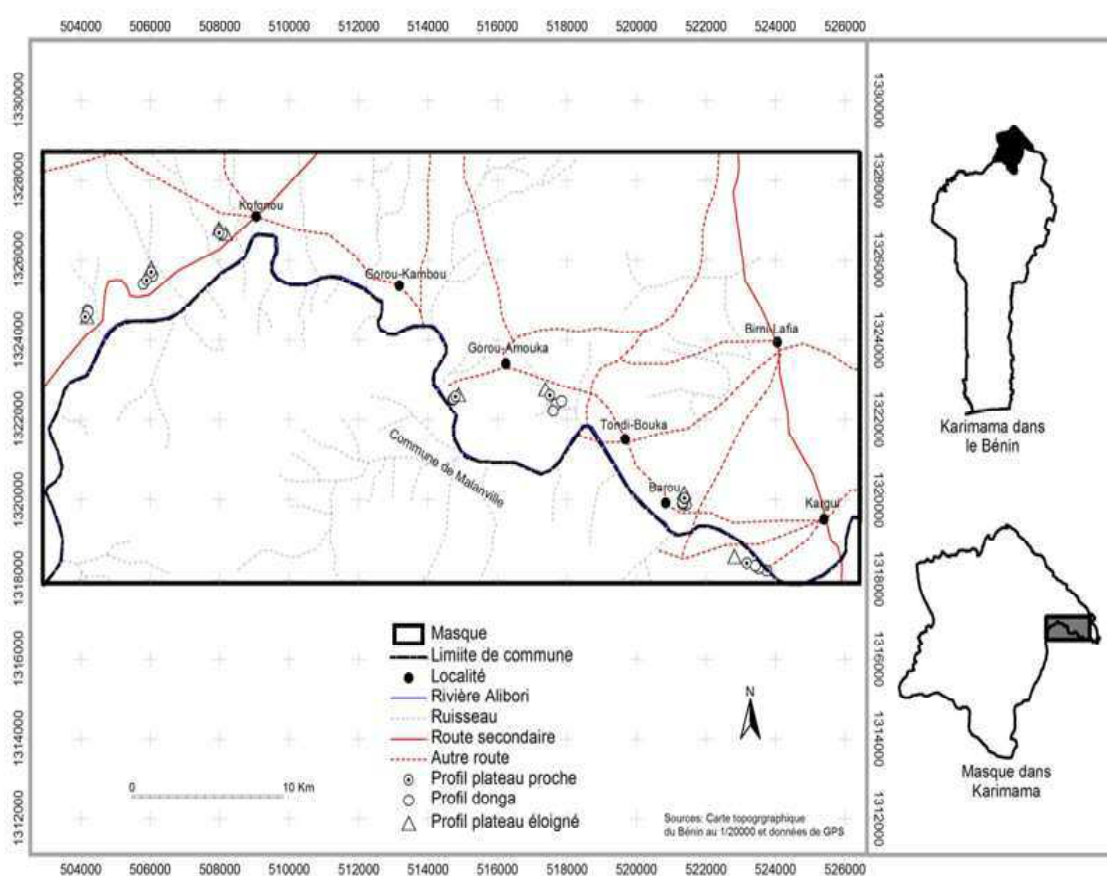


Figure 1 : Localisation des profils pédologiques dans la Commune de Karimama
Location of soil profile in Karimama district.

COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES

L'étude des 26 profils pédologiques a été réalisée et les données ont été collectées sur le terrain. Les données collectées ont concerné la pente du sol variant de 2 à 5 %, le diamètre moyen des ravins (dongas), de même que les caractéristiques physiques et chimiques du sol. La largeur des fosses pédologiques a été de 1 m et leur longueur de 3 m sur le terrain. Leur profondeur dépendait de celle de la roche mère et variait de 50 cm dans les dongas (ravins) à 180 cm au niveau des plateaux proches (Tableau 1).

Les facteurs étudiés ont été les suivants :

- le site, avec deux variantes : le Parc National W et le terroir ;
- la topographie, avec trois variantes : le ravin (donga), le plateau éloigné et le plateau proche. Deux profils pédologiques ont été installés dans chaque donga, et un profil pédologique sur chacun de ses plateaux proche et éloigné ;
- le type de ravin donga avec trois variantes : microdonga (diamètre moyen 10 - 50 m et profondeur \leq 1 m), mésodonga (diamètre moyen 50 - 100 m et profondeur 1 - 3 m) et mégadonga (diamètre moyen $>$ 100 m et profondeur $>$ 3 m) ;
- l'horizon du sol, avec 3 variantes : H_1 : 0 - 20 cm ; H_2 : 20 - 50 cm ; H_3 : $>$ 50 cm. Les échantillons de sols ont été prélevés à l'aide d'un cylindre de densité sur tous les sites au niveau de chaque horizon du profil pédologique et sur tous les sites pour les analyses en laboratoire. Ces échantillons ont été séchés à l'air libre et tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm de maille. Les paramètres physiques et chimiques suivants ont été déterminés à savoir :
 - l'acidité actuelle (pH_{eau}) du sol (ratio 2/5), dans l'eau distillée au pH-mètre à électrode ;
 - l'acidité potentielle (pH_{KCl}) du sol (ratio 2/5), dans une solution normale de KCl au pH-mètre à électrode ;
 - le taux de carbone organique du sol, par l'oxydation de la matière organique au

dichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ dans une solution d'acide sulfurique 96 %, et la détermination des ions Cr^{3+} formés (Aubert, 1978) ;

- l'azote total, par la méthode Kjeldahl (Okalebo *et al.*, 2002) ;
- le phosphore assimilable (Pass), par la méthode Bray 1 (Tejada et Gonzalez, 2008) ;
- le phosphore total P_{tot} , par la méthode Duval (Tejada et Gonzalez, 2008) ;
- la somme des bases échangeables, par déplacement à l'aide d'une solution normale de CH_3COONH_4 à pH 7, (Tejada et Gonzalez, 2008) ;
- la capacité d'échange cationique CEC, par saturation du complexe d'échange à l'acétate d'ammonium 1 N à pH 7 et déplacement des ions NH_4^+ par une solution de KCl 1N (Baize, 2000) ;
- la granulométrie : C'est la détermination des pourcentages des argiles, limons et sables. Elle a été effectuée par la méthode de tamisage à sec, après lavage, qui consiste à séparer les grains agglomérés par brassage, sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, puis tamisé au moyen d'une série de tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon AFNOR, 1996. Les particules fines à très fins sont séparées par sédimentation dans un milieu liquide (AFNOR, 1992).
- la densité apparente et la porosité (Okalebo *et al.*, 2002). Un métal cylindrique, à bases ouvertes et calibré à 100 cm^3 , est enfoncé dans le sol à chaque point de prélèvement du sol. Le cylindre, une fois complètement enfoncé, est enlevé avec le sol sans débordement. Le sol est recueilli, séché et pesé (p). La densité apparente (Da) devient : $Da = p/100\text{ cm}^3$. La porosité (Po) est calculée comme suit : $Po = (Dr - Da) / Dr \times 100$ avec Da = densité apparente, Dr = densité réelle ($Dr = 2,65 - 0,042\% Mo$ avec $\% Mo$: pourcentage de matière organique dans le sol).

