SECHERESSE

Article sientifique
Sécheresse 2004 ; 15 (1) : 19–32

L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte

Charles L. Bielders[1]
Jean-Louis Rajot[2]
Karlheinz Michels[3]

[1] Département des Sciences du milieu et de l'aménagement du territoire, Université catholique de Louvain, Croix du Sud 2, bte 2, B-1348, Louvain-la-Neuve, Belgique
<bielders@geru.ucl.ac.be>
[2] IRD-LISA-Université Paris 12, 61, avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil cedex, France
<rajot@lisa.univ-paris12.fr>
[3] Institute for Plant Production and Agro-Ecology in the Tropics and Subtropics, Université de Hohenheim, 70593 Stuttgart, Allemagne

Résumé

Au Sahel, l'érosion éolienne constitue une menace importante pour l'utilisation durable des ressources en terres. Elle présente une dynamique saisonnière marquée en relation avec les cycles climatiques intraannuels et l'évolution du couvert végétal. Au Niger, pays sahélien servant d'exemple pour cette revue de la littérature, l'érosion éolienne est, de plus, favorisée par la dominance de sols sableux à faible teneur en matière organique et par les pratiques culturales qui contribuent à maintenir un faible couvert du sol pendant la période la plus critique en fin de saison sèche et au début de la saison des pluies. L'érosion éolienne se traduit par des pertes en terre parfois considérables à l'échelle de la parcelle expérimentale et du champ. Cependant, du fait que l'essentiel des sédiments érodés se redéposent localement, le bilan à l'échelle du terroir villageois serait encore actuellement positif, bénéficiant d'apports extérieurs de poussières. Les agriculteurs sont conscients de leur impact sur l'environnement et prennent un ensemble de mesures qui contribuent, parfois indirectement, à réduire le risque d'érosion éolienne : paillage, maintien des pailles de mil dans les champs, préservation de la régénération naturelle de la végétation, maintien de la végétation en bordure de champ, défrichage des champs sans brûlis, etc. Cet article passe en revue les avantages et les limitations de ces différentes techniques ainsi qu'un certain nombre d'autres techniques évaluées dans le cadre de nombreux projets de recherche et de développement au Niger. À l'avenir, il est vraisemblable que la lutte contre l'érosion éolienne ne pourra se concevoir qu'au travers de la mise en œuvre d'un ensemble de mesures simples reposant sur le savoir-faire et les moyens locaux et apportant des bénéfices immédiats autres que le contrôle de l'érosion, par exemple en termes de fertilité des sols ou de sous-produits intéressants.

Mots clés : Érosion éolienne ; techniques culturales ; Sahel.

Summary

Wind erosion in the Nigerian Sahel: Impact of present cultural practices and control measures

Wind erosion constitutes a major threat for the sustainable use of land resources in the Sahel. It is characterised by strong seasonal dynamics in relation to the intra-annual climatic cycles and the evolution of the vegetation cover. In Niger, a Sahelian country taken as example for the present review, wind erosion is further favoured by the dominance of sandy soils poor in organic matter and agricultural practices that help maintain a low ground cover during the most critical period at the end of the dry season and start of the rainy season. Wind erosion can be responsible for considerable losses of soil at plot and field scale. However, because most eroded sediment redeposits locally, the mass balance at the scale of the village land is likely to be still positive as a result of external inputs of dust. Farmers are aware of their impact on the environment and are taking a series of measures that help reduce the

risk of wind erosion, albeit sometimes indirectly: mulching and leaving millet straw in fields, favouring natural regeneration of vegetation, maintaining vegetation at field boundaries, field clearing without burning, etc. The advantages and limitations of these different techniques are being reviewed, as well as some other techniques that have been evaluated over the years within the framework of numerous research and development projects in Niger. In the future, it is likely that the fight against wind erosion will have to rely on the implementation of a series of technically simple measures that draw on local skills, means and knowledge and that provide immediate benefits other that wind erosion control, for instance in terms of soil fertility or useful by-products.

Key words: Wind Erosion; Cultural practices; Sahel.

S'étendant sur plus de 6 000 km d'ouest en est, le Sahel occupe une bande de 400 à 600 km de large au sud du Sahara, entre les isohyètes de 200 et 600 mm. Cette zone semi-aride est caractérisée par une longue saison sèche et une forte variabilité spatiale et temporelle des pluies. De plus, de vastes superficies sont couvertes par des sols sableux d'origine éolienne. La remobilisation de ces dépôts par le vent met actuellement en péril l'exploitation durable des terres [1]. Cette remobilisation fait suite à une diminution de la couverture végétale du sol, liée en partie aux conditions climatiques mais avant tout à la surexploitation des ressources végétales et à l'extension des superficies cultivées qui résultent de l'accroissement démographique [2].

Au Sahel, l'aridification et la dégradation de l'environnement se sont traduites par un accroissement progressif de la charge atmosphérique en poussières au cours des dernières décennies [3]. L'érosion éolienne est à la fois une conséquence de la dégradation de l'environnement et un des processus majeurs de la désertification [1]. La conversion de savanes en terres de culture, le raccourcissement de la durée de jachère, la baisse de fertilité des sols cultivés engendrée par des bilans nutritifs négatifs [4], le surpâturage, et la surexploitation de la végétation ligneuse sont autant de facteurs qui contribuent à la dénudation des sols et favorisent l'emprise du vent. La teneur en nutriments des sols sableux du Sahel étant intrinsèquement très faible et, de plus, essentiellement concentrée en surface dans la matière organique du sol [5], les pertes en terre par érosion éolienne peuvent dès lors conduire à des pertes en nutriments très élevées en proportion du stock de nutriments disponibles et contribuer ainsi à la baisse rapide du potentiel de production végétale [6, 7].

En Afrique subsaharienne, l'apparition de dunes actives est essentiellement limitée à la zone de pluviométrie inférieure à 100 mm [8]. Par conséquent, l'érosion éolienne en zone sahélienne constitue une menace, non pas à cause de l'envahissement des sables mais à cause de son impact sur la productivité des terres et sur la santé humaine. Cela est particulièrement vrai pour la zone agropastorale (pluviométrie annuelle de 350 à 600 mm). A l'échelle écorégionale, le Sahel semble être principalement une zone de dépôts de sédiments éoliens [9], bien que des bilans de masse négatifs aient pu être mis en évidence plus localement [1]. Cette échelle ne reflète cependant pas les transferts de sédiments et nutriments mobilisés par le vent à l'échelle du champ ou du terroir, qui est celle qui affecte directement la productivité des systèmes de production agropastoraux.

La présente synthèse fera, dans un premier temps, l'état des connaissances concernant les transferts de sédiments et nutriments par érosion éolienne au Sahel, à l'échelle du terroir, du champ et de la parcelle expérimentale, sans négliger la perception qu'ont les agriculteurs de cette problématique. On abordera ensuite les différentes techniques actuellement disponibles pour lutter contre la déflation, aussi bien du point de vue de leur efficacité technique que de leur adéquation aux systèmes de production locaux. Ces thèmes seront principalement illustrés par des exemples tirés d'un pays sahélien, le Niger, où se sont concentrées un grand nombre d'études sur l'érosion éolienne au cours de ces vingt dernières années.

Érosion éolienne et pratiques culturales au Sahel

Climat et érosion éolienne au Sahel

Le climat sahélien est rythmé par l'oscillation de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Ainsi, en moyenne, le centre de la ZCIT se déplace de la latitude 10° S aux mois de décembre et janvier à la latitude 8° N en juillet et août. En hiver, le Sahel est soumis à l'alizé de nord-est, l'harmattan, un vent sec et froid qui peut se charger en poussières sur le sud du Sahara. Ces poussières sont parfois transportées à travers le Sahel et l'Atlantique jusqu'au continent américain [10, 11]. C'est le phénomène des brumes sèches *(figure 1)*. Au mois d'avril, le passage du front intertropical (FIT) marque l'entrée du Sahel dans la période de mousson qui se caractérise par un vent humide et chaud de direction moyenne sud-ouest. Ces vents peuvent occasionnellement atteindre des vitesses suffisantes pour induire localement une prise en charge de sédiments *(figure 1)*. La saison des pluies s'installe à partir du mois de juin et culmine aux mois de juillet et août. L'essentiel des précipitations est produit par des systèmes convectifs de mésoéchelle, les lignes de grains. Ces événements spectaculaires *(figure 1)* balayent le Sahel d'est en ouest à une vitesse moyenne de 60 à 70 km h^{-1} [12]. C'est en front de ces systèmes que les plus fortes vitesses, donc les plus fortes érosivités du vent, sont atteintes sur le Sahel *(figure 2)*. Cet exemple permet de souligner l'étroite juxtaposition inhérente au Sahel des plus fortes intensités de vent et de pluie, donc potentiellement des érosions éolienne et hydrique. Le front des lignes de grains, avant la chute des premières gouttes de pluies, dure généralement de 5 à 20 minutes. Mais certains événements de début de saison des pluies peuvent être secs, entraînant des périodes d'érosion éolienne plus longues. Au mois d'octobre, la ZCIT redescend vers le sud et l'harmattan s'installe de nouveau sur le Sahel. La *figure 3* représente les maxima journaliers d'intensité de vent sur 5 minutes qui résument bien le cycle saisonnier. La saison humide, d'avril à octobre, se marque par de fortes variations d'intensité des vents maximums avec des pics qui dépassent très régulièrement 10 m.s^{-1}, intensités très rares en saison sèche. Les plus fortes vitesses de vents surviennent plutôt en début (mai et juin) et en fin (septembre) de saison des pluies.

