

Réhabilitation d'une dune vive par fixation mécanique : flux éoliens, fertilité du sol et biodiversité des herbacées

Dune rehabilitation using a mechanical fixation technique: aeolian sediment fluxes, soil fertility and biodiversity of the herbaceous vegetation

TIDJANI, A. D. ^{1/2}; AMBOUTA, K. J-M.¹ & BIELDERS, C-L ²

Abstract: In Niger, dune fixation techniques usually combine mechanical and biological measures. Mostly empirical, the implementation of these measures has so far not been monitored in terms of reduction of aeolian sediment fluxes and restoration of soil and vegetation. The purpose of this work was therefore to assess the effectiveness of a physical wind barrier on the flux of sediments, soil fertility and grass cover. The experimental setup, 200 m long and 40 m wide, was installed on a bare dune and fenced-off. It is divided into 40 plots of 20 x 10 m, bounded by fences of *Leptadenia pyrotechnica*. Aeolian sediment fluxes were measured during the Harmattan period in 2005, 2006 and 2007 using MWAC sediment catchers aligned according 8 transects oriented parallel to the prevailing winds. A spatiotemporal monitoring allowed to assess the qualitative and quantitative impact of the wind barrier on soil fertility and herbaceous vegetation.

In 2007, the bulk of sediment flows occurred between mid-February and mid-March. In 2005, the wind barrier reduced sediment fluxes by over 98% over a distance of 10 times its height. The efficiency observed in 2006 and 2007 was almost 100%. This increased efficiency is due to recovery of the herbaceous cover within the fenced-off area. Deposits of up to 9 cm thick accumulated in one year 1 m in front of the wind barrier. Clay and silt are very poorly represented in the deposits but there is an enrichment in these two textural fractions leeward of the fence. This is accompanied by an increase in the level of C and N. At the end of the rainy season, there were 13 species of grass in 2005, 29 species in 2006 and 59 species in 2007, allocated respectively to 8, 18 and 20 families. The Meinhinick specificity index rose from 3.6 in 2005 to 6.8 in 2007. Biomass is at its maximum immediately downwind of the wind barrier, where it reached 200 g / m². This likely contributed to the enrichment in C and N of the soil. The results of the dune fixation with palisades of *Leptadenia* suggests a rapid restoration of the environment but the sustainability of this restoration will require further thinking about the optimal management of rehabilitated areas.

Key words: Wind erosion, windbreak, sediment catcher, sediments flux, herbaceous species, biodiversity.

Résumé: Au Niger, la fixation de dunes combine généralement des techniques mécaniques et biologiques. Largement empirique, la mise en place de ces mesures n'a, à ce jour, pas fait l'objet d'un suivi en termes de réduction des flux éoliens et de restauration des sols et de la végétation. Le but de ce travail était dès lors d'évaluer l'efficacité d'une barrière physique antiérosive sur les flux de sédiments éoliens, la fertilité du sol et la couverture herbacée naturelle. Le dispositif expérimental, long de 200 m et large de 40 m est installé sur une dune vive et mis en défens. Il est subdivisé en 40 parcelles de 20 m x 10 m de large délimitées par des palissades de *Leptadenia pyrotechnica*. Les mesures de flux de sédiments ont été effectuées durant la période d'harmattan en 2005, 2006 et 2007 à l'aide de capteurs de sédiments de type MWAC alignés selon 8 transects orientés parallèlement aux vents dominants. Un suivi spatiotemporel a permis d'évaluer l'impact qualitatif et quantitatif du brise-vent, la fertilité du sol et la végétation herbacée.

¹Département de Science du sol, Faculté d'agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, BP 10960, Niamey, Niger. didiarta@yahoo.fr ; ambouta.karimou@yahoo.fr

²Unité de Génie rural, Département des sciences du milieu et de l'aménagement du territoire, Université catholique de Louvain, Croix du sud 2, boîte 2, B-1348, Louvain-la-Neuve, Belgique. charles.biielders@uclouvain.be

En 2007, l'essentiel des flux de sédiment s'est produit entre mi-février et mi-mars. En 2005, la première palissade a réduit de plus de 98 % les flux éoliens sur une distance de 10 fois sa hauteur. L'efficacité observée en 2006 et 2007 était pratiquement de 100 %. Cette efficacité accrue est attribuable au retour des herbacées au sein de la zone mise en défens. L'efficacité des palissades antiérosives se traduit par des dépôts de sédiments pouvant atteindre 9 cm d'épaisseur en un an à 1 m au vent de palissades. Les argiles et les limons sont très faiblement représentés dans les dépôts mais on observe un enrichissement en ces deux fractions texturales sous le vent de la palissade. Ceci s'accompagne d'un accroissement de la teneur en C et N. En fin de saison des pluies, on a dénombré 13 espèces d'herbacées en 2005, 29 espèces en 2006 et 59 espèces en 2007, réparties respectivement en 8, 18 et 20 familles. L'indice de spécificité est passé de 3,6 en 2005 à 6,8 en 2007. La biomasse herbacée sèche est maximale immédiatement sous le vent des palissades exposées à l'harmattan et à la mousson, où elle atteint 200 g/m². Ceci contribue vraisemblablement à l'enrichissement en C et N du sol. La fixation de dunes avec des palissades de *Leptadenia* laisse entrevoir une restauration rapide du milieu mais la pérennisation de cette restauration nécessitera une réflexion quant à la gestion optimale des espaces réhabilités.

Mots clés : Erosion éolienne, brise-vent, capteur de sable, flux de sédiments, espèces herbacées, biodiversité.

INTRODUCTION

Phénomène d'envergure mondiale, la désertification menace un tiers de la superficie des terres émergées et touche plus de 250 millions de personnes dans le monde. On lui impute d'être responsable chaque année de la disparition de 24 milliards de tonnes de terres fertiles (MIDDLETON & THOMAS, 1997). Trente pour cent des terres fortement dégradées du monde se trouvent au Sahel, l'érosion éolienne contribuant pour une part importante dans ces pertes en terre. L'accroissement progressif des teneurs en poussières de l'atmosphère au Sahel reflète la progression de la dégradation des terres (OZER, 2001).

Le Niger, pays semi-aride situé au centre du Sahel, est touché de plein fouet par la désertification (CNEDD, 2005). La prédominance des sols sableux y accroît les risques de dégradation de l'environnement. Dans la région du Manga (Départements de Gouré et de Mainé Soroa), caractérisée par des paysages à faciès dunaire aux interdunes occupées par des cuvettes oasiennes et des vallées à fort potentiel agro-pastoral, la désertification se manifeste par le remplacement de la végétation arborée par des arbustes et une recrudescence de l'activité éolienne, rendue apparente par la remise en mouvement de dépôts éoliens datant du Quaternaire et l'apparition de dunes vives (KARIMOUNE, 1994; JAHIEL, 1998; TIDJANI, A.A./ 2006). Ainsi la superficie occupée par des dunes vives est passée de 70 ha en 1975 à 58762 ha en 1985 puis 304965 ha en 2005 (TOUDJANI & GUERO, 2006). L'essentiel de ces dunes sont localisées à proximité des villages et des cuvettes, où la pression anthropique est la plus forte.

De nombreuses techniques de lutte antiérosive ont été développées et mises au point pour lutter contre l'érosion éolienne, en fonction du type de sol, des moyens disponibles et de l'objectif visé (TIBKE, 1988). Les recherches effectuées au Niger se sont principalement focalisées sur la gestion des terres cultivées au travers du billonnage, du *mulching* et des brise-vent pour réduire la vitesse du vent à la surface du sol et/ou augmenter la vitesse seuil d'érosion éolienne (BIELDERS *et al.*, 2004). En ce qui concerne la fixation de dunes, les techniques les plus couramment utilisées font appel aux brise-vent, représentés essentiellement par les haies vives et les haies mortes. Ces dernières permettent la réduction de la vitesse du vent près de la surface du sol et de ce fait réduisent ou annulent les flux éoliens. Les haies vives sont généralement constituées de bandes de végétation naturelle ou de plantations d'herbacées pérennes, d'arbres ou d'arbustes (BIELDERS *et al.*, 2004) alors que les haies mortes sont faites de branchages.

L'efficacité au vent et sous le vent des barrières antiérosives est fonction de leur nature, de leur porosité et de leur hauteur (H) (VAN EIMERN *et al.*, 1964). Leur épaisseur conditionne leur perméabilité à l'air : plus elles sont épaisses, moins elles sont perméables. Sur des

distances de 2H au vent et de 4H sous le vent, une barrière antiérosive de faible porosité est plus efficace en termes de réduction de la vitesse du vent que celle qui a une porosité plus importante. Une trop faible porosité peut cependant accentuer les turbulences à proximité de la structure. A partir d'une distance de 4H sous le vent, la barrière la plus poreuse devient plus efficace (GUYOT, 1977).

La limite de la zone de protection est conventionnellement définie comme étant la distance sur laquelle la vitesse du vent est réduite de plus de 20 %. ROOSE (1994) indique une réduction de plus de 20 % de la vitesse du vent sur respectivement 10 à 12 fois la hauteur de l'édifice en amont et en aval. Selon SKIDMORE & HAGEN (1977), un brise-vent de 40 % de porosité réduit l'érosion éolienne de 50 % sur une distance de 6H au vent et de 22H sous le vent. Les mesures de terrain effectuées au Niger indiquent cependant une moindre efficacité. En effet, des brise-vent hauts de 2 m ont permis de réduire les flux éoliens de 47 à 77 % (*Bauhinia rufescens*) et de 6 à 55 % (*Andropogon gayanus*) sur une distance de 5 fois la hauteur des brise-vent par rapport à un témoin sans barrière antiérosive (MICHELS *et al.*, 1998). A une distance de 7.5 fois la hauteur du brise-vent, l'effet sur les flux éoliens n'était plus significatif. Une strate herbacée large de 5 m composée de *Galago senegalensis* et d'*Andropogon gayannus* a permis de réduire les flux de sédiments éoliens de 53 et 70 % pour des écartements entre les bandes de 20 et 6 m, respectivement, par rapport à un témoin sans brise-vent (BANZHAF *et al.*, 1992). En plus de passer au-dessus ou au travers d'une barrière antiérosive, le vent peut aussi le contourner par ses extrémités. La longueur minimale de celle-ci pour réduire les effets du contournement doit être au moins égale à 11,5H (GUYOT, 1977). La topographie du site influence aussi la longueur de protection des brise-vent. Une pente descendante dans le sens du vent confère une zone protégée sous le vent plus longue qu'une pente ascendante. La flexibilité du matériau de ces types d'ouvrage entraîne une plus grande dissipation de l'énergie et offre par conséquent une meilleure protection (GUYOT, 1977).