Tableau 1 : Caractéristiques des plateaux et des dongas .
characteristics of plateaus and dongas.

Ravinement	Plateau Proche	Plateau Eloigné	Donga (gully)
Pente	1 % à 3 %	2 % à 3 %	1 % à 5 %
Profondeur du profil pédologique	95 cm à 180 cm	91 cm à 162 cm	50 cm à 145 cm

ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Le Microsoft Excel version 2010 a été utilisé pour la saisie des données et la réalisation des graphes. Le Logiciel SAS version 9.2 a été utilisé pour l'analyse statistique des données. L'Analyse de variance ANOVA et la comparaison des moyennes ont été fait avec le test LSD : Least Significant Difference.

RESULTATS

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL

Les résultats de l'influence du site, de la topographie et du ravinement sur les caractéristiques physiques du sol sont présentés dans le (Tableau 2).

Taille des particules

L'analyse de la taille des particules a permis d'évaluer l'effet de l'érosion hydrique sur les particules de sol. Dans le Parc National W et dans les terroirs villageois, les fractions grossières et fines des particules de sol ne sont pas significativement différentes. Mais, au niveau des fractions intermédiaires, il existe une différence significative entre le parc W et les terroirs. Le sol des terroirs villageois contient plus de limon fin 91,60 g.kg⁻¹ et, le Parc W, plus de sable fin 395,60 g.kg⁻¹. Par contre, le sol de ces deux sites a la même texture argilo-sablo-limoneuse. Sur chaque site, l'effet de ravinement sur la taille des particules a été étudié. Le ravinement n'affecte pas de manière significative le contenu de sol sableux. En effet, les dongas (ravins) contiennent

Tableau 2 : Caractéristiques physiques du sol dans la Commune de Karimama
Soil physical characteristics in Karimama district.

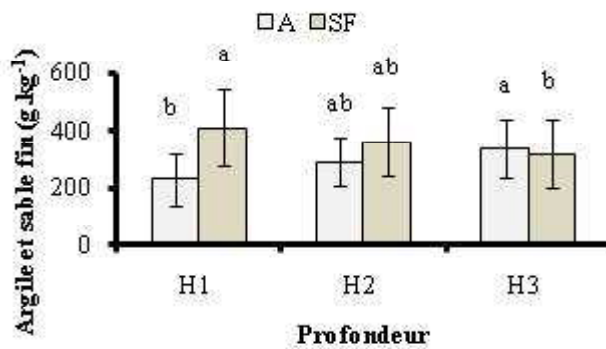
Variables	Sites			Topographie				Ravinement			
	Terroir	Parc	Lsd	PP	PE	Donga	Lsd	Microdonga	Mésodonga	Mégadonga	Lsd
Densité réelle	2,6a	2,61a	0,0065	2,61a	2,60a	2,60a	0,0089	2,6a	2,6a	2,61a	0,0081
Densité apparente	1,65a	1,6b	0,0305	1,61a	1,63a	1,63a	0,0417	1,6b	1,65a	1,62ab	0,0377
Porosité (%)	36,68b	38,37a	1,1553	38,06a	37,45a	37,15a	1,5648	38,39a	36,35b	37,91a	1,424
Limon grossier (g.kg ⁻¹)	128,90a	122,20a	15,141	122,50ab	108,20b	131,20a	21,944	176,30a	105,10b	102,70b	18,606
Limon fin (g.kg ⁻¹)	95,30a	57,10b	14,297	70,20a	73,40a	83,80a	19,399	121,00a	83,10b	30,40c	17,506
Sable grossier (g.kg ⁻¹)	136,10a	136,10a	33,766	141,00a	148,30a	129,30a	45,024	82,10c	176,60a	133,60b	41,585
Sable fin (g.kg ⁻¹)	345,70b	396,90a	41,017	410,30a	380,80ab	346,90b	55,15	339,70b	316,90b	471,40a	50,669
Argile (g.kg ⁻¹)	290,40a	294,70a	38,21	269,20a	285,80a	301,70a	53,069	297,90a	304,40a	266,00a	46,815

PP : Plateau proche ; PE : Plateau éloigné. Lsd : Least significant difference.

Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % (Means followed by the same letter are not significantly different at 5 %).

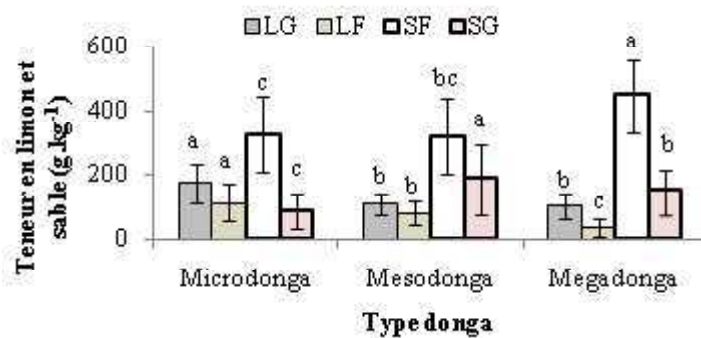
la plus faible teneur de sable ($342,80 \text{ g.kg}^{-1}$), comparativement aux plateaux proches ($380,80 \text{ g.kg}^{-1}$) et plateaux éloignés ($410,30 \text{ g.kg}^{-1}$). Si le plateau éloigné n'est pas encore influencé par l'érosion, le plateau proche du donga (ravin) est déjà sous son influence. La profondeur du donga est liée à la taille et surtout à l'intensité du ruissellement. L'effet de l'intensité de l'érosion sur les fractions granulométriques du sol selon la taille des dongas a été évalué. Les teneurs en argile et en sable fin de l'horizon de surface (H_1 : 0 - 20 cm)

et de l'horizon plus profond (H_3 : > 50 cm) ont différé significativement (Figure 2a). Les dongas (ravins) peu profonds < 1m où l'érosion est moins intense ont les plus hauts niveaux de limon fin ($117,20 \text{ g.kg}^{-1}$) et grossier ($179,60 \text{ g.kg}^{-1}$), et la plus faible teneur en « sable grossier ($82,10 \text{ g.kg}^{-1}$) ». Les dongas (ravins) profonds > 3m ont des niveaux plus bas de limon et la teneur en sable fin la plus élevée ($471,40 \text{ g.kg}^{-1}$) (Figure 2 b). L'érosion par l'eau a commencé par le prélèvement sélectif de sable fin, l'argile n'étant pas significativement affectée par l'intensité de l'érosion.