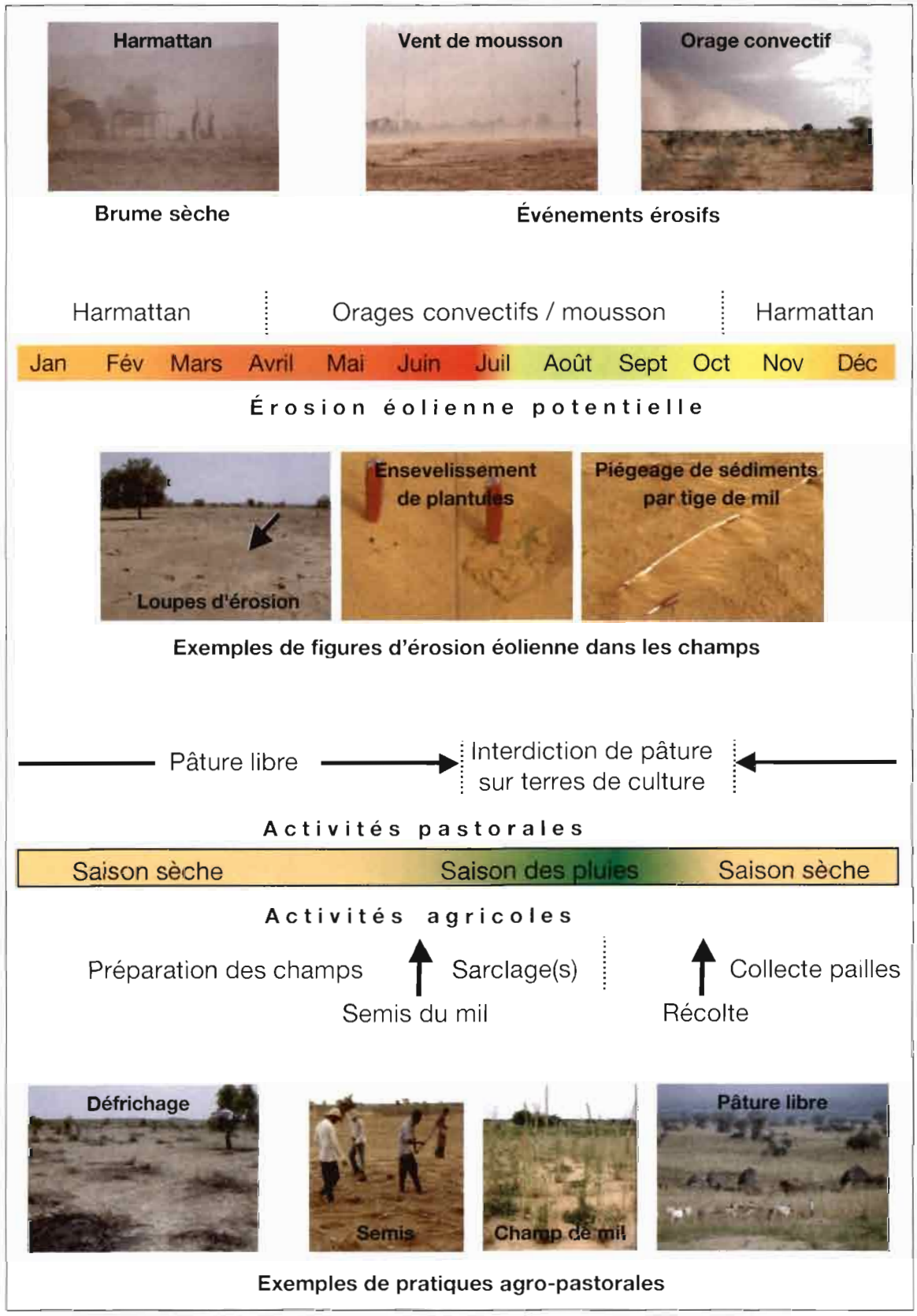

Figure 1. *Représentation schématique des périodes d'érosion éolienne et des cycles saisonniers dans la zone sahélienne du Niger.*
Le risque d'érosion éolienne est très faible de fin juillet à début septembre (vert clair), et présente un maximum en mai-juin (rouge), en relation avec le cycle climatique intraannuel et le développement de la végétation et de la litière.

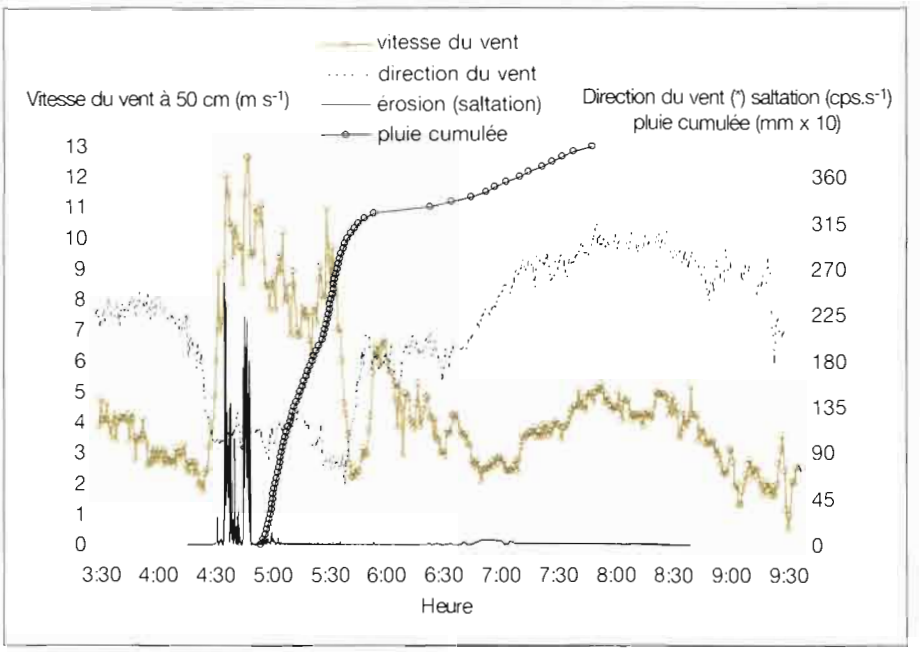

Figure 2. *Enregistrement météorologique typique lié au passage d'un système convectif de méso-échelle, le 11 juillet 1995, à Banizoumbou, Niger.*

Dons un régime de mousson avec un vent de sud-ouest de quelques mètres par seconde, la perturbation s'impose par un brusque changement de direction et une forte augmentation de la vitesse du vent qui déclenche l'érosion éolienne représentée ici par la saltation. Celle-ci est stoppée quasi instantanément par les premières gouttes de pluies liées au front convectif du système. Cette partie convective où la pluie atteint ses plus fortes intensités est suivie d'une longue traîne stratiforme pendant laquelle la direction du vent revient progressivement au sud-ouest sous une pluie de faible intensité.

** (Nord = 0°, Est = 90°)*

Gestion actuelle des terres

L'augmentation de la population au Sahel a conduit à une évolution de l'occupation du sol. À titre d'exemple, sur une surface de 20 km x 20 km centrée sur le village de Banizoumbou au sud-ouest du Niger, il a été démontré, qu'en l'espace d'un demi-siècle, les surfaces cultivées (champs + jachères) sont passées de 12 à 71 % de la surface du terroir, occupant aujourd'hui la quasi-totalité des sols cultivables [13]. Environ la moitié de cette surface correspond à des jachères dont la plupart durent moins de 5 ans et où se développe la végétation naturelle d'arbustes et de plantes annuelles.

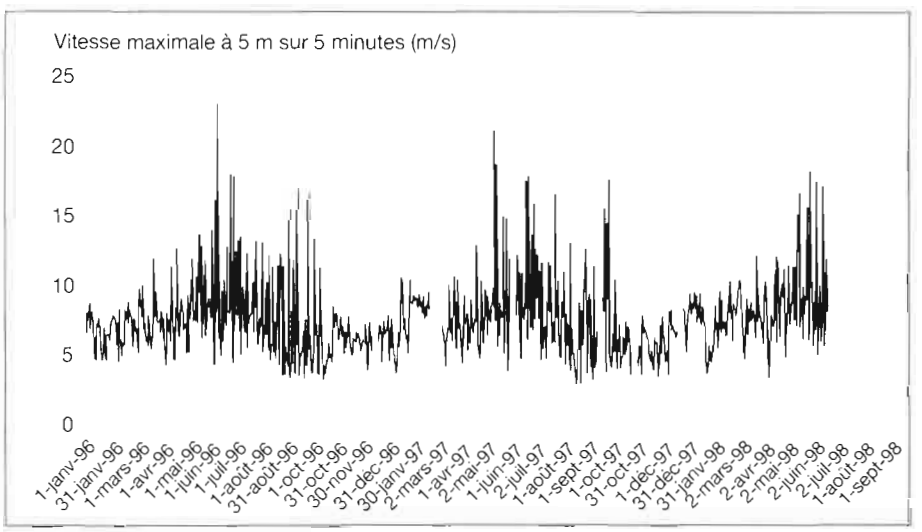

Figure 3. *Évolution des vitesses de vent maximales journalières sur 5 minutes mesurées à 5 m au-dessus du sol pour la période de janvier 1996 à juillet 1998 à Banizoumbou, Niger.*

Au Niger, comme dans tout le Sahel, le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est la principale culture de subsistance. Il est cultivé sur les sols sableux qui représentent près de 80 % de la surface du Niger méridional [14]. 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. La technique de la fumure permet, grâce à un parcage extensif des troupeaux sur les champs en saison sèche, de cultiver un nombre limité de champs sans période de jachère [15]. Durant la saison sèche, après la récolte, les champs sont ouverts au bétail qui consomme une partie des résidus de culture *(figure 1)* et forme, par piétinement, une couche de sable libre d'environ 5 cm d'épaisseur. Dès le mois de janvier, les jachères ou les champs sont défrichés, c'est-à-dire que les plants de mil encore debout sont dessouchés et les pousses d'arbustes sont coupées et souvent brûlées *(figure 1)*. Cela accélère la consommation par les termites des résidus de cultures ainsi couchés sur le sol. Dans les trois jours qui suivent la première pluie importante de la saison, le mil est semé en poquets *(figure 1)*, c'est-à-dire dans des trous d'une dizaine de centimètres creusés à la houe et immédiatement rebouchés après qu'une pincée de graines y a été jetée. Le mil pousse ainsi en touffes espacées de plus d'un mètre ≈ 5 000 à 7 000 poquets.ha^{-1}. Les mauvaises herbes se développent rapidement entre les poquets, nécessitant un à deux sarclages superficiels réalisés à l'iler, une lame courbe qui coupe les racines à moins de 5 cm de profondeur et détruit par la-même les croûtes structurales qui se forment dès les premières pluies. Ce travail se poursuit pendant plus de deux mois, à partir du 15e jour après semis. Au moment de la récolte, seuls les épis sont coupés, laissant les pailles de près de 2 m de haut dressées sur le champ. Dès la fin de la récolte, ces dernières seront broutées par le bétail dans les champs en libre accès *(figure 1)*. De plus en plus souvent, les tiges sont cependant collectées et stockées pour servir de fourrage ou de matériau de construction.

Dynamique saisonnière de l'érosion éolienne

L'effet des pratiques culturales sur les propriétés aérodynamiques des champs peut être illustré par le suivi de la hauteur de rugosité aérodynamique Z_0. Ce paramètre qui correspond à la hauteur théorique à laquelle la vitesse du vent s'annule est calculé à partir de profils de vent mesurés dans les premiers mètres au-dessus de

la surface du sol [16]. La hauteur de rugosité dépend de la rugosité géométrique du terrain et renseigne sur son érodibilité. Plus cette valeur est basse, moins le sol est rugueux et plus il est érodible. L'évolution de Z_0 sur plus de deux cycles saisonniers (1996 à 1998) est représentée à la *figure 4* pour un champ cultivé à Banizoumbou, Niger. Au maximum de développement du mil, Z_0 dépasse 10 cm. Après la récolte, on note une décroissance progressive, d'environ un ordre de grandeur, liée à la collecte des tiges et au pâturage. C'est le défrichage qui provoque la plus forte diminution de Z_0. Lorsque la totalité du champ est défrichée, on atteint des valeurs de l'ordre du millimètre. Z_0 est alors peu sensible à la consommation de la litière par les termites et le bétail. Ainsi, à partir du mois d'avril, la rugosité du champ est minimum et celui-ci est donc le plus sensible à l'érosion éolienne. C'est dans ce contexte que le semis est effectué sans entraîner de modification décelable de la rugosité. Le développement de la végétation ne provoque une remonté de Z_0 qu'à partir de début juillet, près d'un mois après le semis. Le premier sarclage agit clairement sur la rugosité, soit en la diminuant brutalement (1996), soit en arrêtant momentanément son augmentation (1997). Cela souligne l'importance du développement des adventices sur l'augmentation de la rugosité alors que l'influence de la croissance du mil semble plus faible du fait de sa répartition en poquets qui ménage de larges surfaces nues non protégées. Finalement, ce n'est qu'au cours du mois d'août que la rugosité redevient vraiment importante et susceptible de protéger efficacement la surface du sol de l'érosion éolienne.