En plus de réduire la vitesse du vent, les brise-vent améliorent les conditions agroclimatiques par la réduction de l'évapotranspiration et des dégâts mécaniques par abrasion sur la végétation. Les dépôts de sédiments éoliens améliorent la fertilité du sol dans les zones de dépôts. En Chine, une fixation de dune suivie d'une mise en défens vieille de 46 ans sur les rives du Fleuve Jaune a permis une recolonisation végétale très variée (ligneux, herbacées, algues, mousses ; LI *et al.*, 2004). La vitesse du vent comparée à une zone témoin y est réduite de 54 %. La teneur en matière organique est passée de 0,06 % à 1,34 % et les teneurs en nutriments se sont aussi accrues. Ces exemples montrent entre autres la capacité des sites dégradés par l'activité éolienne à se restaurer moyennant une réduction de la vitesse du vent et une suppression de la pression anthropique.

Dans la vallée du fleuve Niger et dans les systèmes dunaires de l'Ader-Doutchi-Maggia et du Manga, la principale technique utilisée pour fixer les dunes vives et pallier ainsi au déplacement de sable tout en restaurant le potentiel écologique consiste en l'association de procédés mécaniques (mise en place de clayonnages à base de branchages) et biologiques (plantation d'arbres et semis d'herbacées). Dans le Damagaram Est (sud-est du Niger), c'est surtout le clayonnage à base de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* et parfois de rachis d'*Hyphaene thebaïca* qui est utilisé pour fixer mécaniquement les dunes. Ce type de technique a montré son efficacité en Chine en terme de restauration de la fertilité du sol et réduction de l'érosion éolienne (QIU *et al.*, 2004). Au Niger, l'évaluation de l'efficacité des haies mortes dans un contexte de réduction de l'érosion éolienne et de restauration de l'écologie du milieu n'est qu'empirique. A ce jour, il ne semble pas y avoir eu d'études quantifiant l'impact des méthodes de fixation physique des dunes vives dans cet environnement, en terme de réduction des flux de sables, de recolonisation du sol par le couvert végétal et de restauration de la fertilité du sol. Le principal objectif de ce travail est donc l'évaluation de l'impact des techniques de fixation mécanique sur les flux éoliens de particules, les propriétés physico-chimiques du sol et l'évolution qualitative et quantitative de la couverture herbacée en milieu sahélien.

MATERIEL ET METHODES

Localisation

Le site expérimental est une dune vive localisée à Tchago (23 km au nord-ouest de Gouré ; voir figure 1 dans TIDJANI *et al.* (2010) entre les longitudes 10°03'39" et 10°04'06" Est et les latitudes 14°02'30" et 14°02'52" Nord, longue de 240 m (NNW-SSE) et large d'environ 100 m (ENE-WSW). La pluie et le vent sont mesurés respectivement à l'aide d'un pluviomètre installé à 1,5 m de hauteur et d'une girouette et d'un anémomètre installés à 2 m de hauteur.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental installé en juillet 2004 est long de 200 m et large de 40 m, orienté perpendiculairement aux vents dominants de saison sèche froide (harmattan). Il est subdivisé en 40 parcelles de 20 m de long et 10 m de large (figure 1). Sur les 40 parcelles, 6 font office de témoins (zone fixée avec un couvert végétal naturel à l'extrémité SSE de la dune) et 4 sont considérées comme zone de transition entre dune fixée et dune mobile. Les 30 autres parcelles (extrémité NNO) sont localisées sur une partie complètement dégradée, sans aucune végétation. L'ensemble des parcelles est délimité par une palissade.

Des branchages de *Leptadenia pyrotechnica* ont été utilisés pour la réalisation des brise-vent. La hauteur moyenne des palissades est de 1,8 m et la porosité moyenne lors de sa mise en place estimée à partir de 30 mesures est de $9\pm 7\%$. Deux ans après leur installation, une mesure de renforcement des palissades par des branchages d'épineux de *Balanites aegyptica* et d'*Acacia raddiana* a ramené la porosité à $5,8\pm 3,5\%$. A la date du 23 septembre 2006, la hauteur de la palissade périmétrale était de $1,5\pm 0,3$ m. Cette réduction de la hauteur est due à la dégradation physique et à la décomposition des branchages de *Leptadenia pyrotechnica* d'une part, et d'autre part à l'accumulation de sédiments au pied de la palissade.

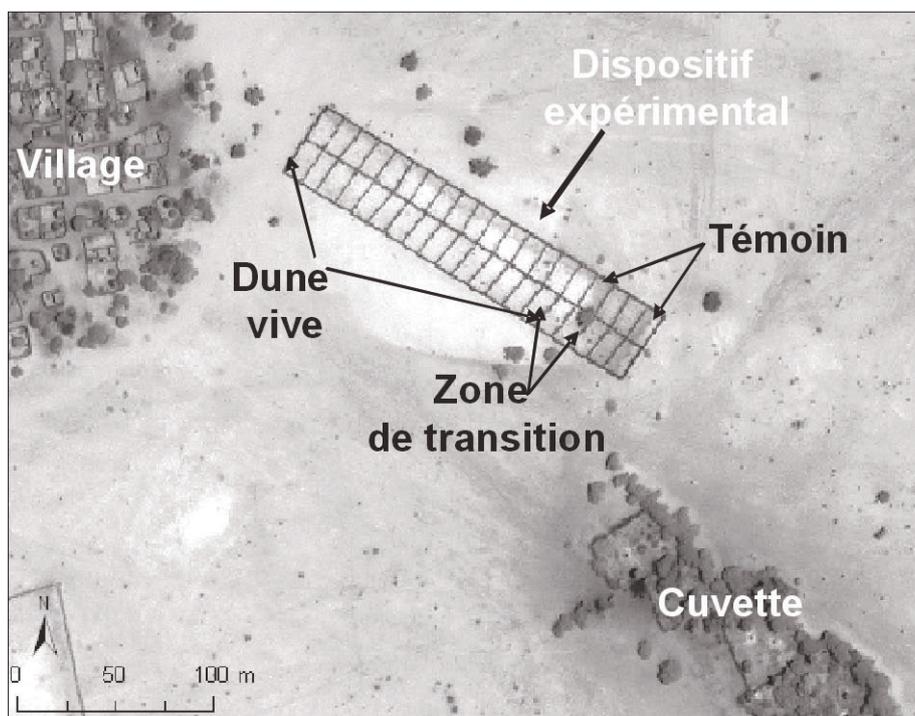


Figure 1: Dispositif antiérosif sur la dune vive de Tchago (Image Ikonos, 25 juillet 2005).

Mesure des flux de sédiments

Les capteurs de sédiments utilisés sont de type MWAC « Modified Wilson And Cooke ». Les capteurs sont alignés le long de 8 transects situés dans la partie vive de la dune. Les 8 transects sont distants de 10 m et orientés transversalement par rapport à la dune, donc parallèlement aux vents d'harmattan. Sur chaque transect, un MWAC est placé à 3 m sur le côté au vent et à 2 m, 5 m, 9 m et 18 m sous le vent par rapport à la première palissade (figures 2 et 3).



Figure2: Capteurs de sédiments (MWAC) installés à 3 m au vent par rapport à la première palissade de *Leptadenia pyrotechnica* sur la dune vive de Tchago.

En 2005 et 2006, les mesures ont été réalisées entre le 15 février et le 15 mars, alors qu'en 2007 les mesures ont été faites entre le 15 novembre et le 15 mars. L'équation de type puissance modifiée (équation 1) est utilisée pour le calcul de la densité de flux.

$$q(z) = q_0 \left(\frac{z}{\sigma} + 1 \right)^p \quad (\text{Équation 1})$$

avec q et q_0 ($\text{kg m}^{-2} \text{ épisode}^{-1}$), la densité de flux de masse à une hauteur $Z = Z$ et $Z = 0$, respectivement ; p (adimensionnel, $p < 0$) et σ (m), des coefficients; Z (m), la hauteur en m. STERK & RAATS (1996) estiment que $\sigma = 1$ m. Par la suite, la densité de flux sera exprimée en kg m^{-2} , s'agissant de la densité de flux sur l'ensemble de la durée d'un événement érosif.

L'intégration de l'équation 1 sur la hauteur de mesure (0,6 m en 2005 et 1 m en 2004 et 2006) donne la valeur du flux de masse Q (kg/m) sur la durée d'un événement. Cette variable correspond au flux de sable en saltation et en suspension entre la surface et 1 m (ou 0,6 m) de hauteur par unité de largeur perpendiculaire à la direction du vent sur la durée d'un événement. Le flux éolien capté est corrigé par l'efficacité du capteur qui est de 0,49. Pour plus de détails concernant la détermination des flux éoliens, voir TIDJANI *et al.* (2009), dans ce même numéro.

Mesures de la topographie

Les flux éoliens captés par les MWAC sous-estiment les flux annuels totaux de sédiments du fait qu'ils ne sont installés qu'en saison sèche. Pour quantifier les flux de sédiments sur toute l'année, la méthode topographique est utilisée. Elle consiste à suivre l'évolution temporelle de la topographie de la dune en des points fixes soigneusement repérés (BUERKERT & LAMERS, 1999). Connaissant la densité apparente du sol sableux, les variations de la topographie pourront être converties en masse de terre déposée ou érodée. Sur huit transects (les mêmes que ceux des capteurs), des piquets sont placés à 4 et 1 m au vent de la palissade et à 1, 4, 9 et 17 m sous le vent de la palissade pour le suivi de la variation temporelle de la topographie. Les mesures sont répétées chaque mois entre juin 2005 et juin 2006. En mars 2007, nous avons également procédé au levé topographique en travers de la dune vive avec une mire et un niveau suivant les mêmes transects que ceux des piquets et des capteurs.