H_1 : 0 - 20 cm ; H_2 : 20 - 50 cm ; H_3 : > 50 cm
A : Argile ; SF : Sable fin.

Figure 2a : Effet de l'érosion sur les caractéristiques physiques du profil du sol.
Effect of erosion on the physical characteristics of the soil profile.



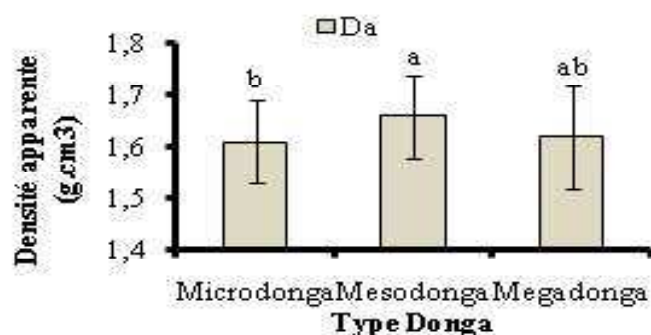
SF : Sable fin ; SG : Sable grossier ; LF : Limon fin ; LG : Limon grossier.

Figure 2b : Effet du type de donga (ravin) sur les caractéristiques physiques du sol.
Effect of donga (ravine) type on soil physical characteristics.

Densité et porosité du sol

Sur les différents sites, au niveau des plateaux ou des dongas (ravins) et quelle que soit la profondeur des ravins, la densité réelle du sol est restée presque constante. Elle n'a pas été influencée par l'érosion, car elle est liée aux particules du sol et non à la structure du sol. Le terroir a une densité apparente significativement plus élevée que celle du Parc W. En conséquence, le sol du Parc W est significativement plus poreux que celui du terroir. L'intensité de l'érosion par ravinement a un effet significatif sur ces paramètres physiques du sol. La densité apparente du sol a augmenté et la porosité a diminué significativement lorsque

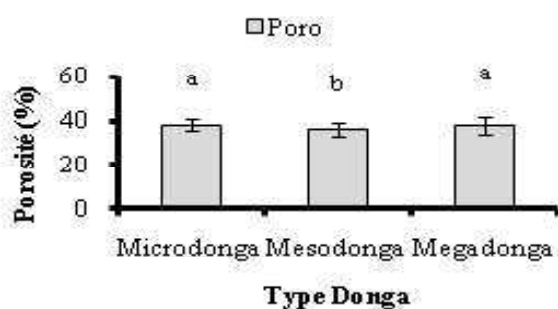
la profondeur des ravins augmente sous l'effet de l'intensité de l'érosion. La densité apparente et la porosité des microdonga ont différé significativement de celles des mésodongas (Figure 3a). A la surface, le sol a une densité apparente plus faible et est plus poreux, alors qu'en profondeur, la densité apparente est plus élevée et la porosité plus faible. La densité apparente et la porosité à la surface du sol ont différé significativement de celles de l'horizon plus profond ($H_3 : > 50$ cm) (Figure 3b), tandis que la densité réelle a été significativement différente dans les trois horizons du sol (Figure 3c). La porosité et la densité apparente du sol ont varié significativement en fonction de la profondeur du sol (Figures 3c et 3d).



Da : Densité apparente.

Figure 3a : Effet du type de donga sur la densité apparente du sol.

Effect of donga type on soil bulk density.



Porosity : Porosité

Figure 3b : Effet du type de donga sur la porosité du sol.

Effect of donga type on soil porosity.

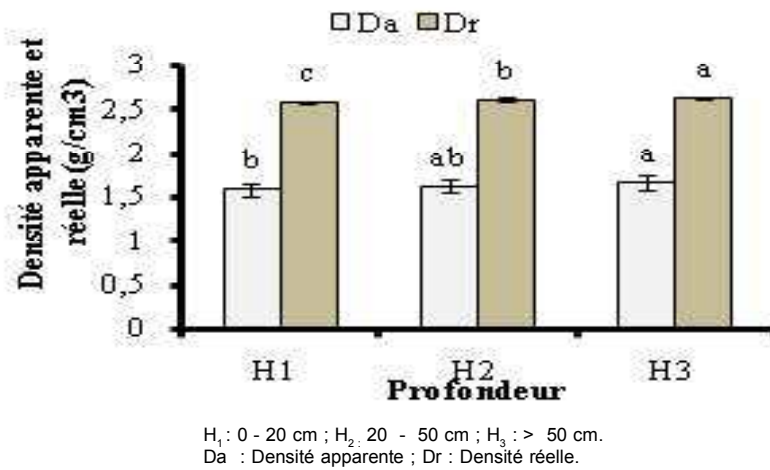


Figure 3c : Effet de l'érosion sur la densité réelle et apparente du profil du sol.
Effect of erosion on the actual and bulk density of the soil profile .

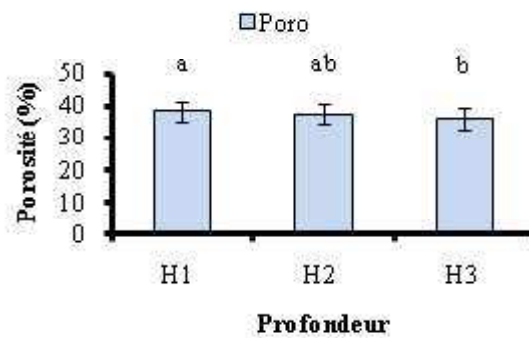


Figure 3d : Effet de l'érosion sur la porosité du profil du sol.
Effect of erosion on the soil profile porosity.

Caractéristiques chimiques du sol

Les résultats concernant l'influence du site, des unités topographiques, de la profondeur des horizons et du type de donga ravinement sur les caractéristiques chimiques du sol ont été présentés dans les (Tableaux 3 et 4).

Acidité du sol

Le sol est légèrement acide sur les deux sites d'étude terroir et parc W. La topographie a eu une influence significative sur l'acidité du sol. En effet, le sol a été moins acide au niveau du donga. Le pH_{eau} et pH_{KCl} du donga ont différé significativement de ceux du plateau proche (Figure 4). L'acidité n'a pas été significativement différente suivant la profondeur du donga. Toutefois, on constate que, plus le donga est profond, plus le sol est acide.

Matière organique du sol

Tous les sites ont un sol très pauvre en matière organique. La teneur en matière organique du sol a varié de façon significative de la surface vers la profondeur. A la surface, le sol a été plus riche en matière organique qu'en profondeur (Figure 5a et 5b). Ces sites sont donc effectivement sous les effets de l'érosion du sol. Ni la topographie, ni l'intensité de l'érosion n'ont affecté de façon significative la teneur en matière organique du sol. Les sites d'étude ont donc un sol dégradé et érodé. La teneur en azote du sol a été aussi faible au niveau des deux sites. Elle diffère significativement au niveau des trois horizons du sol. La distribution de l'azote sur le profil a montré que le sol est deux fois plus riche à la surface qu'en profondeur ($0,18 \text{ g.kg}^{-1}$) et de façon significative. Le rapport C/N étant supérieur à 10, la minéralisation de la matière organique du sol a été relativement bonne et n'a pas subi l'effet de l'érosion du sol sur les sites étudiés. La valeur du rapport C/N à la surface du sol est significativement différente de celle obtenue dans l'horizon de profondeur (Figure 5c).