En fonction de leur taille, les particules sont entraînées par le vent selon trois modes dominants de déplacement : la reptation pour les plus grosses (> 500 µm), la saltation (20 à 500 µm) et la suspension (< 20 µm) pour les plus fines [17]. A l'échelle de la parcelle ou du champ, l'essentiel de la masse est transporté dans le flux de saltation qui traduit l'érosion locale. Ce flux a été mesuré en continu sur trois cycles saisonniers dans le champ traditionnel présenté ci-dessus. La *figure 4* montre une très nette dynamique saisonnière [18]. De 70 à 86 % des flux mesurés sur un cycle annuel complet se produisent entre le 1er mai et le 30 juin, ce qui est fort comparable aux résultats d'autres études [19, 20]. L'érosion éolienne ne se produit que lorsque la vitesse du vent dépasse un seuil de vitesse déterminé par l'état de surface du sol : recouvrement par la litière, travail du sol, taille des agrégats libres en surface, encroûtement et teneur en eau. Sur parcelle cultivée en mil dans la zone de

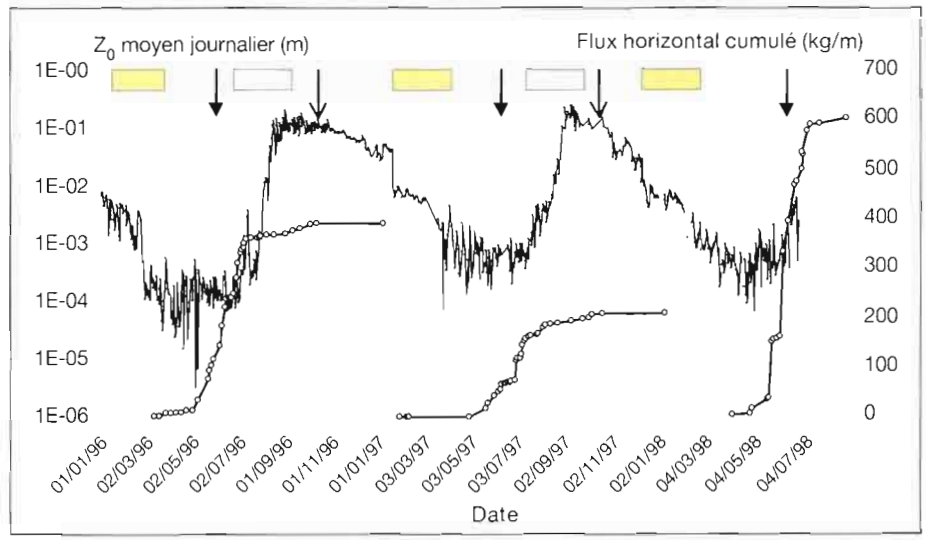

Figure 4. *Évolution de la hauteur de rugosité (Z_0) (trait continu) et du flux horizontal cumulé de sédiments transportés par le vent (ronds) de janvier 1996 à juillet 1998.*
Une valeur quotidienne de Z_0 a été calculée à partir d'un enregistrement continu de profils de vitesses de vent réalisé au milieu d'un champ traditionnel représentatif du terrain de Banizoumbou, Niger. En jaune, la période de végétation ; en gris, la période de défrichage. Flèches pleines : date de semis du mil ; flèches creuses : dates de récolte du mil. Adapté de Rajot [18].

Banizoumbou, ce seuil est typiquement de l'ordre de 7,5 à 8,5 $m \cdot s^{-1}$ sur sol sec. Excepté l'encroûtement et la teneur en eau qui doivent être considérés séparément, la plupart des autres facteurs agissent sur les valeurs de la rugosité aérodynamique [21]. Ainsi, l'occurrence de l'érosion peut s'expliquer par une augmentation de l'intensité du vent ou par une diminution de la vitesse seuil d'érosion. Les *figures 3* et *4* montrent que l'apparition de l'érosion en fin de saison sèche n'est pas liée à une diminution décelable de la rugosité aérodynamique du sol, mais plutôt à l'augmentation de l'intensité du vent en début de période de mousson. La nette diminution de l'érosion dès le mois de juillet s'explique à la fois par l'augmentation de la rugosité liée à la croissance de la végétation et par la relative diminution des intensités maximales du vent au cœur de la mousson. L'augmentation progressive de l'humidité du sol au cours de la saison des pluies intervient vraisemblablement pour très peu dans la réduction de l'érosion éolienne. En effet, seuls les premiers millimètres du sol sont affectés par l'érosion éolienne. Pour des sols sableux, cette couche se dessèche très rapidement entre deux événements pluvieux de telle sorte que la surface du sol est généralement sèche avant le passage de l'événement érosif suivant.

Le facteur encroûtement du sol a été étudié sur une parcelle expérimentale d'un hectare située dans le même champ à Banizoumbou, Niger. La surface de cette parcelle a été dénudée en retirant les tiges de mil, les arbustes et la litière pour permettre le déclenchement de l'érosion éolienne dès le mois de février lorsque les croûtes superficielles sont totalement détruites à cause du piétinement par le bétail. Ces croûtes de type structural dominant, caractéristiques des sols sableux [22], se reforment dès la première pluie. La mesure des flux de saltation et des flux verticaux d'émission de poussière avant et après encroûtement montre que celui-ci n'a pas d'effet décelable sur l'érosion éolienne dans le cas de ces sols très sableux [23]. L'effet de différents types de croûtes sur l'érosion éolienne n'a à ce jour pas été étudié. Des observations visuelles montrent cependant que même les croûtes d'érosion sont sujettes à abrasion sous l'effet du flux de saltation.

L'expérience décrite ci-dessus a permis de mesurer un flux horizontal de 962 $kg.m^{-1}$ sur la parcelle dénudée pendant les mois de février à avril, alors que seulement 16,8 $kg.m^{-1}$ ont été mesurés pendant la même période sur une parcelle non perturbée dans le même champ. Cela montre bien que, pourvu que la hauteur de rugosité, contrôlée essentiellement par les résidus de culture, soit suffisamment basse, l'érosion peut se produire même en période d'harmattan. Ainsi, la climatologie de l'érosion éolienne décrite ci-dessus, représentative de la zone étudiée (13° 30' de latitude nord), est susceptible de varier en fonction du taux de recouvrement des sols par les résidus de culture et donc en fonction des pratiques culturales et de la latitude. Il faut noter une forte variabilité

Tableau I. Caractéristiques des parcelles expérimentales pour lesquelles un bilan de masse de l'érosion éolienne a été calculé.

Dimensions des parcelles	État de surface	Méthode	Distance par rapport aux limites non érodables	périodes de mesure	Bilan	Références
m × m			m		$Mg.ha^{-1}$	
19 x 25	nu	topographie	< 50	de février à juillet 1994	– 160	[25]
19 x 25	résidu 2,0 $Mg.ha^{-1}$	topographie	< 50	de février à juillet 1994	+ 290	[25]
40 x 60	résidu 0,8 $Mg.ha^{-1}$	flux	25 à 50	du 13 juin au 1 juillet 1993	– 46	[28]
15 x 20	nu	flux	> 200	saisons des pluies 1995 à 1997	– 17 à -214	[31]
15 x 20	résidu 2,0 $Mg.ha^{-1}$	flux	> 200	saisons des pluies 1995 à 1997	+ 111	[31]

interannuelle de l'érosion éolienne. Plus que le nombre d'événements érosifs, c'est plutôt l'intensité de quelques événements majeurs liés au passage de lignes de grains qui explique cette variabilité [18].

Méthodes de mesure de l'érosion éolienne

Une synthèse des différentes méthodes d'étude de l'érosion éolienne sur le terrain a été publiée récemment [24]. Seules les plus couramment utilisées au Sahel sont décrites ci-dessous. Une méthode classiquement employée pour estimer les bilans consiste à suivre l'évolution temporelle de la topographie en des points fixes soigneusement repérés [25]. Connaissant la densité apparente de la surface du sol, les variations de topographie sont ensuite converties en gain ou perte en terre. Une autre méthode repose sur la mesure des teneurs résiduelles en radio-césium (^{137}Cs) dans des profils de sol qui permettent d'estimer pour chaque profil les gains ou les pertes en terre depuis 1963, moyennant l'identification d'un profil de référence non perturbé [26]. Ces deux méthodes ne permettent pas de distinguer l'érosion éolienne de l'érosion hydrique. Par ailleurs, il s'agit de mesures ponctuelles très délicates à spatialiser dans le milieu sahélien caractérisé par une forte variabilité spatiale. C'est pourquoi de nombreuses études reposent sur la mesure directe et plus intégrative des flux horizontaux d'érosion éolienne [6, 18, 20, 23, 27, 28]. Ces mesures reposent sur l'utilisation de pièges à sable dont les plus courants sont les BSNE (*Big Spring Number Eight* [29]) et les MWAC (*Modified Wilson And Cooke* [30]). Situé à une seule hauteur, de tels capteurs renseignent qualitativement sur l'intensité de l'érosion [20]. Il est nécessaire de disposer au minimum de deux hauteurs de mesure pour calculer un véritable flux horizontal en intégrant sur la hauteur une courbe théorique ajustée sur les valeurs mesurées [6, 18, 28]. De tels dispositifs, placés à chaque extrémité de parcelles [31] ou répartis sur des champs expérimentaux [28], traditionnels [27] ou sur des bassins-versants non cultivés [32], permettent de calculer des pertes ou gains en terres par différence entre flux sortant et flux entrant pour les surfaces considérées. Pour déterminer ces flux, il faut connaître la direction du vent pendant l'événement érosif. Les données météorologiques avec une bonne résolution temporelle (typiquement de l'ordre de 5 minutes) sont donc indispensables pour ce genre d'étude. L'utilisation de capteurs de saltation de type Saltiphone™ permet de déterminer exactement les périodes d'érosion, et donc, d'extraire plus précisément les caractéristiques météorologiques de chaque événement érosif [28, 31]. Dans certains cas, de tels capteurs peuvent également être étalonnés sur le terrain à partir des mesures de flux décrites ci-dessus. Cela permet alors d'obtenir un suivi détaillé du flux horizontal d'érosion au cours de l'événement [23].

Les flux verticaux de dépôt totaux (secs et humides) peuvent être mesurés en continu sur plusieurs années au moyen de capteurs passifs ouverts vers le haut, dans lesquels les poussières en suspension sédimentent. Seules la forme des capteurs et la durée de collecte des sédiments (quotidienne [18], mensuelle [33] et trimestrielle [34]) diffèrent selon les études. Les flux verticaux d'érosion peuvent être mesurés par la méthode des gradients qui nécessite de mesurer, en plus des profils de vent et de température, les concentrations d'aérosol en suspension à deux hauteurs au-dessus de la couche de saltation [23, 35]. Ces flux verticaux d'émission peuvent également être estimés à partir de mesures de flux de saltation horizontaux [18].