Mesures des caractéristiques physico-chimiques du sol et des sédiments éoliens

Pour évaluer l'effet des brise-vent sur les propriétés physico-chimiques du sol, des échantillons de sol (0-10 cm) ont été prélevés selon les mêmes transects que ceux des piquets en avril 2005 et 2006. Les échantillons sont prélevés à 9, 4 et 1 m au vent de la palissade et à 1,

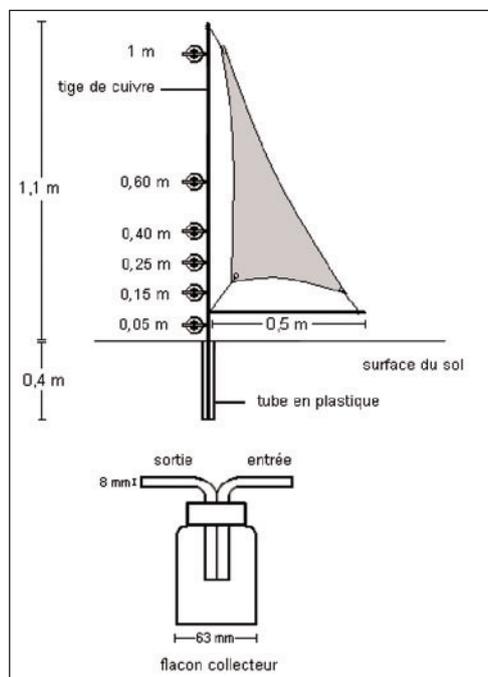
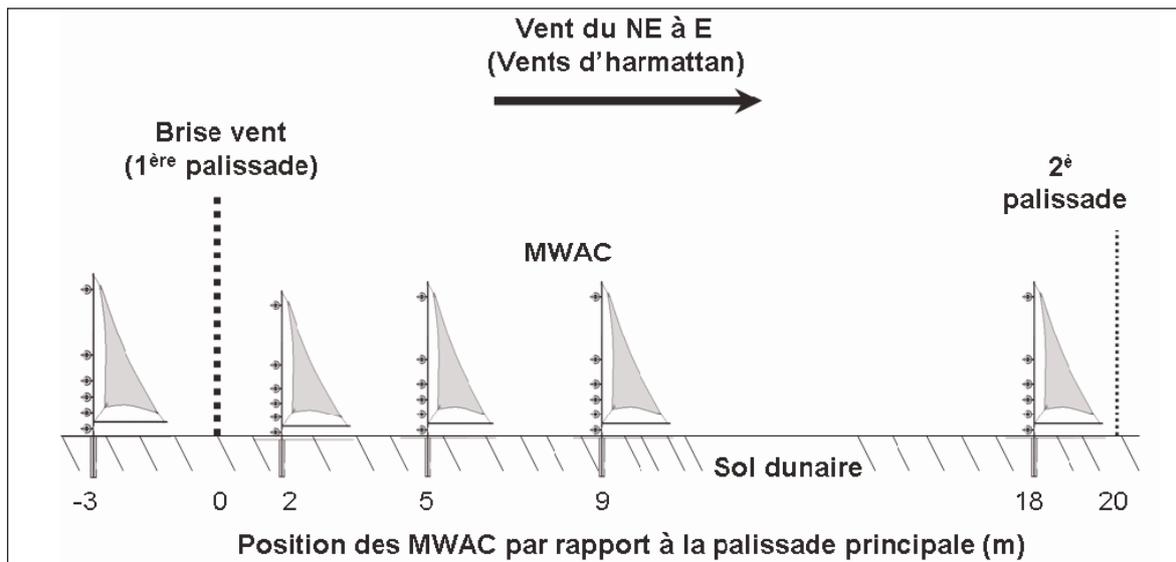


Figure 3: Schéma de détail d'un MWAC et de l'emplacement des capteurs sur un transect à travers une parcelle du dispositif antiérosif de Tchago.

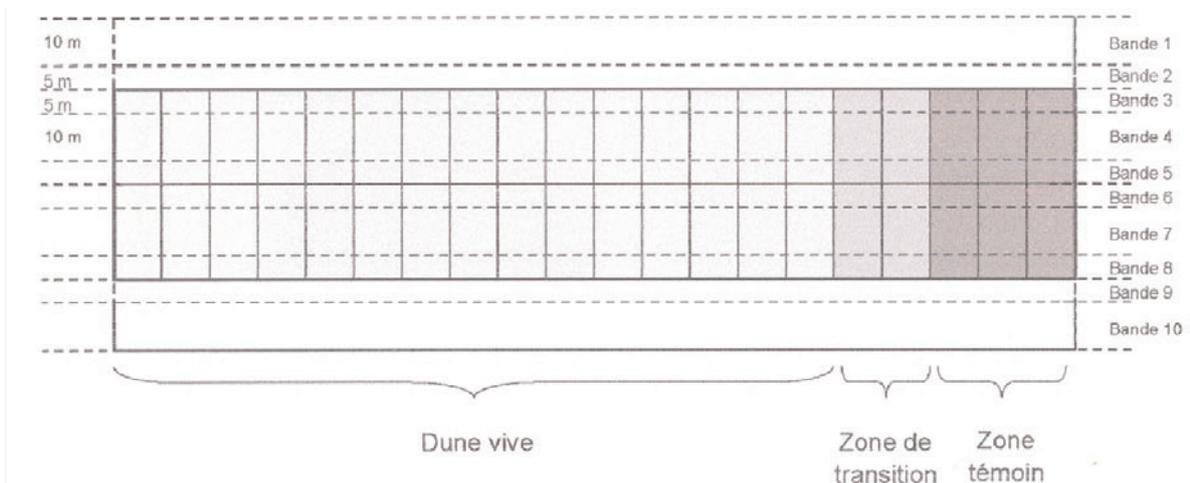


Figure 4: Délimitation des zones d'échantillonnage pour l'étude qualitative et quantitative des herbacées sur la dune vive de Tchago. La zone grisée représente le dispositif de fixation de la dune vive.

4, 9 et 17 m sous le vent de celle-ci. L'ensemble du contenu des capteurs des 8 mats situés à 3 m au vent de la première palissade est regroupé en un seul échantillon composite pour analyse. La granulométrie (méthode humide) pour les classes 0-2 μm , 2-50 μm , 50-200 μm et 200-2000 μm ainsi que les teneurs en phosphore assimilable, azote total et carbone organique total (Flash EA 1112 Séries) ont été déterminées pour tous les échantillons.

Caractérisation de la végétation herbacée

Le développement de la végétation herbacée a été suivi en 2005, 2006 et 2007. L'inventaire de la végétation herbacée s'est fait selon dix bandes orientées parallèlement à la grande longueur de la dune vive, en commençant à 15 m au vent de la palissade exposée au vent d'harmattan (figure 4). Une onzième zone correspond à une partie 'témoin' non dégradée de la dune mise en défens. La zone de transition se trouvant entre le secteur dégradé et la zone témoin n'a pas été inventoriée.

Au niveau de chacune des bandes un recensement systématique de toutes les espèces d'herbacées a été réalisé en 2005, 2006 et 2007 en début septembre. A cette période, toutes les semences d'herbacées ont levé. L'inventaire est effectué sur le terrain en langue locale transcrit ensuite selon la nomenclature scientifique en se servant du lexique des plantes du Niger (DE FABREGUES, 1979).

Dans chaque bande, à l'intérieur d'une placette de 0,5 m² disposée aléatoirement en 10 répétitions, la totalité des espèces herbacées ont été identifiées, récoltées et pesées. Les mesures de biomasse se font à la fin de la saison des pluies quand on estime que la croissance des herbacées est arrêtée.

Le recensement des herbacées a permis de calculer au niveau de chaque zone l'indice de spécificité de Meinhinick (RAMADE, 2001) suivant l'équation 2:

$$d = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (\text{Équation 2})$$

avec d, indice de spécificité de Meinhinick, S, la richesse spécifique se traduisant par le nombre d'espèces au niveau du secteur concerné et N, le nombre total d'individus au niveau du dispositif global d'étude.

RESULTATS

Fréquence et direction du vent

Les vents observés au niveau du site expérimental montrent un régime saisonnier très net. La première saison s'observe entre novembre et mars et la seconde entre mai et septembre. Avril et octobre sont typiquement des mois de transition. Les vents de nord-est à est (Harmattan) et du sud-ouest à ouest (mousson) caractérisent respectivement ces deux périodes (figure 5).

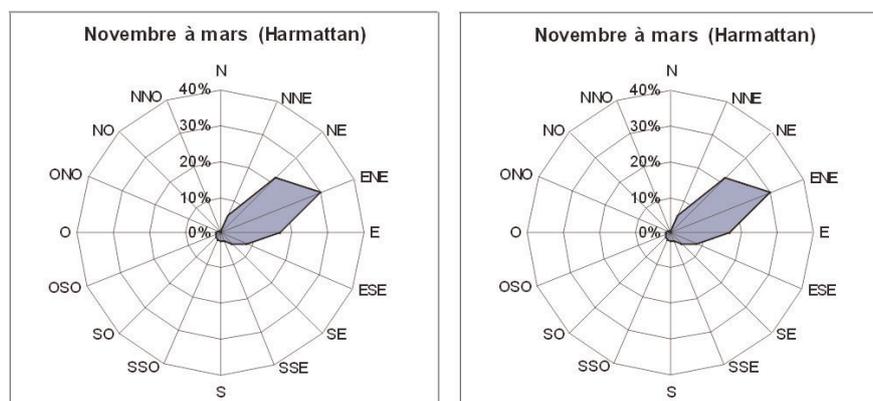


Figure 5: Roses des fréquences annuelles saisonnières des vents pour la période allant de juillet 2004 et mai 2007 à Tchago (nord-ouest de Gouré) à partir de données enregistrées chaque 15 minutes.

Le tableau 1 montre que les vents aux vitesses inférieures à 10 m/s représentent plus de 99 % des enregistrements supérieurs à 6 m/s (= vitesse seuil de saltation) entre novembre et mars (Harmattan). Les vitesses maximales des vents durant cette période atteignent parfois 15 m/s (sur 20 secondes). Entre mai et septembre (mousson), la classe des vitesses inférieures à 10 m/s reste nettement dominante mais les vents forts supérieurs à 10 m/s sont plus fréquents qu'entre novembre et mars. Il s'agit surtout des vents précédant l'arrivée des lignes de grains. Ces vents se présentent parfois avec des vitesses supérieures à 24 m/s (sur 20 secondes). Ces mêmes vents forts précédant les orages ont été aussi observés dans l'ouest du Niger (MICHELS, 1994; STERK, 1997; RAJOT, 2001). Ils n'apparaissent pas de façon marquée à la figure 5 car leur durée est très limitée.

