

Six années de suivi du flux d'érosion éolienne sur un sol sableux cultivé au Sahel :

Impacts des résidus de culture et de l'encroûtement

A. Abdourhamane Touré^(1, 8), J.-L. Rajot^(2, 4, 8), Z. Garba^(1, 8), R. Guillon⁽³⁾, T. A. Didier^(1, 8), B. Marticorena⁽⁴⁾, C. Petit⁽⁵⁾ et D. Sebag^(6, 7)

- 1) Université Abdou Moumouni, Département de Géologie, BP 10662, Niamey, Niger,
- 2) IRD – BIOEMCO - LISA Université Paris Est Créteil 61, Avenue du Général de Gaulle 94010 Créteil CEDEX, France
- 3) Université de Bourgogne, Laboratoire ARTeHIS, UMR 5594 CNRS, 6, bd Gabriel 21000 Dijon, France
- 4) LISA, Universités Paris Est-Paris Diderot, UMR CNRS 7583, Créteil 61, Avenue du Général de Gaulle 94010 Créteil CEDEX, France
- 5) Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 7041 ArScAn, 3 rue Michelet, F-75006 Paris, France
- 6) Université de Rouen, M2C, UMR 6143 CNRS, 76821 Mont Saint Aignan CEDEX, France
- 7) Université Montpellier 2, IRD UMR 050 HSM, Maison des Sciences de l'Eau – Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier CEDEX 5, France
- 8) Jeune Equipe Associée à IRD – Anthropisation et Dynamique Eolienne, UAM BP 237 Niamey, Niger

* : Auteur correspondant : doudu2000@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Au Sahel, l'érosion éolienne se développe particulièrement sur les surfaces cultivées. La présente étude vise : 1) à quantifier les résidus de culture sur les champs traditionnels pour en déterminer leurs impacts sur l'intensité des flux d'érosion éolienne ; 2) à déterminer le rôle de l'érosion éolienne dans le développement des croûtes d'érosion d'horizon B et à déterminer en retour l'impact de cet encroûtement sur le flux d'érosion éolienne ; 3) à tester le rôle que pourraient jouer des aménagements de type bandes enherbées sur des sols nus très sensibles.

Six années de mesures de flux d'érosion éolienne ont été entreprises à Banizoumbou dans le sud-ouest du Niger. Celles-ci ont permis de montrer que les résidus de culture protègent la surface des champs de l'érosion éolienne pendant la saison sèche (janvier – avril) et la diminuent significativement (de plus de 3 fois) au début de la saison des pluies (mai – juillet). Cependant, en dessous d'un seuil de 100 kg.ha⁻¹ de recouvrement par les résidus de culture, l'érosion éolienne intervient pendant toutes les saisons, favorisant du coup le développement des croûtes d'érosion. Celles-ci peuvent modifier les flux d'érosion éolienne en limitant le stock de particules mobilisables. Par ailleurs, les bandes enherbées ont contribué à baisser les flux d'érosion éolienne sur les sols nus, mais n'ont pas évité le développement des croûtes.

Mots clés

Sahel, érosion éolienne, résidus de culture, croûtes d'érosion, champs cultivés.

SUMMARY**SIX YEARS WIND EROSION FLUX MONITORING ON CULTIVATED FIELDS IN THE SAHEL : Crop residues and soils crust impacts**

In the Sahel, wind erosion occurs particularly in cultivated fields. This work was led at Banizoumbou in Niger where wind erosion fluxes have been measured for six years. The aims of this study was i) to monitor crop residues cover on traditional field and to quantify its influence on wind erosion ii) to characterize the impacts of soils crusting on erosion flux, iii) to characterize the impact of herbaceous strips on wind flux. Results showed that crop residues efficiently prevent cultivated fields from wind erosion during the dry season (January to April) and considerably reduce erosion fluxes at the beginning of the rainy season (May to July). Under a minimal crop residues cover rate of about 100 Kg.ha⁻¹, soil losses by wind erosion would dramatically increase and favoured the development of erosion crust. These crusts lead to supply limitation of particles by wind and thus decreased wind erosion fluxes.

In addition, herbaceous strips have also contributed to reduce soil lost by wind erosion on the bare soil. But they didn't avoid soil crusting.

Key-words

Sahel, wind erosion, crop residues, erosion crust, cultivated fields.

RESUMEN**SEIS AÑOS DE SEGUIMIENTO DEL FLUJO DE EROSIÓN EÓLICA SOBRE UN SUELO ARENOSO CULTIVADO EN EL SAHEL: Impactos de los residuos de cultivo y del encostramiento**

En el Sahel, la erosión eólica se desarrolla particularmente sobre las superficies cultivadas. Este estudio tiene como objetivo: 1) cuantificar los residuos de cultivo en los campos tradicionales para determinar sus impactos sobre la intensidad de los flujos de erosión eólica; 2) determinar el papel de la erosión eólica en el desarrollo de las costras de erosión; 3) probar el papel que podrían jugar acondicionamientos de tipo franjas herbáceas de contorno sobre suelos desnudos muy sensibles.

Seis años de medidas de flujos de erosión eólica se realizaron a Banizoumbou en el suroeste de Níger. Permitieron mostrar que los residuos de cultivo protegen la superficie de los campos de la erosión eólica durante la estación seca (enero – abril) y la disminuyen significativamente (más de tres veces) al principio de la estación lluviosa (mayo – julio). Sin embargo, debajo de un umbral de 100 kg.ha⁻¹ de recubrimiento por los residuos de cultivo, la erosión eólica interviene durante todas las estaciones, fomentando el desarrollo de las costras de erosión. Estas pueden modificar los flujos de erosión eólica limitando el stock de partículas movilizadas.

De otra manera, las franjas herbáceas de contorno contribuyeron a bajar los flujos de erosión eólica sobre los suelos desnudos pero no evitaron el desarrollo de las costras.

Palabras clave

Sahel, erosión eólica, residuos de cultivo, costras de erosión, campos cultivados.

Au Sahel, près de 80 % de la population vit en milieu rural (United Nations, 2007) et dépend largement d'une agriculture de subsistance (Sivakumar, 1989). Les pratiques culturales restent fondamentalement manuelles et font encore largement appel à la mise en jachère périodique des champs pour la restauration de la fertilité. Le champ et la jachère constituent ainsi les unités fonctionnelles de base de nombreux paysages sahéliens.

Dans le Sahel central, au Sud du Niger en particulier, 80 % des sols sont sableux (sols ferrugineux tropicaux peu lessivés (Gavaud, 1977) - psammentic Paleustalf (Soil Survey Staff, 1975) ou aéronosols cambique (ISSS-ISRIC-FAO, 1994)) avec des teneurs en nutriments très faibles (Bationo *et al.*, 2000). Ce sont principalement ces sols qui sont cultivés et assurent la production vivrière d'une population à fort taux de croissance. Dans le contexte actuel de l'occupation des sols, l'érosion éolienne est insignifiante dans les jachères où l'on note une redéposition des sédiments érodés depuis les champs (Biolders *et al.*, 2002). Ces derniers en revanche sont soumis à une forte érosion (Sterk et Stein, 1997 ; Sterk *et al.*, 1996 ; Rajot, 2001 ; Biolders *et al.*, 2002). Les pertes en terre par érosion éolienne conduisent à des pertes en nutriments très élevées en proportion du stock disponible, contribuant ainsi à la baisse du potentiel de production végétale (Sterk *et al.*, 1996 ; Biolders *et al.*, 2002). La raison principale avancée pour expliquer l'érosion des champs est que ces derniers présentent une faible protection de leurs surfaces par la végétation. Or, dans les champs cultivés, la protection de la surface du sol est essentiellement assurée par les résidus de cultures issus de la production agricole. Dans la lutte contre l'érosion éolienne, l'effet des résidus de culture a été beaucoup étudié, mais essentiellement à l'aide de parcelles expérimentales et avec des quantités contrôlées bien supérieures à celles des champs traditionnels (Michels *et al.*, 1993, 1995 ; Sterk et Spaan 1997 ; Biolders *et al.*, 2000). Ces auteurs reconnaissent en effet que des quantités de 1500 kg.ha⁻¹ ne peuvent être atteintes à la surface des champs traditionnels sahéliens sans un apport extérieur conséquent qui ne représente pas la réalité des pratiques culturales actuelles.