Phosphore du sol

Le sol a été moyennement riche en phosphore sur les sites étudiés. Il y a donc une insolubilisation du phosphore dans le sol

des sites étudiés. Le taux de phosphore total (Figure 6a) et de phosphore assimilable, (Figure 6b) à la surface du sol, a différé significativement de ceux enregistrés dans l'horizon de profondeur $\text{H}_3 : > 50 \text{ cm}$.

Pouvoir adsorbant

La capacité d'échange cationique du sol est faible. Elle est de façon significative, plus importante en profondeur (11 cmol.kg^{-1} de sol) qu'à la surface du sol ($7,9 \text{ cmol.kg}^{-1}$) (Figure 7a), l'intensité de l'érosion a agi significativement sur la capacité d'échange cationique du sol (Figure 7b). Elle a été plus faible ($8,27 \text{ cmol.kg}^{-1}$ de sol) lorsque l'érosion a été plus intense (profondeur du donga $> 3 \text{ m}$). Aussi la teneur en calcium a-t-elle varié significativement en fonction de l'intensité de l'érosion. La teneur en calcium du sol des mésodongas est significativement différente de celle des mégadongas (Figure 7c). La topographie n'a eu aucun effet significatif sur la capacité d'échange cationique du sol, mais elle a influencé la somme des bases. La somme des bases a été très sensible à l'érosion du sol. En effet, la teneur en bases échangeables du sol est élevée au niveau du donga ($6,64$) et faible au niveau du plateau proche ($3,33$). Les bases ont été drainées du plateau proche vers le donga sous l'effet de l'érosion. La teneur en bases du plateau éloigné est significativement supérieure à celle du plateau proche. Il en résulte un taux de saturation en bases élevé au niveau du donga ($58,28$) et faible au niveau du plateau proche ($47,62$). Cette différence du taux de saturation a été statistiquement significative (Figure 7d). Au niveau des dongas (ravins), la somme des bases a été significativement influencée par l'intensité de l'érosion. En effet, les ravins les plus profonds ont eu une teneur plus faible en bases échangeables, tandis que les ravins les moins profonds $< 1 \text{ m}$ sont plus riches en bases (Figure 7b). Il en résulte un taux de saturation en bases plus élevé ($55,89 \%$) au niveau des ravins les moins profonds, et plus faibles au niveau des plus profonds ($48,95 \%$). La distribution des bases sur les horizons du sol montre que le sol est plus riche en bases, avec un taux de saturation en bases plus élevé en profondeur qu'à la surface.

Tableau 3 : Caractéristiques chimiques des sols dans la Commune de Karimama : Impact du site et de la topographie.*Chemical characteristics of soils in Karimama district : Site and topography impact.*

Paramètres	Site				Topographie			
	<i>Terroir</i>	<i>Parc W</i>	<i>Lsd</i>	<i>PE</i>	<i>PP</i>	<i>Ravin</i>	<i>Lsd</i>	
Acidité actuelle	6,22a	5,99a	0,269	5,79b	5,54b	6,45a	0,3678	
Acidité potentielle	5,26a	5,05a	0,2936	4,95b	4,58b	5,46a	0,4017	
Matière organique	8,40a	7,90a	1,502	8,20a	7,40a	8,50a	2,054	
Azote total	0,32a	0,30a	0,043	0,31a	0,28a	0,32a	0,059	
Rapport C/N	15,11a	14,54a	1,2363	14,79a	15,03a	14,47a	1,6904	
Phosphore total	111,43a	102,89a	12,013	105,05a	97,63a	112,34a	16,329	
Phosphore assimilable	7,04a	6,39a	1,0452	7,03a	5,39b	7,18a	1,4291	
Bases échangeables	5,35a	5,93a	1,125	5,1b	3,33c	6,64a	1,5383	
CEC	10,35a	10,70a	1,4667	10,36a	7,90b	11,45a	2,0416	
Taux de saturation en bases	54,53a	54,07a	4,7643	50,30b	47,39b	58,19a	6,5741	

PP : Plateau proche ; PE : Plateau éloigné. Lsd : Least significant difference.
 Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %
Means followed by the same letter are not significantly different at 5 %.

Tableau 4 : Caractéristiques chimiques des sols dans la Commune de Karimama : Impact des horizons et de la taille des ravins dongas.*Chemical characteristics of soils in Karimama district : Horizons and dongas ravines size impact.*

Paramètres	Horizon				Ravinement			
	<i>H₁</i>	<i>H₂</i>	<i>H₃</i>	<i>Lsd</i>	<i>MiD</i>	<i>MeD</i>	<i>MaD</i>	<i>Lsd</i>
Acidité actuelle	6,05a	6,09a	6,22a	0,3274	6,19a	6,2a	5,91a	0,3323
Acidité potentielle	5,27a	5,08a	5,15a	0,3565	5,07a	5,32a	5,05a	0,3625
Matière organique	13,00a	7,30b	4,40c	1,829	8,60a	8,40a	7,40a	1,856
Azote total	0,46a	0,29b	0,18c	0,052	0,32a	0,32a	0,28a	0,053
Rapport C/N	16,04a	14,4b	14,13b	1,5048	14,95a	14,67a	15,02a	1,5275
Phosphore total	133,14a	97,83b	91,78b	14,605	111,26a	108,33a	102,32a	14,755
Phosphore assimilable	8,44a	6,11b	5,7b	1,2721	6,21a	7,46a	6,29a	1,2913
Bases échangeables	4,61b	5,18b	7,03a	1,3694	5,52ab	6,52a	4,33b	1,39
CEC	9,12a	9,43a	11,72a	2,8603	10,07b	11,92a	8,65b	1,8205
Taux de saturation en bases	55,46a	52,15a	55,35a	5,8136	55,64a	56,47a	49,60b	5,906

H₁ H1 : 0 - 20 cm ; H₂ : 20 - 50 cm ; H₃ : > 50 cm ; MiD = Microdonga ; MeD = Mesodongan ; MaD = Megadonga
 Lsd : Least significant difference.
 Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %
Means followed by the same letter are not significantly different at 5 %.

