

Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel : cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso

Jean-Louis Rajot¹
 Harouna Karambiri²
 Olivier Ribolzi³
 Olivier Planchon⁴
 Jean-Pierre Thiebaut³

¹ IRD, UR 176 Solutions
 Université Abdou-Moumouni (UAM)
 IRD, BP 11416
 Niamey
 Niger

<Jeanlouis.rajot@ird.fr>
² 2iE (Groupe EIER-ETSHER)
 UTER GVEA
 01 BP 594

Ouagadougou 01
 Burkina Faso
 <harouna.karambiri@2ie-edu.org>
³ IRD

UR 176 Solutions
 IRD-IWMI-NAFRI
 BP 06 Vientiane
 Laos RDP
 <Olivier.Ribolzi@ird.fr>
 <jean-pierre.thiebaut@ird.fr>
⁴ IRD

UR 176 Solutions
 Po Box 1025
 Kasetsart University
 Bangkok 10903
 Thailand
 <Olivier.Planchon@Gmail.com>

Résumé

Au Sahel, les sols sableux sont largement répandus et supportent non seulement l'essentiel de la production de mil, la principale culture vivrière, mais aussi l'essentiel de la production fourragère. Ils se développent sur des voiles sableux, voire de véritables dunes d'origine éolienne qui se sont mises en place au cours de périodes arides. Ils sont donc particulièrement sensibles à l'érosion éolienne. Leur faible teneur en argile est cependant suffisante pour permettre la formation de croûtes superficielles au cours des pluies qui entraînent le ruissellement et l'érosion hydrique. Les lignes de grains, événements convectifs de mésoéchelle, qui produisent l'essentiel de la pluie au Sahel, sont très souvent précédées de vents extrêmement violents. L'érosion hydrique et l'érosion éolienne sont ainsi étroitement associées aussi bien dans le temps que dans l'espace. Malgré cela, elles sont très rarement étudiées simultanément. De telles mesures d'érosion ont été effectuées, pendant deux années consécutives (2001 et 2002), sur un petit bassin-versant pâturé (1,4 ha), typique de la zone sahélienne, situé à Katchari au nord du Burkina Faso, avec 500 mm de pluies annuelles. L'érosion éolienne se produit essentiellement au début de la saison des pluies, lorsque la couverture des sols par les plantes annuelles est minimale, de mai à mi-juillet, avant la croissance de la végétation. La dynamique éolienne est exactement la même sur ces sols non cultivés que sur les champs de mil étudiés dans d'autres régions du Sahel. L'érosion hydrique se produit pendant toute la saison des pluies, mais l'essentiel de la perte en terre annuelle intervient au cours de quelques événements particulièrement intenses. C'est le vent qui produit les flux de sédiments les plus importants. Ces flux entraînent soit une érosion (jusqu'à 20 Mg/ha par an), soit un dépôt de sédiments (jusqu'à 30 Mg/ha par an) selon l'endroit où ils se produisent dans le bassin-versant. L'érosion hydrique est d'un ordre de grandeur plus faible que l'érosion éolienne. Elle est plus intense où l'érosion éolienne est la plus forte. Ainsi, les mêmes surfaces sont érodées à la fois par le vent et par l'eau. À l'inverse, les zones où on observe un dépôt de sédiments par le vent ruissellent très peu et ne produisent quasi pas d'érosion hydrique. Ces zones correspondent à des îlots de fertilité où se développe la végétation. À l'issue de cette étude, il n'y a pas globalement de dégradation des sols à l'échelle du bassin-versant, mais une intense dynamique éolienne et hydrique qui entretient une très forte variabilité spatiale typique des environnements sahéliens.

Mots clés : érosion éolienne, érosion hydrique, Sahel.

Tirés à part : J.-L. Rajot

Abstract

Wind and water erosions of pastured sandy soils in the Sahel: A case study in Northern Burkina Faso

In the Sahel, sandy soils are widespread and support not only most of the pearl millet production, the major staple crop in the region, but also grass production for livestock. Parent sediments of these soils have an aeolian origin and are hence prone to wind erosion. Still, their clay content, even though very low, allows physical crust formation during rainfall leading to runoff and water erosion. Squall lines, major rainfall events of the rainy season, are usually preceded by intense wind. Wind and water erosions are therefore closely associated in both time and space, but they are rarely studied simultaneously. Erosion measurements were performed for two years (2001, 2002) on a small catchment of grazing land (1,4 ha) at Katchari, Burkina Faso, a location typical of the Sahel area with under 500 mm annual rainfall. Wind erosion occurs at the onset of the rainy season, from May to 15th of July, when soil cover is the lowest and before the growth of vegetation. On this non-cultivated area, the same dynamic unfolds as that recorded in millet fields in other sahelian studies. Water erosion occurs throughout the rainy season, but certain intense events produce most of the total annual erosion. Wind causes the largest sediment fluxes leading to both erosion (up to 20 Mg/ha per year) and deposition (up to 30 Mg/ha per year) depending on the area in the catchment. Water erosion is one order of magnitude lower than wind erosion and is more intense where wind erosion is highest. Hence, the same area is eroded by both wind and water. Conversely, areas where aeolian deposition occurs are less affected by water erosion and correspond to fertile islands where vegetation grows. From this study, it comes out that there is on the whole no land degradation at the catchment scale, but an intense aeolian and water dynamic leading to substantial spatial variability typical of sahelian landscapes.

Key words: Sahel, water erosion, wind erosion.

Les sols sableux couvrent la majorité de la surface du Sahel. Ils représentent, par exemple, plus de 80 % de la zone agropastorale au Niger [1]. Ils supportent de plus l'essentiel de la production végétale annuelle : les herbacées consommées par le bétail et le mil (*Penisetum glaucum*), la principale culture vivrière de la zone. À ce titre, ils jouent donc un rôle majeur pour les agriculteurs qui représentent plus de 80 % de la population sahélienne [2, 3]. Ces sols subissent à la fois l'érosion éolienne et l'érosion hydrique, pourtant ces deux processus sont très rarement étudiés simultanément. La quantification de l'érosion éolienne, plus rarement effectuée que celle de l'érosion hydrique, concerne essentiellement les zones cultivées (champ ou jachère). À titre d'exemple, à l'échelle du champ, les pertes en terre peuvent atteindre des valeurs extrêmement élevées (plus de 25 Mg/ha par an) [4]. En revanche, il existe très peu de quantifications de l'érosion éolienne spécifiquement pour la zone pastorale. Les pertes en terre causées par l'érosion hydrique semblent relativement moins importantes [5], mais comme les mesures n'ont pas été effectuées pour le même type de surface (même état de surface et même superficie), elles restent extrêmement difficiles à comparer. Cependant, des travaux récents [6] réalisés dans la même zone que cette étude ont visé à comparer ces deux types

d'érosion à partir de mesures expérimentales et de modélisation. Les résultats obtenus confirment bien la tendance évoquée plus haut : les flux de sédiments et de nutriments déplacés par l'érosion éolienne sont de plusieurs ordres de grandeurs supérieurs à ceux mobilisés par l'érosion hydrique. Ces données ont été obtenues à l'échelle des événements érosifs et sur trois parcelles expérimentales (deux champs de mil et une surface nue gravillonnaire), mais elles ne concernent pas la zone pâturée.