Bilans de masse dans les systèmes de culture traditionnels : différentes échelles d'investigation

Les bilans de masse et leurs significations sont directement liés aux échelles considérées. Réalisés sur de petites parcelles, ils renseignent plutôt sur la variabilité spatiale intra-champ ; à l'échelle du champ, c'est la dynamique du système de culture champ/jachère qui peut être appréhendée, alors qu'à l'échelle du terroir, c'est plutôt la dynamique régionale qui est prise en compte. À chacune de ces échelles correspondent des processus d'érosion différents qui conditionnent les méthodes de mesures employées : de l'échelle des petites parcelles à celle du champ, c'est le flux horizontal de sable qui mobilise l'essentiel de la masse ; à l'échelle du terroir, ce sont plutôt les flux verticaux de poussière qui doivent être considérés.

• Échelle des parcelles expérimentales – Variabilité spatiale intra-champ

Les mesures réalisées sur parcelles expérimentales ont généralement eu pour but de tester différentes techniques de lutte antiérosive. Néanmoins, lorsque les traitements consistent en paillages non organisés de résidus de culture du mil, ils peuvent correspondre aux états de surface que l'on trouve localement dans les champs cultivés traditionnels. Le *tableau I* montre la gamme de variation des bilans obtenus pour des parcelles dont la masse de résidus secs varie de 0 à 2 $Mg.ha^{-1}$. Les bilans sont systématiquement négatifs pour les parcelles nues, et positifs sur les parcelles dont le taux de paillage est de 2 $Mg.ha^{-1}$. Sterk et Stein montrent de plus que 38 $Mg.ha^{-1}$ de sol perdus en seulement deux événements érosifs s'accompagnent d'une perte en éléments nutritifs de 57,1, 79,6, 18,3 et 6,1 $kg.ha^{-1}$ de potassium, carbone, azote et phosphore, respectivement, ce qui équivaut approximativement à la quantité de potassium et phosphore nécessaire pour produire 2 600 $kg.ha^{-1}$ de matière sèche de mil, dont 600 $kg.ha^{-1}$ de grain [28].

Les résultats de mesures d'érosion à l'échelle de la parcelle expérimentale sont en fait difficilement comparables d'une étude à l'autre du fait des différentes techniques de mesure employées, mais aussi du fait de la taille des parcelles et de leur distance par rapport aux limites non érodables *(tableau I)*. Ainsi, l'érosion se produit même pour des taux de paillage de 2 $Mg.ha^{-1}$ lorsque l'on se situe près de la limite est non érodable des parcelles qui correspond à la zone de développement des flux d'érosion [20]. S'ils ne peuvent en aucun cas être généralisés à la totalité d'un champ cultivé, les bilans obtenus sur

ces parcelles expérimentales en fonction des taux de résidus de culture permettent d'expliquer en partie la très forte variabilité spatiale des bilans mesurés dans un champ traditionnel au cours d'un seul événement, avec des pertes en terre de plus de 20 $Mg.ha^{-1}$ et des dépôts de plus de 15 $Mg.ha^{-1}$ observés à quelques dizaines de mètres de distance au sein du même champ [27]. Cela se traduit, entre autre, par la formation de « loupes d'érosion », micro-dépressions de dimension métrique couramment observées dans les champs cultivés *(figure 1)*. Néanmoins, la variabilité spatiale du taux de recouvrement par les résidus de culture ne suffit sans doute pas à expliquer la forte variabilité spatiale des bilans puisque elle est également observée sur des parcelles expérimentales où les résidus ont été répartis de façon homogène [28]. Ce sont peut-être les variations de la microtopographie qui interviennent de façon déterminante dans ce cas.

Quoi qu'il en soit, la redistribution des sédiments par l'érosion éolienne au sein même des champs cultivés est une des caractéristiques du milieu sahélien. Cette redistribution, et les transferts de nutriments qui lui sont associés, serait le principal mécanisme expliquant le développement des îlots de fertilité au sein des champs cultivés traditionnels [36].

• Échelle du champ – Dynamique du système champ/jachère

Bien que constituant les unités fonctionnelles de base du paysage sahélien, le champ et la jachère ont été peu étudiés en tant qu'entités homogènes du point de vue de la dynamique éolienne. Ces unités sont généralement juxtaposées et les limites entre ces deux types d'états de surface sont des points clefs de la dynamique. Dans les champs de mil traditionnels, la distance à partir de laquelle le flux atteint sa valeur maximale, c'est-à-dire la capacité de transport du vent, n'est pas déterminée clairement. Elle serait atteinte à partir de 250 m dans un champ à sa quotrième année de culture [37], mais dépasserait 300 à 400 m dans un champ cultivé depuis deux ans [27]. Les distances obtenues suggèrent que la capacité maximale de transport du vent n'est presque jamais atteinte sur les champs traditionnels isolés qui subiraient globalement, au-delà de la forte variabilité spatiale évoquée plus haut, des pertes en terre sur la totalité de leur surface.

Dans un champ cultivé depuis plus de cinq ans, les pertes en terre atteignent au maximum 16 $Mg.ha^{-1}$ pour l'événement le plus intense étudié pour une bande de 51 m de largeur à partir de la limite amont du champ [6]. Ce phénomène s'accompagne d'une perte en éléments nutritifs de 1,3, 0,6, 1,2, 0,03 et 1,4 $kg.ha^{-1}$ d'azote, de phosphore, de potassium, de calcium et de magnésium, respectivement. À ce jour, une seule étude a publié des bilans concernant la totalité d'un champ [27]. Sur une période de trois ans, la première année de mesure qui correspond aussi à la première année de mise en culture du champ a donné un bilan positif correspondant à des dépôts de 5,4 $Mg.ha^{-1}$ alors que les deuxième et troisième années ont permis d'enregistrer des pertes en terre de 5,0 et 25 $Mg.ha^{-1}$, respectivement. Ce champ de plus de 8 hectares n'est pas totalement entouré de jachères, mais bordé sur sa limite sud-ouest par un autre champ cultivé, source de sédiments, expliquant le bilan positif observé la première année. Les auteurs attribuent les pertes en terre des deuxième et troisième années à une diminution du taux de recouvrement par la litière, le champ ayant été défriché sans brûlis de la litière herbacée.

Ces résultats montrent le rôle déterminant de la durée de mise en culture des champs qui contrôle en partie les taux de recouvrement par la litière (donc la rugosité de la surface) et suggèrent que plus un champ est cultivé depuis longtemps, plus il est sensible à l'érosion éolienne. À cela s'ajoute l'hétérogénéité liée au défrichage des jachères pour leur mise en culture. Dans l'ouest du Niger, cette pratique varie fortement d'un paysan à l'autre, certains se contentant de couper les arbustes tout en laissant la litière herbacée en place, d'autres procédant systématiquement au brûlis. Au cours de la première année de mise en culture, la pratique du brûlis a un impact considérable sur le bilan de masse de sédiment par suite de la disparition de la litière et de la couverture herbacée, des bilans négatifs pouvant être observés sur les parties brûlées et des bilans nuls ou positifs sur les parties non affectées par le feu [27].

Le nombre d'études concernant les jachères est encore plus faible que pour les champs. Des flux horizontaux de 20, 3 et 2 $kg.m^{-1}.an^{-1}$ ont été mesurés pendant trois ans respectivement au cœur d'une jachère ancienne (six à neuf ans), sachant que les fortes valeurs de la première année font suite à un incendie accidentel qui a détruit la litière de cette jachère [18]. Ils représentent systématiquement moins de 3 % des flux mesurés simultanément au cœur du champ voisin. Si le flux horizontal augmente de façon linéaire au niveau de la limite amont des champs, il diminue de façon exponentielle dès son entrée dans la jachère [6]. Des flux entrants compris entre 4,5 et 56,8 $kg.m^{-1}$ deviennent toujours inférieurs à 1,1 $kg.m^{-1}$ à 40 m dans la jachère. Pour chaque événement étudié, la diminution des flux en fonction de la distance suit la même fonction exponentielle, sans être influencée par le développement de la végétation dans la jachère. Ce fait s'explique sans doute par le fort taux de recouvrement de graminées par la litière même en fin de saison sèche dans cette jachère peu pâturée de plusieurs années.

Ces résultats, bien que partiels, donnent une vision cohérente du système de culture traditionnel sur sol sableux dans la région de Niamey. Les champs y sont soumis à une forte érosion éolienne, au moins dès leur deuxième année de mise en culture, mais la quasi-totalité des sédiments grossiers exportés par saltation se dépose en quelques dizaines de mètres dès leur entrée dans les jachères adjacentes encore nombreuses dans cette région. Cette redéposition se traduit par un gradient de fertilité croissant sur les 20 premiers mètres des jachères du fait d'une redéposition plus rapide des sédiments éoliens grossiers moins riches en minéraux, en cations échangeables et en matière organique [6]. Des bilans à des échelles comparables ont également été effectués au nord du Burkina Faso, pour une pluviométrie annuelle plus faible, de l'ordre de 300 mm, sur des sols non cultivés, mais pâturés. Dans ce cas, les unités considérées ne sont plus les champs et les jachères, mais les zones présentant des états de surface homogènes. Pour un petit bassin-versant d'1,4 hectare, un bilan annuel quasi équilibré a été obtenu [32]. Ce bilan équilibré cache en réalité une très forte variabilité spatiale : l'érosion éolienne atteint 20 $Mg.ha^{-1}.an^{-1}$ sur des zones constituées de petites buttes sableuses végétalisées reposant sur des croûtes argileuses nues et les dépôts atteignent 30 $Mg.ha^{-1}.an^{-1}$ sur des zones sableuses dont la surface est comparable aux jachères nigériennes (buissons épars et tapis d'herbacées).