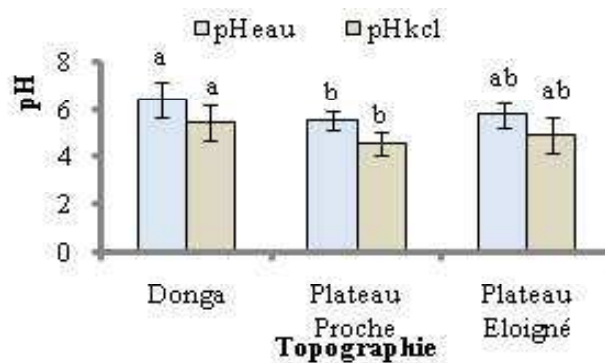
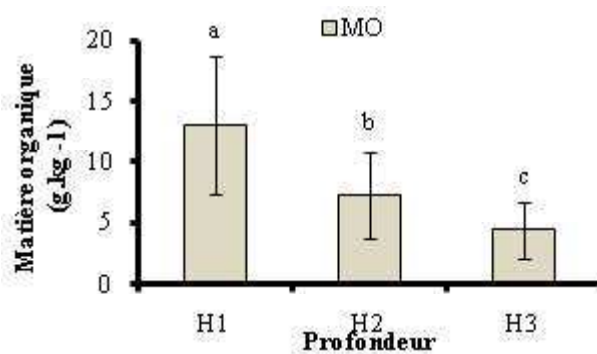


Figure 4 : Effet de la topographie sur le pH du sol sous l'érosion.

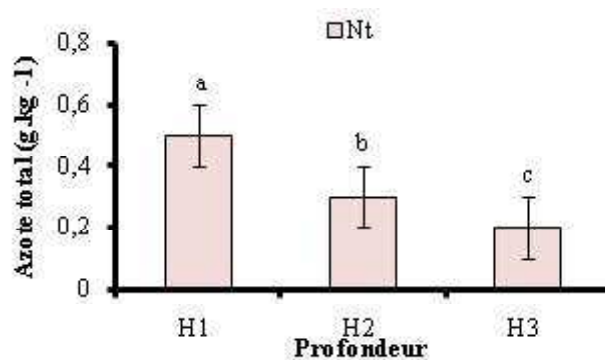
Effect of topography on the pH of the soil under erosion.



H₁ : 0 - 20 cm ; H₂ : 20 - 50 cm ; H₃ : > 50 cm ; MO : Matière organique.

Figure 5a : Effet de l'érosion sur la teneur en matière organique du profil du sol.

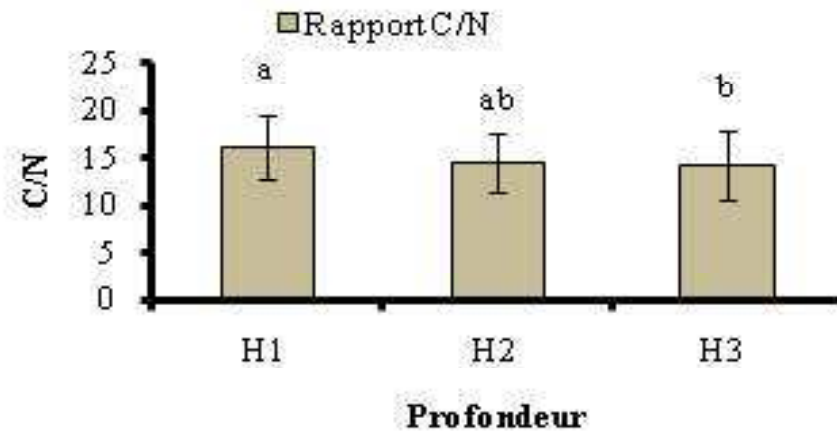
Effect of erosion on the organic matter of the soil profile.



H₁ : 0 - 20 cm ; H₂ : 20 - 50 cm ; H₃ : > 50 cm ; Nt : Azote total du sol.

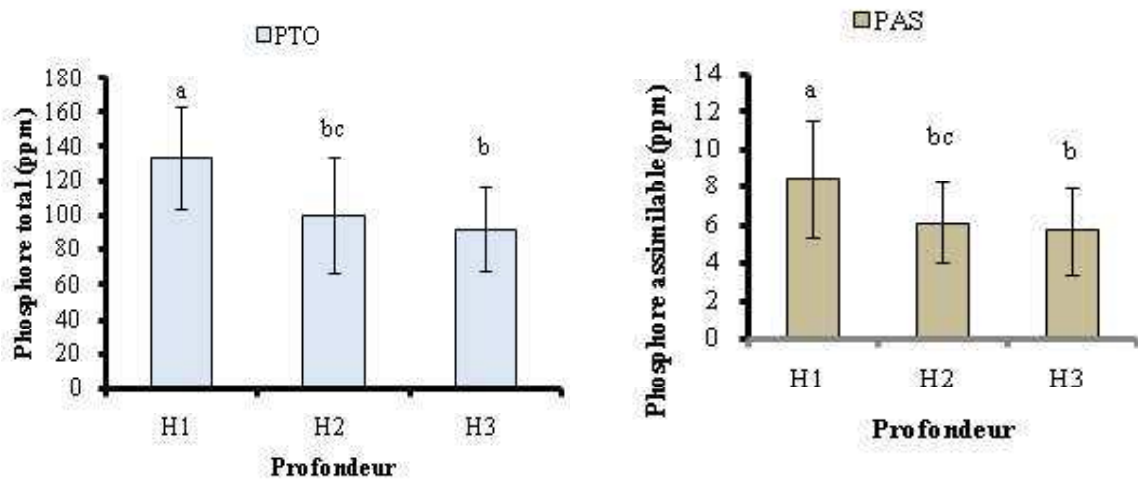
Figure 5b : Effet de l'érosion sur la teneur en azote du profil du sol.

Effect of erosion on the nitrogen content of the soil profile.



