

Caractérisation et quantification des flux sédimentaires éoliens participant au comblement des lacs du Sahel central : cas de Bangou Bi (SW Niger).

Characterization and quantification of Wind fluxes involved in the filling of south-west Niger Lakes: example of Bangou Bi

Amadou ABDOURHAMANE TOURE^{1, 2, 3}, Rodrigue GUILLON², Zibo GARBA¹, Jean Louis RAJOT³, Christophe PETIT², Vincent BICHET⁴, Alain DURAND⁵, David SEBAG^{5, 6}

1- Université Abdou Moumouni, Département des Sciences de la Terre, BP 10662, Niamey, Niger

2- Université de Bourgogne, Laboratoire ARTeHIS, UMR 5594 CNRS, Dijon, France

3- IRD, Laboratoire BIOEMCO, UMR 211, Niamey, Niger

4- Université de Franche-Comté, Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249 CNRS, Besançon, France

5- Université de Rouen, Laboratoire M2C, UMR 6143 CNRS, Mont Saint Aignan, France

6- Université de Montpellier, Laboratoire HSM, UMR 5569 IRD, Montpellier, France

Résumé

Dans la région de Niamey, les mares et lacs apparus au cours des six dernières décennies sont menacés de comblement du fait d'un fort taux de sédimentation de plus 4 cm par an. Les surfaces sableuses cultivées couvrant l'essentiel de leurs bassins versants sont particulièrement sensibles à l'érosion éolienne et à l'érosion hydrique. L'objectif de ce travail a été d'estimer la part des apports éoliens dans le comblement d'un de ces lacs, Bangou Bi, à travers des mesures directes de flux de dépôts dans ce lac et de flux d'érosion éolienne sur des surfaces cultivées typiques et nues.

Ainsi il est apparu que les dépôts éoliens sur Bangou Bi suivent une dynamique imposée par la cyclicité de l'érosion éolienne des sols nus et cultivés et proviennent à plus de 70 % de l'érosion locale de ces sols. Cependant, ces dépôts ne représenteraient qu'une épaisseur annuelle maximum de 400 µm et apparaissent donc négligeables dans le comblement actuel des mares principalement lié à l'érosion hydrique.

Mots clés : Niger, érosion éolienne, poussières éoliennes, comblement des lacs

Abstract

In Niamey region, ponds and lakes formed in the past six decades are being filled with a sedimentation rate of 4 cm per year. The cultivated sandy soils covering their watershed are prone to wind and water erosions. This work aimed to estimate the proportion of aeolian deposits in the filling of one of these lakes, Bangou Bi, by the means of aeolian deposition flux measurements on the lake and wind erosion flux measurements on cultivated and bare soils.

It appeared that more than 70% of aeolian deposits on Bangou Bi were provided by locale wind erosion that is controlled by the annual cycle of cultivated and bare soils erosion. Anyway, these deposits only reached a maximum thickness of 400µm per year which appears negligible in the filling of the lake.

Key words: Niger, wind erosion, dust, lakes filling

I. Introduction

Les environnements sahéliens ont été soumis à de rudes épreuves provoquant des transformations majeures au cours des dernières décennies. Ces transformations sont liées, d'une part aux facteurs climatiques avec d'importantes sécheresses au cours des années 1970 – 1980 et, d'autre part, à une forte pression anthropique consécutive à une forte croissance démographique, la plus élevée au monde. Cette augmentation de la population a en effet été supportée par un changement d'usage des sols, en particulier par un accroissement et une extension des surfaces cultivées (Ringrose et Matheson, 1992; Raynaud, 2001). Ceci a abouti à une diminution, voire une disparition totale, de la couverture végétale arborée (brousse tigrée et savanes arborées) (Loireau, 1998 ; Anyamba and Tucker, 2005; Herrmann *et al.*, 2005 ; Hiernaux *et al.*, 2009). Au Sahel central, cette baisse du couvert végétal a eu des conséquences hydrologiques importantes dont l'augmentation du ruissellement, la hausse de la nappe phréatique et l'apparition de lacs et mares (Leduc *et*