L'objectif de ce travail est de quantifier en parallèle les érosions éolienne et hydrique sur deux cycles annuels et pour les mêmes surfaces : des petits bassins-versants pâturés montrant une grande variété d'états de surface.

Matériel et méthode

Zone d'étude

La zone d'étude se situe au nord du Burkina Faso (UTM30, WGS84, 809 847 m Est, 1 550 930 m Nord), près de Dori, 250 km au nord-est de Ouagadougou (figure 1). Le climat est de type sahélien avec une longue saison sèche et une courte saison des pluies, de mai à septembre. La moyenne des pluies annuelles enregist-

trée à Dori, de 1925 à 1998, est de 512 mm.

Les zones pâturées du terroir villageois occupent un glacis à faible pente (en moyenne 1 %). Celui-ci présente deux types majeurs de surfaces [7] : de larges zones de sols argileux nus et encroûtés recouverts localement par des sols sableux se développant sur des dépôts d'origine éolienne (microdunes ne dépassant pas 0,7 m d'épaisseur). Ce sont sur ces sols sableux que la végétation annuelle, les buissons et les arbres se développent.

Au sein de ce glacis, un petit bassin-versant représentatif (1,4 ha) a été instrumenté. Il présente cinq types d'état de surface tels que décrits par Casenave et Valentin [8] (figure 1), présentés ci-dessous par ordre d'aptitude croissante à l'infiltration :

- des surfaces nues de croûtes d'érosion (ERO) qui représentent 33,9 % de la surface totale du bassin ;
- des croûtes gravillonnaires (G) également nues qui ne couvrent que 0,4 % de la surface ;
- des croûtes de décantation (SED) qui tapissent le fond de flaques et de dépressions et représentent 1,2 % du bassin ;
- des croûtes de ruissellement (RUN) formées de succession de lamines de sédiments de granulométrie variable généralement déposés dans les axes d'écoulement représentant 4,2 % de la surface ;

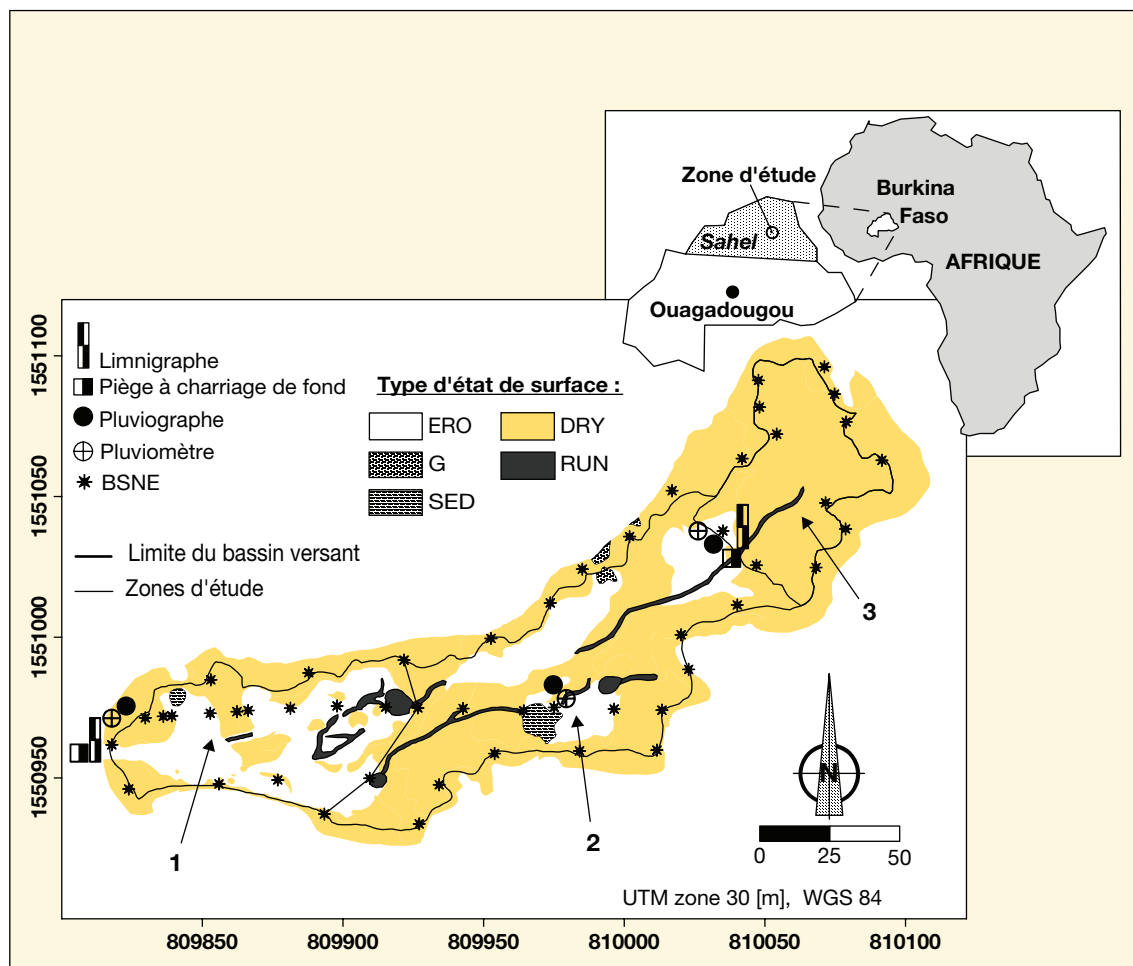


Figure 1. Localisation du site d'étude, carte des états de surface, dispositif expérimental et limite des zones d'étude (1 à 3) sur lesquelles ont été calculés les bilans d'érosions éolienne et hydrique.