Un autre facteur qui interagit avec l'érosion éolienne est l'encroûtement des sols. Les croûtes structurales n'ont pas d'effet décelable sur l'érosion éolienne dans le cas des sols sahéliens très sableux (Rajot *et al.*, 2003), mais il n'en est pas de même pour la forme la plus sévère d'encroûtement des sols : la croûte d'érosion, caractérisée par une fine pellicule plasmique (mélange de particules fines d'argile et de limon) qui recouvre la surface du sol et colmate l'horizon sous-jacent tassé (Casenave and Valentin, 1989). Le développement de ce type de croûte explique en particulier les très forts ruissellements actuellement observés sur le Sahel (Descroix *et al.*, 2012). Or les interactions entre ces croûtes d'érosion et l'érosion éolienne ne sont pas encore bien définies, même si le rôle de l'érosion éolienne dans la

formation des « loupes d'érosion » est reconnu depuis longtemps (Ambouta *et al.*, 1996, Gavaud, 1968).

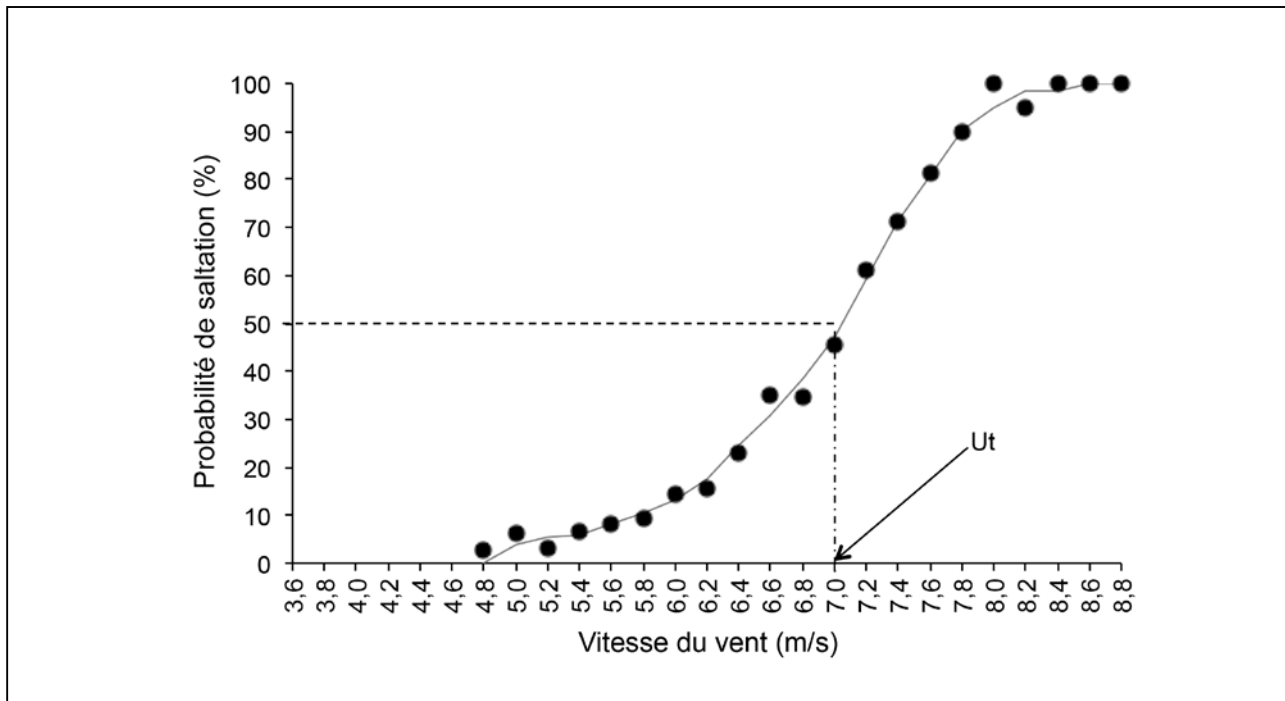
Le présent travail a été réalisé sur des champs cultivés traditionnellement par les agriculteurs en respectant les quantités et la répartition de résidus qui existent réellement dans la zone étudiée. Les objectifs visés dans cet article, à travers 6 années de mesures continues du flux d'érosion éolienne sont : 1) de quantifier les résidus de culture sur les champs traditionnels pour en déterminer leurs impacts sur l'intensité des flux d'érosion éolienne ; 2) de déterminer le rôle de l'érosion éolienne dans le développement des croûtes d'érosion d'horizon B et de déterminer en retour l'impact de cet encroûtement sur le flux d'érosion éolienne ; 3) pour les sols nus très sensibles à l'érosion éolienne, il s'agit de tester le rôle que pourraient jouer des aménagements de type bandes enherbées, sur le flux d'érosion éolienne et enfin 4) le flux d'érosion éolienne est connu pour sa variabilité au Sahel, sur la période exceptionnellement longue de 6 ans, il s'agit de caractériser cette variabilité et de déterminer les rôles des résidus de culture, des croûtes et des aménagements dans cette variabilité.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Zone de l'étude

Les parcelles étudiées sont 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). Le climat est de type semi-aride avec une évapotranspiration potentielle moyenne proche de 2 500 mm an⁻¹ et une pluie annuelle de 545 mm en moyenne.

Pour mesurer l'impact des résidus de culture sur l'érosion de la surface des champs, deux parcelles (PA et PB) ont été instrumentées en juin 2005. Elles sont de forme rectangulaire et de même taille (100 m x 150 m). Elles sont séparées l'une de l'autre et isolées de l'extérieur par des bandes végétalisées larges de 20 m. Ces parcelles sont cultivées depuis près de 40 ans avec des alternances de phases de culture et jachère. L'année (2005) de l'instrumentation de ces parcelles suit une année de culture (2004) après 7 ans de mise en jachère (1997 à 2003). De juin 2005 au 6 avril 2006, PA a été cultivée comme PB. A partir d'avril 2006, PA a été maintenue nue par désherbage, ramassage et suppression de toute forme de végétaux. Des bandes larges de 1 m et espacées de 30 m, délimitées sur sa surface pendant la saison des pluies 2007, se sont enherbées à partir de 2008 avec le développement naturel de la végétation. L'intérieur des surfaces délimitées par ces bandes enherbées a été maintenu nu. La parcelle PB est travaillée de manière traditionnelle de 2005 à 2009. Sur cette parcelle, les cultivateurs jugent à quelle période il faut défricher, semer, sarcler et récolter. En 2010, cette parcelle a été mise en jachère.

Figure 1 - Exemple de détermination de la vitesse seuil d'érosion (U_t) sur PB (avril 2006).**Figure 1** - Example of threshold wind speed (U_t) computation on plot PB (April 2006).

Mesures de la saltation

Deux capteurs de saltation (Saltation Impact Sensor) de type saltiphones ont été installés à la même hauteur (7 cm de haut) sur chaque parcelle. Ils enregistrent les impacts des grains de sable en saltation, cumulés sur une durée de 10 secondes. Ces mesures permettent de connaître la date de début et de fin d'un événement érosif. Elles ont également été utilisées pour calculer une vitesse seuil d'érosion qui permet de comparer la sensibilité au vent des deux types de surface étudiés. Les vitesses de vents mesurées sur une période de 1 mois sont classées par classes de vitesse d'amplitude $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La classe pour laquelle la probabilité de mesurer de la saltation est de 50 % est prise comme vitesse seuil (*figure 1*).

Mesures du flux horizontal

L'érosion éolienne est caractérisée sur les parcelles par le flux horizontal exprimé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ par événement. Il est mesuré par des pièges à sable de type BSNE (Big Spring Number Eight ; Fryrear, 1986). L'implantation des BSNE est identique sur les deux parcelles : 25 mâts de 3 BSNE, étagés à 5, 15 et 30 cm de hauteur ont été installés sur chacune d'elles. Le flux horizontal est calculé en intégrant sur la hauteur une courbe théorique ajustée sur les valeurs mesurées aux niveaux des BSNE (Michels et al., 1995 ; Rajot, 2001 ; Biolders et al., 2002).