al., 2001 ; Leblanc *et al.*, 2007 ; Descroix *et al.*, 2009). Ces derniers sont devenus des centres d'intérêts d'une grande importance à cause des activités de maraîchage et pêche qui s'y pratiquent. Cependant, les sols sableux cultivés qui couvrent l'essentiel des bassins versants de ces lacs (comme la majorité de la surface sahélienne) sont très fragiles et très sensibles à la fois à l'érosion hydrique et à l'érosion éolienne (Sterk *et al.*, 1996 ; Bieters *et al.*, 2002 ; Rajot *et al.*, 2009). S'il a été prouvé que les mares s'ensablent du fait de l'accroissement de l'érosion hydrique (Roussel, 1999 ; Le Breton, 2005), les apports de sédiments dans le comblement de ces mares par érosion éolienne ne sont pas clairement quantifiés. Or, plusieurs mesures expérimentales réalisées à l'échelle détaillée de parcelles agricoles suggèrent que les flux de sédiments déplacés par l'érosion éolienne sont plus élevés que ceux transportés par érosion hydrique (Collinet et Valentin, 1985 ; Rajot *et al.*, 2009) au Sahel. Cependant les apports de sédiments par érosion éolienne dans les points d'eau du Sahel n'ont jamais été quantifiés précisément. Le présent travail vise donc à estimer la part des apports éoliens dans le comblement d'un de ces lacs, Bangou Bi, à travers des mesures directes de flux de dépôts dans ce lac et de flux d'érosion éolienne sur des surfaces cultivées typiques et nues.

II. Matériels et méthodes

II. 1. Caractérisation du flux d'érosion éolienne sur les surfaces cultivées et nues

L'érosion éolienne a été caractérisée par le flux horizontal exprimé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ par événement. Ce flux désigne la masse de particules traversant au cours d'un événement érosif une surface verticale, perpendiculaire au sens de l'écoulement du vent, de hauteur infinie et de largeur unité. Il a été mesuré par des pièges à sable de type BSNE (Big Spring Number Eight ; Fryrear, 1986). Le principe de la mesure consiste à piéger, en un même point de mesure, le sable transporté en saltation à différentes hauteurs. Les masses de sables collectées après chaque événement érosif permettent alors d'ajuster une équation représentant la densité de flux en fonction de la hauteur. Le flux horizontal est obtenu en intégrant cette équation sur la hauteur à chaque mât de mesure (Rajot *et al.*, 2003). Vingt-cinq mâts de 3 BSNE, étagés à 5, 15 et 30 cm de hauteur ont été installés sur deux parcelles PA et PB. Celles-ci sont rectangulaires (100 m X 150 m) et localisées sur le super site AMMA près de Banizoumbou (13°54'N ; 2°66'E) à 70 km à l'Est de Niamey (SW du Niger). Elles sont séparées l'une de l'autre et isolées de l'extérieur par des bandes végétalisées larges de 20 m. La parcelle PA a été mise à nu puis maintenue nue tandis que la parcelle PB est cultivée de manière traditionnelle. Sur cette dernière, la végétation se présente essentiellement sous forme de plants de mil (août à octobre) puis de résidus de culture qui sont couchés à la surface du sol par les paysans à partir de décembre / janvier lors du nettoyage de leurs champs.

Par ailleurs, la vitesse du vent est mesurée en continu par des anémomètres, étagés à 35, 70, 140 et 250 cm sur des mâts implantés au milieu de chaque parcelle.

II. 2. Mesure des dépôts éoliens sur le lac de Bangou Bi

Le flux vertical de dépôt a été mesuré entre 2007 et 2009 sur le lac de Bangou Bi (lac noir en Djerma) situé à 15 km à l'Est de Niamey (Niger). Les mesures ont été faites au moyen d'un récipient en acier inoxydable ayant la forme d'un frisbee inversé (30 cm de diamètre et 3,6 cm de profondeur) rempli de billes (Sow *et al.*, 2006). Il est pourvu d'un orifice de 1 cm de diamètre relié en saison des pluies à un réservoir par un tuyau. Cet orifice permet la collecte des dépôts en saison sèche et leur évacuation dans le réservoir en cas de pluie. Le frisbee a été équipé d'un déflecteur aérodynamique (en aluminium) en forme d'anneau circulaire (ayant 38,4 et 64 cm de diamètres interne et externe respectivement (figure 3) qui permet de minimiser la perturbation du capteur sur les champs de vent (Wiggs *et al.*, 2002). L'ensemble de ce dispositif a été monté sur un support flotteur qui le maintient à 65 cm au dessus de la surface des eaux. Ce support coulisse verticalement le long d'un tube fixé au fond du lac ce qui permet d'effectuer la mesure toujours à la même distance de la surface de l'eau. Par

ailleurs, il est muni d'une girouette qui permet de maintenir le capteur au vent du tube et d'éviter ainsi les effets d'ombre.

Les poussières déposées et piégées dans le frisbee sont récoltées chaque semaine par rinçage à l'eau du frisbee et des billes qu'il contient. Le matériel décanté est pesé avec une précision de $\pm 10 \mu\text{g}$. Il est ensuite traité à l'eau oxygénée (une attaque par jour et pendant 3 jours) puis pesé de nouveau pour obtenir un dépôt dépourvu de matière organique.



