

CSFD

Les dossiers
thématiques

Numéro 3

Combattre l'érosion éolienne : *un volet de la lutte contre la désertification*



Comité Scientifique Français de la Désertification



Les dossiers thématiques du CSFD numéro 3

Directeur de la publication

Marc Bied-Charreton

Président du CSFD
Professeur émérite de
l'Université de Versailles
Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ)
Chercheur au Centre d'économie
et d'éthique pour l'environnement et
le développement (C3ED-UMR IRD/UVSQ)

Auteurs

Monique Mainguet

Membre de l'Institut universitaire de France
et directrice du Laboratoire de géographie zonale
pour le développement (LGZD),
Université de Reims Champagne-Ardenne
monique.mainguet@univ-reims.fr

Frédéric Dumay

Ingénieur d'études au Laboratoire
de Géographie Zonale pour le Développement,
Université de Reims Champagne-Ardenne
frederic.dumay@univ-reims.fr



Édition et iconographie

Isabelle Amsallem (Agropolis Productions)

Remerciements pour les illustrations



Danièle Cavanna (Photothèque INDIGO
de l'Institut de recherche pour le développement)

Conception et réalisation

Olivier Piau (Agropolis Productions)

Impression : *Les Petites Affiches* (Montpellier)
Dépôt légal : à parution • ISSN : 1772-6964
Imprimé à 1 500 exemplaires

© CSFD/Agropolis, avril 2006

Pour référence : Mainguet M. & Dumay E., 2006. Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification. *Les dossiers thématiques du CSFD*. N°3. Avril 2006. CSFD/Agropolis, Montpellier, France. 44 p.

Comité Scientifique Français de la Désertification

La création, en 1997, du Comité Scientifique Français de la Désertification, CSFD, répond à une double préoccupation des ministères en charge de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Il s'agit d'une part de la volonté de mobiliser la communauté scientifique française compétente en matière de désertification, de dégradation des terres et de développement des régions arides, semi-arides et sub-humides afin de produire des connaissances et servir de guide et de conseil aux décideurs politiques et aux acteurs de la lutte. D'autre part, il s'agit de renforcer le positionnement de cette communauté dans le contexte international. Pour répondre à ces attentes, le CSFD se veut une force d'analyse et d'évaluation, de prospective et de suivi, d'information et de promotion. De plus, le CSFD participe également, dans le cadre des délégations françaises, aux différentes réunions statutaires des organes de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification : Conférences des Parties, Comité de la science et de la technologie, Comité du suivi de la mise en œuvre de la Convention. Il est également acteur des réunions au niveau européen et international.

Le CSFD est composé d'une vingtaine de membres et d'un Président, nommés *intuitu personae* par le ministre délégué à la Recherche et issus des différents champs disciplinaires et des principaux organismes et universités concernés. Le CSFD est géré et hébergé par l'Association Agropolis qui rassemble, à Montpellier et dans le Languedoc-Roussillon, une très importante communauté scientifique spécialisée dans l'agriculture, l'alimentation et l'environnement des pays tropicaux et méditerranéens. Le Comité agit comme un organe indépendant et ses avis n'ont pas de pouvoir décisionnel. Il n'a aucune personnalité juridique. Le financement de son fonctionnement est assuré par des subventions du ministère des Affaires étrangères et du ministère de l'Écologie et du Développement durable, la participation de ses membres à ses activités est gracieuse et fait partie de l'apport du ministre délégué à la Recherche.

Pour en savoir plus :

www.csf-desertification.org

La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français. Les dossiers thématiques du CSFD sont téléchargeables librement sur le site Internet du Comité.

Marc Bied-Charreton
Président du CSFD
Professeur émérite de l'Université
de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Chercheur au C3ED-UMR IRD/UVSQ

L'humanité doit dorénavant faire face à un problème d'envergure mondiale : la désertification, à la fois phénomène naturel et processus lié aux activités humaines. Jamais la planète et les écosystèmes naturels n'ont été autant dégradés par notre présence. Longtemps considérée comme un problème local, la désertification fait désormais partie des questions de dimension planétaire pour lesquelles nous sommes tous concernés, scientifiques ou non, décideurs politiques ou non, habitants du Sud comme du Nord. Il est dans ce contexte urgent de mobiliser et de faire participer la société civile, et dans un premier temps de lui fournir les éléments nécessaires à une meilleure compréhension du phénomène de désertification et de ses enjeux. Les connaissances scientifiques doivent alors être à la portée de tout un chacun et dans un langage compréhensible par le plus grand nombre.