Mesures du bilan de masse

A l'échelle de la parcelle cultivée, c'est le flux horizontal mesuré sur les limites des parcelles qui est utilisé pour calculer le bilan de masse (Rajot et al., 2009). La première étape pour déterminer le bilan de masse, pour chaque événement érosif, a été de calculer la direction moyenne du vent. Cette direction permet de déterminer le côté au vent (où les flux entrent) et le côté sous le vent (où les flux sortent). Seuls les mâts de BSNE situés sur les bordures des parcelles ont été utilisés dans le calcul du bilan d'érosion. La masse de sédiment (M) qui passe à travers un segment compris entre deux mâts de BSNE successifs (i et $i+1$) est calculée en faisant l'hypothèse d'une variation linéaire du flux horizontal entre eux. Cette masse est alors le produit de la moyenne des flux mesurés au niveau de ces mâts successifs par la distance D (m) perpendiculaire au vent qui les sépare (*figure 2*). D est obtenu selon la formule ci dessous :

$$D = d \sin((\beta - \alpha)) \quad (1)$$

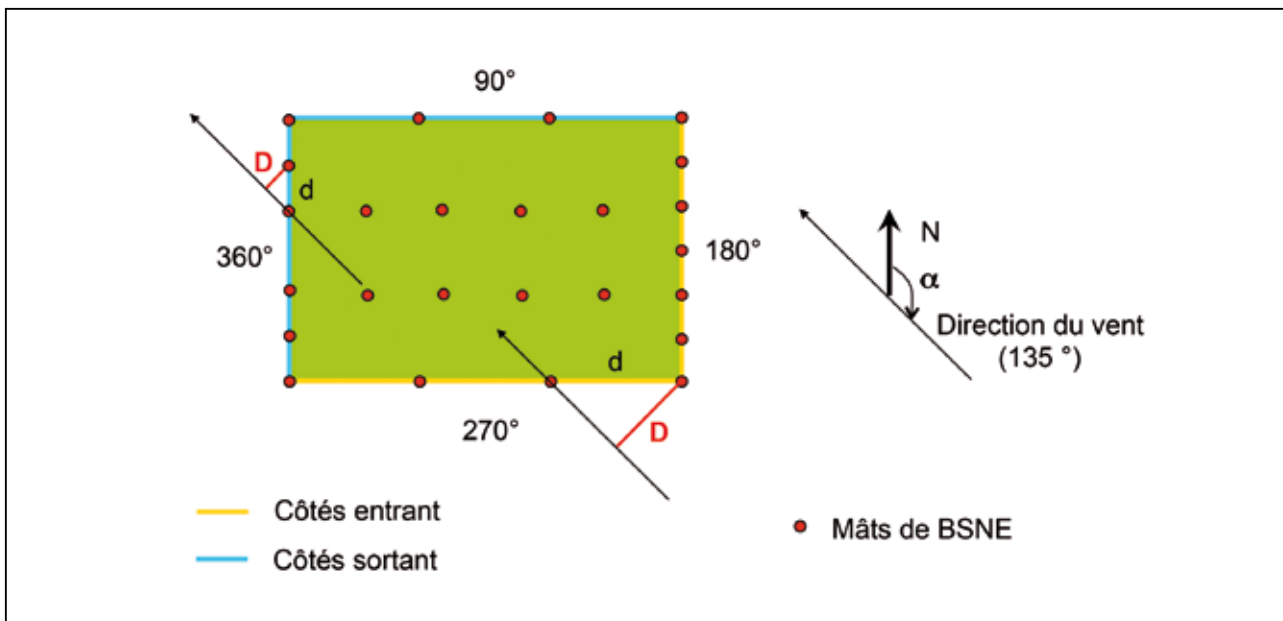
Où d (m) est la distance qui sépare les 2 mâts successifs, α : l'angle de la direction moyenne du vent par rapport au Nord, β : l'angle du segment par rapport au Nord (rotation antihoraire) (*figure 2*). Le signe de D ainsi obtenu est positif pour les flux entrant et négatif pour les flux sortant.

La masse de sédiment traversant le segment est :

$$M_i = ((F_{h_i} + F_{h_{i+1}}) / 2) \times D_2$$

Figure 2 - Détermination des côtés entrant et sortant des parcelles relativement à la direction du vent (exemple pour un vent du sud est = 135°).

Figure 2 - Determination of inside and outside of the plot in relation with wind direction (example of south-east wind direction = 135°).



Avec M_i (kg) la masse entrant (positive) ou sortant (négative) entre les mâts successifs de BSNE i et $i+1$, $F_{h_i} + F_{h_{i+1}}$ les flux horizontaux ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) mesurés respectivement au niveau de ces 2 mâts.

La masse totale de sédiments déposés ou perdus (dM) au cours d'un événement érosif est la somme des masses entrant dans la parcelle diminuée des masses sortant de la parcelle :

$$dM = \sum M_i \quad (3)$$

En divisant dM par l'aire des parcelles (S_p (ha)), on obtient des pertes en terre (ou des gains) par unité de surface, ΔM exprimées en tonnes par hectare ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), grandeur généralement utilisée pour la caractérisation des bilans.

$$\Delta M = dM / S_p \quad (4)$$

Mesures de la vitesse et de la direction du vent

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. Le profil de vent qu'ils déterminent sert à calculer la hauteur de rugosité aérodynamique (Z_0) qui est la hauteur théorique à laquelle la vitesse du vent s'annule (Stull, 1998). Cette valeur renseigne sur la rugosité du terrain et s'avère être un bon indice de l'érodibilité des sols (Blumberg et Greeley, 1993) : plus elle est élevée plus la rugosité est forte et plus il faudra un vent fort pour provoquer l'érosion. Dans notre cas, en l'absence de thermocouple (pour mesurer le profil de

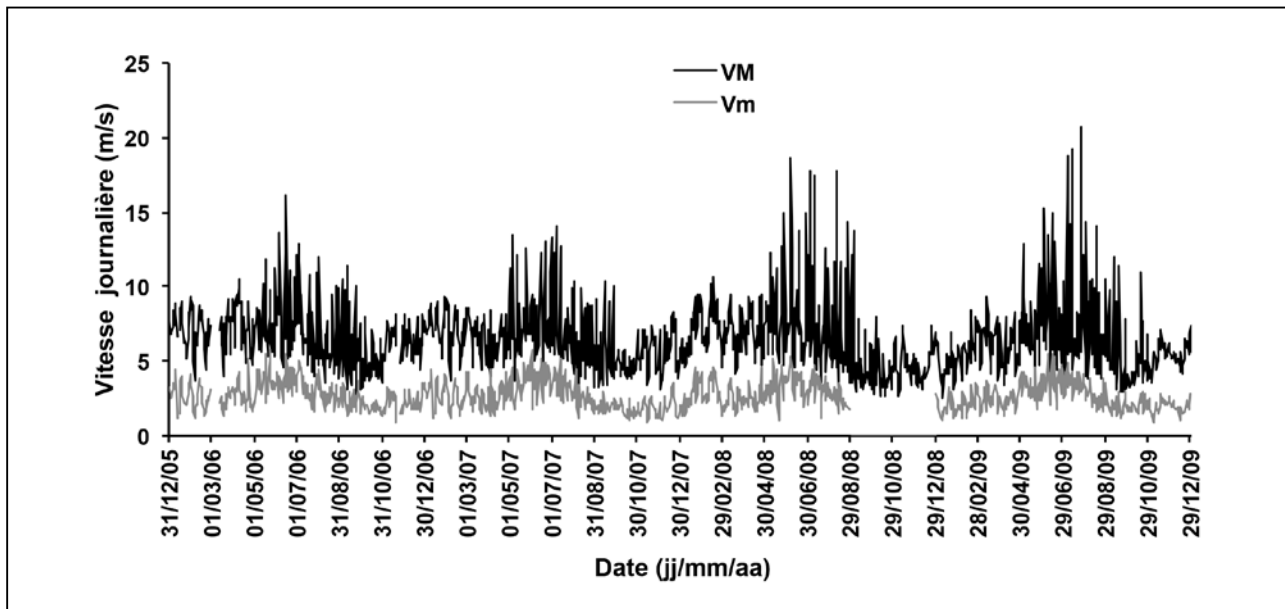
température), Z_0 est calculée lorsque les vents à 35 cm sont $> 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c'est-à-dire dans des conditions de neutralité dynamique (la modification du profil de vent induite par les différences de températures est négligeable et le profil de vent peut être considéré comme logarithmique – Abdourhamane Touré et al., 2011). La direction du vent a été mesurée par un anémomètre sonic 2D (Windsonic Gill Instrument Ltd) situé à 200 m des parcelles sur une station de monitoring des poussières désertiques (Marticorena et al., 2010). Comme pour les anémomètres, la mesure de la direction du vent est effectuée toutes les 10 secondes, mais seule la moyenne sur 5 minutes est stockée dans la centrale d'acquisition (CR200 Campbell®).