Tableau 1: Fréquences des vitesses de vent (U) et vitesses maximales sur 10 secondes pour des vitesses supérieures ou égales à 6 m/s enregistrées avec un pas de temps d'une minute en fonction des deux régimes de vent de l'année à Tchago (2004-2007).

Classe de vitesse	Novembre à mars (Harmattan)		Mai à septembre (mousson)	
	Fréquence	Vit. max.	Fréquence	Vit. max.
	%	m/s	%	m/s
$6 \leq U < 10$ m/s	99,38	11,2	94,54	15,2
$10 \leq U < 13$ m/s	0,61	14,8	4,34	17,3
$13 \leq U < 16$ m/s	0,01	15,3	0,98	19,9
$16 \leq U < 19$ m/s	0,00	0	0,15	24,5

Flux de sédiments éoliens en 2005, en 2006 et en 2007 sur le côté au vent de la palissade

L'analyse des flux éoliens collectés à 3 m au vent de la première palissade exposée au vent d'harmattan montre une importante variation spatiotemporelle. La figure 6 montre des flux moyens collectés relativement constant en 2005 et 2006 suivis d'une chute significative en 2007. Ces flux éoliens sous-estiment vraisemblablement la réalité du fait que les capteurs se trouvent dans la zone d'influence du brise-vent.

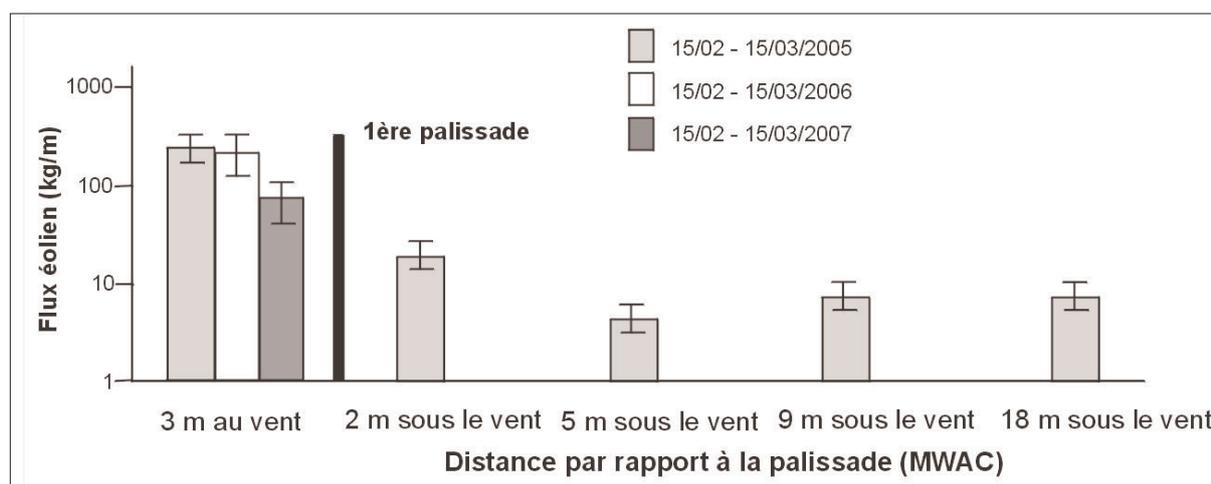


Figure 6: Variation des flux éoliens moyens en fonction de la distance par rapport à la palissade exposée au vent d'harmattan entre le 15 février et le 15 mars 2005, 2006 et 2007. Barre d'erreur = écart-type (n=8).

La figure 7 compare les flux éoliens mensuels moyens mesurés entre le 15 novembre 2006 et le 15 mars 2007 avec les flux estimés par l'équation de LETTAU & LETTAU (1978) pour un sol supposé nu. Cette équation nécessite la connaissance des vitesses de friction et de la vitesse de friction seuil. La vitesse de friction est obtenue à partir de la vitesse du vent

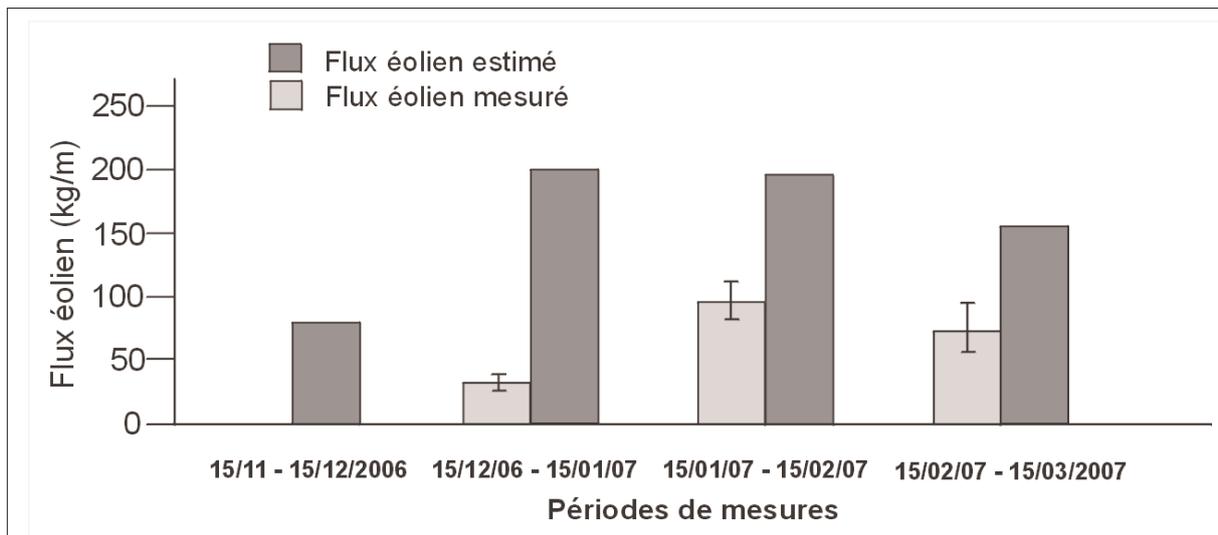


Figure 7: Variation des flux éoliens mensuels mesurés à 3 m au vent de la palissade sur la dune vive de Tchago et des flux estimés par l'équation de Lettau et Lettau (1978) pour un sol nu ($Z_0 = 10\text{-}4$ m) entre le 15 novembre 2006 et 15 mars 2007. Barre d'erreur = écart-type ($n = 8$).

mesurée à 2 m et la connaissance de la hauteur de rugosité aérodynamique Z_0 . Celle-ci a été fixée à 1.10^{-4} m, correspondant à un sol très faiblement couvert. Pour ce même état de surface, la vitesse de friction seuil est de 0.26 m/s (pour plus de détails, voir TIDJANI *et al.*, dans ce même numéro). Les flux éoliens collectés au vent de la palissade sont nuls entre le 15 novembre et le 15 décembre, augmentent progressivement pour atteindre le maximum entre le 15 janvier et 15 février, pour diminuer ensuite jusqu'à la mi-mars. Les flux estimés pour ces différentes périodes par l'équation de LETTAU & LETTAU (1978) reflètent essentiellement les variations dans la force du vent. Les flux varient entre 78 et 200 kg/m sur toute la période de mesure et sont nettement supérieurs aux flux mesurés (figure 7). La faiblesse relative des flux mesurés par rapport aux flux estimés reflète l'effet de la première palissade antiérosive sur la mobilisation des flux de sédiments par le vent et d'une reprise partielle de la végétation herbacée sur le coté au vent. L'augmentation des flux mesurés entre novembre et février traduit une augmentation de la capacité de transport du vent et une dégradation progressive du couvert végétal par le pâturage à l'extérieur du dispositif de fixation. De mi-février à mi-mars, la décroissance semble être due à une diminution de la force du vent comme le montre les flux estimés par l'équation de LETTAU & LETTAU (1978).

Efficacité antiérosive de la palissade

En 2005, année de mise en place de la palissade, les flux éoliens mesurés à 2, 5, 8 et 16 m sous le vent de la première palissade représentent respectivement 5 %, 1,2 %, 1,3 % et 1,3 % par rapport aux flux mesurés à 3 m au vent (figure 6). Un an après, aucun flux mesurable n'a été observé sous le vent de la palissade.

La figure 8 montre la variation moyenne de la topographie de la dune pour la période allant du 11 novembre 2005 au 15 avril 2006. En moyenne, l'ensemble du secteur d'étude est sujet à dépôts. Les dépôts sont plus importants au vent et à proximité de la palissade. Cette situation traduit l'efficacité de la première palissade exposée au vent d'Harmattan. Des dépôts importants s'observent déjà à 3 m au vent de la palissade, ce qui démontre clairement qu'il y a déjà une réduction de la vitesse du vent à cet endroit.

En considérant que les dépôts ont une densité apparente de $1,65 \text{ t/m}^3$, on peut calculer les taux d'érosion ou de dépôts correspondants aux variations topographiques mesurées (tableau 2). Entre 4 m avant et 1 m sous le vent, les dépôts sont considérables, atteignant 151 kg/m^2 à 1 m au vent de la palissade. A 4 et 9 m sous le vent de la barrière, les dépôts sont faibles et à 17 m on observe une faible déflation.