• Échelle du terroir – Dynamique régionale

Deux études ont été réalisées sur des terroirs voisins, à 60 km à l'est de Niamey, en vue d'établir un bilan de masse à l'échelle du terroir. La première repose sur une estimation directe des dépôts de poussières d'origine lointaine ou locale ainsi que des quantités émises localement [18]. Puisque dans cette zone le déplacement des particules par saltation ne conduit essentiellement qu'à une redistribution locale des sédiments [6], seuls les flux de poussière en suspension doivent être pris en compte à l'échelle d'investigation du terroir. Les mesures de flux de poussières (particules < 20 µm) ont été réalisées en continu sur trois cycles saisonniers (1996 à 1998). L'étude montre qu'il existe deux périodes de dépôts de poussières qui correspondent respectivement à la période d'harmattan avec apport majoritairement d'aérosols d'origine lointaine, et la pé-

riode de mousson qui correspond plutôt à des dépôts d'aérosols soulevés localement par les lignes de grains, avec des dépôts annuels s'élevant à 1 $Mg.ha^{-1}.an^{-1}$ [18], comparables à d'autres études [33]. Ces dépôts de poussières se traduisent par un dépôt de nutriments de l'ordre de 12,7, 16,3, 5,3, 0,7, 31,6 et 3,8 $kg.ha^{-1}.an^{-1}$ pour le potassium, le calcium, le magnésium, le phosphore et l'azote, respectivement [33].
Des flux d'émission de poussières ont été calculés sur base des flux horizontaux mesurés en continu dans un champ et dans une jachère. Ils s'élèveraient respectivement en moyenne à 0,68 et 0,01 $Mg.ha^{-1}.an^{-1}$ [18]. En prenant en compte la granulométrie des sédiments mesurés dans les dépôts (pour être cohérent avec les valeurs calculées pour les émissions qui correspondent à des particules de diamètre inférieur à 20 µm) et le pourcentage de champs et de jachères sur le terroir concerné (25 km × 25 km), le bilan obtenu correspondrait à un dépôt moyen de l'ordre de 0,4 $Mg.ha^{-1}.an^{-1}$ à l'heure actuelle. Ce bilan positif est essentiellement dû à la présence de jachères sur près de la moitié des sols cultivés.
Par la méthode du radio-césium (^{137}Cs), et en fonction de la méthode de calcul utilisée, des pertes en terre variant de 16 à 48,5 $Mg.ha^{-1}.an^{-1}$ ont été établies pour une zone d'un peu moins de 1 km^2 proche de Banizoumbou [26, 38]. La technique du radio-césium ne permet pas de différencier érosion hydrique et éolienne, mais le secteur étudié étant endoréique, il ne peut pas y avoir d'exportation de sédiments due à l'érosion hydrique. Il faut souligner que ces taux d'érosion représentent une moyenne pour les 30 dernières années qui se caractérisent par une augmentation des surfaces mises en culture et donc par une augmentation des surfaces soumises à l'érosion éolienne. Par ailleurs, sachant que les flux d'érosion sont extrêmement faibles, voir nuls, en jachère [6, 18], les pertes en terre en champ cultivé seraient donc encore plus élevées que les valeurs moyennes rapportées ci-dessus [26, 38]. Ces valeurs très élevées ne semblent pas compatibles avec les mesures directes de flux obtenues récemment et qui mettent avant tout en évidence de très fortes redistributions spatiales sur de courtes distances [6]. Elles s'expliquent peut être par la difficulté de trouver un profil de référence n'ayant subi ni érosion ni dépôt pour calculer en chaque point de mesure les pertes ou gains en terre, mais aussi par la difficulté de spatialiser des mesures ponctuelles dans un milieu qui se caractérise avant tout par une variabilité spatiale très forte à quelques mètres ou dizaines de mètres de distance.

Perception des agriculteurs face à l'érosion éolienne

S'il est clairement établi que l'érosion éolienne peut être un processus de dégradation important à l'échelle du champ à l'heure actuelle en zone sahélienne, cette conviction est-elle partagée par les populations rurales ? Pour répondre à cette question, un certain nombre d'enquêtes ont été effectuées au cours des 10 dernières années auprès d'agriculteurs du Niger [39-43].
À partir des résultats d'enquêtes menées dans 41 villages dans la zone des 400-600 mm de pluviométrie annuelle au Niger, l'érosion éolienne constitue une contrainte modérée à sévère pour l'agriculture dans près de 4 villages sur 10 [39]. Parmi les contraintes environnementales, l'érosion éolienne reste néanmoins moins importante que les sécheresses récurrentes et la faible fertilité des sols, mais nettement plus importante que l'érosion hydrique. De façon assez surprenante, l'érosion éolienne est généralement perçue comme une contrainte plus importante dans les zones à pluviométrie plus élevée [39]. Bien que l'érosion éolienne soit fort probablement plus intense dans les zones à plus faible pluviométrie du fait d'un moindre développement de la végétation, ces zones sont à tel point affectées par la sécheresse, la famine et la pauvreté que l'érosion éolienne en devient une contrainte secondaire. Par conséquent, dans la zone des 400 mm de pluviométrie annuelle, la participation des populations aux programmes de lutte contre l'érosion sera nécessairement limitée du fait que ces populations ne perçoivent pas l'érosion éolienne camme une contrainte importante [40]. Avant de se lancer dans la mise en œuvre de programmes de lutte anti-érosive, il est donc essentiel pour les décideurs et les responsables de projets de bien cerner la perception qu'ont les agriculteurs de ce phénomène.
De manière générale, l'érosion éolienne est perçue par les agriculteurs sahéliens comme un cercle vicieux qui trouve son origine dans une baisse de la fertilité des sols et de la couverture végétale, et comme un phénomène en augmentation [39, 41]. Cette dernière constatation est en accord avec l'évolution croissante du nombre de jours à forte charge de poussière dans l'atmosphère au cours des dernières décennies [3]. Des problèmes de santé, principalement la toux, les maux d'yeux et la fièvre, sont directement associés à ces poussières [39] et sont considérés comme le souci majeur en relation avec l'érosion éolienne. La dégradation des sols et les dégâts aux cultures par ensevelissement des jeunes pousses *(figure 1)*, par déchaussement et par abrasion des feuilles constituent les deux autres formes de dommages engendrés par l'érosion éolienne. La perte en terre par déflation est observée chaque année par les agriculteurs dans la majorité de leurs champs, mais des dégâts visibles sont limités à des plages restreintes à l'intérieur des champs. La forme la plus sérieuse de dommage pour le sol est le développement de « loupes d'érosion » caractérisées par la présence de croûtes d'érosion consécutive à la déflation de l'horizon superficiel *(figure 1)* [42].
Les agriculteurs sahéliens sont généralement conscients de l'impact de leurs pratiques de gestion des terres sur l'érosion [39], et en particulier de la déforestation, du mode de préparation des terres pour les cultures (par exemple, brûlis ; *figure 1*), et du prélèvement des résidus de culture comme aliment pour le bétail ou comme matériau de construction. En revanche, la pâture et les facteurs climatiques ne semblent pas être considérés comme des facteurs déterminants dans l'accroissement de l'érosion éolienne [40]. Cela montre que, bien que la dégradation de l'environnement au Sahel soit fréquemment mise en relation avec les grandes sécheresses de ces dernières décennies, les agriculteurs perçoivent au contraire cette dégradation comme une conséquence directe de leurs actions, conditionnées largement par la nécessité de subvenir aux besoins élémentaires. Le fait que le surpâturage par le bétail ne soit pas mis en cause a été attribué à la grande valeur que les agriculteurs accordent au bétail [40].

Méthodes de lutte contre l'érosion éolienne

Dès 1965, l'utilisation du paillage, du travail du sol et la plantation de végétation naturelle en bordure de champ fut préconisée au Niger pour réduire les effets néfastes du vent [44]. Dans ce pays, des mesures de conservation des sols ont été entreprises à partir des années 1960 dans le cadre de projets de développement. Ces mesures visaient cependant principalement la fixation de dunes vives par des méthodes biologiques et physiques [45]. Bien que plus spectaculaires, les problèmes d'ensablement dus aux dunes vives ne sont cependant que secondaires dans la zone agro-pastorale sahélienne par rapport aux pertes de sols et de nutriments par déflation et par rapport aux dégâts sur les cultures. Dans cette partie, nous nous limi-

terons donc aux techniques de lutte contre la déflation.

Deux voies principales sont disponibles pour lutter contre l'érosion éolienne :

– réduire la vitesse effective du vent au niveau du sol (brise-vents, augmentation de la rugosité du sol par travail du sol, paillage, maintien d'une litière ou couverture végétale) ;

– augmenter la cohésion du sol et donc augmenter la vitesse seuil d'érosion (création de mottes par labour, humidification du sol par irrigation, apport d'amendements organiques, etc.). Les méthodes de conservation peuvent aussi être classées selon leur nature : techniques de travail du sol, techniques fondées sur la gestion des cultures ou des résidus de culture, et brise-vents. C'est cette dernière approche qui sera suivie ici. Une évaluation qualitative des différentes techniques est donnée au *tableau II*.

Pour être efficace, les techniques de conservation doivent au minimum assurer une bonne protection du sol en fin de saison sèche et en début de saison des pluies (avril à mi-juillet) lorsque le risque d'érosion éolienne est maximal. Dans la mesure du possible, elles assureront également une protection pendant la période d'harmattan (décembre à mars), même si cette période est moins critique du fait des vitesses de vent moins élevées et de la meilleure couverture du sol par la litière et les résidus de culture.

Gestion des cultures et des résidus de culture

Les agriculteurs disposent d'un certain nombre de techniques dans ce domaine pour lutter contre l'érosion éolienne : paillage, mode de gestion des résidus de culture, mode de préparation des champs avant la culture, gestion du sarclage, mise en jachère. Ces techniques se caractérisent par un niveau de technicité relativement faible et peuvent donc être assez facilement mises en œuvre par les agriculteurs.

Le paillage *(mulching)* est de loin la technique de lutte contre l'érosion éolienne la plus étudiée au Sahel. L'efficacité de cette technique a été largement démontrée pour des taux d'application de paille de mil de 2 $t.ha^{-1}$. Un tel taux d'application n'assure qu'un taux de couverture du sol de 7 à 10 %, mais réduit les flux de sédiments éoliens de 40 à 60 %, à 10 cm au-dessus du sol [20, 46]. Une efficacité semblable a pu être obtenue pour des pailles placées en bandes de 30 cm de large et espacées de 1,5 m [31], mais, dans ce cas, la protection du sol n'est véritablement assurée que pour des vents perpendiculaires aux bandes. Placé en aval de zones soumises à érosion, le paillage permet de piéger efficacement les sédiments transportés par saltation [31, 47]. Cette caractéristique est d'ailleurs bien connue des agriculteurs sahéliens qui l'exploitent sur de petites superficies pour récupérer des terres dégradées [41, 43, 48], et est valable pour d'autres matériaux, tel que les branchages [49].

En plus de son efficacité pour la lutte antiérosive, le paillage bénéficie d'un atout considérable, à savoir son impact favorable sur la fertilité des sols [50]. Pour des sols cultivés depuis plusieurs années, l'effet du paillage sur les rendements est très marqué. Cependant, malgré son efficacité, sa simplicité et son impact favorable sur la fertilité des sols, le *mulching* souffre d'un certain nombre de limitations, dont la principale est la disponibilité en paille. Au niveau actuel de productivité, cette contrainte est d'ailleurs insurmontable puisqu'il est difficile d'atteindre une production de paille de 2 $t.ha^{-1}$ sans recourir à l'utilisation de matières fertilisantes organiques ou inorganiques. De plus, les pailles sont utilisées pour l'alimentation du bétail et comme matériau de construction ou de chauffe, utilisations souvent plus rentables [51]. Pour des taux d'application plus faible (0,5 à 1,5 $t.ha^{-1}$), le mulching est nettement moins efficace, voire inefficace [20, 52]. Pour des vents très violents, le paillage à faible dose pourrait même accentuer l'érosion en augmentant la turbulence près du sol, favorisant ainsi la déflation [53].