Mesures du recouvrement par la végétation

La végétation des champs cultivés est essentiellement composée de plants de mil pendant la saison des pluies. Durant la saison sèche, la biomasse végétale se compose principalement des résidus de culture, c'est-à-dire les tiges et souches de mil. Les herbes sont aussi présentes, de même que quelques débris ligneux. Ces résidus de culture se répartissent de façon hétérogène à la surface des champs.

Le taux de recouvrement par les résidus de culture (exprimé en %) correspond à la proportion de la surface du champ couverte par ces résidus. Il est déterminé par le traitement sous ImageJ, de photographies de 10 surfaces de référence prises régulièrement sur chaque parcelle.

Figure 3 - Variation saisonnière des vitesses maximale (VM) sur 5 minutes et moyenne journalières (Vm) mesurées à 2,5 m de hauteur
Figure 3 - Seasonal variation of maximum wind speeds (VM) averaged over 5 min and daily mean wind speed (Vm) measured at 2,5 m height.



Suivi des croûtes d'érosion d'horizon B sur les surfaces PA et PB

Le pourcentage d'encroûtement des surfaces a été mesuré sur les mêmes photos utilisées pour déterminer le taux de recouvrement par les résidus de culture sur les parcelles PA et PB et sur les photographies aériennes réalisées avec un paramoteur radiocommandé (PIXY) qui donne une vue d'ensemble de la surface des parcelles.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Climatologie : direction et vitesse des vents, et pluie

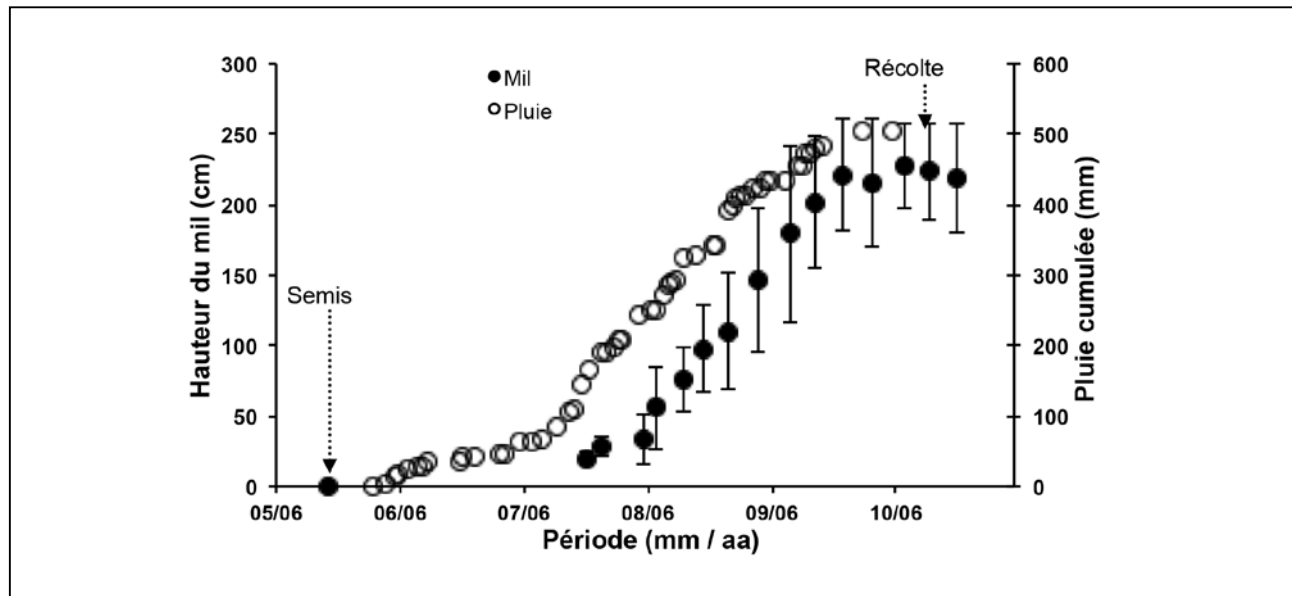
La direction du vent comme l'humidité relative de l'air permettent d'identifier deux types de temps : la période d'harmattan avec des vents du nord est très secs et la période de mousson avec des vents au sol du sud ouest chargés d'humidité (Lafore et al., 2012). Les pluies se produisent exclusivement pendant la période de mousson, mais sont très rares en début de période (avril-mai) et culminent en juillet/août. Les vitesses de vent, comme l'ont évoqué Marticorena et al., (2010), ne présentent pas un cycle saisonnier aussi marqué que la direction ou l'humidité de l'air. Les moyennes journalières dépassent

très rarement 5 m.s^{-1} à 2,5 m de haut. Le cycle annuel de la vitesse maximale journalière sur 5 minutes est plus marqué. On observe d'une part des vitesses dépassant régulièrement 7 m.s^{-1} et d'autre part que les fortes vitesses se situent principalement en début de période de mousson de mai à mi juillet (figure 3). Les plus fortes vitesses sont systématiquement associées aux événements convectifs qui génèrent l'essentiel des pluies. Ces vents forts se produisent plus précisément en front de système convectif avant l'arrivée de la pluie et au début de la pluie.

Dynamiques de la végétation sur la surface des champs cultivés

La physionomie de la surface des champs sahéliens est intimement liée aux saisons qui caractérisent la zone. Au fil de la saison pluvieuse, le mil se développe dans les champs et atteint son maximum en fin de saison des pluies (fin septembre/début octobre) (figure 4). Après la récolte, les tiges de mil restent dressées et sont en partie consommées par le bétail ou collectées comme matériaux de construction. Dès les mois de décembre/janvier, les champs sont défrichés, c'est-à-dire que les plants de mil encore debout sont dessouchés et couchés sur le sol de même que les rejets d'arbustes lorsqu'ils existent.

Le recouvrement par les résidus de culture (RRC) est mesuré à partir du défrichage (figure 5). Son évolution montre que la surface des champs présente le maximum de couverture juste après le défrichage : il baisse de façon exponentielle passant de

Figure 4 - Suivi de la hauteur du mil et pluie cumulée pour la saison sur PB en 2006.**Figure 4** - Monitoring of millet plant height and accumulated rainfall depth for the 2006 season.

12 % ($\sim 800 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) dix jours après le défrichage à moins de 2 % ($\sim 100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) quatre mois plus tard soit 5 fois plus faible que les plus faibles densités testées par Michels *et al.*, (1995) pour lutter contre l'érosion éolienne. Cette baisse du RRC s'explique par divers facteurs dont l'enfouissement de ces résidus par piégeage de sédiments, leur consommation par le bétail, leur utilisation par l'homme comme combustible ou comme matériau de construction ou encore leur consommation par les termites. Elle est plus rapide au début du fait de la présence de feuilles de mil, plus facilement dégradables ou consommées par le bétail que les tiges.