C'est dans ce contexte que le Comité Scientifique Français de la Désertification a décidé de lancer une nouvelle série intitulée « *Les dossiers thématiques du CSFD* » qui veut fournir une information scientifique valide sur la désertification, toutes ses implications et ses enjeux. Cette série s'adresse aux décideurs politiques et à leurs conseillers du Nord comme du Sud, mais également au grand public, aux journalistes scientifiques, du développement et de l'environnement. Elle a aussi l'ambition de fournir aux enseignants, aux formateurs ainsi qu'aux personnes en formation des compléments sur différents domaines. Enfin, elle entend contribuer à la diffusion des connaissances auprès des acteurs de la lutte contre la désertification, la dégradation des terres et la lutte contre la pauvreté : responsables d'organisations professionnelles, d'organisations non gouvernementales et d'organisations de solidarité internationale.

Une douzaine de dossiers est consacrée à différents thèmes aussi variés que la biodiversité, le changement climatique, le pastoralisme, la télédétection, etc., afin de faire le point des connaissances sur ces différents sujets. Il s'agit également d'exposer des débats d'idées et de nouveaux concepts, y compris sur des questions controversées, d'exposer des méthodologies couramment utilisées et des résultats obtenus dans divers projets et enfin, de fournir des références opérationnelles et intellectuelles, des adresses et des sites Internet utiles.

Ces dossiers seront largement diffusés - notamment dans les pays les plus touchés par la désertification - sous format électronique à la demande et via notre site Internet, mais également sous forme imprimée. Nous sommes à l'écoute de vos réactions et de vos propositions. La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français. Les avis exprimés dans les dossiers reçoivent l'aval du Comité.

Éric Roose
Président du Réseau EGCES
et
Georges De Noni
Secrétaire scientifique du Réseau EGCES

La désertification et la dégradation des terres se manifestent par plusieurs phénomènes (ou processus) dont l'importance est variable selon les régions et les conditions : perte de fertilité, réduction de la couverture végétale et arborée, perte de la capacité de rétention en eau des sols, ruissellement, érosion hydrique et érosion éolienne. Les conséquences en sont une plus grande fragilité des milieux, la baisse des rendements et donc des revenus des habitants, une augmentation de l'insécurité alimentaire et, d'une façon générale, l'accroissement de la vulnérabilité des sociétés vis-à-vis des risques climatiques et des crises économiques, le départ en migration.

Le grand mérite de ce dossier thématique du CSFD est de se concentrer sur une des manifestations les plus criantes de la désertification : l'érosion éolienne. Comme les auteurs le signalent dès le début, nous assistons en ce moment à une augmentation considérable des vents et des poussières, donc de l'érosion éolienne ; ceci est particulièrement préoccupant, entre autres, en Mauritanie et le long de la boucle du Niger.

Ce dossier va nous éclairer sur les mécanismes de l'action du vent, les facteurs déclenchant l'érosion et la dégradation, ainsi que sur les moyens de suivi. Il va également faire un point décisif sur ce que nous connaissons des techniques de lutte contre l'ensablement et contre cette forme d'érosion, et sur la nécessité d'une approche intégrée. De nombreux exemples sont présentés, montrant à la fois l'intérêt et les limites des divers moyens de lutte ; ils donnent également des montants et des fourchettes de coûts.