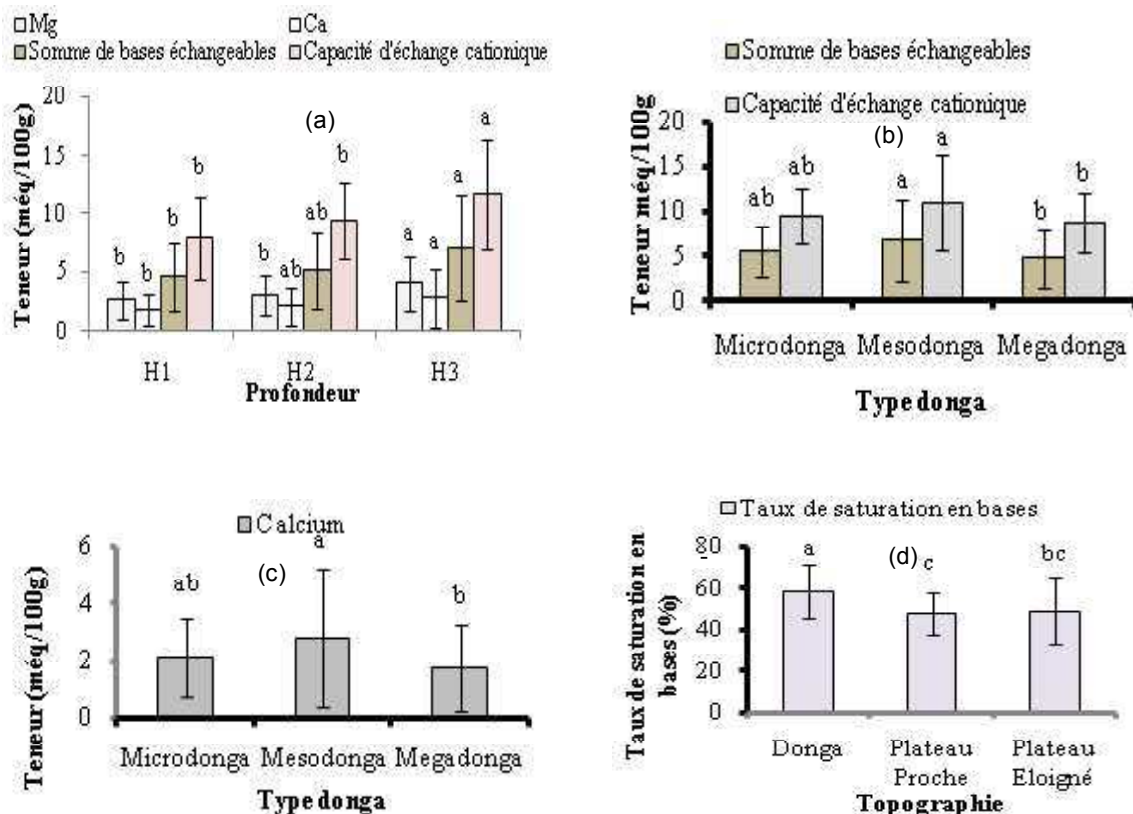
H₁: 0 - 20 cm ; H₂: 20 - 50 cm ; H₃: > 50 cm ; C/N : Ratio carbone/ azote.

Figure 5c : Effet de l'érosion sur le ratio carbone/ azote du profil du sol
Effect of erosion on carbon/nitrogen ratio of the soil profile.



H₁: 0 - 20 cm ; H₂: 20 - 50 cm ; H₃: > 50 cm ; PTO : Phosphore total ; H₁: 0 - 20 cm ; H₂: 20 - 50 cm ; H₃: > 50 cm ; PTO : Phosphore total ; PAS : Phosphore assimilable.
PAS : Phosphore assimilable

Figure 6 : Effet de l'érosion sur le phosphore total (a) et assimilable (b) du profil du sol
Effect of erosion on total phosphorus (a) and available phosphorus (b) of the soil profile.



H₁ : 0 - 20 cm ; H₂ : 20 - 50 cm ; H₃ : > 50 cm ; Mg : Magnésium ; Ca : Calcium.

Figure 7 : Influence de la profondeur des horizons (a) du type de donga (b, c) et de la topographie (d) sur le pouvoir adsorbant du sol.

Influence of horizon depth (a) donga type (b, c) and topography (d) on the soil adsorbent power.

DISCUSSION

ANALYSE DE L'IMPACT DE L'ÉROSION SUR LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU SOL DES DONGAS

La distribution de la taille des particules de sol a montré que les sols du Parc National du W et des terroirs villageois ont la même texture, sablo-argilo-limoneuse. Le sol des terroirs villageois contient plus de limon fin (91,6 g.kg⁻¹) et le Parc National du W, plus de sable (395,60 g.kg⁻¹). En effet, les sédiments à forte teneur en sable ou en limon s'érodent plus facilement que ceux contenant de faible teneur de sable et de limon (Fairbridge, 2008). L'érosion par ravinement n'affecte pas de manière significative les sols sableux. En effet, la teneur en sable des ravins est la plus faible

(342,80 g.kg⁻¹) comparativement aux plateaux éloignés et proches respectivement 380,80 g.kg⁻¹ et 410,30 g.kg⁻¹. Les sols contenant des pourcentages élevés de sable et de limon sont les plus sensibles au détachement parce qu'ils n'ont pas les caractéristiques de cohésion inhérentes (Vidal, 2012). Les sols sableux et limoneux sur les versants sont très sensibles à l'érosion par ravinement où les flux se concentrent parce qu'ils n'ont pas la cohésion suffisante (Vidal, 2012). En considérant l'intensité de l'érosion, le niveau élevé de limon fin et la plus faible teneur en sable grossier ont été trouvés dans les microdongas où l'érosion est moins intense tandis que les plus profonds ravins c'est-à-dire les mégadongas de profondeur > 3 m ont le plus faible taux de limon et la teneur en sable la plus élevée. Ceci est en accord avec les résultats de Oluyori et Mgbanyi (2014) qui ont constaté que la distribution de la taille des

particules de sol est dominée par le sable dans les ravins, dans certaines parties de Kaduna, au Nigéria. La présence de sols limoneux dans la zone d'étude, à Karimama au Bénin, facilite le détachement des particules, leur transport et l'installation des ravins (donga) par l'effet combiné de l'érosion en nappe, en rigoles et en ravines. Ces trois types d'érosion se produisent et constituent les principaux types d'érosion du sol rencontrés dans le Parc National du W et sa périphérie. La perméabilité du sol est un facteur important influençant l'érosion. Elle se réfère à la capacité du sol pour transmettre de l'eau ou de l'air, elle dépend à la fois de la taille et du volume des pores. Dans la zone d'étude, la porosité et la densité apparente du sol varient significativement en fonction de la profondeur du sol. A la surface, le sol est plus poreux, de densité apparente plus faible, alors qu'en profondeur, la densité apparente est plus élevée et la porosité plus faible. Le sol est alors plus perméable en surface qu'en profondeur. Étant donné que la perméabilité varie en fonction de la profondeur, l'excavation peut exposer les couches qui sont plus ou moins perméables que la surface d'origine.

ANALYSE DE L'IMPACT DE L'ÉROSION SUR LES CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DU SOL DES DOGAS

Le sol est légèrement acide sur les deux sites d'étude terroir et Parc W. La topographie a une influence significative sur l'acidité du sol. Il n'a pas été démontré que le pH du sol affecte directement l'érosion par ravinement, cependant, une corrélation entre la variation du pH du sol et les processus de l'érosion a été observée (Gachene *et al.*, 1997). L'acidification du sol est liée à une perte de la qualité du sol (Nandi et Luffman, 2012). Lorsque la végétation est incapable de se développer sur un sol acide : elle peut mourir ; ses racines ne seront plus conservées dans le sol et l'érosion du sol va commencer (Nandi et Luffman, 2012). Un pH bas, dans la gamme de 4,5 à 6 dans l'horizon A, a été observé, aussi bien dans les sols érodés que dans ceux non érodés. En effet, le sol est moins acide au niveau du donga. Le pH_{eau} du donga (6,45) diffère significativement de ceux du plateau proche (5,54) et du plateau éloigné (5,79). Selon Weill et Duval (2009), le pH est en général un reflet de l'état calcique du sol. Un pH_{eau} de 6,5 est un objectif général à atteindre, car il est convenable pour la plupart des cultures. C'est ce qui justifie peut être la