Il a été démontré que, à taux d'application égal, l'efficacité des pailles est meilleure lorsqu'elles sont dressées que couchées sur le sol [54], ce qui est généralement le cas à la récolte au Niger où, dans un premier temps, seul les épis sont récoltés. Cette efficacité accrue des pailles dressées demande cependant à être confirmée pour les conditions du Niger où les densités des semis sont très faibles et la production de biomasse spatialement très hétérogène à l'échelle du champ [55].

Par le développement d'une litière et d'une couverture herbacée, la jachère permet de réduire fortement la prise en charge des particules de sol par le vent [18]. De plus, elle constitue un piège efficace pour les particules en saltation provenant de champs adjacents [6] et pour les poussières [56, 57]. On estime que près de 90 % des flux de saltation entrant dans une jachère peuvent être piégés dans les 20 premiers mètres par la végétation et la litière [6]. La mise en jachère constitue donc une pratique efficace pour lutter contre l'érosion éolienne à l'échelle du terroir, même si elle n'empêche pas l'érosion dans les champs eux-mêmes. La mise en place de bandes enherbées en alternance avec des bandes cultivées pourrait constituer une méthode efficace de lutte antiérosive, mais une telle pratique ne serait applicable que dans les zones où la pression foncière est faible. Par un effet brise-vent, de telles bandes permettent également de réduire les pertes en terre dans les interbandes cultivées [58].

Le mode de préparation d'un champ pour la culture en fin de saison sèche peut avoir une importance considérable sur l'emprise du vent. Le brûlis de la litière constitue, en particulier, une pratique favorisant très fortement l'érosion éolienne [27], ce qui est d'ailleurs reconnu par les agriculteurs eux-mêmes [39]. Cette pratique est d'ailleurs loin d'être généralisée dans l'ouest du Niger. En revanche, la coupe rase des arbustes et parfois des arbres dans les champs est plus fréquente, compte tenu de la concurrence avec les cultures pour l'eau et les éléments nutritifs. Cependant, le maintien des arbres et arbustes dans les champs et la protection des jeunes plants pour favoriser la régénération naturelle peuvent être recommandés car les arbres et arbustes constituent des îlots de fertilité [36]. De plus, ils constituent une source de bois, de fourrage, de fruits, d'ombre, et de médicaments traditionnels [59]. En nombre suffisant, ils sont susceptibles de réduire la vitesse du vent au sol, mais cette fonction a été peu étudiée.

Travail du sol

Contrairement au paillage, la prévention de l'érosion éolienne par des techniques de travail du sol n'est pas subordonnée au niveau actuel de productivité des terres. Ces techniques peuvent donc éventuellement constituer une alternative là où le paillage est difficilement applicable, mais elles nécessitent, en pratique, le recours à la traction animale lorsque les superficies à traiter sont importantes. Le labour, le billonnage et le scarifiage sont trois de ces techniques couramment utilisées dans la lutte contre l'érosion éolienne dans d'autres régions du monde. Aucune de ces techniques n'est actuellement mise en œuvre sur les sols sableux de l'ouest du Niger.

Dans le cas des sols sableux du Niger ayant une structure très peu développée, le labour s'est avéré peu efficace pour contrôler l'érosion éolienne [60]. En effet, en l'absence de mottes, la rugosité du sol créée par le labour est rapidement nivelée par les pluies. Pour cette même raison, le scarifiage – travail du sol superficiel pratiqué plusieurs fois en cours de saison et destiné à augmenter la rugosité de surface – est inefficace [60].

Par rapport au labour, le billonnage – formation de buttes rectilignes d'une vingtaine de centimètres de hauteur sur lesquelles sont semées les cultures – permet de

Tableau II. Principaux bénéfices et contraintes de techniques de lutte antiérosive au Sahel.

Techniques	Efficacité antiérosive, échelle parcelle agricole	Efficacité antiérosive, échelle terroir	Protection assurée pendant la période critique	Autres avantages[1]	Disponibilité locale des matériaux	Besoins en outil/animal de trait	Besoins en main-d'œuvre pour la mise en place	Besoins en main-d'œuvre pour l'entretien[9]	Niveau d'expertise technique requis	Coût des intrants	Perte de superficie cultivable	Intérêt économique des utilisations alternatives[2]
Mulching avec branches ou pailles	+ +	+ +	var[3]	+ +	± [4]	--	+	na	--	--	na	+ +
Maintien des pailles de mil et de la litière dans les champs	+ [5]	+ [5]	var[5]	+	+	--	--	na	--	na	na	+ +
Fumure organique, apport manuel	+ [6]	+ [6]	var[7]	+ +	± [4]	+	+	na	--	-	na	na
Apport de bouses par parcage	+ [6]	+ [6]	var[7]	+ +	± [4]	--	-	na	--	+	na	na
Fumure minérale	+ [6]	+ [6]	var[7]	+ +	-	--	±	na	±	+ +	na	na
Premier sarclage retardé	+	+	non	-	na	-	--	na	±	na	na	na
Second sarclage partiel	+	+	non	+	na	-	--	na	--	na	na	na
Zaï, demi-lunes, cordons de pierre	±	±	oui	+ +	±	+ +	+ +	+	+	±	na	na
Billonnage en début de saison des pluies	±	±	non	-	na	+ +	+	na	+	na	na	na
Billonnage en début de saison sèche avec pailles enfouies	+	+	oui	+ +	± [4]	+ +	+ +	na	+	--	na	+ +
Labour	-	-	non	+	na	+ +	+ +	na	+	na	na	na
Scarifiage	-	-	non	--	na	+	+ +	na	±	na	na	na
Brise-vent	+	+	oui	+	-	±	+	+	+ +	±	±	na
Mise en jachère	+ +	+ +	oui	+ +	na	--	--	na	--	na	+ +	± [8]
Végétation en bordure de champ	±	±	var[5]	+	na	--	--	-	--	na	±	-
Protection de la régénération naturelle/préservation des arbres et arbustes dans les champs	?	+	var[5]	+	na	--	-	±	±	na	na	na
Bandes de végétation	-	+	var[5]	±	na	--	--	-	-	na	+	± [8]

[1] Amélioration de la fertilité, sous-produits (bois, fruits, pharmacopée,..) ; [2] S'il existe plusieurs utilisations possibles pour les matériaux sur lesquels repose la technique ; [3] Variable : dépendant de la période d'application ; [4] Disponible, mais en quantité limitée ; [5] Fonction de la quantité / biomasse présente ; [6] Fonction des quantités disponibles et de l'impact sur la productivité des cultures ; [7] Surtout en cours de saison des pluies, mais effet indirect si celo se traduit par un taux plus élevé de résidus de culture pendant la saison sèche ; [8] Fonction de la pression foncière ; [9] Pour techniques ayant une durée de vie pluri-annuelle ; na : non applicable.

créer une rugosité plus importante et de réduire les surfaces de sol à travailler du fait de la faible densité de semis recommandée au Niger. Par rapport à des parcelles témoins sans billons, cette technique a permis de réduire les pertes en terre de 89 % et 28 % en moyenne, au cours de quatre tempêtes, pour des écartements de billons de 0,75 m et 1,5 m, respectivement, pour des vents perpendiculaires aux billons. La technique est cependant globalement assez peu efficace à cause de l'affaissement rapide des billons sous l'effet des pluies et des flux de sable [31, 61] et du fait que la rugosité du sol créée par les billons est unidirectionelle et donc agit beaucoup moins sur les vents non perpendiculaires aux billons. Le choix de l'orientation des billons par rapport aux vents les plus érosifs est donc un aspect crucial de cette technique, quoiqu'il doive être subordonné à l'orientation de la pente pour ne pas favoriser l'érosion hydrique. En condition non-érosive, le billonnage aurait un impact relativement faible sur la productivité du mil, une augmentation de rendement de l'ordre de 10 % ayant été mesurée sur un essai à long terme (11 ans ; M. Klaij, communication personnelle). En condition érosive, des améliorations de rendement de l'ordre de 30 % ont été mesurées pour le mil [60], qui s'expliquent sans doute partiellement par une réduction des dégâts aux plants par enfouissement et abrasion des feuilles.

L'enfouissement de pailles dans les billons lors de leur construction permet de réduire la vitesse d'affaissement de ces derniers. Sur une période de trois ans, cette pratique a permis de réduire les pertes en terre de 87 % par rapport à des parcelles témoins, contre 57 % sur la même période pour des billons sans paille et pour un même écartement de 1,5 m entre billons [31]. L'efficacité de cette technique n'a pas décru en cours de saison, démontrant la stabilisation des billons par les pailles.

L'introduction du billonnage comme technique de lutte antiérosive nécessite l'adoption de la traction animale et d'une billonneuse, et donc un investissement conséquent. L'âne est l'animal de trait le plus courant dans cette région, mais il n'existe actuellement pas de billonneuse susceptible d'être tirée par un âne. De plus, comme toutes les techniques de travail du sol avant semis, le billonnage implique fréquemment un retard dans le semis qui, dans les conditions pédoclimatiques du Niger, conduit à une baisse de rendement [62]. La pratique des billons enrichis de paille permet en partie de contourner ce problème, car elle rend possible le billonnage en fin de saison de culture pour la saison suivante sans perte d'efficacité notable [31]. Cela permet aussi d'exploiter les animaux de trait au mieux de leur forme physique. Par ailleurs, l'enfouissement de paille dans les billons a un effet très favorable sur les propriétés chimiques et physiques du sol et sur les rendements des cultures [63, 64]. Si l'enfouissement de paille dans les billons permet donc de circonvenir certaines des contraintes principales liées au billonnage, elle n'en est pas moins subordonnée à la disponibilité en paille, à des contraintes de main-d'œuvre et au besoin en équipements et en animaux de trait.

Brise-vents

L'objectif premier des brise-vents est de réduire la vitesse du vent au niveau du sol. Les brise-vents peuvent être constitués de bandes de végétation naturelle ou de plantations d'herbacées pérennes, d'arbres ou d'arbustes. Ainsi, des bandes de végétation naturelles de 5 m de large (strate herbacée clairsemée d'arbustes de *Galago senegalensis* et d'une herbacée pérenne *Andropogon gayannus*) permettent de réduire les flux de sédiments de 53 à 70 % lorsque l'écartement entre les bandes passe de 20 à 6 m [58]. Des brise-vents de 2 m de haut de *Bauhinia rufescens* et *A. gayannus* ont par ailleurs permis de réduire de façon sensible les flux de sédiments sur une distance de 7 et 5 fois la hauteur du brise-vent, respectivement [65]. Les brise-vents ayant une strate herbacée bien développée constituent un piège efficace pour les sédiments éoliens. Une différence de hauteur de 150 mm entre des parcelles de 10 m de large plantées avec *A. gayannus* et des parcelles de même largeur non protégées a ainsi pu être observée suite au dépôt de sédiments éoliens après 1 an [66].