Relations entre le cycle de la végétation et la hauteur de rugosité aérodynamique

Après le traitement par ratisage de PA, la hauteur de rugosité, Z0, est devenue très différente sur les 2 parcelles. Sur PA, sa valeur a oscillé entre 10^{-4} m et 10^{-5} m tandis que sur PB, elle a varié entre 10^{-3} m et 10^{-1} m soit plus de 2 ordres de grandeurs de différence (figure 6). Entre le défrichage et le début de la saison des pluies, le Z0 est essentiellement contrôlé par les résidus de culture. Sur cette période, les valeurs de Z0 obtenues baissent de façon linéaire en fonction du temps (figure 7). Cette baisse s'explique par la baisse du taux de recouvrement par les résidus de culture décrite plus haut (figure 5). De fait, si l'on trace l'évolution du Z0 selon le taux de recouvrement par les résidus de culture en prenant aussi en compte les très faibles taux de recouvrements de la parcelle A, deux situations se présentent

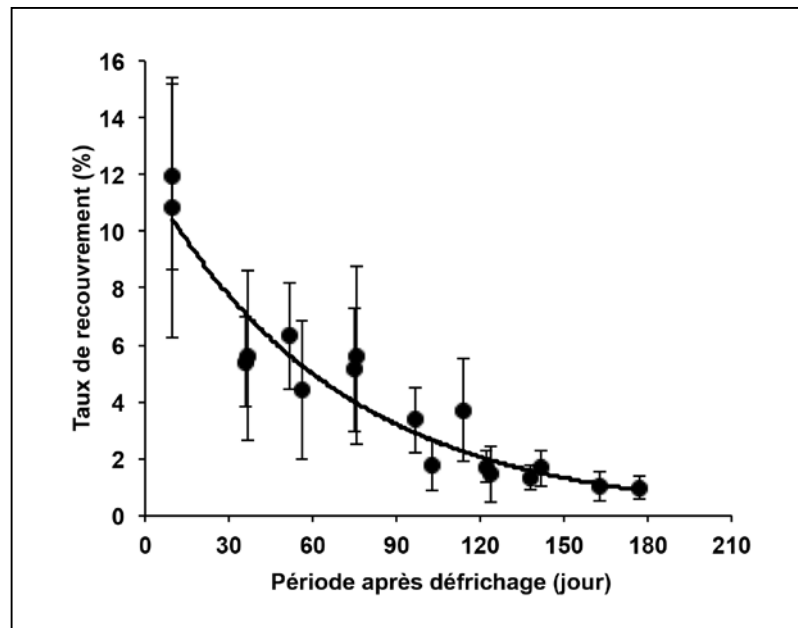
(figure 6). Pour des RRC supérieurs à 2 %, la variation du Z0 est lente et progressive. En dessous de 2 %, le Z0 baisse de façon rapide de plus d'un ordre de grandeur pour atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-4} m typiques de surfaces extrêmement sensibles à l'érosion éolienne. Cette courbe fait donc apparaître un seuil critique de recouvrement de la surface des champs sahéliens par les résidus de culture voisin de 2 % ($100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). Un RRC inférieur à ce seuil critique engendrerait des pertes importantes en terre par érosion éolienne. Pour éviter d'atteindre ce seuil critique avant le début de l'accroissement du Z0 (août), la surface des champs doit présenter un RRC d'au moins 12 % soit environ $800 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de résidus de culture après le défrichage des champs s'il est pratiqué en janvier.

Influence de la hauteur de rugosité sur la vitesse seuil

Les vitesses seuil à 2,5 m de hauteur sont en moyenne de $5,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) et $7,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) respectivement sur PA et PB sur l'année complète. Il faut noter qu'il n'a pas été possible de mettre en évidence une évolution temporelle significative des vitesses seuil d'érosion, ni sur la parcelle PA dont l'état de surface ne change pas significativement, ni sur la parcelle PB où le RRC et le Z0 varient. Tout au long de l'année, la vitesse moyenne journalière reste en dessous des vitesses seuil des deux parcelles. Ceci montre que la valeur de la vitesse moyenne journalière a peu de sens vis-à-vis de l'érosion éolienne. En revanche, ces vitesses seuil ont respec-

Figure 5 - Evolution du taux de recouvrement par les résidus de culture (RRC) à la surface des champs après le défrichage sur 3 campagnes agricoles.

Figure 5 - Evolution of the total Crop Residue Cover (CRC) with standard deviation after the clearing of PB for the three cropping years.



tivement été dépassées 2 jours sur 3 et 1 jour sur 3 par les vitesses maximales journalières sur PA et PB (figure 3). Ces dépassements se produisent pour les deux parcelles lors des événements convectifs du début de la saison des pluies. En revanche, seule la vitesse seuil de la parcelle PA est régulièrement dépassée durant la période d'harmattan.

Le flux horizontal de saltation

Les mesures de flux ont été identiques sur les 2 parcelles avant le traitement de PA, ce qui a permis de les comparer en leur appliquant un traitement différent. Les mesures présentées sur la figure 8 sont cumulées sur 6 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 ; Biolders et al., 2004, 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 3) liés aux événements convectifs dans un contexte de protection minimal de la surface des sols par les résidus de culture (Biolders et al., 2004 ; Sow et al., 2009, Abdourhamane Touré et al., 2011). C'est durant cette période (1er mai au 15 juillet) que plus de 90 % des flux sont enregistrés sur PB avec une moyenne sur les 4 années de mesure (2005 à 2009) de près de $4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{j}^{-1}$; en 2010 cette moyenne a atteint $8 \text{ kg.m}^{-1}.\text{j}^{-1}$.

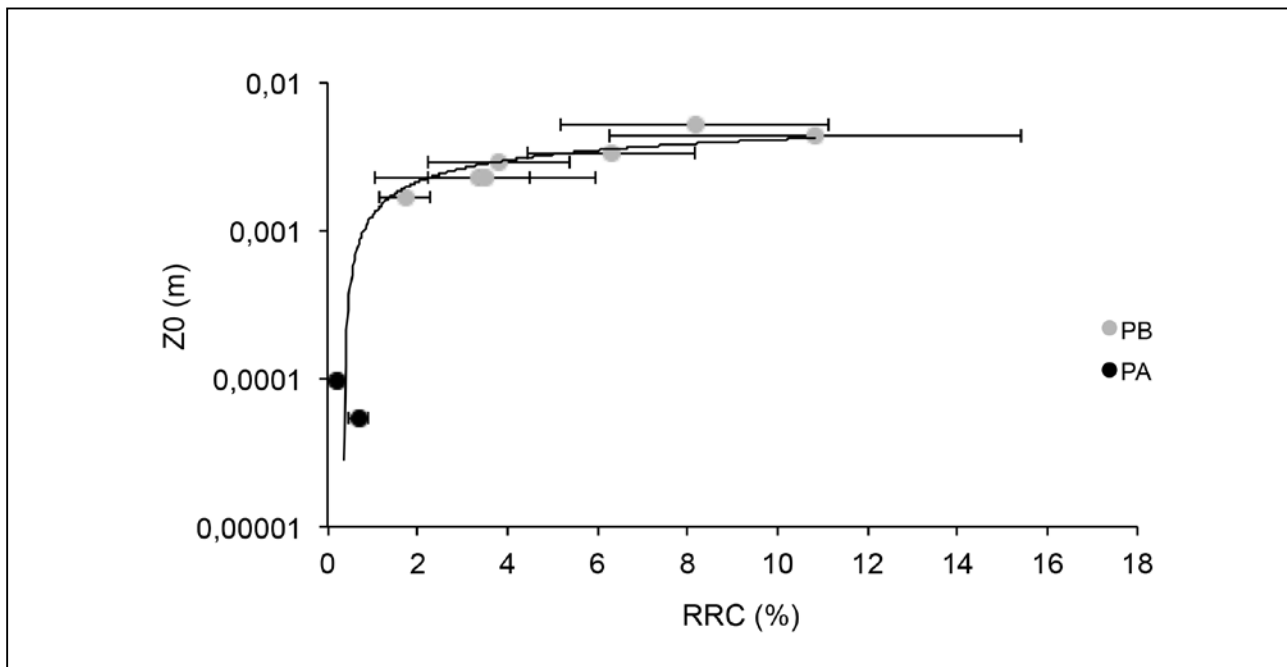
Cette phase d'érosion se retrouve bien sûr sur la parcelle PA où elle est beaucoup plus intense puisque le flux moyen est de $12 \text{ kg.m}^{-1}.\text{j}^{-1}$, soit plus du triple de celui mesuré sur PB.

Il est remarquable de constater que cette phase d'érosion cesse de façon quasi identique et simultanée sur PA et sur PB. Jusqu'à présent, l'hypothèse retenue pour expliquer l'arrêt de l'érosion sur le Sahel en mi-juillet était l'augmentation de la rugosité liée au développement de la végétation (Biolders et al., 2004). Comme aucune végétation ne se développe sur PA, l'explication est en fait d'ordre météorologique (baisse après la mi-juillet du nombre des événements érosifs, de la durée et de la vitesse des vents) (Abdourhamane Touré et al., 2011).

En 2010, la parcelle PB a été mise en jachère, c'est-à-dire qu'elle n'a plus été cultivée. C'est pourtant durant cette année que le cumul des flux horizontaux a été le plus important sur PB. Ceci s'explique en partie par des conditions météorologiques plus érosives (vitesses de vent et nombre d'événements érosifs plus importants). Mais ceci s'explique surtout par une érodibilité plus forte de la surface. En effet, le champ n'ayant pas été défriché, les tiges de mil sont en partie restées dressées. Dans ce cas, elles protègent moins efficacement le sol que lorsqu'elles sont couchées, par les paysans, sur la surface.