– des croûtes de dessiccation (DRY) qui couvrent les flancs sous le vent des microdunes sableuses et représentent 60,3 % de la surface totale du bassin. Il faut noter que les microdunes, où se développe la végétation, représentent en fait 69 % de la surface totale du bassin, mais leurs flancs au vent (14,3 % de la surface du bassin), très pentus et souvent dénudés, présentent un sous-type particulier de croûte d'érosion sur sédiments sableux qui pourra être identifié dans la suite de l'étude (ERO/S). Cette croûte est souvent fragmentée en raison de la structure interne litée des microdunes où alternent pellicules plasmiques et couches sableuses résultant de leur mise en place sous l'action du vent.

Les cinq types de croûtes ainsi définis permettent d'isoler trois zones au sein du bassin principal, relativement homogènes en termes de répartition des croûtes de surface (figure 1) :

– une zone 3, en amont (sous bassin-versant emboîté dans le bassin principal),

presque entièrement couverte par les croûtes DRY ;

– une zone 2, médiane, où les croûtes ERO (20 % environ de la surface) apparaissent en tache au sein des croûtes DRY ;

– une zone 1, aval, où la répartition s'inverse, avec des croûtes ERO qui dominent largement (80 % de la surface) et où les croûtes DRY se cantonnent sur quelques buttes sableuses de petite taille et isolées.

Le suivi couplé des érosions éolienne et hydrique a été réalisé du 1^{er} juin 2001 à fin septembre 2002.

Mesure de l'érosion hydrique

Dans cette étude, nous avons voulu éviter l'utilisation de parcelles d'érosion classiques [9] dont les bordures constituent de véritables brise-vent qui modifient les écoulements de l'air. Cela provoque généralement des dépôts éoliens importants au sein des parcelles qui peuvent ensuite perturber

considérablement la dynamique hydrique en favorisant l'infiltration [10] et/ou en constituant une source de sédiments facilement mobilisable par le ruissellement. Pour éviter de telles perturbations, l'érosion hydrique a été mesurée sur deux petits bassins-versants naturels emboîtés. Le bassin-versant amont de 0,3 ha correspond à la zone 3 de la figure 1.

La pluie a été mesurée grâce à trois pluviomètres totalisateurs à lecture directe et trois pluviographes à auget basculeur. Les crues de chaque bassin ont été mesurées sur des seuils calibrés, équipés de capteurs de pression. Les flux de matières en suspension ont été obtenus par des prélèvements discrets d'un litre, réalisés aux deux exutoires au cours de la crue, avec des pas de temps variables de deux à cinq minutes en fonction de l'intensité du ruissellement. Le charriage de fond a été collecté dans des pièges à sédiments relevés après chaque événement de ruissellement.

L'ensemble des sédiments est ensuite séché et pesé.

Mesure de l'érosion éolienne

Sur les zones pastorales du Sahel, il n'existe pas de limite claire contrôlant l'érosion éolienne, à la différence des zones cultivées où les limites de champs et surtout les limites entre champs et jachères sont déterminantes [11, 12]. En conséquence, les limites des surfaces de mesure de l'érosion éolienne sont celles qui contrôlent l'érosion hydrique, à savoir les limites topographiques du bassin-versant principal et du bassin-versant amont emboîté (zone 3) (figure 1). Au sein du bassin-versant principal, nous avons aussi travaillé sur les deux zones aval qui se différencient par l'organisation de leurs états de surface (zones 1 et 2 - figure 1).

Les flux de sédiments éoliens ont été mesurés grâce à 50 mâts équipés chacun de trois capteurs de sable de type BSNE (*big spring number eight*) [13], dont le milieu de l'ouverture est situé en moyenne à 0,05, 0,15 et 0,30 m de haut. Ces mâts sont placés approximativement tous les 20 m sur la limite des bassins-versants et sur celle des zones 1 et 2 (figure 1). Un transect orienté est-ouest, selon la direction des vents les plus érosifs, a également été mis en place. Chaque mât est, dans ce cas, placé à la transition entre les différents types d'état de surface reconnus sur le transect (figure 1).

Les sédiments piégés dans les BSNE ont été collectés dans la mesure du possible après chaque événement d'érosion éolienne, de juin à juillet, et une fois par mois en saison sèche, d'octobre 2001 à mai 2002. Pour chaque mât, on ajuste le profil de densité de flux sur une fonction puissance [4] de type :

$$q_{(z)} = a \cdot (1 + z)^b \quad (1)$$

avec $q_{(z)}$ densité de flux (kg/m^2) mesurée à la hauteur z (m), a et b constantes d'ajustement de la loi.

Le flux horizontal F_H (kg/m) est alors calculé en intégrant l'équation 1 sur la hauteur (de 0 à 0,40 m de haut).

$$F_H = \int_0^{0,4} q_{(z)} = \frac{a}{b+1} (1+0,4)^{b+1} - 1 \quad (2)$$

La vitesse du vent et sa direction ont été mesurées sur une station météorologique automatique (Campbell) au pas de temps de cinq minutes. Un saltiphone, capteur de saltation qui enregistre les impacts des grains de sables sur un microphone [14], a permis de déterminer précisément la date et la durée de chaque événement érosif. La direction moyenne du vent pendant

ces événements a été calculée en pondérant la direction par le cube de la vitesse du vent. Connaissant cette direction moyenne, il est possible de déterminer, pour chaque événement, la limite au vent (où les flux éoliens entrent) et la limite sous le vent (où les flux éoliens sortent) des différentes surfaces étudiées. La masse de sédiments traversant ces limites est alors calculée pour chaque segment compris entre deux mâts de BSNE, en faisant l'hypothèse que les flux varient linéairement entre deux mâts successifs.

$$M_{(n,n+1)} = D_{(n,n+1)} \frac{F_{H(n)} + F_{H(n+1)}}{2} \quad (3)$$

avec $M_{(n,n+1)}$ la masse de sédiments (kg) traversant le segment compris entre deux mâts de BSNE successifs n et $n+1$, $D_{(n,n+1)}$ la distance (m) perpendiculaire au vent moyen entre les deux mâts successifs et $F_{H(n)}$ et $F_{H(n+1)}$ les valeurs des flux horizontaux (kg/m) calculées d'après l'équation (2) aux mâts n et $n+1$. Le bilan de masse pour chaque surface étudiée est la somme des masses traversant les segments situés sur la limite au vent diminuée de la somme des masses traversant les segments situés sur la limite sous le vent des surfaces étudiées. En divisant le bilan de masse ainsi obtenu par l'aire des surfaces, on obtient les pertes (ou gains) en terre par unité de surface, comparables aux mesures d'érosion hydrique.