Figure 1 : Frisbee sur Bangou Bi, la flèche indique la direction du vent

III. Résultats et discussions

III. 1. Caractéristiques de la vitesse des vents mesurée à Banizoumbou

L'érosion éolienne est un phénomène à seuil contrôlé par la rugosité de surface et la vitesse du vent. Une vitesse seuil de $7,2 \text{ m s}^{-1}$ à 2,5 m de haut a été obtenue pour les sols sableux cultivés de la région de Niamey (Abdourhamane Touré *et al.*, 2010b). Relativement à cette valeur seuil, les vitesses journalières maximales de vent présentent une dynamique saisonnière marquée :

- pendant la saison des pluies (mai à septembre), les vitesses maximales sont exceptionnellement fortes et largement au-dessus de ce seuil : ces vents violents précèdent les systèmes convectifs qui produisent l'essentiel des pluies au Sahel ;
- durant la saison sèche, les vitesses maximales sont nettement plus faibles qu'en saison des pluies. On distingue deux périodes. D'octobre à décembre, les vitesses maximales de vent sont presque systématiquement en-dessous du seuil de $7,2 \text{ m s}^{-1}$, puis de janvier à avril elles dépassent légèrement, mais régulièrement, cette valeur (figure 2).

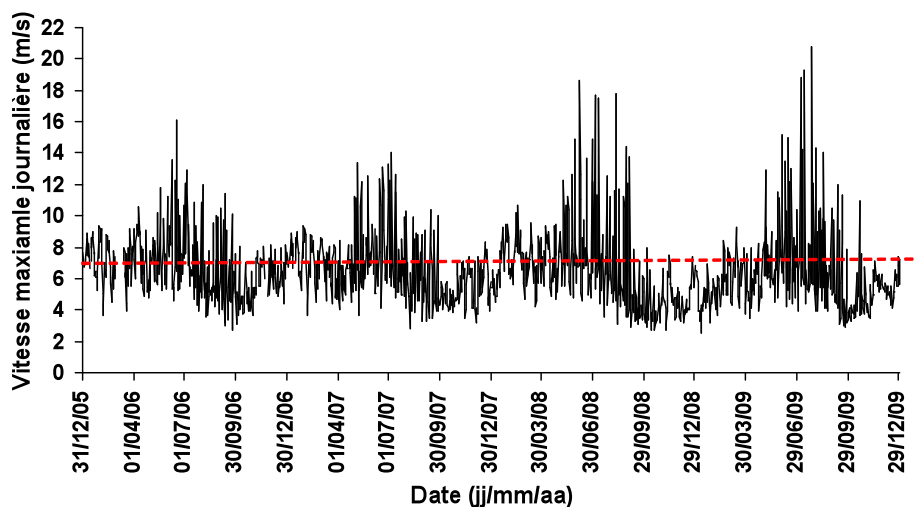


Figure 2 : Variation saisonnière de la vitesse maximale journalière du vent mesurée à 2,5 m de haut

III. 2. L'érosion éolienne des sols sableux de la région de Niamey

La moyenne des flux mesurés pour chaque événement érosif sur chacune des parcelles est présentée figure 3. Les mesures sont cumulées sur 5 années consécutives. La forme de la courbe obtenue pour la parcelle PB qui correspond à un champ traditionnel sans fumure organique est tout à fait caractéristique du Sahel (Rajot, 2001 ; Biielders *et al.*, 2004 ; Tidjani, 2008 ; Rajot *et al.*, 2009) et met essentiellement en évidence la période d'érosion intense de mai à mi-juillet qui correspond au début de la saison des pluies (Michels *et al.*, 1995 ; Buerkert *et al.*, 1996). Cette période d'érosion s'explique par l'occurrence des vents de très forte intensité (Figure 2) liés aux événements convectifs dans un contexte de protection minimale de la surface des sols par les résidus de culture (Biielders *et al.*, 2004 ; Sow *et al.*, 2009). C'est durant cette période que 90% des flux sont enregistrés sur PB avec une moyenne sur les quatre dernières années de mesure de $3.9 \text{ kg m}^{-1} \text{ j}^{-1}$.

Cette phase d'érosion se retrouve bien sûr sur la parcelle nue PA où elle est beaucoup plus intense puisque le flux moyen atteint le triple de celui mesuré sur PB soit de $12.2 \text{ kg m}^{-1} \text{ j}^{-1}$. Il est remarquable de constater que cette phase d'érosion cesse de façon quasi identique et simultanée sur PA et sur PB. Une augmentation de la rugosité liée au développement de la végétation ne permet donc pas d'expliquer cet arrêt de l'érosion comme la plupart des auteurs le suggéraient jusqu'à présent (Biielders *et al.* 2004). En effet, comme aucune végétation ne se développe sur PA, L'arrêt de l'érosion à cette période est dû à des facteurs météorologiques notamment à la diminution du nombre d'événement érosifs, la baisse de la durée et de la vitesse des vents érosifs (Abdourhamane Touré *et al.*, sous presse).