Si la capacité des brise-vents à réduire les flux de sable est clairement établie, aucun effet positif sur les rendements des cultures cultivées entre les brise-vents n'a pu être mis en évidence, que ce soit pour des brise-vents de végétation naturelle [61], pour des bandes d'*A. gayannus* [66] ou pour sept espèces locales et exotiques d'arbustes et d'herbacées pérennes évaluées comme brise-vents avec un écartement de 30 m (*B. rufescens, A. gayannus, Acacia holosericea, Acacia nilotica, Acacia senegal, Azadirachta indica, Maerua crassifolia*). Une huitième espèce, *F. albida*, a un impact positif sur les rendements de mil à proximité du brise-vent [65]. Cependant, compte tenu du fait que cette espèce est défoliée en saison des pluies, l'impact favorable sur les rendements de *F. albida* fut attribué avant tout à l'amélioration de la fertilité du sol suite à la chute des feuilles et au changement dans les conditions micro-climatiques [67], plutôt qu'à un réel effet brise-vent.

Il est souvent admis que l'écartement minimal entre brise-vents devrait être de l'ordre de 15 fois leur hauteur afin de compenser les pertes de rendement des cultures suite à la concurrence entre les cultures et les brise-vents pour l'eau, les nutriments et la lumière [68]. Aucun des brise-vents susmentionnés n'assurerait donc une protection complète d'un champ dans ces conditions.

À l'exception des bandes de végétation naturelle, l'implantation de brise-vents requiert la disponibilité de plants pour la plantation, mais aussi une protection contre le broutage pendant les premières années qui suivent la plantation, et ensuite un entretien régulier. C'est donc une technique exigeante qui requiert un soutien financier et institutionnel [69], partiellement compensé par les sous-produits des arbres et arbustes utilisés : fruits, bois de construction, bois de chauffe et pharmacopée traditionnelle. Le choix des espèces est donc crucial pour intéresser les populations rurales dans l'installation et l'entretien de brise-vents [43].

Quatre-vingt douze pour-cent des agriculteurs mettent actuellement en œuvre une ou plusieurs techniques permettant de réduire l'érosion éolienne [41]. En dehors du cadre de projets de développement, ni le billonnage ni les brise-vents ne sont actuellement pratiqués par les agriculteurs sahéliens pour lutter contre l'érosion éolienne. Le paillage n'est, quant à lui, généralement pratiqué que sur de faibles superficies, pour la régénération de petites surfaces dégradées [48]. Pour qu'elles puissent être adoptées par les agriculteurs, les technologies doivent être simples, peu coûteuses, requérir peu d'intrants externes, et reposer largement sur l'expertise locale [40, 70] sans nécessiter une organisation communautaire trop importante. Par ailleurs, les agriculteurs préfèrent les technologies à objectifs multiples, avec pour objectif principal de maintenir ou de restaurer la fertilité des sols, la lutte contre l'érosion éolienne étant un objectif secondaire [42, 71]. Le *tableau III* reprend à cet effet les principales techniques pratiquées par les agriculteurs nigériens.

À l'avenir, il est vraisemblable que la lutte contre l'érosion éolienne ne pourra se concevoir qu'au travers de la mise en œuvre d'un ensemble de mesures reposant largement sur le savoir-faire et les moyens locaux et apportant des bénéfices immédiats autres que le contrôle de l'érosion, par exemple en termes de fertilité des sols ou par la production de sous-produits intéressants. À ce titre, le paillage devrait occuper une place importante dans les programmes de protection des sols, mais cette technique doit évoluer vers des formes nécessitant le moins de main-d'œuvre

Tableau III. Pratiques utilisées par les agriculteurs en zone sahélienne du Niger contribuant à la lutte contre l'érosion éolienne [72].

Pratiques	Commentaires	Références
Maintien de la végétation en bordure de champ	Sert à délimiter les parcelles (p.ex., *Andropogon gayanus* ou *Guiera senegalensis*). Source de bois et matériaux de construction. Rôle de brise-vent si suffisamment dense.	[39, 44, 66]
Gestion de la végétation naturelle dans les champs	Consiste à maintenir certaines espèces d'arbres et d'arbustes dans les champs et à favoriser la régénération naturelle *(voir texte)*.	
Mulching (pailles, branchages ou déchets ménagers)	Petites superficies uniquement *(voir texte)*.	Voir texte
Maintien des pailles de mil et de la litière dans les champs	Voir texte.	Voir texte
Implantation de zaï, demi-*lunes*, cordons de pierre	Avant tout pratiquée pour lutter contre l'érosion hydrique. Amélioration de la productivité de terres dégradées et donc meilleur couvert végétal. Piégeage de sédiments éoliens.	[41, 73]
Apport de fumure organique (fumier, compost) dans les champs.	Couverture du sol par le compost ou le fumier. Amélioration de la fertilité du sol et meilleure couverture du sol par les cultures.	[15, 39, 41]
Retarder le premier sarclage	Consiste à maintenir une couverture du sol par les adventices le plus longtemps possible en début de saison. Nécessite une forte disponibilité en main-d'œuvre. Accentue le risque de déficit hydrique et nutritionnel des cultures à cause de la compétition accrue pour l'eau et les nutriments.	[39]
Sarclage partiel lors du second sarclage	Consiste à ne pas sarcler les parties de champ où la levée a été mauvaise et où la croissance est tellement limitée par manque d'eau ou de nutriments qu'elle ne donnera pas de produits récoltables. Meilleur couvert végétal. Economie de main-d'œuvre.	[39]
Clôture avec arbustes ou branchages	Effet brise-vent. Limitée à de petites superficies (p. ex. jardins maraîchers). Production de fourrage et de fruits si arbustes (p. ex. *Ziziphus Mauritania*).	[39, 40]

possible et sa mise en œuvre systématique nécessitera une concertation entre les intérêts divergents des agriculteurs et des pasteurs. La contrainte majeure du paillage étant cependant la disponibilité en paille pour satisfaire les différents usages, cette pratique ne pourra être appliquée à grande échelle et à des taux suffisants que moyennant une augmentation de la production de biomasse et donc de la fertilité des sols. Une fertilisation raisonnée, et en particulier l'apport de faibles doses de phosphore, constitue donc un moyen indirect de favoriser l'utilisation du paillage [5]. Cela permettrait également d'accroître la vitesse de croissance du mil en début de saison des pluies, et donc de réduire la période de sensibilité maximale à l'érosion éolienne. Une augmentation des rendements agricoles permettrait également le maintien de plus grandes superficies sous jachère, et donc le maintien de bilans de sédiments éoliens positifs à l'échelle du terroir.

Conclusion

Bien que l'érosion éolienne soit une menace sérieuse pour la durabilité de l'agriculture en région sahélienne en termes de bilan de masse et d'éléments nutritifs, elle n'est généralement perçue que comme une contrainte secondaire par les agriculteurs. Ces derniers mettent néanmoins en œuvre un certain nombre de techniques pouvant contribuer à la conservation des ressources en sols, telles qu'un paillage localisé, la préservation de la régénération naturelle de la végétation, ou le sarclage sélectif. Compte tenu de l'extension des terres cultivées, ces techniques, dont l'effet est souvent très localisé, devront être suppléées par d'autres technologies plus performantes fondées, par exemple, sur une gestion des résidus de culture prenant aussi en compte leur fonction antiérosive ou une utilisation rationnelle de l'espace avec préservation d'un couvert végétal suffisant, en veillant à ce que ces technologies assurent des bénéfices immédiats aux agriculteurs en plus de la conservation des ressources en sol. De manière générale, la lutte antiérosive au Sahel ne peut en aucun cas se faire sans remettre ce processus dans le cadre général de lutte contre la pauvreté et l'amélioration de la productivité, et en particulier l'amélioration de la fertilité des sols. Tout cela constitue un préalable indispensable à la participation active de la population rurale dans la lutte contre la dégradation de l'environnement.

Références

1. Mainguet M, Chemin MC. Wind degradation on the sandy soils of the Sahel of Mali and Niger and its part in desertification. *Acta Mechanica* 1991 ; 2 : 113-30.

2. Mainguet M. *Aridity. Droughts and human develapment.* Berlin : Springer Verlag, 1999 ; 302 p.

3. Valentin C. Sécheresse et érosion au Sahel. *Sécheresse* 1994 ; 5 : 191-8.

4. Smaling EMA, Stoorvogel JJ, Windmeijer PN. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. 2. District scale. *Fert Res* 1993 ; 35 : 237-50.

5. Bationo A, Wani S, Bielders CL, Vlek PLG, Mokwunye AU. Crop residue and fertilizer management to improve soil organic carbon content, soil quality and productivity in the Desert Margins of West Africa. In : Lal R, Kimble JM, and Stewart BA, eds. *Global climate change and tropical ecosystems.* Boca Raton (USA) : CRC Press, 2000 : 117-45.

6. Bielders 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.

7. Sterk G, Herrmann L, Bationo A. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in Southwest Niger *Land Degrad Devel* 1996 ; 7 : 325-35.

8. Cooke R, Warren A, Goudie A. *Desert Geomorphology.* London : UCL Press, 1993 ; 526 p.

9. Mainguet M. The concept of sandy-aeolian sediment budget applied to the sand deposits of the Sahara and Sahel taken as unit in the analysis of the surface shape types of the "Grand erg oriental and occidental". In : El-Baz F, El-Tayeb IA, Hassan MHA, eds. *Sand transport and desertification in arid lands.* Londres : World Scientific Publ. Co, 1990 : 44-65.

10. Prospero JM, Glacum RA, Nees RT. Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America. *Nature* 1981 ; 289 : 570-2.

11. Swap R, Garstang M, Greco S. Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus* 1992 ; 44B : 133-49.

12. Lebel T, Taupin JD, D'Amato N. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology. *J Hydrol* 1997 ; 188-189 : 74-96.

13. Loireau M, D'Herbes JM, Delabre E. Evolution et place de la jachère à travers une analyse spatiale des interactions ressources-usages au Sahel agropastoral nigérien. In : Floret Ch, Pontanier R, éds. *La jachère en Afrique tropicale : Rôles, aménagements, alternatives.* Montrouge (France) : John Libbey Eurotext, 2000 : 32-42.

14. Gavaud M. *Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional.* Vol. 78. Travaux et documents de l'ORSTOM. Paris : Orstom, 1977 ; 102 p.

15. de Rouw A, Rajot JL, Schmelzer G. Effets de l'apport de bouses de zébus sur les composantes du

rendement du mil, sur les mauvaises herbes et sur l'encroûtement superficiel du sol au Niger. In : A. Biarnès, éd. *La conduite du champ cultivé*. Paris : Orstom, 1998 : 95-112.

16. Stull RB. *An introduction to boundary layer meteorology*. Atmospheric Science Library. Dordrecht, (Netherlands) : Kluwer Academic Publishers, 1991 ; 666 p.

17. Chepil WS. Dynamics of wind erosion : I. Nature and movement of soil by wind. *Soil Sci* 1945 ; 60 : 305-20.

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

19. Buerkert B, Allison BE, von Oppen M. *Wind erosion in Niger. Implications and control measures in a millet-based farming system*. Dordrecht, (The Netherlands) : Kluwer Academic Publ, 1996 ; 255 p.

20. Michels K, Sivakumar MVK, Allison BE. Wind erosion contral using crop residue. I. Effects on soil flux and soil properties. *Field Crops Res* 1995 ; 40 : 101-10.

21. Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle : 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *J Geophys Res* 1995 ; 100 : 16415-30.

22. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Collection didoctiques. Paris : Orstom éditions, 1989 ; 229 p.