Quinze mâts de BSNE ont été installés sur le transect est-ouest à chaque changement d'état de surface. Quand les vents érosifs ont correspondu sensiblement à l'orientation du transect ($95 \pm 15^\circ\text{N}$), il a été possible d'obtenir un bilan de masse par type d'état de surface en calculant la différence entre le flux mesuré sur deux mâts successifs dans le sens du vent divisée par la distance entre ces deux mâts [4]. Les mesures sur le transect ne concernent que l'année 2001.

Résultats et discussion

Dynamique des flux éoliens

Les 50 mâts de mesures ont été relevés 57 fois pendant la totalité de la période d'observation. Quelques relevés correspondent à des cumuls d'événements qui se sont succédé trop rapidement pour permettre la collecte des échantillons ou qui se sont produits en fin de saison sèche, pendant les périodes de mesures mensuelles. À partir des enregistrements météorologiques, on a pu estimer que 68 événements d'érosion se sont produits au cours des

16 mois de mesures. Pendant les périodes de mesures communes, en 2001 et 2002 (de juin à septembre), il y a eu respectivement 33 et 21 événements en 2001 et 2002. Mais pour ces mêmes périodes, la somme des densités de flux mesurées à 30 cm de haut et moyennées sur les 50 points de mesure ($\overline{q_{(0,3)}}$) a été, respectivement, de 250 et 220 kg/m^2 en 2001 et 2002. Ainsi, la variabilité interannuelle observée apparaît plus faible que celle obtenue au Niger, de 1996 à 1998, par Rajot [15].

Seuls trois événements se sont produits au cours de la saison sèche, d'octobre à mars. Ces événements représentent moins de 0,3 % de $\overline{q_{(0,3)}}$ cumulé pour la totalité de la période de mesures. Le premier événement de 2002 s'est produit le 6 avril, en liaison avec la première pluie de l'année. Comme cela est observé dans la zone cultivée du Niger [12, 15, 16], les vents d'harmattan de saison sèche ne produisent pas non plus d'érosion éolienne significative sur les sols pâturés de cette zone d'étude. Sur l'ensemble de la période de mesures, huit événements ont produit 53 % de $\overline{q_{(0,3)}}$ cumulé pour la totalité de la période de mesure. Cinq d'entre eux se sont produits en juin, deux en juillet et un en avril. Comme au Niger, quelques événements du début de la saison des pluies produisent donc l'essentiel des flux mesurés [15].

La figure 2 montre le $\overline{q_{(0,3)}}$ en fonction des classes de direction moyenne du vent au cours des événements érosifs sur la totalité de la période de mesures. Soixante-quinze pour cent du flux correspondent à des vents soufflant de directions comprises entre l'est et le sud-est (entre 75 et 165°). Ce résultat est en bon accord avec la morphologie locale des microdunes qui présentent systématiquement une pente plus forte et érodée sur le côté faisant face à cette direction.

Toutes ces observations sont en excellent accord avec la dynamique généralement observée au Niger sous des pluviométries voisines [12], ce qui suggère une dynamique éolienne relativement homogène sur l'ensemble du Sahel.

Bilan de masse de l'érosion éolienne au sein des différentes zones d'études

Parmi les 68 événements ayant produit des flux horizontaux de sédiments pendant la période d'étude, seuls 26 événements n'ont pas permis de calculer des bilans soit du fait de mélanges entre événements de directions différentes dans les relevés, soit parce que la direction du vent a fortement varié au cours de l'événement. Le $\overline{q_{(0,3)}}$ cumulé pour les 42 événements restants correspond à 87 % du

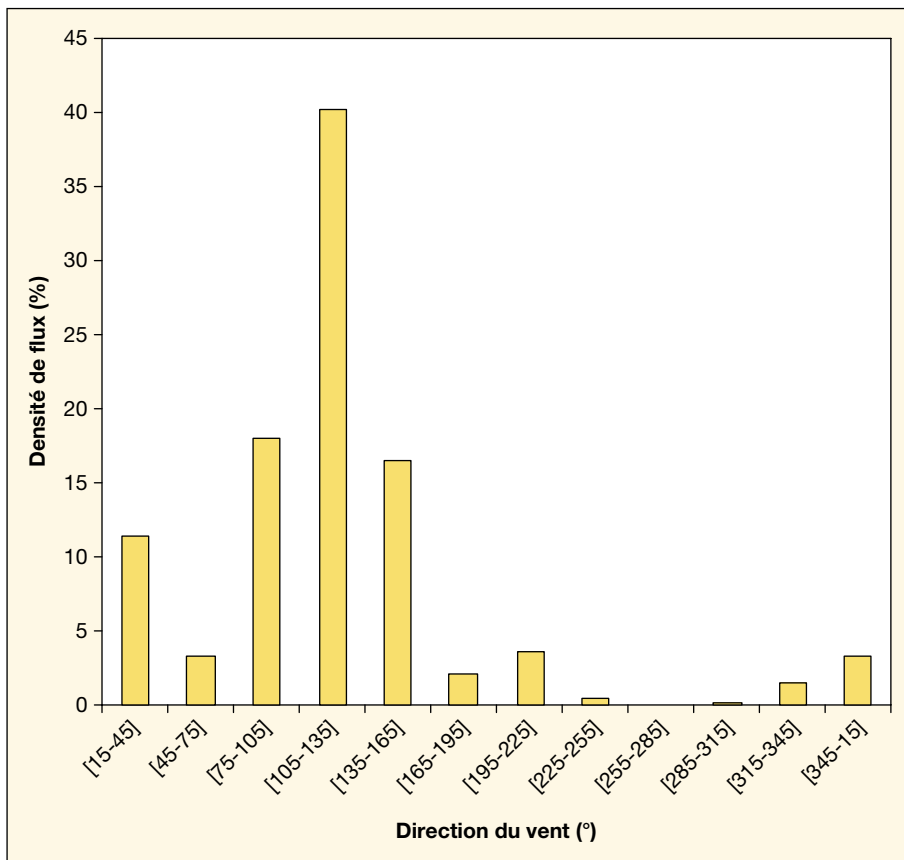


Figure 2. Pourcentage par classe de directions de vent au cours des événements érosifs de la densité de flux à 30 cm de haut, moyennée sur les 50 mâts de BSNE ($\bar{q}_{(0,3)}$) et cumulée sur la totalité de la période de mesures.