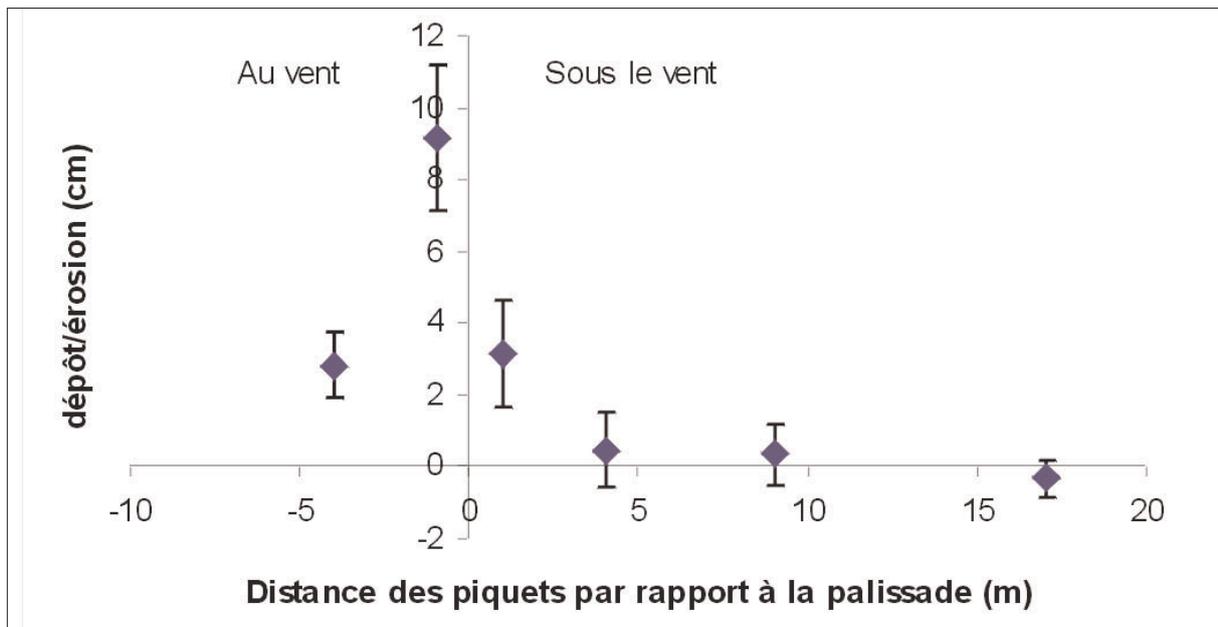


Figure 8: Variation moyenne de la topographie au vent et sous le vent de la palissade exposée au vent d'Harmattan du dispositif antiérosif sur la dune vive de Tchago pour la période allant du 11 novembre 2005 au 15 avril 2006 ; l'axe des ordonnées marque la position de la première palissade. Barre d'erreur = écart-type (n = 8).

Tableau 2: Masse de sédiments déposés ou érodés calculée à partir de la variation de la topographie entre le 11/11/2005 et 15/04/2006.

Position par rapport à la palissade exposée à l'Harmattan	Dépôt/érosion kg/m ²
4 m au vent	46
1 m au vent	151
1 m sous le vent	52
4 m sous le vent	8
9 m sous le vent	6
17 m sous le vent	-6

La figure 9 montre la topographie en travers de la dune vive en fin mars 2007 et permet d'apprécier qualitativement l'action des palissades sur les sédiments transportés par les vents d'Harmattan et de mousson. La crête au niveau de la palissade exposée aux vents d'Harmattan est plus élevée que celle directement exposée aux vents de mousson. Ces élévations de la topographie au niveau de la première et troisième palissade indiquent qu'il y a eu dépôt de sédiments de part et d'autre du dispositif antiérosif. Par contre, aucune accumulation ne s'observe au niveau de la palissade interne,

indiquant d'une part que les sédiments transportés par le vent sont intégralement déposés au niveau des palissades externes et d'autre part l'absence de remobilisation de sédiments à l'intérieur du dispositif de fixation.

Caractéristiques physico-chimiques des sédiments éoliens collectés à 3 m au vent de la palissade exposée à l'harmattan

La figure 10 montre la composition granulométrique des sédiments éoliens collectés dans les MWAC à 3 m au vent de la palissade exposée à l'Harmattan.

Les particules de diamètre supérieur à 50 μm constituent plus de 93 % de la masse des sédiments éoliens. La teneur en éléments fins ($\varnothing < 50 \mu\text{m}$) contenus dans les sédiments éoliens est faible (moins de 5%) quelle que soit la période de mesure. En 2007, les sédiments collectés avant le 15 janvier sont proportionnellement plus riches en particules fines (figure 10b). L'augmentation graduelle de la teneur relative en sable grossier au cours de la saison sèche en 2007 s'explique vraisemblablement par la disparition progressive du couvert végétal au fur et à mesure de l'avancement de la saison sèche et donc l'augmentation de la capacité de transport du vent.

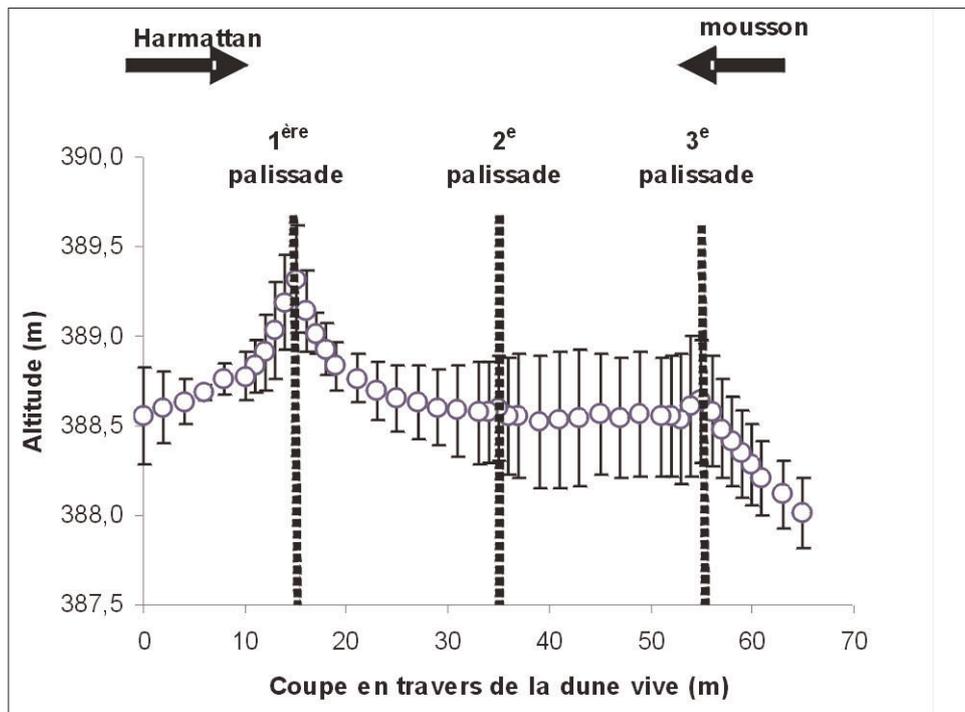


Figure 9: Topographie moyenne en travers de la dune vive en fin mars 2007. Les barres d'erreur représentent l'écart-type de 10 mesures.

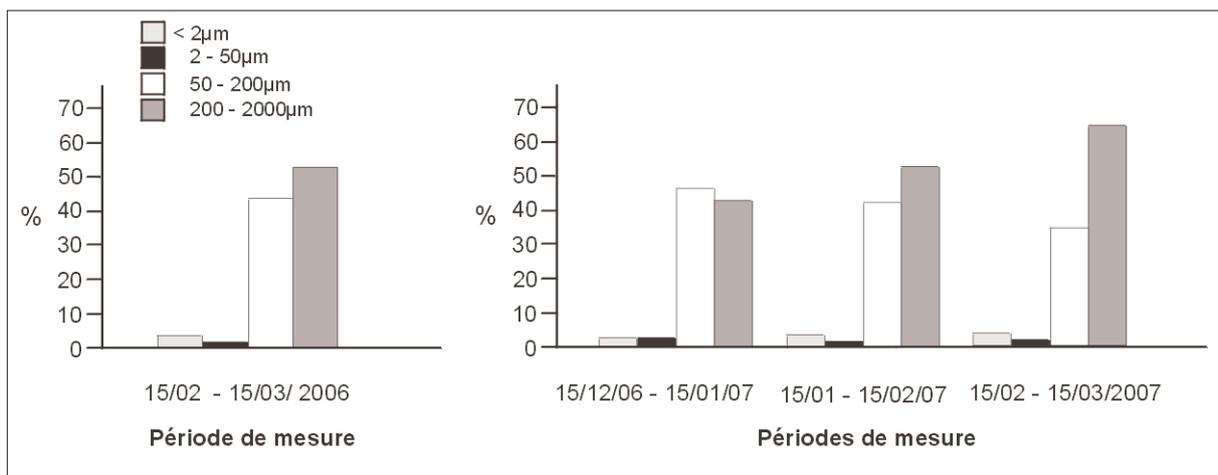


Figure 10: Analyse granulométrique des sédiments éoliens collectés entre 5 et 100 cm de hauteur à 3 m au vent de la palissade exposée à l'harmattan en 2006 (a) et 2007 (b)

La figure 11 montre la teneur en phosphore assimilable, en carbone organique total et en azote total des sédiments éoliens. Globalement les teneurs en ces éléments sont faibles. Le sol concerné est composé essentiellement de grains de quartz et est pauvre en argile et matière organique, ce qui explique les très faibles teneurs en nutriments et en carbone organique dans les sédiments. Pour la période allant de mi-février à mi-mars, les teneurs en P, N et C sont du même ordre en 2006 et 2007. Entre le 15 décembre et le 15 janvier 2007, les teneurs en ces éléments sont nettement supérieures à celle observées à partir du 15 février. Ces différences de concentrations entre les périodes de mesure s'expliquent d'une part par le fait que la vitesse du vent d'harmattan est globalement plus élevée après le 15 janvier et, d'autre part, par la diminution progressive du couvert végétal. Ces deux facteurs se conjuguent pour accroître la capacité de transport du vent et permettre ainsi de transporter des particules plus grossières (figure 10b). Avant le 15 janvier, lorsque les vents sont plus faibles et le couvert végétal plus dense, les sédiments sont donc proportionnellement plus riches en argiles et particules organiques. Le rapport C/N pour toutes les périodes considérées tourne autour de 10 et est similaire à celui du sol en place, indiquant que le carbone transporté est surtout d'origine

humique et non lié à des débris végétaux. L'évolution de la teneur en sable grossier par rapport aux sables fins en 2007 ne se traduit pas par un changement dans la composition chimique des sédiments. Ceci est logique compte tenu de la nature quartzreuse des sables.