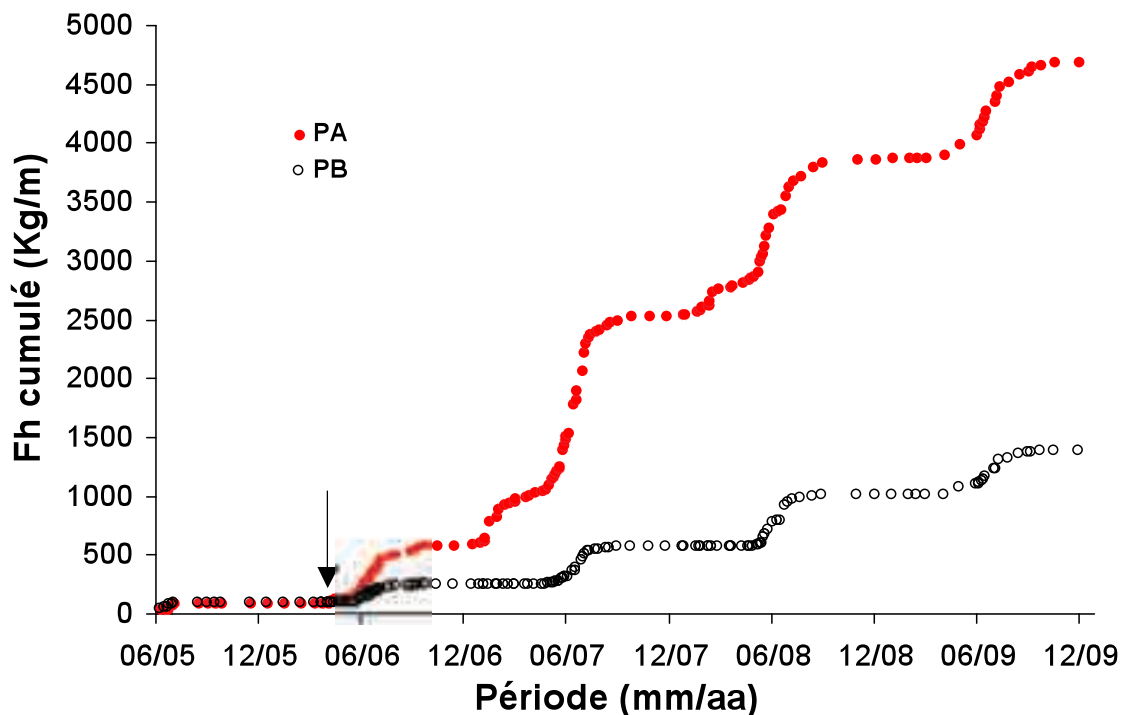


Figure 3 : Flux horizontaux moyens cumulés sur PA et PB entre juin 2005 à décembre 2009 (la flèche indique le début du traitement de PA lorsque la totalité de la végétation qui recouvre cette parcelle est supprimée et que sa surface est mise à nu)

Par ailleurs, au début de la saison des pluies, seuls 66 % en moyenne des flux d'érosion annuels sur PA ont été enregistrés. En effet, sur cette parcelle nue, on constate l'occurrence d'une période d'érosion en saison sèche de janvier à avril notamment en 2006, 2007 et 2008, qui n'existe pas sur PB, mais qui représente près de 25 % des flux mesurés sur la parcelle nue. Cette phase d'érosion de saison sèche sur PA a atteint une intensité moyenne

de $3,7 \text{ kg m}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2007 et 2008, comparable à celle mesurée pendant la phase d'érosion majeure en début de la saison des pluies sur PB. Cette phase d'érosion sur PA s'explique très clairement par la très faible rugosité de sa surface qui conduit à une vitesse seuil d'érosion de l'ordre de $5,6 \text{ m.s}^{-1}$, souvent inférieure aux vents maximums de cette période (Figure 2). Une telle phase d'érosion locale en période d'Harmattan a déjà été identifiée par Rajot et al (2008).

Il apparaît finalement que sur la totalité de la période de mesure après le traitement de PA, entre avril 2006 et décembre 2009, le cumul de flux atteint environ 4600 kg.m^{-1} sur PA tandis qu'il n'est que d'environ 1300 kg.m^{-1} sur PB soit 3,6 fois plus faible.