mise en valeur de ces zones dégradées, surtout dans les terroirs de Mamassy-Gourman (85,68 %), Kofounou (77,78 %), Birni-Lafia (66,62 % et Gouroukambou (55,56 %) où le problème de manque de terre cultivable se pose avec acuité. En effet, la présence du Parc National du W sur les 5/6 de la Commune de Karimama fait que face à la poussée démographique, la population exerce une forte pression sur la terre. Les exploitants agricoles sont contraints à la mise en valeur des zones dégradées (Godonou, 2011). Les teneurs en matière organique et en azote du sol de tous les sites étudiés sont très faibles. L'agriculture dans ces zones dégradées nécessite alors l'apport de fumure organique ou minérale, pour un bon développement des cultures, afin de compenser les exportations de matières liées à la récolte. Dans un contexte de pauvreté, les producteurs de Karimama exploitant ces zones dégradées n'utilisent pas des engrais minéraux, et très peu d'entre eux utilisent la fumure organique de façon satisfaisante pour relever cette baisse du potentiel agricole. La baisse de la fertilité se révèle par la chute des rendements agricoles Agadjihouédé (2008) et l'envahissement des champs par des espèces végétales indicatrices de pauvreté des terres, dont *Striga hermonthica* (Agadjihouédé, 2008 ; Avakoudjo *et al.*, 2011). Face aux problèmes de dégradation des terres, les stratégies de gestion et de restauration de la fertilité des sols dans la zone d'étude doivent être centrées sur l'utilisation de la matière organique avec les paysans producteurs. L'amendement organique inclut l'apport de fumier d'étable, le parcase, les parcs agro-forestiers. Dans les champs de case et autres champs plus proche du village, la fertilisation du sol par l'apport du fumier est la pratique de reconstitution du stock organique et d'amélioration de la structure du sol. Le fumier utilisé est constitué des ordures ménagères et du fumier d'étable, produit par les animaux petits et gros ruminants surtout. Ce fumier d'étable est en fait un mélange de déjections, d'urines, de pailles et de terre. L'apport du fumier se fait en saison sèche. Il est d'abord entassé sur les plages nues, encroûtées ou sur les parties du champ où le sol présente un éclaircissement prononcé, donc pauvre, de l'avis du paysan (Agadjihouédé, 2008). Les Peulhs (73,33 %) utilisent le plus le fumier d'étable, tandis que pour l'utilisation des ordures ménagères et déchets de cuisine, ce sont les Dendi et Djerma (57,57 %). La technique de parcase des animaux est aussi utilisée pour fertiliser le sol à Karimama.

Au total, 83,82 % des paysans pratiquent le parcage. Selon ces paysans, cette pratique est plus facile, compte tenu du fait qu'elle ne nécessite pas le transport du fumier (Agadjihouédé, 2008). La valorisation des résidus de récolte par leur transformation en fumier de ferme est une technique utilisée par les exploitants agricoles pour améliorer la fertilité des sols et les rendements agricoles. En intégrant les résidus de récolte dans l'alimentation du bétail, les refus du fourrage et les excréments fèces et urines sont transformés dans le parc, en fumier, utilisé pour les cultures suivantes. Mais Agadjihouédé (2008), lors de ses analyses sur la pratique du parcage, s'est demandé si la charge animale des exploitants suffisait pour améliorer substantiellement la fertilité des champs face au constat d'absence de contrat de parcage entre agriculteurs et éleveurs peulhs. Coly *et al.* (2013), en étudiant la transformation locale des résidus de récolte en fumier de ferme dans le terroir de la Néma, au Saloum (Sénégal), ont trouvé que la production de fumier apparaît très liée à la taille de l'exploitation, et donc, à l'effectif des animaux dans le parc, et surtout à l'apport de fourrage. Pour améliorer cette production, ils ont suggéré d'augmenter l'effectif des animaux dans le parc et d'ajouter aux refus de fane, de la litière non consommable. Des études spécifiques sont alors nécessaires dans la zone d'étude afin d'évaluer la production de fertilisants organiques en fonction de la taille des exploitations et de la quantité de résidus (mil, sorgho, arachide ou maïs) disponibles sur l'exploitation. L'adoption de la culture du mil dans les parcs agroforestiers à *Piliostigma reticulatum* a été constatée dans la commune de Karimama au niveau de toutes les exploitations agricoles. En effet, dans le but de comprendre les logiques de la pratique des cultures sous *P. reticulatum* dans la région d'Aguié, au Niger, et de la justifier à travers des évaluations de rendement de mil, Abasse *et al.* (2013) ont encouragé les paysans à pratiquer la régénération naturelle assistée de *P. reticulatum*, du fait de son importance dans l'amélioration du rendement de mil, qui constitue la base de leur alimentation. La mise en œuvre d'un tel système de culture par les paysans de Karimama est alors bien pensée, pour régler les problèmes de sur-exploitation des terres et de rendement acceptable. D'autres parcs agroforestiers, moins pratiqués sont aussi observés telles les cultures sous *Balanites aegyptiaca*, ou *Vitellaria paradoxa* ou *Sclerocarya birrea*.

La teneur en matière organique du sol varie de façon significative de la surface vers la

profondeur. A la surface, le sol est plus riche en matière organique qu'en profondeur. La distribution de l'azote sur le profil montre que le sol est deux fois plus riche à la surface ($0,46 \text{ g.kg}^{-1}$) qu'en profondeur ($0,18 \text{ g.kg}^{-1}$) et de façon significative. Le rapport C/N étant supérieur à 10, la minéralisation de la matière organique du sol est bonne et ne subit donc pas l'effet de l'érosion du sol sur les sites étudiés. Les différents équilibres minéraux $\text{Nt}/\text{P}_2\text{O}_5$ total et le Ca/Mg considérés dans cette étude montrent que la valeur du rapport Ca/Mg est faible $\text{Ca}/\text{Mg} = 0,68 < 1,5$. Ce résultat suggère qu'il y a une légère déficience du calcium sur le magnésium dans le sol des dongas. En ce qui concerne le rapport $\text{Nt}/\text{P}_2\text{O}_5$ total, on constate que c'est inférieur à 0,5, ce qui suggère la faible teneur d'azote dans ces sols. L'azote pourrait constituer le facteur déterminant des rendements des cultures dans ces écosystèmes dégradés.