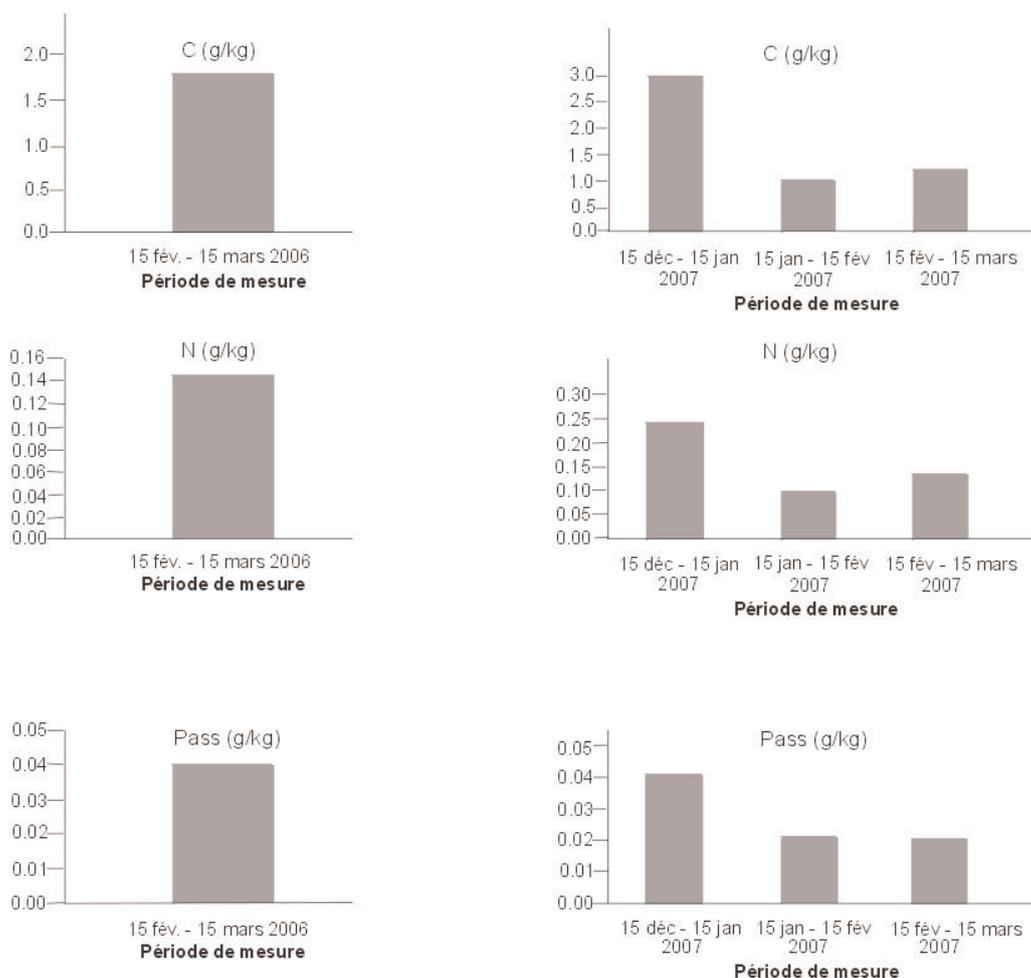


Figure 11: Analyse chimique des sédiments éoliens collectés entre 5 et 100 cm de hauteur à 3 m au vent de la palissade exposée à l'harmattan en 2006 et 2007.

Caractéristiques physico-chimiques du sol au vent et sous le vent de la première palissade

La granulométrie du sol est composée de 57,8 % de sable grossier, 38,7 % de sable fin, de 1,5 % de limon et de 2,1 % d'argile. Globalement pour les deux années et dans le secteur correspondant à 5 m au vent et sous le vent de la palissade exposée au vent d'harmattan, les teneurs en sables grossiers sont plus importantes au vent de la palissade que sous le vent alors qu'on observe le contraire au niveau des teneurs en sables fins et en argile et limons (figure 12). Cette situation s'explique par le dépôt préférentiel des sables grossiers suite à la forte réduction de la vitesse du vent au vent de la première palissade. Les sédiments arrivant de ce fait sous le vent de la première palissade sont enrichis en sables fins et en particules fines de diamètre inférieur à 50 μm (figure 12).

Les teneurs moyennes en phosphore assimilable (Pass), en carbone organique total et en azote total sont dans l'absolu, faibles (figure 13). L'évolution des teneurs en Pass au vent de la première palissade est cohérente avec l'évolution de la teneur en éléments fins de diamètre inférieur à 50 μm . Il semble donc que sur le côté au vent, ce soient avant tout les éléments fins qui conditionnent la teneur en Pass. Ceci ne s'observe pas sous le vent de la palissade, où malgré une augmentation de la teneur en éléments fins, la teneur en P est stable, voire diminue. La faiblesse des teneurs en Pass sous le vent est difficilement explicable. Ces données doivent cependant être interprétées avec prudence vu que la précision de

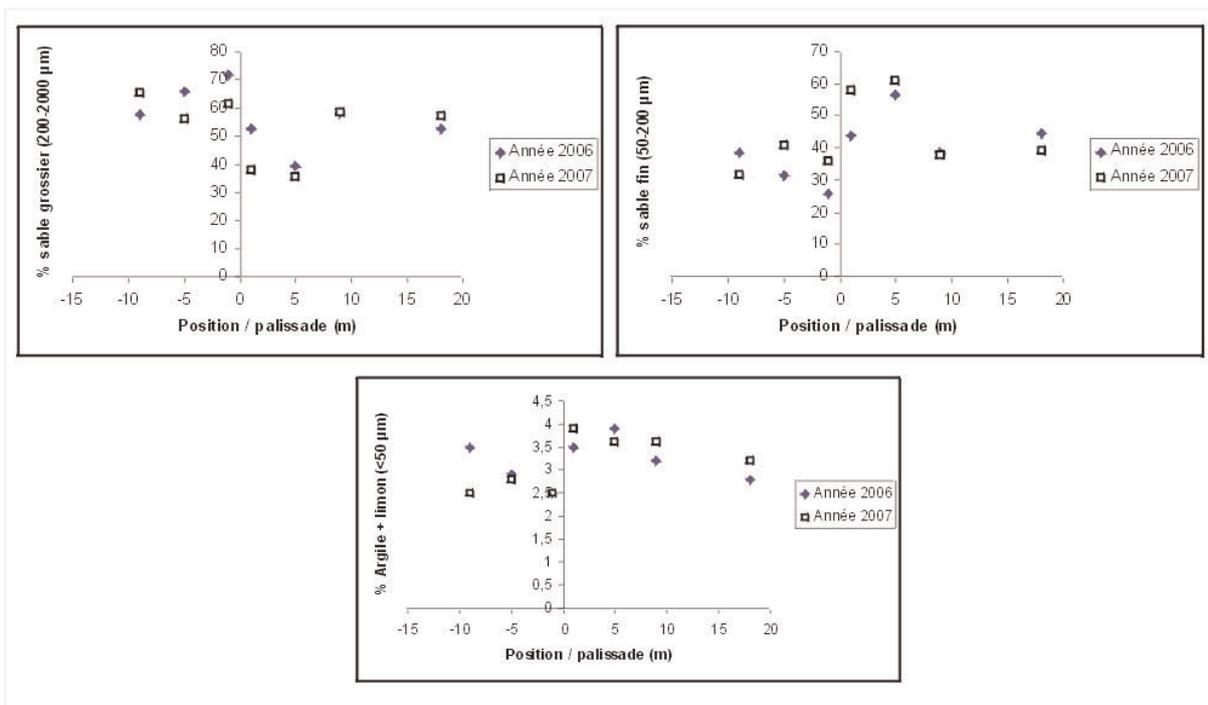


Figure 12: Granulométrie du sol (0-10 cm) de part et d'autre de la palissade exposée au vent d'harmattan.

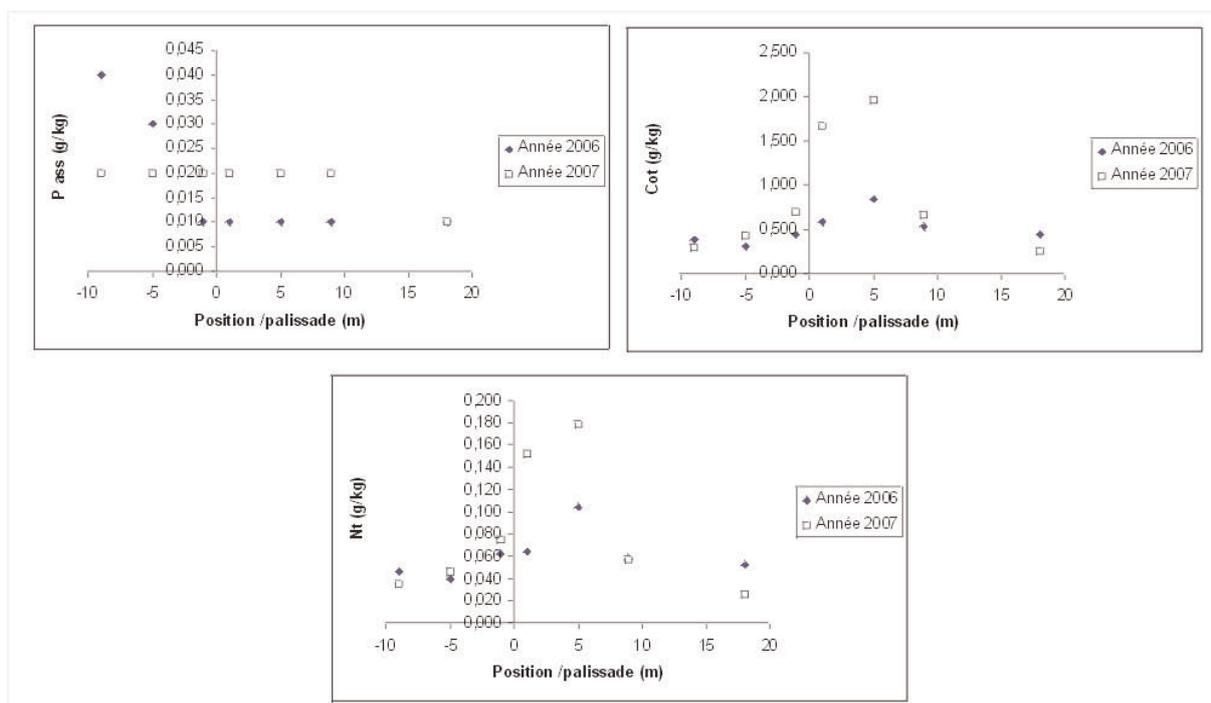


Figure 13: Teneur en azote et en carbone organique du sol(0-10 cm) de part et d'autre de la palissade exposée au vent d'harmattan.

l'instrument de mesure est de 0,01 g/kg et que par ailleurs les teneurs sont à la limite de la capacité de détection des équipements utilisés.