L'érosion éolienne a connu par ailleurs une dynamique pluriannuelle sur les deux parcelles. Au cours des 4 années de mesure, on note une évolution différente des flux totaux sur les mêmes périodes de mesure. Sur la parcelle PB, la valeur cumulée des flux pendant la période d'érosion du début de la saison des pluies augmente régulièrement de 2006 à 2008 avant de baisser en 2009 (tableau 1). Elle ne correspond pas à des vents plus intenses de 2006 à 2008. Une telle augmentation pluriannuelle des flux avait déjà été observée par Biolders et al (2001) qui l'expliquaient par la baisse de la protection des sols par la litière. En effet, la production de biomasse tend à diminuer sur les champs non-fumés avec la durée de leur mise en culture (Hiernaux *et al.*, 2009). A l'inverse sur la parcelle PA on note une très forte augmentation du flux la deuxième année du traitement, alors qu'il tend à diminuer les troisième et quatrième années. Cette évolution s'explique par le développement de croûtes d'érosion (Casenave et Valentin, 1992) à la surface du sol qui conduit à une limitation du stock de particules disponibles pour l'érosion. Cette limitation s'observe aussi bien pendant la saison des pluies que pendant la saison sèche (tableau 1). Durant cette dernière saison en 2009, nous n'avons d'ailleurs presque plus observé le pic d'érosion de janvier à avril. De telles limitations d'érosion par les croûtes ont été couramment décrites (Gomes *et al.*, 2003).

Tableau 1 : Cumuls du flux horizontal (Fh) sur les parcelles durant les 4 années suivant le traitement de PA, comparaison des cumuls de début de saison des pluies et de la deuxième partie de la saison sèche

Année	Fh cumulé (kg m^{-1}) du début de saison des pluies (1 mai au 15 juillet)		Fh cumulé (kg m^{-1}) de la deuxième partie de la saison sèche (1 janvier au 30 avril)	
	PA	PB	PA	PB
2006	339,72	117,70		
2007	1318,42	281,24	455,84	2,78
2008	824,77	394,19	319,51	5,71
2009	576,28	291,33	38,86	2,84

III. 3. Les dépôts éoliens sur Bangou Bi

Les mesures se sont déroulées entre novembre 2007 et novembre 2009 (figure 4). Sur une période de 736 jours, $31,02 \text{ g}$ de poussières ont été déposés dans le frisbee soit un dépôt moyen de $0,61 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$.

Les dépôts présentent cependant une dynamique saisonnière bien marquée caractérisant les saisons de la zone (figure 4, tableau 2). En effet, durant la saison sèche (novembre à avril), les dépôts ont été quasi stables sur les deux campagnes de mesures 2007-2008 et 2008-2009. Ils ont respectivement été de $0,355$ et $0,359 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ correspondant à des dépôts cumulés de $62,5$ et $66,3 \text{ g.m}^{-2}$. C'est pendant la période de la mousson (entre mai et octobre) que les dépôts ont été les plus significatifs avec des flux moyens près de 3 fois supérieurs à ceux de la saison sèche. En effet, ces dépôts qui ont été particulièrement importants en 2009 comparativement à 2008, ont atteint respectivement $0,98 \text{ g.m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ et $0,77 \text{ g.m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ en moyenne soit des dépôts cumulés de $181,6$ et de $128,7 \text{ g.m}^{-2}$. Sur l'ensemble de la période de mesure, les dépôts pendant la mousson ont ainsi représenté plus de 70 % de la masse des apports éoliens sur le lac de Bangou Bi.

Une telle périodicité des dépôts est classiquement enregistrée au Sahel (Rajot, 2001). Les ordres de grandeur mesurés ici sont tout à fait comparables à ceux obtenus par Drees et al (1993), mais atteignent le double de ceux mesurés par Herrmann (1996) et Rajot (2001). En faisant l'hypothèse d'une densité de sédiment de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$, il est possible de recalculer à partir de ces masses des épaisseurs de sédiments éoliens déposés. On obtient ainsi pour les saisons sèches 2007-2008 et 2008-2009 respectivement 24 et 25 μm d'épaisseur et pour les saisons des pluies 2008 et 2009 respectivement 53 et 73 μm .