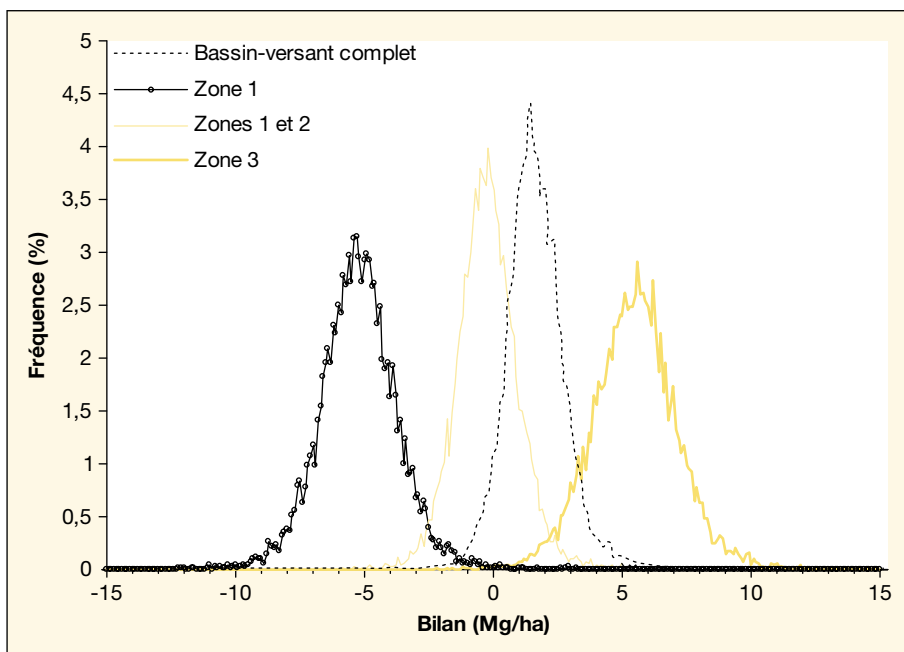


Figure 3. Résultats du calcul de propagation d'erreur selon la méthode de Monte Carlo (10 000 itérations) sur le bilan de masse d'érosion éolienne pour l'événement du 3 juin 2002. La dispersion des résultats reste relativement faible et montre que les bilans mesurés sont significativement différents selon les zones considérées.

$\bar{q}_{(0,3)}$ cumulé pour la totalité de la période de mesures. De plus, aucun événement majeur n'a été rejeté. On peut donc considérer que les bilans obtenus à partir des 42 événements utilisables donnent une bonne image de l'érosion éolienne sur les bassins-versants et les surfaces étudiées.

Un calcul de propagation des erreurs, utilisant la procédure de Monte Carlo, a été effectué pour l'un des événements érosifs majeurs (le 3 juin 2002), afin d'estimer la précision des bilans obtenus par cette méthode pour les différentes surfaces. Ce calcul prend en compte toutes les incertitudes pouvant affecter le calcul des bilans, à savoir les incertitudes sur : la hauteur des BSNE, la surface de leur ouverture, la pesée des sédiments collectés, l'ajustement du profil de densité de flux à la courbe théorique pour calculer le flux horizontal à chaque mât, la position des mâts sur le bassin-versant, la direction des vents érosifs. Les coefficients de variation ainsi obtenus varient de 20 à 150 % selon les surfaces considérées pour les calculs. Malgré cette variabilité, les bilans obtenus pour chaque surface restent significativement différents les uns des autres (figure 3), ce qui traduit bien une différence de fonctionnement selon le type d'état de surface.

La figure 4 montre les bilans de masse de l'érosion éolienne pour les trois surfaces identifiées au sein du bassin-versant principal (figure 1). Ces trois surfaces ont un comportement extrêmement différent : le bilan est presque systématiquement positif pour le sous bassin-versant amont (zone 3), alors qu'il est presque systématiquement négatif pour la zone aval n° 1. Les bilans cumulés sur la totalité de la période de mesures correspondent donc à des dépôts de +65 Mg/ha et à des pertes en terre de -35 Mg/ha pour les zones 3 et 1, respectivement. Dans la zone centrale (n° 2), on observe à la fois des gains et des pertes en terre, mais le bilan est finalement positif sur la période complète de mesures (+27 Mg/ha). À l'échelle du bassin-versant, ces différences de comportement selon les surfaces étudiées conduisent à un bilan quasi équilibré en 2001 (+1 Mg/ha) et franchement positif en 2002 (+15 Mg/ha), soit 16 Mg/ha à la fin de la période de mesures.

De telles valeurs de dépôts relativement élevées ont déjà été rapportées par Biellers *et al.*, [4] dans des jachères au Niger qui présentaient un état de surface tout à fait similaire à celui du bassin-versant amont (zone 3) de notre site d'étude (croûte DRY partiellement couverte de végétation annuelle et de buissons). Dans ce cas, le dépôt de sédiments a été attribué à une plus grande rugosité des états de surface des jachères par rapport