Sur la parcelle PA, seuls 66 % des flux d'érosion annuels ont été enregistrés pendant la phase d'érosion intense du début de la saison des pluies pendant les 2 premières années du traitement. En effet, on constate sur cette parcelle nue l'occurrence d'une période d'érosion en saison sèche de janvier à avril qui n'existe pas sur PB, mais représente près de 25 % des flux mesurés sur PA. Cette phase d'érosion de saison sèche sur PA a atteint une intensité de $3,67 \text{ kg.m}^{-1}.\text{j}^{-1}$, comparable à celle mesurée sur PB pendant la phase d'érosion majeure en début de la saison des pluies. Cette phase d'érosion sur PA s'explique bien par la très faible rugosité de sa surface qui correspond à une

Figure 6 - Relation entre la hauteur de rugosité aérodynamique (Z_0) et le taux de recouvrement par les résidus de culture (RRC).
Figure 6 - Relation between aerodynamic roughness length (Z_0) and the Crop Residue Cover (CRC).



vitesse seuil d'érosion souvent inférieure aux vents maximums de cette période (figure 3).

Quantification des pertes en terre par érosion sur les parcelles PA et PB

Les bilans d'érosion ont été calculés pour les 64 événements érosifs survenus entre avril 2006 et décembre 2007 avant que la végétation ne se développe sur les bandes enherbées.

Les pertes cumulées sur PB ont respectivement été de 13,3 et 23,0 t.ha⁻¹ en 2006 et 2007. Ces pertes en terre présentent une grande variabilité intra-annuelle. Ainsi, près de 100 % des pertes mesurées sur la parcelle PB ont été enregistrées au début de la saison des pluies (de mai à mi-juillet) et sont dues à seulement huit (8) événements érosifs. Il se confirme ainsi que les vents de l'harmattan ne produisent pas d'érosion significative sur les surfaces cultivées couvertes par des résidus de culture (cas de PB) (Rajot 2001). La plus importante perte enregistrée au cours d'un événement érosif entre avril 2006 et décembre 2007 sur PB était de 5,3 t.ha⁻¹. Cependant, une perte beaucoup plus significative de 16 t.ha⁻¹ a été mesurée sur un champ du même terroir pendant un seul événement érosif (Bielders *et al.*, 2002). Les plus importantes pertes sont clairement liées aux événements convectifs majeurs de directions comprises entre le NNE et ESE ce qui correspond aux lignes de grains. Les fortes variabilités interannuelles observées s'expliquent ainsi par le nombre et l'intensité de ces événements majeurs et au second ordre par

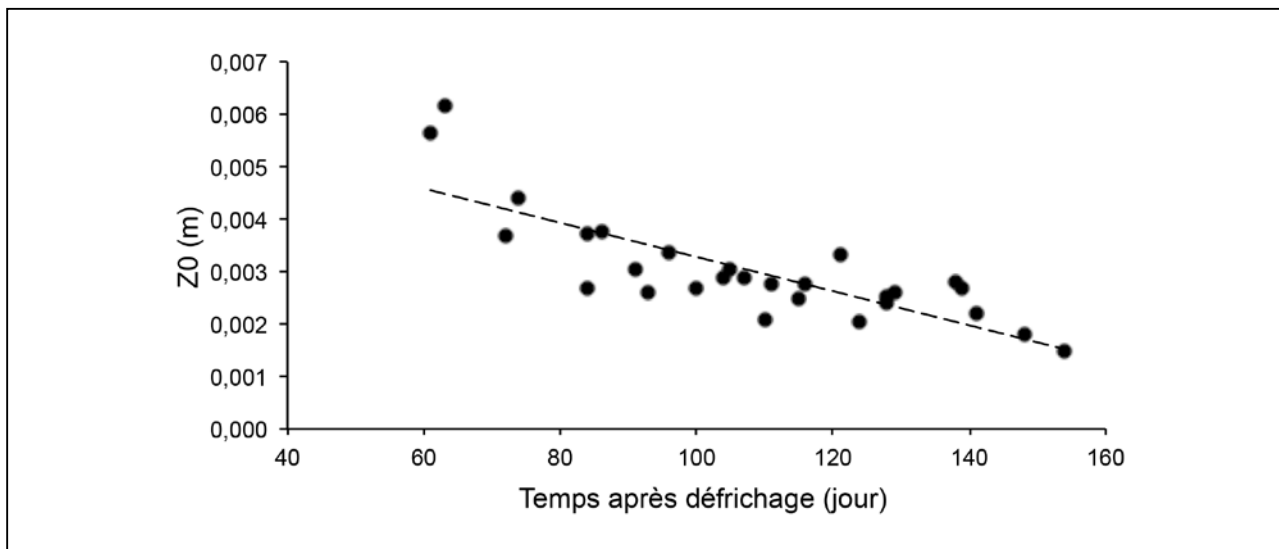
les petites variations de taux de recouvrement par les résidus de culture lorsqu'ils sont proches du seuil 2 % mis en évidence ci-dessus.

A l'inverse de la parcelle PB, sur la parcelle nue PA, le bilan a été systématiquement négatif pour tous les événements érosifs. L'essentiel des pertes a été enregistré sur les 2 parcelles au cours de la saison des pluies, particulièrement en son début. En effet, sur PA, les pertes mesurées pendant cette période représentent environ 3/4 des pertes totales et s'élèvent respectivement à 42 t.ha⁻¹ et 159 t.ha⁻¹ pour les années 2006 et 2007. Des bilans comparables, variant entre 17 et 214 t.ha⁻¹, ont été enregistrés sur des sols nus de la région au cours des saisons de pluies de 1995 à 1997 (Bielders *et al.*, 2000). Cette variabilité interannuelle n'est cependant pas marquée de la même manière sur les deux parcelles. Ainsi, sur PB, on a noté le doublement des pertes entre 2006 et 2007 alors que sur PA, elles ont été quadruplées (multipliées par 3,8). La plus importante perte sur PA a atteint 34,5 t.ha⁻¹ pour l'événement le plus intense, soit l'équivalent du cumul des pertes enregistrées en 2006 et 2007 sur la parcelle cultivée PB. Contrairement à PB, d'importantes pertes ont été enregistrées sur PA au cours de la saison sèche notamment entre janvier et avril 2007 où 1/4 des pertes, soit 55 t.ha⁻¹, ont été mesurées. La perte de sédiments peut donc se produire aussi durant l'harmattan : il suffit pour cela que la rugosité de surface soit rabaisée (cas de la parcelle PA).

La présence de résidus de culture sur PB, contrairement à PA, a ainsi permis de maintenir en place en deux années de

Figure 7 - Evolution du Z0 en fonction du temps sur la parcelle B pour les vents orientés selon l'axe de la parcelle ($232^\circ \pm 6^\circ$) en 2006 et 2007.

Figure 7 - Evolution of Z0 as a function of time after clearing on plot PB for winds direction parallel to the longest plot axis ($232^\circ \pm 6^\circ$) in 2006 and 2007.



mesure plus de $230 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de sol de l'horizon de surface le plus riche en nutriments liés à la matière organique. La présence de la végétation a ainsi une influence singulière sur les bilans de masse des principales unités du paysage sahélien (surfaces pâturées, jachères et champs cultivés). Dans les jachères par exemple, la rugosité développée par la végétation conduit à un bilan positif sur ces surfaces (Biielders *et al.*, 2002). Par ailleurs, sur des surfaces végétalisées de la zone pastorale du Nord Burkina Faso comparables aux jachères, Rajot *et al.*, (2009) ont également mesuré des dépôts de $65 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ en 17 mois.