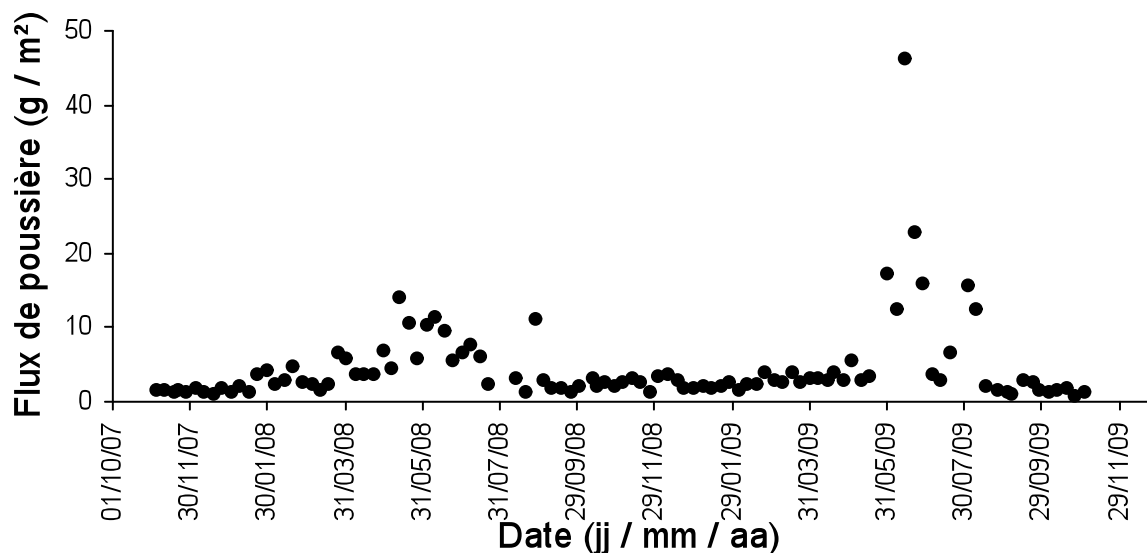


Figure 4 : Dépôts éoliens sur Bangou Bi

On constate que les différentes périodes de dépôt de poussière sur Bangou Bi coïncident avec les périodes d'érosion observées sur les surfaces cultivées et nues de Banizoumbou, à environ 50 km de Bangou Bi. Ces périodes sont en effet déterminées par la météorologie et particulièrement par les vitesses de vent (figure 2). Ainsi, durant la première partie de la saison sèche (octobre à décembre) où les vitesses maximales journalières ont été généralement en-dessous du seuil d'érosion mesuré sur les surfaces cultivées, les émissions locales de poussière ont été négligeables. Les flux de dépôts, très faibles, proviennent essentiellement de sources lointaines sahariennes (Rajot et al. 2008). Durant la seconde partie de la saison sèche, suite à une augmentation sensible des vitesses de vent (figure 2), l'érosion locale peut se produire sur les surfaces nues et non encroûtées qui sont marginales dans le paysage. Les contributions lointaines restent sans doute majoritaires dans les flux de dépôts dont la légère augmentation s'expliquerait plus par une augmentation des concentrations moyennes de poussières dans l'atmosphère (Marticorena et al., 2010). C'est au début de la saison des pluies (mai à mi-juillet) que le maximum de dépôt a été enregistré sur Bangou Bi. On peut relier ce maximum au passage des lignes de grains. Celles-ci sont en effet caractérisées par de très fortes vitesses de vent qui produisent l'essentiel de l'érosion des surfaces cultivées (figure 3) et donc des émissions locales de poussière. En deuxième partie de saison des pluies, la baisse des dépôts est consécutive à la diminution de l'érosion de la surface des champs (figure 3). Il ressort ainsi qu'au moins 70 % des dépôts éoliens sur Bangou Bi sont d'origine locale et proviennent de l'érosion des surfaces cultivées et nues pendant la saison des pluies (mai à septembre) et plus ponctuellement de l'érosion des surfaces nues et non encroûtées au cours de la deuxième partie de saison sèche (janvier à avril) (figure 4). L'essentiel de ces dépôts, plus de 50 %, a été déposé en début de saison des pluies (figure 4, tableau 2).

Tableau 2 : période et flux moyen de dépôt de poussière

Saisons	Période	Flux de poussière (g m ⁻² jour ⁻¹)	
		2008	2009
sèche	Novembre à mi-janvier	0,20	0,33
	mi-janvier à avril	0,48	0,38
pluvieuse	Mai à juillet	1,08	1,53
	Août à octobre	0,40	0,52

Ainsi, sur l'ensemble de la période de mesure des dépôts éoliens (736 jours), au moins 26 tonnes de poussières auraient pu s'accumuler dans le lac de Bangou Bi. Ceci représenterait une épaisseur de sédiment d'environ 175 μ m. Cependant, la quantité de sédiment réellement déposée dans le lac pourrait bien être supérieure à celle déposée dans le frisbee. En effet, l'efficacité de collecte du frisbee est particulièrement faible aux fortes vitesses de vent lorsque les particules sont susceptibles d'être remises en suspension malgré la présence des billes. La calibration de ce collecteur (Sow *et al.*, 2006) a montré qu'il a une efficacité de l'ordre de 20 % excédant rarement 40 % pour des vitesses de vent supérieures à 2 m.s⁻¹, ce qui est le cas la région de Niamey. Ceci impliquerait que la quantité de poussière déposée sur Bangou Bi pourrait réellement atteindre alors 2 à 5 fois la quantité récoltée. La puissance cumulée des apports éoliens sur deux ans dans Bangou Bi atteindrait alors près de 1 mm. Même dans cette estimation maximale, les dépôts d'origine éolienne resteraient difficile à détecter au fond des lacs de Niamey qui ont un taux de sédimentation supérieur à 4 cm par an (Abdourhamane Touré *et al.*, 2010a). Cette détection est d'autant plus difficile que ces apports sont pour l'essentiel épisodiques et seraient donc mêlés aux dépôts d'origine hydrique.