23. Rajot JL, Alfaro SC, Gomes L. Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion. *Catena* 2003 ; 53 : 1-16.

24. Zobeck TM, Sterk G, Funk R, Rajot JL, Stout JE, Scott Van Pelt R. Measurement and dato analysis methods for field-scale wind erosion studies and madel validation. *Earth Surf Proc Landf* 2003 ; 28 : 1163-88.

25. Buerkert A, Lamers JPA. Soil erosion and deposition effects on surface characteristics and pearl millet growth in the West African Sahel. *Plant Soil* 1999 ; 215 : 239-53.

26. Chappell A, Warren A, Taylor N, Charlton M. Soil flux (loss and gain) in southwestern Niger and its agricultural impact. *Land Degrad Devel* 1998 ; 9 : 295-310.

27. Bielders CL, Vrieling A, Rajot JL, Skidmore E. On-farm evaluation of field-scale soil losses by wind erosion under traditional management in the Sahel. In : Ascough JC II, Flanagan DC, èds. *Soil erosion research for the 21st century*. St Joseph (Michigan) : ASAE, 2001 : 494-7.

28. Sterk G, Stein A. Mapping wind-blown mass transport by modeling variability in space and time. Soil Sci Sac Am J 1997 ; 61 : 232-9.

29. Fryrear DW. A field dust sampler J Soil Water Cons 1986 ; 41 : 117-20.

30. Sterk G, Raats PAC. Comparison of models describing the verticol distribution of wind-eroded sediment. Soil Sci. Soc Am J 1996 ; 60 : 1914-9.

31. Bielders CL, Michels K, Rajot JL. On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger. *Soil Sci Soc Am J* 2000 ; 64 : 1776-85.

32. Rajot JL, Ribolzi O, Thiebaux JP. Wind erosian in a small catchment of grazing area in Northern Burkina Faso : influence of surface features. In : Lee JA, Zobeck TM, éds. *Proceedings of the ICARS/GCTE-SEN Joint Meeting. Lubbock, Texas, USA, 22-25 July 2002*. Lubbock, (Texas) : International Center for Arid and Semiarid Lands Studies, 2002 :185-90.

33. Herrmann L. *Staubdeposition auf Böden West-Afrikas*. Stuttgart (Germony) : University of Hohenheim, 1996 ; 239 p.

35. Rajot JL, Sabre M, Gomes L. Measurement of vertical fluxes of soil-derived dust during wind erosion events in a Sahelian region (Niger). In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, éds. *Wind Erosion in West Africa. The problem and its control*. Weikersheim (Germany) : Margraf Verlag, 1996 : 49-56.

36. 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 Envir* 2000 ; 44 : 383-98.

37. Valentin C, Rajot JL, Mitja D. Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the subhumid and semi-arid regions of West-Africa. *Agric Ecosyst Environ* 2004 : (sous presse).

38. Chappell A, Warren A, Oliver MA, Charlton M. The utility of ^{137}Cs for measuring soil redistribution rotes in southwest Niger. *Geoderma* 1998 ; 81 : 313-37.

39. Bielders CL, Alvey S, Cronyn N. Wind erosion : the perspective of gross-roots communities in the Sahe. *Land Degrad Devel* 2001 ; 12 : 57-70.

40. Baidu-Forson J, Napier TL. Wind erosion control within Niger. *J Soil Water Cons* 1998 ; 53 : 120-5.

41. Sterk G, Haigis J. Farmer's knowledge of wind erosion processes and control methods in Niger. *Land Degrad Devel* 1998 ; 9 : 107-14.

42. Feil PR, Lamers JPA. Farmer's perception obout wind erosion and its control. In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, eds. *Wind erosion in Niger. Implications and control measures in a millet-based farming system*. Dordrecht (The Netherlands) : Kluwer Academic Publ., 1996 : 215-34.

43. Lamers JPA, Michels K, Feil PR. Wind erosion control using windbreaks and crap residues . local knowledge and experimental results. *J Agric Tropics Subtrop* 1995 ; 96 : 87-96.

44. Raulin H. *Techniques et phases socio-économiques des sociétés rurales nigériennes*. Vol. 12. Études nigériennes. Niamey (Niger) : IFAN-CNRS, 1965.

45. Ben Mohammed A. Wind erosion in Niger : extent, current research, and ongoing soil conservation activities. In : Sivakumar MVK, Zöbisch M, Koala S, Maukonen T, eds. *Wind erosion in Africa and West Asia : Problems and control strategies. Proceedings of the Expert Group Meeting, 22-25 April 1997, Caïro, Egypt*. Aleppo (Syria) : ICARDA ; Patancheru (India) : Icrisat, 1998 : 125-41.

46. Buerkert A. *Effects of crop residues, phosphorus, and spatial variability on yield and nutrient uptake of pearl millet (Pennisetum glaucum L.) in southwest Niger*. Stuttgart-Hohenheim (Germany) : Ulrich Grauer Verlag, 1995 ; 272 p.

47. Geiger SC, Manu A, Bationo A. Changes in a sandy Sahelian soil following crop residue and fertilizer additions. *Soil Sci Soc Am J* 1992 ; 56 : 172-7.

48. Lamers J, Feil PR. Farmer's knowledge and management of spatiol soil and crop growth variability in Niger, West Africa. *Nether J Agric Sci* 1995 ; 43 : 375-89.

49. Chase R, Boudouresque E. Methods to stimulate plant regrowth on bare Sahelian forest soils in the region of Niamey, Niger. *Agric Ecosyst Environ* 1987 ; 18 : 211-21.

50. Bationo A, Buerkert A, Sedogo MP, Christianson BC, Mokwunye AU. A critical review of crop residue use as soil amendment in the West African semi-arid tropics. In : Powell JM, Fernandes-Riverra,S, Williams TO, Renard C, eds. *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed forming systems of Sub-Saharan Africa*. Vol 2. Addis Aboba (Ethiopia) : International Livestock Center for Africa (ILCA), 1995 : 305-22.

51. Lamers JPA, Bruentrup M. Comparative advantage of single and multipurpose uses of millet stover in Niger. *Agric Syst* 1996 ; 50 : 273-85.

52. Sterk G, Spaan WP. Wind erosion control with crop residues in the Sahel. *Soil Sci Soc Am J* 1997 ; 61 : 911-7.

53. Sterk G. Flattened residue effects on wind speed and sediment transport. *Soil Sci Soc Am J* 2000 ; 64 : 852-8.

54. Lyles L, Allison BE. Wind erosion : the protective role of simulated standing stubble. *Trans ASAE* 1976 ; 19 : 61-4.

55. Brouwer J, Bouma J. *Soil and crop growth variability in the Sahel : highlights of reserach (1990-95) at ICRISAT Sahelian Center*. Informatian Bulletin N°49. Patoncheru (India) : Icrisat, 1997 ; 58 p.

56. Ambouta JMK, Valentin C. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse* 1996 ; 7 : 269-75.

57. Herrmann L, Jahn R, Starh K. Identification and quantification of dust additions in peri-saharan soils. In : Guerzoni S, Chester R, eds. *The impact of desert dust across the mediterranean*. Dordrecht (The Netherlands) : Kluwer Academic Publ., 1996 : 173-82.

58. Banzhaf J, Leihner DE, Buerkert A, Serafini PG. Soil tillage and windbreak effects on millet and cowpea : I. Wind speed, evaporation and wind erosion. *Agron J* 1992 ; 84 : 1056-60.

59. Rinaudo T. Tailoring wind erosion control methods for farmers' specific needs. In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, eds. *Wind erosion in West Africa. The problem and its control*. Weikersheim (Germany) : Margraf Verlag, 1996 : 161-71.

60. Klaij MCK, Hoogmoed WB. Soil Management for crop production in the West African Sahel. II. Emergence, establishment and yield of pearl millet. *Soil Till Res* 1993 ; 25 : 301-15.

61. Leihner DE, Buerkert A, Banzhaf J, Serafini PG. Soil tillage and windbreak effects on millet and cowpea. II. Dry matter and grain yield. *Agron J* 1993 ; 85 : 400-5.

62. Hoogmoed WB, Klaij MC. Soil management for crop production in the West African Sahel. I. Soil and climote parameters. *Soil Till Res* 1990 ; 16 : 85-103.

63. Bielders CL, Michels K. On-farm Evaluation of Ridging and Residue Management Options in a Sahelian millet-cowpea intercrop. II. Crop development. *Soil Use Manage* 2002 ; 18 : 309-15.

64. Bielders CL, Michels K, Bationo A. On-farm Evaluation of Ridging and Residue Management Options in a Sahelian millet-cowpea intercrop. I. Soil quality changes. Soil Use Manage 2002 ; 18 : 216-22.

65. Michels K, Lamers JPA, Buerkert A. Effects of windbreak species and mulching on wind erosion and millet yield in the Sahel. *Exp Agric* 1998 ; 34 : 449-64.

66. Renard C, Vandenbeldt RJ. Bordures d'Andropogon gayanus Kunth comme moyen de lutte contre l'érosion éolienne au Sahel. *Agron Trop* 1990 ; 45 : 227-31.

67. Poyne WA, Williams JH, Moussa KAM, Stern RD. Crop diversification in the Sahel through use of environmental changes near *Faidherbia albida* (Del) A Chev. *Crop Sci* 1998 ; 38 : 1585-91.

68. Brenner AJ, Jarvis PG, Van den Belt RJ. Windbreak-crop interactions in the sahel. 2. Growth response of millet in shelter. *Agric Forest Meteor* 1995 ; 75 : 235-62.

69. Lamers JPA, Becker T, von Oppen M. Arrangements to finance tree windbreaks for wind erosion control. In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, eds. *Wind Erosion in West Africa. The problem and its control.* Weikersheim (Germany) : Margraf Verlag, 1996 : 227-41.

70. Lamers JPA. *An Assessment of Wind Erosion Control Techniques in Niger. Financial and Economic Analyses of Windbreaks and Millet Crop Residues.* Stuttgart (Germany) : Ulrich Grauer Verlag, 1995 ; 208 p.

71. Lamers JPA. Wind erosion in Niger : Farmer perception, traditional techniques to prevent and combat wind erasion, and farmer adoption of modern soil conservation technologies. In : Sivakumar MVK, Zöbisch M, Koala S, Maukonen T, eds. *Wind erosion in Africa and West Asia : Problems and control strategies. Proceedings of the Expert Group Meeting, 22-25 April 1997, Cairo, Egypt.* Aleppa (Syria) : ICARDA ; Patancheru (India) : Icrisat, 1998 : 173-86.

72. Bielders CL, Lamers JPA, Michels K. Wind erosion control technologies in the West African Sahel : the effectiveness of windbreaks, mulching and soil tillage, and the perspective of farmers. *Annals Arid Zones* 2001 ; 40 : 369-94.

73. Scoones I, Reij C, Toulmin C. Sustaining the soil : indigenous soil and water conservation in Africa. In : Scoones I, Reij C, Toulmin C, eds. *Sustaining the soil : indigenous soil and water conservation in Africa.* London (UK) : Earthscan Publications Ltd, 1996 : 1-27.