Qu'on soit en 2006 ou 2007, les teneurs totales en carbone organique et azote sont plus importantes sous le vent qu'au vent de la première palissade et les teneurs enregistrées en 2007 sous le vent de la palissade sont nettement supérieures à celles de 2006. L'évolution spatiale des teneurs en carbone total et en azote total sous le vent est cohérente avec l'évolution des teneurs en éléments fins de diamètre inférieur à 50 µm (figure 12). Le retour progressif de la végétation, plus accentué du côté sous le vent de la palissade, peut également expliquer une certaine augmentation de la teneur en matière organique. C'est également le

retour de la végétation herbacée qui expliquerait l'augmentation de la teneur en C et N sur le coté au vent de la palissade, malgré l'appauvrissement en éléments fins. Un enrichissement en ces deux éléments dans les environs des palissades antiérosives a été aussi observé par MICHELS *et al.* (1998) et par ELTROP *et al.* (1996). L'impact de la végétation sur le stock de C et N est plus faible à l'extérieur qu'à l'intérieur de la palissade car l'extérieur n'est pas protégé contre la pâture.

Quantification de la biomasse herbacée

En 2004, au moment de la mise en place du dispositif antiérosif, la totalité de la surface de la dune vive était nue. Dès la première année qui a suivi la mise en place du dispositif, on a observé le retour des herbacées, dont la biomasse est particulièrement élevée au niveau des zones d'accumulation des sédiments éoliens (bandes 3 et 8 ; figures 14 et 15). La meilleure croissance dans ces deux bandes s'explique vraisemblablement par le microclimat induit par la palissade (ombre, stabilisation du sol, réduction de l'effet d'abrasion dû aux flux de particules éoliennes, réduction de l'évapotranspiration par réduction de la vitesse du vent) et du potentiel fertilisant et semencier des dépôts. Si nous nous référons aux travaux de BIELDERS *et al.* (2002) et de BANZHAF *et al.* (1994), une telle production de biomasse herbacée au sein du dispositif réduirait conséquemment les flux de sédiments éoliens même en l'absence de clayonnage. Cependant, le développement d'une telle végétation n'est possible que moyennant une réduction préalable des flux de sédiments par des palissades antiérosives ou d'autres mesures physiques.

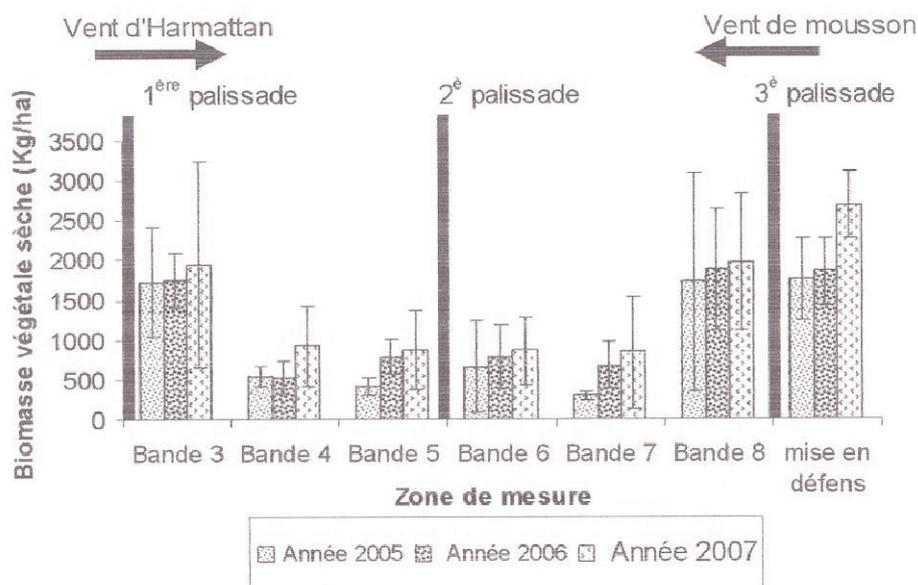


Figure 14: Variation de la production de biomasse herbacée au sein du dispositif antiérosif installé sur la dune vive de Tchago en 2004 selon la distance par rapport aux palissades. Barre d'erreur = écart-type (n=10).

On observe de légères tendances à l'augmentation de biomasse observées au sein de chaque bande suivant les années, en ce compris la zone témoin non dégradée (figures 14 et 15). Le fait que la pluviométrie cumulée annuelle en 2005, 2006 et 2007 soit respectivement de 317, 299 et 254 mm ne semble pas d'avoir d'effet sur la variation annuelle de la production de biomasse. Cette croissance pourrait traduire une restauration progressive du potentiel écologique du site : amélioration de la fertilité chimique suite à l'accumulation de sédiments fins, de C et d'éléments nutritifs, diversification des espèces végétales (voir ci-dessous), et accroissement du stock semencier. En effet, les palissades pourraient favoriser le dépôt des semences et leur germination. Au fil des ans, en plus des semences contenues dans les sédiments éoliens, les semences produites sur place viennent renforcer le potentiel semencier.

La biomasse produite par les herbes contribue elle-même à l'amélioration de la fertilité, via l'augmentation de la teneur en C (figure 13). Ces résultats doivent cependant être interprétés avec prudence vu la grande variabilité spatiale des résultats.



Figure 15: Développement de la végétation herbacée sur la dune vive de Tchago (septembre 2007). Les vents d'harmattan soufflent de droite à gauche. A l'avant plan, la zone témoin non dégradée; à l'arrière plan la dune vive. On observe clairement une meilleure croissance des herbacées sur les côtés intérieurs de palissades externes dans la zone dégradée.

Biodiversité de la végétation herbacée

Le tableau 3 montre la diversité végétale en 2005, 2006 et 2007. Les bandes internes à la palissade (bandes 3 à 8) montrent un nombre plus élevé d'herbacées comparé aux zones externes exposées directement aux vents d'harmattan (bandes 1 et 2) et de mousson (bandes 9 et 10). Au sein de la palissade, le nombre d'espèces et le nombre de familles auxquelles elles appartiennent croît considérablement d'année en année. L'indice de spécificité de Meinhinick confirme cette tendance. Il en est de même pour la zone témoin qui, bien que jugée comme étant non dégradée au départ, semble bénéficier de la mise en défens (protection contre le pâturage). Pour toutes les périodes confondues, la famille dominante est celle des graminées avec principalement *Aristida adscensionis* et *Cenchrus biflorus*.

DISCUSSION

Sur base des mesures de flux de sédiments, il apparaît que les palissades de *Leptadenia* de 2 m de hauteur réduisent efficacement les flux éoliens sur une distance de 18 m sous le vent. La réduction des flux éoliens sous le vent de la palissade est progressive sur une période de deux ans suite à l'effet de la palissade (2005) et de l'effet combiné de la palissade et du retour des herbacées (2006 et 2007). Bien que conformes aux résultats rapportés dans la littérature (GUYOT, 1977; SKIDMORE & HAGEN, 1977; TIBKE, 1988; ROOSE, 1994), ces résultats se rapportent donc à des conditions sensiblement différentes car reflétant l'effet combiné des brise-vent et du retour des herbacées dans la zone mise en défens. Selon BIELDERS *et al.* (2002), une bande de végétation herbacée de 5 m de large permet à elle seule de réduire les flux éoliens de 43%. Les précédents travaux sur l'efficacité des brise-vent au Niger ont révélé des taux de réduction des flux éoliens plus faibles (max. 75%) et sur des distances parfois nettement plus courtes (MICHELS *et al.*, 1998; BUERKERT & LAMERS, 1999). Ceci s'explique par le fait que ces études concernaient des brise-vent en bordure de champs cultivés, où le retour des herbacées est contrôlé par sarclages répétés.

Sur base des importants dépôts de sédiments observés sur le côté au vent de la palissade exposée à l'harmattan, on peut conclure que la palissade réduit les flux sur une distance minimum de 2 fois sa hauteur sur le côté au vent. L'importance de cette réduction n'a cependant pas pu être quantifiée par manque de capteurs suffisamment éloignés de la dune pour servir de référence. Ces dépôts à proximité de la palissade conduisent à leur ensevelissement progressif. Pour pallier cet ensevelissement, il est nécessaire de recourir à des opérations de regarni dont l'objectif est de permettre à la palissade de retrouver ces caractéristiques d'origine.

Tableau 3: Evolution du nombre d'espèces herbacées et de l'indice de diversité de Meinhinick au niveau de la dune vive suite à la mise en place d'un dispositif antiérosif. Le chiffre entre parenthèse indique le nombre de familles.

Bandes						
	1	2	3 à 8	9	10	Témoïn
Nombre d'espèces						
2005	-	-	13 (8)	-	-	11 (8)
2006	23	26	29 (18)	16	16	33 (18)
2007	10	15	59 (20)	12	15	71 (23)
Indice de diversité de Meinhinick						
2005			3,6			3,3
2006			4,4			5,0
2007			6,8			8,2

Les mesures topographiques en travers de la dune mettent en évidence des dépôts de sédiments plus importants sur le côté exposé à l'harmattan que sur le côté exposé aux vents de mousson. Ceci est vraisemblablement dû à des différences d'état de surface de part et d'autre de la dune ainsi qu'aux caractéristiques des vents. Les vents de moussons atteignent en effet rarement la vitesse seuil de saltation. En période de mousson, ce sont les vents associés au passage des fronts convectifs de méso-échelle qui produisent l'essentiel de la déflation, mais ces vents ont typiquement une direction E à S-E, c'est-à-dire approximativement parallèle au grand axe du dispositif de fixation. Les flux engendrés pendant cette période ne s'accumuleront donc pas au niveau de la palissade exposée aux vents de mousson. Par ailleurs, la dune est bordée sur sa face N-E par des sols sableux de nature similaires à la dune, mais sur sa face S-O par des sols de cuvettes à texture légèrement plus fine et plus cohésifs (anciennes cuvettes dégradées) et vraisemblablement moins sensibles à la déflation.