Par ailleurs, l'essentiel de ces dépôts étant d'origine locale, il paraît impossible de les distinguer des dépôts liés à l'érosion hydrique locale des sols. Seuls les dépôts de saison sèche d'origine lointaine et souvent plus riche en nutriments (en particulier en carbonate de calcium) (Rajot *et al.* 2008, Herrmann 1996, Beavington and Cawse, 1979; Herut and Krom, 1996; Sterk *et al.*, 1996) pourraient tout de même jouer un rôle dans l'écologie de la région de Niamey et de Bangou Bi en modifiant la composition chimique des milieux de dépôt et affecter du coup la production biologique.

IV. Conclusion

Les lacs et mares de la région de Niamey sont en voie d'ensablement du fait d'une importante modification environnementale et d'une forte pression anthropique sur le milieu. Les sols sableux cultivés qui couvrent l'essentiel de leurs bassins versants sont particulièrement soumis à l'érosion éolienne. Cependant, les dépôts de sédiments issus directement de l'érosion éolienne locale ou lointaine des sols ne représentent au maximum que 500 μ m d'épaisseur par an. Ils restent donc négligeables dans le comblement de Bangou Bi et des lacs de Niamey à fort taux de sédimentation (plus de 4 cm par an) dû à l'érosion hydrique des sols. Il faut noter que l'érosion éolienne joue sans doute un rôle important dans le déclenchement de l'érosion hydrique et donc indirectement dans le comblement des points d'eau (Abdourhamane Touré *et al.*, 2010a). Ces dépôts éoliens pourraient aussi jouer un rôle dans l'écologie des zones de sédimentation. Ces poussières sont en effet des sources de nutriments qui pourraient modifier la composition chimique des milieux de dépôt et affecter du coup la production biologique. Enfin, du fait de leur différence de composition, ces poussières pourraient aussi servir de marqueur pour identifier les saisons sèches dans les sédiments lacustres. Cette voie de recherche est en cours d'exploration.