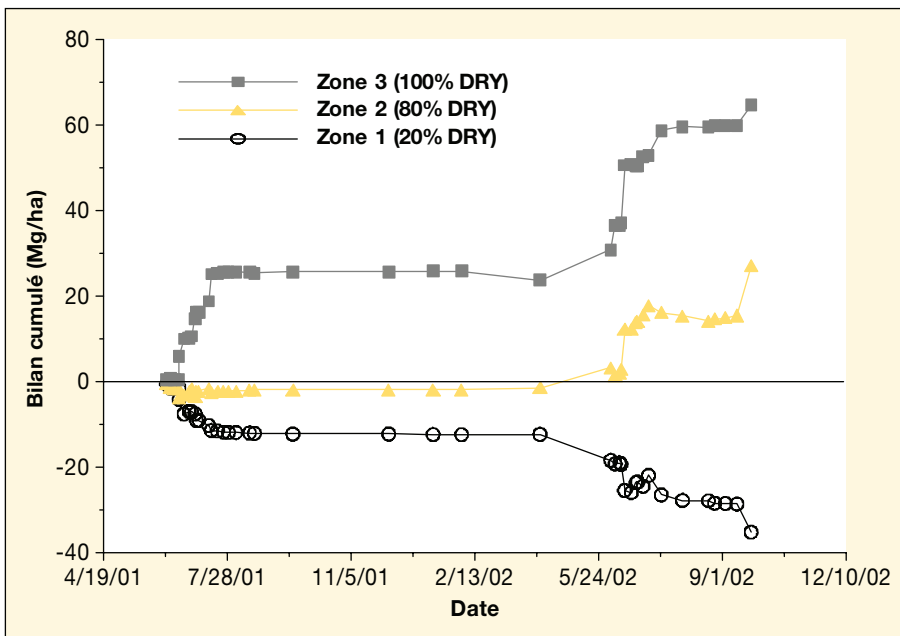


Figure 4. Bilan cumulé de l'érosion éolienne (Mg/ha) sur les deux années de mesure pour les trois zones définies par l'organisation de leurs états de surface.

aux champs, en particulier du fait de la présence de la végétation pérenne et annuelle. Au Niger, les zones sources de sédiments transportés par le vent sont clairement les champs cultivés [12]. Dans cette étude, l'érosion éolienne se produit sur des surfaces naturelles complexes où plusieurs types d'état de surface sont représentés (figure 1). C'est pourquoi, nous avons cherché à identifier plus précisément l'ori-

gine des sédiments mobilisés à partir des mesures effectuées sur le transect de BSNE.

Bilan des sédiments éoliens sur le transect en fonction des types d'état de surface

Le transect de BSNE traverse les zones 1 et 2 (figure 1) du bassin-versant et recoupe donc les principaux types d'état de surface

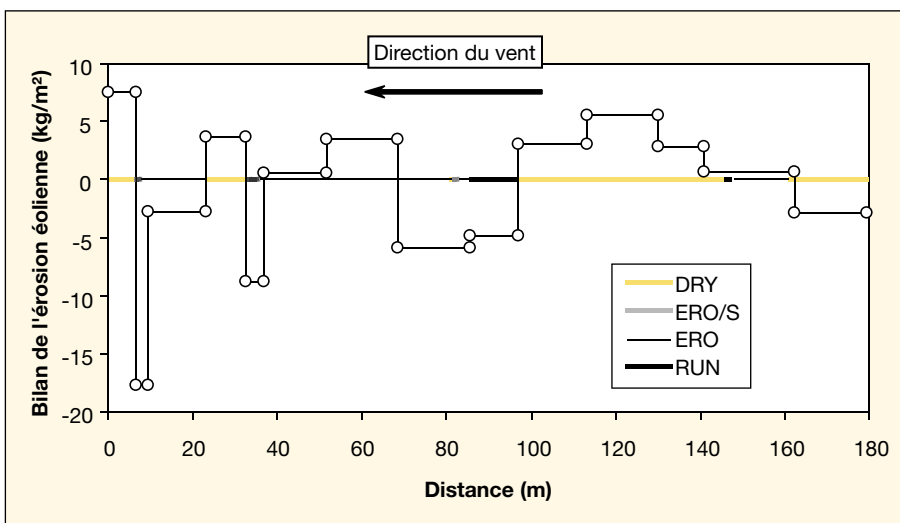


Figure 5. Bilan de l'érosion éolienne sur le transect calculé pour les cinq événements de direction est-ouest (parallèle à l'orientation du transect) en fonction de la distance à la bordure ouest du bassin-versant.

Les différents types d'états de surface (voir le texte pour leur description) sont indiqués sur l'axe des abscisses. Le transect traverse la zone 1 de 0 à 100 m et la zone 2 de 100 à 180 m (Fig. 1).

rencontrés. Seuls cinq événements érosifs ont respecté les critères de direction nécessaires pour calculer les bilans sur le transect. Mais deux de ces événements étaient les plus intenses de l'année 2001. La figure 5 représente la somme des bilans obtenus pour ces cinq événements le long du transect et selon les types d'états de surface. Ces résultats montrent d'abord la très grande variabilité spatiale de l'érosion éolienne sur de très courtes distances, de l'ordre du mètre. Les bilans ne sont pas constants selon les types d'état de surfaces : l'érosion peut se produire sur les croûtes DRY des microdunes sableuses, et les dépôts peuvent se produire sur des croûtes ERO. Néanmoins, c'est bien sûr les grandes surfaces de croûtes DRY qu'il y a le plus de dépôts, ce qui confirme les mesures obtenues à plus large échelle sur la zone 3. La situation est plus complexe pour les zones 1 et 2. Les croûtes ERO y représentent la plus grande surface, mais le transect montre que l'érosion y est la plus forte sur les zones où les croûtes d'érosion sur sable (ERO/S) dominant (entre 30 et 37 m) ou sont présentes (entre 70 et 85 m). Les petites microdunes sableuses présentent une étroite association entre croûtes ERO/S et croûtes DRY. Si ces microdunes complètes, avec leurs deux types de croûtes, sont considérées (entre 0 et 9 m et entre 25 et 37 m), il apparaît que le bilan est négatif pour les deux ensembles recoupés par le transect. Ces petites unités seraient ainsi les principales zones érodées dans les surfaces aval du bassin-versant. Cela correspond bien au schéma proposé par Casenave et Valentin [17], pendant les périodes de sécheresse.

Les croûtes RUN seraient également des zones sources potentielles lorsqu'elles sont suffisamment étendues.

Finalement, le fait que des dépôts soient détectés sur les croûtes ERO par les mesures de flux alors que l'on n'observe pas de sable sur le terrain suggère que ces dépôts sont immédiatement mobilisés par l'érosion hydrique qui suit presque systématiquement les plus forts événements d'érosion éolienne lors des lignes de grains [6]. De la même façon, la sensibilité des surfaces de ruissellement (RUN) à l'érosion éolienne montre que l'érosion hydrique produit également des sédiments très facilement mobilisables par l'érosion éolienne.