Description et suivi des croûtes

Aucune croûte d'érosion n'a été observée sur les surfaces photographiées de la parcelle PB pendant toute la durée de l'expérience. Sur PA par contre, on a noté un important développement des croûtes d'érosion, notamment des croûtes qui se développent sur l'horizon B, enrichi en particules fines et très pauvre en matière organique, qui apparaissent plus rouges sur les photographies (*figure 9*). L'extension des surfaces couvertes par ces croûtes entre 2006 et 2009 (*figure 9*) est spectaculaire. En octobre 2006 et octobre 2008 par exemple, les taux de recouvrement par ces croûtes sont respectivement de $\sim 0\%$ et $\sim 35\%$. En octobre 2009, plus de 80% de la surface de PA est couverte par les croûtes d'érosion d'horizon B (*figure 9*). Dès la description de ces croûtes en 1989, Casenave et Valentin avaient noté le rôle de l'érosion hydrique et éolienne dans leur formation. Or sur nos parcelles de mesure et en par-

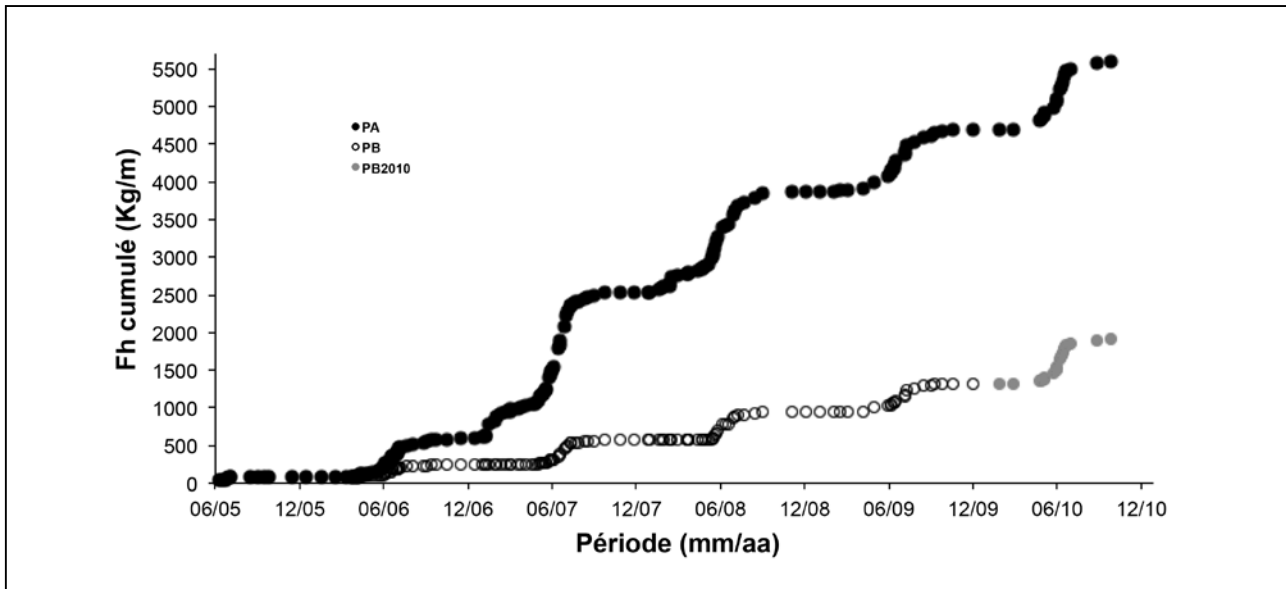
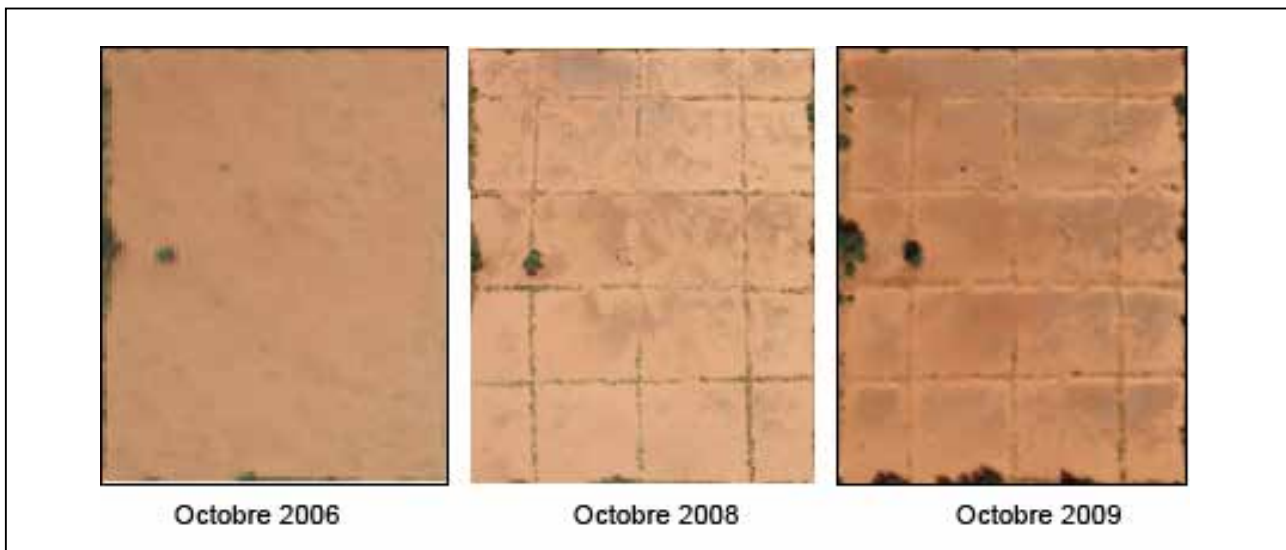
ticulier pour PA, les pentes sont trop faibles pour produire de l'érosion hydrique. La comparaison de l'évolution de la surface des parcelles PA et PB montre ainsi que, dans ce cas, le moteur du développement des croûtes est uniquement l'érosion éolienne de la surface consécutive à la baisse drastique de la rugosité de la parcelle PA.

Si l'apparition et le développement des croûtes d'érosion sur la parcelle PA est clairement due à l'érosion éolienne, on peut se demander si en retour la présence de ces croûtes modifie les flux d'érosion. La comparaison de ces flux sur les deux parcelles pendant les six années de mesures apporte des éléments de réponse.

Dynamique pluriannuelle des flux d'érosion

(*figure 8*)

De fait, on observe sur PA une dynamique différente de celle de PB. 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 connaître une légère baisse en 2009 relativement à 2008. Cette évolution peut bien sûr être liée à des vents plus intenses de 2006 à 2008. Mais la parcelle PA ne suit pas la même évolution. Cette augmentation du flux moyen pourrait donc s'expliquer par l'évolution de l'état de surface de la parcelle PB de moins en moins densément recouverte au fur et à mesure de l'augmentation de la durée de la mise en culture. Cette parcelle a en effet été mise en culture en 2004 après une période de jachère de 7 années. Une telle

Figure 8 - Flux horizontaux moyens cumulés sur PA et PB de juin 2005 à décembre 2010.**Figure 8** - Accumulated average horizontal fluxes on PA and PB monitored from June 2005 to December 2010.**Figure 9** - Evolution des croûtes d'érosion d'horizon B sur PA.**Figure 9** - Evolution of soil B horizon crust on PA.

augmentation pluriannuelle des flux avait déjà été observée par Bieters *et al.*, (2001) qui l'expliquaient par la baisse de la quantité de biomasse en surface. Cependant, nous n'avons pas identifié une variation interannuelle significative dans le taux de recouvrement par les résidus de culture. Mais il faut rappeler que durant la période d'érosion intensive du début de saison des pluies, les taux de recouvrement sont très bas, et relativement proches du seuil de 2 % que nous avons identifié plus

haut (figure 6). Une faible variation de ce taux, difficile à détecter, pourrait donc très fortement influencer l'intensité du flux.

A l'inverse sur la parcelle PA on note une très forte augmentation du flux de début de saison des pluies la deuxième année du traitement, alors qu'il tend à diminuer les années suivantes. Cette évolution s'expliquerait par le développement de croûtes d'érosion à la surface du sol. En effet, ces croûtes correspondent à une modification importante de la structure de

surface des sols scellée par une pellicule plasmique et surtout dépourvue de sable libre. Cette absence de particules libres en surface peut créer une limitation de stock de particules disponibles pour l'érosion éolienne qui a déjà été observée sur des croûtes similaires se développant sur des sols plus argileux (Gomes *et al.*, 2003). Si le développement des croûtes a contribué à diminuer le cumul de flux entre 2007 et 2010, on remarque également sur PA en 2009 et 2010, une disparition de la période d'érosion du cœur de la saison sèche qui ne peut s'expliquer par l'encroûtement. En effet, cet encroûtement a aussi pour effet de lisser les surfaces et donc de diminuer leur rugosité. Cette disparition de l'érosion de saison sèche est donc plutôt liée à un accroissement de la rugosité à sa surface contrôlée par les bandes enherbées. Ces bandes, délimitées en 2007, n'ont en effet été réellement colonisées par des herbes sauvages qu'à la saison des pluies 2008, c'est-à-dire après la période d'érosion intense de 2008. Ces bandes enherbées ne permettent donc pas d'expliquer la diminution des flux observée sur PA pendant cette période en 2008. En revanche, il est probable qu'elles ont contribué comme les croûtes d'érosion à diminuer les flux en 2009 et 2010. Mais le dispositif instrumental ne permet pas de quantifier la part relative de ces deux facteurs dans la diminution des flux.