Références bibliographiques

- Abdourhamane Touré A., Guillon R., Petit. C., Rajot J.L., Garba Z., Bichet V., Durand A., Sebag D. 2010a. Les sédiments des lacs de la région de Niamey : mémoire de l'évolution récente (50 ans) du milieu sahélien ? (Pangea)
- Abdourhamane Touré A, Rajot J.L, Marticorena B, Petit. C, Garba Z. 5-9 July 2010b. Impact of low rate of crop residues on wind erosion in the Sahel. International Conference on Aeolian Research (ICAR VII), Santa Rosa, Argentina,
- Anyamba, A., Tucker, C.J., 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments* 63 (3), 596–614.
- Beavington, F., A. Cawse. P., 1979. The deposition of trace elements and major nutrients in dust and rainwater in northern Nigeria. *The Science of The Total Environment, Volume 13, Issue 3, December 1979, Pages 263-274*
- Bielders, C.L., Rajot, J.R., Amadou, M., 2002. Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel, *Geoderma*, 109, 19-39.
- Bielders, C.L., Rajot, J.R., Karlheinz, M., 2004. L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte. *Sécheresse*, 15, 19-32.
- Buerkert, B., Allison, B.E., Von Oppen, M., 1996. Wind erosion in Niger. Implications and control measures in millet-based farming system. Dordrecht (The Netherlands) : Kluwer Academic Publ, 40 101-10
- Casenave, A., Valentin, C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of west Africa. *J. Hydrol.* 130, 231-249.
- Collinet, J., Valentin, C., 1985. Evaluation of factors influencing water erosion in West Africa using rainfall simulation. *Challenges in African Hydrology and Water Resources. IAHS Publication 144*, 451–461.
- Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J-C., Albergel J, Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhiou A., Le Breton E., Mamadou I, Sighomnou D., 2009. Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology* 375, 90–102.
- Drees, L.R., Manu, A., Wilding, L.P., 1993. Characteristics of Aeolian dusts in Niger, West Africa. *Geoderma*, 59, 213-233.
- Fryrear, D.W., 1986. A field dust sampler. - *J. Soil Water Conserv.* 41: 117-120.
- Gomes L., Rajot, J.L., Alfaro, S.C., Gaudichet, A., 2003. Validation of a Dust Production Model from measurements performed in Spain and Niger, *Catena*, 52, 3-4, 257-271.
- Herrmann, L., 1996. Staubdeposition auf böden West Afrikas, Eigenschaften und Herkunftgebiete der stäube und ihr Einflub auf Boden und Tandortseigenschaften. Phd dissertation. Hohenheim Bodenkundliche Hefter 36. University of Hohenheim, Stuttgart, Germany, 239pp.
- Herut, B; Krom, MD (1996) Atmospheric input of nutrients and dust to the SE Mediterranean, In: (Ed) *The impact of desert dust across the Mediterranean*, Environmental Science and Technology Library, 11, Kluwer Academic Publishers, 349-358.
- Hiernaux, P., Diarra, L., Trichon, V., Mougin, E., Soumaguel, N., Baup, F., 2009. Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). *Journal of Hydrology* 375, 103-113.
- Herrmann, S.M., Anyamba, A., Tucker, C.J., 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change* 15, 394–404.
- Leblanc M., Favreau G., Massuel S., Tweed S., Loireau M., Cappelaere B. (2007) - Land clearance and hydrology change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61 (2008), 135 – 150.
- Le Breton E. (2005). Ensablement des bas-fonds sahélien : étude des transferts sédimentaires au fleuve Niger dans le secteur moyen Niger –Mali ; Niger ; Bénin, DEA de géomorphologie de l'université Paris 7-Denis – Diderot, 74p.
- Leduc, C., Favreau, G., Shroeter, P., 2001. Long term rise in a Sahelian water-table: the continental terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology* 243, 43–54.
- Loireau, M., 1998. Espaces, ressources, usages: spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. PhD thesis, Montpellier III University, France.
- Marticorena, B., Chatenet, B., Rajot, J. L., Traoré, S., Coulibaly, M., Diallo, A., Koné, I., Maman, A., NDiaye, T., and Zakou, A., 2010. Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa: analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian Dust Transect, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10, 8051-8101.
- Michels, K., Sivakumar, M.V.K., Allison, B.E., 1995. Wind erosion control using crop residue I. Effects on soil flux and soil properties. *Field Crops Research* 40, 101-110.
- Rajot, J. L., 2001. Wind blown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger, *Bull. Soc. Geol. France*, 5, 523-531.
- Rajot, J.L., Alfaro, S.C., Gomes, L., Gaudichet, A., 2003. Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion, *Catena*, 53:1-16
- Rajot, J.L., Formenti P., Alfaro S., Desboeufs, K., Chevaillier S., Chatenet, B., Gaudichet, A., Journet, E., Marticorena, B., Triquet, S., Maman A., Mouget N., Zakou A., 2008. AMMA dust experiment: An overview of measurements performed during the dry season special observation period (SOP 0) at the Banizoumbou (Niger) supersite. *J. Geophys. Res.* 113, D00C14, doi:10.1029/2008JD009906.

- Rajot, J.L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O., Thiébaux, J.P., 2009. Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel : cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Sécheresse* 20, 17-30.
- Raynaut C. 2001 - Societies and nature in the Sahel : ecological diversity and social dynamics. *Global Environmental Change*, 11, 9-18
- Ringrose, S., Matheson, W., 1992. The use of Landsat MSS imagery to determine the aerial extent of woody vegetation cover change in the west-central Sahel. *Global Ecology and Biogeography Letters* 2, 16–25.
- Roussel, B., 1999. Déforestation des bas-fonds sahélo-soudaniens du Niger central : de la « brousse noire » aux cultures maraîchères. *Autrepart* (9), 17-32
- Sow, M., Alfaro, S., Rajot, J.L., Marticoréna, B., 2009. Size resolved dust emission fluxes measured in Niger during 3 dust storms of the AMMA experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 3881–3891
- Sow, M., Goossens, D., Rajot, J.L., 2006. Calibration of the MDCO dust collector and of four versions of the inverted frisbee dust deposition sampler. *Geomorphology, Volume 82, Issues 3-4, 15 December 2006, Pages 360-375.*
- Sterk, G., L. Hermann, and A. Bationo. 1996. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land control. Proc. Intern. Symp., Univ. Hohenheim, Stuttgart, Ger- Degrad. Dev. 7:325–335.*
- Tidjani, A.D., 2008. Erosion éolienne dans le Damagram Est (sud-est du Niger) Paramétrisation, quantification et moyens de lutte. Thèse de doctorat s sciences. Université catholique de Louvain, 1-171p
- Wiggs, G.F.S., Leys, J., McTainsh, G.H., Heidenrich, S., Strong, C., 2002. A wind tunnel study of the collection efficiency of an aerodynamically improved “Frisbee” dust trap. *Proc. ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference, Int. Center for Arid and Semiarid Land Studies, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA, Publ. 02-2, pp. 133–141.*