Dynamique de l'érosion hydrique

La pluie annuelle cumulée a été de 325 mm en 2001 et 345 mm en 2002. Ces deux années montrent donc un déficit important par rapport à la moyenne annuelle (512 mm) calculée sur la période de 1925 à 1998. Ces pluies ont généré 16 crues en 2001 et 13 en 2002. Les épi-

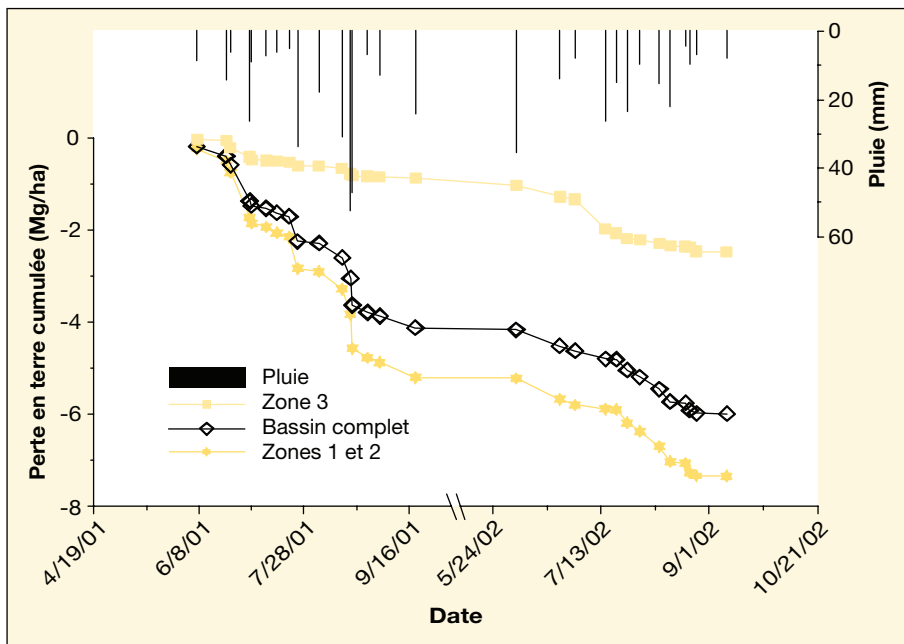


Figure 6. Pluies et pertes en terre par érosion hydrique cumulées pour les deux saisons de mesures (2001 et 2002) pour le bassin-versant principal, le sous-bassin amont (zone 3) et la partie aval du bassin-versant (zones 1 et 2).

sodes d'érosion hydrique sont donc plus de deux fois moins nombreux que ceux d'érosion éolienne. Bien que la quantité de pluie ait été légèrement plus faible en 2001, il y a eu plus d'événements intenses qu'en 2002 : seules deux événements ont dépassé 25 mm de pluie en 2002, alors qu'il y en a eu quatre en 2001 (figure 6). Pour le bassin-versant principal, les pertes en terre ont été deux fois plus fortes en 2001, mais l'inverse s'est produit pour le petit bassin-versant amont (zone 3 figures 1,6). À l'inverse de l'érosion éolienne qui se concentre en début de saison des pluies, l'érosion hydrique peut se produire pendant la totalité de la saison des pluies sans présenter, au cours de cette saison, de période où elle apparaît systématiquement plus intense.

De même que pour l'érosion éolienne, quelques événements très intenses peuvent produire la majorité des pertes en terre. Ainsi en 2001, les quatre pluies les plus

fortes (cumul > 25 mm) ont produit plus de 60 % de l'érosion hydrique (figure 6).

Érosion hydrique au sein des sous-bassins-versants

Les pertes en terre par érosion hydrique cumulées pour la période de mesures ont été estimées, respectivement, à 6,0, 2,5 et 7,3 Mg/ha pour l'ensemble du bassin-versant, le bassin-versant amont (zone 3) et la partie aval du bassin-versant (zones 1 et 2), (figure 6). Les pertes en terre sont donc clairement plus faibles dans la partie amont que dans la partie aval du bassin-versant. Ces résultats sont parfaitement en accord avec les observations de Karambiri et de Karambiri *et al.* [18, 19] sur la même zone d'étude, obtenues pour les saisons des pluies de 1998 à 2000. Cette différence de comportement entre l'amont et l'aval a été attribuée aux différents types d'état de surface qui recouvrent les bassins-versants : les croûtes DRY, qui ont un fort coefficient

d'infiltration et sur lesquelles pousse la végétation herbacée, occupent la presque totalité du bassin-versant amont. Elles favorisent donc l'infiltration aux dépens du ruissellement. À l'inverse, les zones aval sont dominées par les croûtes ERO, quasi imperméables [17], qui produisent un très fort ruissellement conduisant à une forte érosion hydrique.

La distribution granulométrique des sédiments exportés varie selon les bassins-versants. Sur le bassin amont (zone 3), les sédiments sont essentiellement du sable transporté par charriage de fond. À l'inverse, les zones aval (zones 1 et 2) produisent essentiellement des argiles et des limons transportés en suspension. Ces résultats montrent que les croûtes ERO argileuses sont très vraisemblablement la principale source de sédiments pour l'érosion hydrique. Cela confirme également les résultats obtenus par Karambiri et Karambiri *et al.* [18, 19].

Bilan global des érosions hydrique et éolienne

À l'échelle du bassin-versant, si l'on prend en compte à la fois l'érosion hydrique et l'érosion éolienne pour la totalité de la période de mesures, on obtient un bilan positif de 10,2 Mg/ha. Ce résultat masque, cependant, une très forte variabilité spatiale (dépôts éoliens intenses dans la zone amont, forte érosion hydrique comme éolienne dans la zone aval) ainsi qu'une variabilité temporelle interannuelle (tableau 1). Dans cette zone d'étude, l'érosion hydrique peut, localement, atteindre le même ordre de grandeur que l'érosion éolienne à l'inverse de ce qui a été observé dans les champs cultivés [6] où l'érosion éolienne domine très clairement.

Conclusion

Pour la première fois au Sahel, l'érosion éolienne et l'érosion hydrique ont été mesurées de façon couplée sur une même surface naturelle consacrée au pâturage. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

Tableau 1. Bilans cumulés (Mg/ha) de l'érosion hydrique, l'érosion éolienne et de l'érosion globale pour les différentes surfaces étudiées.