Finalement, il apparaît que sur la totalité de la période de mesure après le traitement de dénudation de PA, entre avril 2006 et décembre 2010, le cumul de flux atteint environ 5510 kg.m^{-1} sur PA tandis qu'il n'est que d'environ 1340 kg.m^{-1} sur PB soit plus de 4 fois plus faible. Lancaster et Baas (1998) avaient mesuré des flux 3 fois plus élevés sur des sols sableux nus que sur des surfaces naturelles avec un taux de couverture par la végétation de 4 %. Cependant, il est difficile de comparer leurs résultats aux nôtres parce que, d'une part, leurs parcelles n'étaient pas isolées des flux extérieurs provenant des surfaces avoisinantes avec des taux de couverture différentes et, d'autre part, la couverture végétale dans leur cas n'est pas liée aux résidus de culture, mais à des herbes encore dressées sur pied. Ceci suggère malgré tout que les surfaces herbeuses pâturées pourraient avoir le même comportement que les surfaces cultivées en ce qui concerne l'impact de la couverture végétale sur l'érosion éolienne des sols.

CONCLUSIONS

Dans la zone cultivée du Sahel, l'érosion éolienne se produit presque exclusivement sur les champs. Son intensité est intimement liée à la vitesse du vent, mais aussi à la quantité de résidus de culture qui recouvrent les surfaces cultivées. Cette quantité dépend à la fois de la production de biomasse de l'année précédente et de la gestion de cette biomasse par les paysans. Avec un taux variant entre 800 et 100 kg.ha^{-1} , les résidus de culture protègent les champs traditionnels de l'érosion éolienne

en saison sèche et diminuent le flux horizontal d'érosion de plus de 3 fois, relativement au sol nu, pendant la période d'érosion maximale, en début de saison des pluies. En-dessous d'un taux de résidus de culture de 100 kg.ha^{-1} , la rugosité aérodynamique des sols chute de plus d'un ordre de grandeur ce qui explique la très forte érosion éolienne qui se produit alors. Cette intense érosion éolienne des surfaces nues ou peu couvertes est à l'origine du développement rapide de croûtes d'érosion au cours de la saison des pluies. Ces croûtes influencent à la fois l'érosion éolienne et l'érosion hydrique :

- par l'absence de grains libres à leur surface, elles limitent le stock de particules érodables et diminuent manifestement les flux d'érosion éolienne. L'impact de ce processus de limitation du stock sur l'intensité des flux reste cependant à quantifier, en particulier en prenant en compte la taille des surfaces encroûtées et surtout la présence ou l'absence dans leur environnement immédiat de source de particules libres ;
- par l'accumulation de particules fines en surface, elles diminuent de façon drastique l'infiltration, favorisent ainsi le ruissellement et, lorsque que l'eau se concentre sur les pentes, l'érosion hydrique sous forme de ravines.

Le développement des croûtes d'érosion est le principal facteur identifié par Descroix *et al.*, (2012) pour expliquer l'augmentation actuelle des inondations catastrophiques au Sahel. Le rôle de l'érosion éolienne dans l'encroûtement des sols mérite donc d'être plus largement étudié car il semble primordial dans les phases initiales de ce processus, au moment où il est théoriquement le plus facile d'y remédier. Cependant, le test de bandes enherbées que nous avons réalisé sur la parcelle nue PA montre bien la difficulté de lutter contre l'érosion éolienne. S'il a bien permis de diminuer l'érosion en saison sèche, il a manifestement été inefficace pour réduire l'encroûtement.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdourhamane Toure A, Rajot J.L., Garba Z, Marticorena B., Petit C, Sebag D., 2011 - Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel. *Catena*, 85, pp. 205-214
- Ambouta J.M.K., Valentin C., Laverdiere M.R., 1996 - Jachère et croûte d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, 7, pp. 269-275.
- Bationo A., Wani S., Biielders C.L., Vlek P.L.G., Mokwunye A.U., 2000 - Crop residue and fertilizer management to improve soil organic carbon content, soil quality and productivity in the Desert Margins or West Africa. In : Lal R, Kimble J.M., and Stewart B.A., (eds), *Global climate and tropical ecosystems*. Boca Raton (USA) : CRC Press, pp. 117-45.
- Biielders C.L., Michels K., Rajot J.L., 2000 - On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger. *Soil Science Society of America Journal*, 64, pp. 1776-1785.
- Biielders 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, pp. 19-39.
- Biielders 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, pp. 19-32.
- Blumberg D.G., Greeley R., 1993 - Field studies of aerodynamic roughness length. *Journal of Arid Environment*, 25, pp. 39-48.
- 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, pp. 101-110
- Casenave A., Valentin C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne Influence sur l'infiltration. Collections didactiques. Paris. Orstom éditions, 229 p.
- Descroix L., Genthon P., Amogu O., Rajot J.L., Sighomnou D., Vauclin M., 2012 - Change in Sahelian Rivers hydrograph : The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global and Planetary Change*, 98-99, pp. 18-30.
- Fryrear D.W., 1986 - A field dust sampler. *J. Soil Water Conserv.*, 41, pp. 117-120.
- Gavaud M., 1968 - Les sols bien drainés sur matériaux sableux du Niger. Essai de systématique régionale. *Cah. Orstom Sér. Pédol.*, 6, pp. 271-307.
- Gavaud M., 1977 - Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional., Travaux et documents de l'ORSTOM, 76. ORSTOM, Paris, 102 p.
- 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, pp. 257-271.
- International Soil Science Society (ISSS)-International Soil Reference and Information Centre (ISRIC)-Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1994. World reference base for soil resources draft (O. C. Spaargaren, ed.), Wageningen/Rome.
- Lancaster N., Baas A., 1998 - Influence of vegetation cover on sand transport by wind : field studies at Owens lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, pp. 69-82.
- Larwanou M., Saadou M., Hamadou S., 2006 - Les arbres dans les systèmes agraires en zone sahélienne du Niger : mode de gestion, atouts et contraintes. *Tropicultura*, 24 (1), pp. 14-18.
- 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, pp. 8051-8101.
- Michels K., Sivakumar M.V.K., Allison B.E., 1993 - Wind erosion in the Southern Sahelian Zone and induced constraints to pearl millet production. *Agric. Forest Meteorol.*, 67, pp. 65-77.
- 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, pp. 101-110.
- Rajot J. L., 2001 - Wind blown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger. *Bull. Soc. Geol. France*, 5, pp. 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, pp. 1-16.
- 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, pp. 17-30.
- Sivakumar M.V.K. 1989 - Agroclimatic aspects of rainfed agriculture in the Sudano-Sahelian zone. In : Soil, Crop and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian zone. Proceedings of an International Workshop, 7-11 January 1987, ICRIASAT Sahelian Center, Niamey, Niger, pp. 17-38.
- Soil Survey Staff, 1975 - Soil taxonomy : a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, USDARSCS Agricultural Handbook No. 436. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Sow M., Alfaro S., Rajot, J.L., Marticorena B., 2009 - Size resolved dust emission fluxes measured in Niger during 3 dust storms of the AMMA experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, pp. 3881-3891
- Sterk G., Hermann L., Bationo A., 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.
- Sterk G., Stein A., 1997 - Mapping wind blown mass transport by modelling variability in space and time. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 232-239.
- Stull R.B., 1991 - An introduction to boundary layer meteorology. Atmos. Sci. Library, Boston, 666 p.
- United Nations, 2007 - World population prospects. The 2006 revision, population database, United Nations, population division, <http://esa.u.org/unpp/>
- Visser S.M., Stroosnijder L., Chardon W.J., 2005 - Nutrient losses by wind and water, measurement and modelling, *Catena*, 63, pp. 1-22.