CONCLUSION

L'étude sur la caractérisation physico-chimiques des sols dans les zones dégradées (dongas) dans la région soudanienne sèche du Bénin à Karimama, a contribué à une meilleure connaissance et compréhension des phénomènes qui se déroulent dans les sols. Les zones dégradées du Parc W et de ses terroirs riverains ont une texture sablo-argilo-limoneuse. Le sol des terroirs villageois contient plus de limon fin et le Parc National du W, plus de sable. L'étude a mis en évidence l'existence de poches sableuses, atténuant ainsi le potentiel agronomique du sol et menaçant la productivité dans ces zones. En outre, l'azote s'est révélé être l'élément déficient dans ces sols, d'où la nécessité d'apporter de l'azote si l'on veut accroître les rendements agricoles de manière durable. Les éléments fins sont drainés par le ruissellement, depuis les plateaux vers les dongas (ravins), qui sont moins acides et offrent un bon potentiel pour beaucoup de cultures. La mise en œuvre de l'agriculture nécessite l'apport de fertilisant organique et minéral pour compenser l'exportation liée à la récolte, et améliorer la fertilité des sols. Des études complémentaires doivent être réalisées pour évaluer la production de fertilisants organiques en fonction de la taille des exploitations et en fonction de la quantité de résidus (mil, sorgho, arachide ou maïs) disponibles dans les exploitations.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce à l'appui financier et logistique de l'Union Européenne (FP6 INCO-dev 031685), à travers le Projet SUN (Sustainable Use of Natural Vegetation in West Africa) et du Laboratoire d'Ecologie Appliquée de la Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi (Bénin). Les auteurs remercient l'équipe du Laboratoire Sciences du Sol de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi et le Dr. Azontondé Anasthase pour leur contribution.

REFERENCES

- Abasse T., Yayé A., Abdoul Habou Z., Adamou A. I., Adam T. 2013. Influence des Parcs agro-forestiers à *Piliostigma reticulatum* sur l'infestation des plants de mil par les insectes floricoles et *Coniestaigne fusalis* (Hmps) (Lépidoptère : Pyralidae) dans la zone d'Aguié au Niger. *Journal of Applied Biosciences* 66 : 5140 - 5146.
- AFNOR. 1992. Sol : reconnaissances et essais. Norme française. 16 p.
- AFNOR. 1996. Sol : reconnaissance et essais. Norme française. 15 p.
- Agadjihouédé H. 2008. Zones dégradées des terroirs riverains du Parc National du W du Niger dans la Commune de Karimama et les potentialités de reboisement avec les essences locales d'intérêt socio-économique pour les populations locales. Mémoire de DESS Protection de l'environnement et amélioration des systèmes Agraires sahéliens. Université Abdou Moumouni, Faculté d'Agronomie. Centre Régional d'Enseignement spécialisé en Agriculture (CRESA), 80 p.
- Aubert G. 1978. Méthodes d'analyses des sols. Edit. C.R.D.P. Marseille. 189 p.
- Avakoudjo J., Kindomihou V., Sinsin B. 2011. Farmers' perception and response to soil erosion while abiotic factors are the driving forces in Sudanian Zone of Benin *Agricultural Engineering Research Journal* 1 (2) : 20 - 30.
- Avakoudjo J., Kindomihou V., Akponikpè P. I., Thiombiano A., Sinsin B. 2013. Essences végétales et techniques de restauration des zones d'érosion (dongas) du Parc W et de sa périphérie à Karimama (Nord-Bénin). *Journal of Applied Bioscience* 69 : 5496 - 5509.
- Blaize D. 2000. Guide des analyses en pédologie. Choix. Expression. Présentation. Interprétation. 2^{ème} Ed. INRA. Paris. 257p.
- Coly I., Diop B., Akpo L. E. 2013. Transformation locale des résidus de récolte en fumier de ferme dans le terroir de la Néma au Saloum (Sénégal) *Journal of Applied Biosciences* 70 : 5640 - 5651
- Fairbridge R. W. 2008. Erosion. In : W. Chesworth (Ed.). *Encyclopedia of Soil Science*. pp. 216 - 221. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Gachene C. K., Mbuvi, J. P., Jarvis N. J., Linner H. 1997. Soil erosion effects on soil properties in a highland area of Central Kenya. *Soil Science Society of America Journal* 61(2) : 559 - 564.
- Godonou Y. S. 2011. Analyse des formes d'utilisation des terres dégradées par l'érosion (Dongas) au nord-Bénin : cas de la Commune de Karimama. Master en Gestion des Ressources Naturelles et de la Biodiversité (RESBIO). Université d'Abomey-Calavi. (Bénin) 49 p.
- Hiepe C. 2008. Soil degradation by water erosion in a sub-humid West-African catchment a modeling approach considering land use and climate change in Benin. Thesis, ULB, Belgium, 337 p.
- Lobo D., Lozano, Z. Z., Delgado, F. 2005. Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil. *Catena*, 64 (2-3): 297 - 306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.011>. Consulté le 03 novembre 2014.
- Lujan L. D. 2003. Soil Physical Properties Affecting Soil Erosion in Tropical Soils Faculty of Agronomy, Institute of Soil Science, Central University of Venezuela, Maracay, Venezuela. Lecture given at the College on Soil Physics Trieste, 3 : 232 - 243.
- Nandi A., Luffman I. 2012. Erosion Related Changes to Physicochemical Properties of Ultisols Distributed on Calcareous Sedimentary Rocks. *Journal of sustainable development* 5 (8) : 52 - 68. <http://dx.doi.org/10.5539/jsd.v5n8p52>. Consulté le 07 novembre 2014.
- Okalebo R. J., Gathua, W. K., Woomer, L. P. 2002. Laboratory methods of soil and plant analysis : A working manual. Second edition, TSBF-CIAT and SACRED Africa, Nairobi, Kenya, 128 p.

- Oluyori R. N., Mgbanyi L. L. O. 2014. Soil aggregate stability and erodibility in different gully sites in parts of Kaduna state, Nigeria. *Ethiopian Journal of Environmental Studies Management* 7(2) : 188 -196. <http://dx.doi.org/10.4314/ejesm.v7i2.10>. Consulté le 29 avril 2014.
- Pimentel D. 2006. Soil erosion : A food and environmental threat. *Environ. Dev. Sustain.* 8 : 119 - 137.
- Tejada M., Gonzalez J. L., Garcia-Martinez A. M., Parrado J. 2008. Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield. *Bioresour. Technol.* 99, 1758 - 1763.
- Toko I., Sinsin B. 2008. Les phénomènes d'érosion et d'effondrement naturels des sols (dongas) du Parc National du W et leur impact sur la productivité des pâturages. *Sécheresse*. Vol. 19(3) : 193 - 200.
- Vidal H. 2012. Soutènement et renforcement des sols. Comment apporter une stabilité à un massif, devenu instable du fait de facteurs naturels ou artificiels défavorables ? Manuel, p. 39. http://pedagogie.lyceesavioudouala.org/tpe/2011-2012/1s_2012/complet.pdf. Consulté le 12 décembre 2014.
- Weill A., Duval J. 2009. Gestion du sol : état de santé, drainage, chaulage et travail du sol : Guide de gestion globale de la ferme maraîchère biologique et diversifiée. Module 6, Gestion du sol et de l'eau -Chapitre 10. 20 p.