Érosion	Hydrique	Éolienne	Globale	Hydrique	Éolienne	Globale	Hydrique	Éolienne	Globale
	2001			2002			Cumul		
Totalité du bassin	-4,1	1,1	-3,0	-1,9	15,1	13,2	-6,0	16,2	10,2
Zone 3	-0,9	25,7	24,8	-1,6	39,0	37,4	-2,5	64,7	62,2
Zone 1 et 2	-5,2	-6,4	-11,6	-2,1	6,0	3,9	-7,3	-0,4	-7,7

– la dynamique annuelle de l'érosion éolienne pour les surfaces pâturées est sensiblement la même que pour les surfaces cultivées étudiées au Niger. Elle apparaît typique du Sahel, sous une pluviométrie de 300 à 500 mm ;

– l'érosion éolienne se produit selon une direction dominante, responsable de l'orientation et de la morphologie asymétrique des microdunes sableuses qui influencent le ruissellement et l'infiltration [20] ;

– les événements d'érosion éolienne sont plus nombreux que ceux d'érosion hydrique et, aux échelles les plus fines, plus intenses, déplaçant des quantités de sédiments très nettement plus importantes ;

– on observe une très forte variabilité temporelle et surtout spatiale à l'échelle locale, typique du Sahel, avec des zones de dépôt net correspondant à des larges surfaces de plusieurs dizaines de mètres, couvertes de croûtes DRY où se développe la végétation, et des zones d'érosion nette dominées par les sols nus à croûtes ERO où subsistent quelques buttes sableuses de petite taille ;

– cependant, à la différence de l'érosion hydrique, il n'y a pas une relation simple entre le type de croûte et sa sensibilité à l'érosion éolienne. La taille des unités morphologiques et leur organisation spatiale jouent aussi sur l'intensité de l'érosion. Ainsi, les plus petites microdunes sableuses entourées de sols nus, bien que couvertes de croûtes DRY, subissent manifestement une érosion nette. De même, la succession des croûtes dans l'espace joue certainement un rôle. Ainsi, la présence de sable libre au vent des croûtes ERO peut provoquer leur érosion par abrasion ;

– dans la partie aval du bassin-versant, les deux types d'érosion sont plus intenses, et chacun contribue à fournir des sédiments mobilisables par l'autre type d'érosion.

Ces différents résultats soulignent la difficulté d'estimer la dégradation des terres au Sahel qui dépend fondamentalement de l'échelle d'observation. Ils suggèrent un lien très fort, à l'échelle de quelques mètres, entre des zones sources de sédiments qui se dégradent et des zones puits où la végétation se développe en îlots de fertilité [21]. Finalement, ils démontrent l'importance de prendre en compte à la

fois l'érosion éolienne et l'érosion hydrique pour quantifier la dégradation des terres au Sahel. ■

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien du département des ressources vivantes de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et a été financé par le Programme national sol et érosion (PNSE). Nous tenons à remercier l'Inera (Institut national de l'environnement et de recherche agricole, Burkina Faso) qui nous a permis l'accès au site de recherche de Katchari.

Références

1. Gavaud M. *Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional*. Travaux et documents de l'Orstom, 76. Paris : Orstom éditions, 1977.
2. Guengant JP, Banoïn M. *Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers : le Burkina Faso, une étude de cas*. In : Drabo I, Ilboudo F, Tallet B, eds. Paris : Rome : CICRED; FAO, 2003.
3. Thiombiano L. *Étude de l'importance des facteurs édaphiques et pédopaysagiques dans le développement de la désertification en zone sahélienne du Burkina Faso*. Thèse d'État, université de Cocody, République de Côte d'Ivoire, 2000.
4. Biielders CL, Vrieling A, Rajot JL, Skidmore E. *On-farm evaluation of Field-scale Soil Losses by Wind Erosion under Traditional Management in the Sahel*. Proceedings of International Soil Erosion Symposium, ASAE, Honolulu 1-5 janvier 2001.
5. Collinet J, Valentin C. *Evaluation of factors influencing water erosion in West Africa using rainfall simulation*. - *Challenges in African hydrology and water resources*. IAHS Publication n° 144. Wallingford (Royaume-Uni) : IAHS-AISH, 1985.
6. Visser SM. *Modelling nutrient erosion by wind and water in northern Burkina Faso*. Tropical Resource Management Papers, no53. Wageningen (Pays-Bas) : Université Agronomique de Wageningen, 2004.
7. Ribolzi O, Auque L, Bariac T, et al. *Ecoulements hypodermiques et transferts de solutés dans les placages éoliens du Sahel : Etude par traçage isotopique et chimique sous pluies simulées*. *CR Acad Sci* 2000 ; 330 : 53-60.

8. Casenave A, Valentin C. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J Hydrol* 1992 ; 130 : 231-49.

9. Visser SM, Sterk G, Ribolzi O. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions. *J Arid Environ* 2004 ; 59 : 699-717.

10. Léonard J, Rajot JL. Influence of termites on runoff and infiltration : quantification and analysis. *Geoderma* 2001 ; 104 : 17-40.

11. Biielders CL, Rajot JL, Amadou M. Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally-managed cultivated fields in the Sahel. *Geoderma* 2002 ; 109 : 19-39.

12. Biielders CL, Rajot JL, Michels K. L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 19-32.

13. Fryrear DW. A field dust sampler. *J Soil Water Conservat* 1986 ; 41 : 117-20.

14. Spaan W, Van den Abeele GD. Windborne particle measurements with acoustic sensors. *Soil Technol* 1991 ; 4 : 51-63.

15. Rajot JL. Wind blown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger. *Bull Soc Geol Fr* 2001 ; 172 : 523-31.

16. Rajot JL, Formenti P, Alfaro S, et al. AMMA dust experiment: An overview of measurements performed during the dry season special observation period (SOP 0) at the Banizoumbou (Niger) supersite. *J Geophys Res* 2008 ; 113 (D00C14. doi:10.1029/2008JD009906).

17. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne – influence sur l'infiltration*. Paris : Edition Orstom, collection Didactiques, 1989.

18. Karambiri H. *Crue et érosion hydrique au Sahel : étude et modélisation des flux d'eau et de matières sur un petit bassin versant pastoral au nord du Burkina Faso*. Thèse de doctorat, université Paris VI, 2003.

19. Karambiri H, Ribolzi O, Delhoume JP, Ducloux J, Coudrain-Ribstein A, Casenave A. Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. *Hydrol Process* 2003 ; 17 : 1495-507.

20. Ribolzi O, Hermida M, Karambiri H, Delhoume JP, Thiombiano L. Effects of aeolian processes on water infiltration in sandy Sahelian rangeland in Burkina Faso. *CATENA* 2006 ; 67 : 145-54.

21. Wezel A, Rajot JL, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *J Arid Environ* 2000 ; 44 : 383-98.