L'analyse physico-chimique des sédiments montre un enrichissement sous le vent à proximité du brise-vent en termes d'argile et limon, de C et de N. De ce fait, ces zones d'accumulation peuvent être associées à des îlots de fertilité. Dans les systèmes champs/jachère en milieu sableux de l'ouest du Niger, les dépôts observés autour des arbustes et à proximité des brise-vent constituent des îlots de fertilité où les rendements observés sont supérieurs aux autres parties du terrain (ELTROP *et al.*, 1996; MICHELS *et al.*, 1998; MICHELS & BIELDERS, 2006). On peut raisonnablement penser que le meilleur développement de la strate herbacée à proximité des palissades externes est lié à un effet similaire. Il semble par ailleurs y avoir un enrichissement progressif en N, P et C entre 2006 et 2007. Cet enrichissement pourrait résulter des apports résultant de la décomposition de la strate herbacée.

L'accroissement de la diversité végétale observée au niveau de la dune suite à la présence du dispositif antiérosif et la mise en défens est remarquable. Elle reflète le potentiel des différents types de semences d'herbacées contenues dans le sol dunaire et les flux éoliens. LI *et al.* (2004) indique une situation similaire au niveau d'un site de fixation de dune situé en Mongolie du Nord. La réduction de la force du vent associée à une mise en défens au niveau d'un site constitue donc une bonne technique de restauration écologique.

CONCLUSIONS

En 2005, la première palissade a réduit de plus de 98 % les flux éoliens enregistrés au vent à 3 m de celle-ci. L'efficacité observée en 2006 et en 2007 était pratiquement de 100 %. L'absence totale de mobilisation éolienne à l'intérieur de l'ouvrage de fixation de dune est à la fois favorable à la reprise de la végétation herbacée pour la fixation biologique et en même temps est une conséquence de la reprise de la végétation herbacée.

L'efficacité des palissades antiérosives se traduit aussi par des dépôts de sédiments à proximité de celles-ci. La granulométrie de ces dépôts est dominée par du sable grossier au vent et par du sable plus fin sous le vent de la palissade exposée à l'harmattan. Les argiles et les limons sont très faiblement représentés dans ces dépôts mais suivent la même tendance que les sables fins. L'accumulation de particules de diamètre inférieur à 50 μm plus riches en C et N que les sables en association avec la biomasse issue des herbacées a permis un accroissement de la teneur en carbone organique et en azote à proximité de la palissade antiérosive sous le vent et sur une moindre distance sur le côté au vent.

Le retour des herbacées au niveau de la dune vive se traduit par la présence en fin de saison des pluies de 13 espèces recensées en 2005, 29 espèces en 2006 et 59 espèces en 2007. Le nombre de familles et l'indice de spécificité biologique suivent la même tendance. La biomasse herbacée sèche produite dépasse par endroit 200 g/m² en 2007.

L'emploi de palissades en branchages de *Leptadenia pyrotechnica* à faible porosité (inférieure à 10 %) et 1,8 m de hauteur s'est révélé être une technique efficace de fixation mécanique des dunes vives en zone semi-aride. Non seulement cette efficacité se maintient en première année jusqu'au-delà de 18 m sous le vent de la palissade exposée aux vents d'harmattan mais aussi elle se trouve renforcée en deuxième année suite à une reprise relativement abondante de la végétation herbacée spontanée. Elle constitue donc une méthode adéquate pour la restauration du potentiel écologique des dunes dégradées. Cependant, la non-pâturation au sein des clayonnages est essentielle pour permettre le développement de la végétation herbacée en saison des pluies et son maintien en saison sèche.

L'étude de l'efficacité de la mesure antiérosive s'est faite sur une période de quelques mois chaque année en période d'harmattan. Il serait utile de l'étendre sur toute l'année de façon à pouvoir quantifier l'impact des vents de mousson et d'harmattan sur les flux éoliens d'une part, et sur l'efficacité des palissades antiérosives d'autre part.

Ayant constaté *de visu* un dépérissement rapide des branchages de *Leptadenia pyrotechnica*, et pour mieux gérer les ressources végétales utilisées dans la fixation de dunes, ressources qui sont parfois rares et précieuses dans les milieux arides et semi-arides, il serait utile de tester d'autres matériaux et techniques de fixation de dunes en vue de dégager les plus appropriées en fonction des contextes. En plus de leur impact sur les flux éoliens, cette étude devrait aussi s'intéresser à l'impact des palissades sur le fonctionnement hydrique des écosystèmes dunaires, en vue d'établir la possibilité de survie d'une végétation pérenne.

Vu l'effort consenti pour récupérer les terres dégradées en milieu dunaire, une bonne gestion du potentiel végétal et des terres ainsi récupérées s'impose. Pour cela, un suivi de l'évolution de la restauration écologique est nécessaire. Ceci permettrait d'identifier le mode de gestion le plus approprié de la biomasse végétale.

BIBLIOGRAPHIE

- BANZHAF, J., LEIHNER, D.E., BUERKERT, A. & SERAFINI, P.G., 1992. Soil Tillage and Windbreak Effects on Millet and Cowpea .1. Wind-Speed, Evaporation, and Wind Erosion. *Agronomy Journal* 84 : 1056-1060.
- BIELDERS, C.L., RAJOT, J.L. & 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.-L. & MICHELS, K., 2004. L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien: influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte. *Sécheresse*, 15 ; 19-32.

- BUERKERT, A. & LAMERS, J.P.A., 1999. Soil erosion and deposition effects on surface characteristics and pearl millet growth in the West African Sahel. *Plant & Soil*, 215 : 239-253.
- CNEDD, 2005. Programme d'action nationale de lutte contre la désertification et de gestion des ressources naturelles (PAN-LCD/GRN). Conseil national de l'environnement pour un développement durable, République du Niger. 80 p.
- DE FABREGUES, B.P., 1979. Lexique des plantes du Niger. Institut national de recherche agronomique du Niger (INRAN), Niger. 156 p.
- ELTROP, L., ALLISON, B.E., LAMERS, J.P.A. & MICHELS, K., 1996. Effets of planted windbreaks on wind erosion and millet growth, and biomass production of the windbreaks. In : Buerkert, B.E., Allison, B.E., von Oppen, M. (eds.). *Wind Erosion in Niger. Implications and control measures in a millet-based farming system*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 105-122.
- GUYOT, G., 1977. Les effets aérodynamiques des brise-vent. *Proclim E.*, Tome 8E, 3, 137-188.
- JAHIEL, M., 1998. Rôle du palmier dattier dans la sécurisation foncière et alimentaire au sud-est du Niger. *Sécheresse*, 2 : 167-174.
- KARIMOUNE, S., 1994. Contribution à l'étude géomorphologique de la région de Zinder (Niger) et analyse par télédétection de l'évolution de la désertification. Thèse de doctorat en sciences géographiques, Faculté des sciences, Université de Liège. 350 p.
- LETTAU, K. & LETTAU, H. H., 1978. Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration. In: H. H. Lettau & K. Lettau (eds). *Exploring the World's Driest Climate*. University of Wisconsin-Madison, Institute for Environmental studies, IES report, vol. 101, 110-147.
- LI, X.R., XIAO, H.L., ZHANG, J.G. & WANG, X.P., 2004. Long-Term Ecosystem Effects of Sand-Binding Vegetation in the Tengger Desert, Northern China. *Restoration Ecology*, 12 : 376-390.
- MICHELS, K., 1994. Wind Erosion in the Southern Sahelian Zone; Extent, Control, and Effects on Millet Production. Ulrich E. Grauer Verlag, Stuttgart. 99 p.
- MICHELS, K. & BIELDERS, C.L., 2006. Pearl Millet Growth on an Erosion-Affected Soil in the Sahel. *Experimental Agriculture*, 42 : 1-17.
- MICHELS, K., LAMERS, J.P.A. & BUERKERT, A., 1998. Effects of Windbreak Species and Mulching on Wind Erosion and Millet Yield in the Sahel. *Experimental Agriculture*, 34 : 449-464.
- MIDDLETON, N. & THOMAS, D., 1997. World Atlas of desertification. 2nd edition, United Nations Environment Programme. 182 p.
- OZER, P., 2001. Les lithométéores en région sahélienne: un indicateur climatique de la désertification. *Geo-Eco-Trop.*, 24, 317 p.
- QIU, G.Y., LEE, I.B., SHIMIZU, H., GAO, Y. & DING, G.D., 2004. Principles of Sand Dune Fixation with Straw Checkerboard Technology and Its Effects on the Environment. *Journal of Arid Environments*, 56 : 449-464.
- RAJOT, J.L., 2001. Wind Blown Sediment Mass Budget of Sahelian Village Land Units in Niger. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172 : 523-531.
- RAMADE, F., 2001. *Eléments d'Ecologie fondamentale*. Edition Mcgraw-Hill. 408 p.
- ROOSE, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. *FAO Soils Bulletin*, N° 70. FAO, Rome, 380 p.
- SKIDMORE, E.L. & HAGEN, J.L., 1977. Reducing wind erosion with barriers. *Transactions of the ASAE*, 20 : 911-915.
- STERK, G., 1997. Wind erosion in the Sahelian zone of Niger: Processes, models, and control techniques. Thèse de doctorat. Erosion and Soil et Water Conservation Group, Wageningen Agric. Univ., Wageningen, Pays-Bas, 151 p.
- TIBKE, G., 1988. Basic Principles of Wind Erosion Control. *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 22 : 103-122.
- TIDJANI, A.A., 2006. Apport de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (Nord-ouest de Gouré, Niger). DEA en Sciences, Faculté des Sciences géographiques, Université de Liège, 88 p.
- TIDJANI, A.D., BIELDERS, C.L. & AMBOUTA, K.J.-M., 2009. Dynamique saisonnière des paramètres déterminant l'érosion éolienne sur les pâturages dunaires du Niger oriental. Numéro spécial *Geo-Eco-Trop.* n° 33 (in press)
- TOUDJANI, Z. & GUERO, M., 2006. Analyse diagnostique détaillée de la zone d'intervention du PLECO. Cartographie de la situation d'ensablement. Division des statistiques et de la cartographie forestière, Ministère de l'environnement et de la lutte contre la désertification, PNUD - PLECO, 66 p.
- VAN EIMERN, J., KARSCHON, R., RAZUMOVA, L.A. & ROBERTSON, G.W., 1964. Windbreaks and shelterbelts. WMO Technical Note 59. WMO, Genève, 188 p.