Cette volonté de mettre à la portée des décideurs et du public tous ces acquis doit être saluée. Notre réseau francophone de chercheurs sur l'érosion et la gestion conservatoire des eaux et des sols (Réseau EGCES), porté par l'Agence universitaire de la francophonie, ne peut que s'associer aux conclusions de ce dossier et se féliciter de cette initiative. En effet, ce Réseau, qui a repris l'héritage d'un autre réseau très actif autrefois à l'Orstom puis à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), veut avoir un rôle actif au contact des communautés de chercheurs, développeurs et enseignants francophones du Nord et du Sud pour mieux faire connaître l'érosion des sols, qui est un phénomène préoccupant au niveau mondial. Le réseau EGCES est également largement ouvert aux divers champs scientifiques qui alimentent la question de l'érosion des sols : méthodologie (indicateurs biophysiques, spatiaux), aspects socio-économiques, lutte antiérosive traditionnelle ou moderne, gestion des eaux et de leur qualité, restauration des terres et de la biodiversité.

Le Réseau EGCES est proche de l'action du CSFD car c'est au sein des zones semi-arides que la dégradation du couvert végétal entraîne le plus de problèmes tant sur le plan de l'érosion des terres le vent y étant très actif, de l'envasement des barrages, que sur la disponibilité en eau de qualité, véritable défi à relever face aux besoins élémentaires d'une population en pleine croissance. Pour marquer ce point, les dernières journées scientifiques du Réseau se sont déroulées à Marrakech, au Maroc, en mai 2006 durant le congrès ISCO (*International Soil Conservation Organisation*).

Sommaire



4
L'érosion éolienne, un mécanisme complexe de dégradation du milieu sous l'action du vent

6
Les seuils d'amorce de l'érosion éolienne et les facteurs déclenchants de la dégradation mis en évidence par la télédétection

16
Les mécanismes de l'érosion éolienne à l'interface homme-nature

24
Les techniques de lutte contre l'érosion éolienne

40
Espoir dans la lutte contre l'érosion éolienne

41
Acronymes et abréviations utilisés dans le texte

42
Pour en savoir plus...

44
Lexique

L'érosion éolienne, un mécanisme complexe de dégradation du milieu sous l'action du vent

L'érosion éolienne est un des mécanismes les plus traumatisants de la dégradation environnementale, notamment par l'appauvrissement textural et minéral des sols et par le déplacement par le vent de volumes élevés de sable. Insidieuse dans ses premiers stades et alors difficile à déceler, elle ne devient perceptible pour les non-spécialistes que lorsqu'elle atteint un stade sévère, malaisé à juguler, comme pour l'ancienne cité caravanère de Chinguetti (Mauritanie, classée au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1996) presque totalement ensevelie sous le sable et aujourd'hui partiellement désensablée grâce à un projet de sauvegarde. En 2005, il y avait cependant encore jusqu'à 5 mètres de sable dans certaines ruelles de l'agglomération.

Dans les écosystèmes secs, l'érosion éolienne, amplifiée par le brutal changement de rythme de la dégradation survenue au cours des deux dernières décennies, est telle qu'il est devenu inefficace de l'appréhender en utilisant le modèle classique en trois étapes (causes, mécanismes et conséquences) développé à la fin des années 1970. Par exemple, l'augmentation de 800 pour cent des vents de poussières, donc de l'érosion éolienne à Nouakchott (Mauritanie) entre 1960 et 1995, traduit bien la réalité de l'accélération des processus. Il est ainsi devenu impossible de dissocier ces trois étapes et d'établir une chronologie dans leur enchaînement, compte-tenu des multiples rétroactions et des liens insidieux qu'elles entretiennent entre elles. Ces trois étapes doivent donc être analysées conjointement pour conserver leur validité contextuelle. En effet, il est nécessaire de ne pas perdre de vue que chaque cas diffère des autres et qu'une



solution qui fonctionne localement n'est pas transposable ailleurs sans avoir préalablement fait l'objet d'une adaptation : le « modèle » du barrage vert développé en Algérie au milieu des années 70 est la preuve tangible de cet échec !

Zoom

Le « barrage vert » en Algérie, un modèle inadapté à la réalité

Au début des années 1970, une vision simpliste de la désertification en Algérie défendait la thèse que le désert progressait tel un rouleau compresseur du sud vers le nord. C'est ainsi que toute la stratégie de mise en place du « barrage vert » a reposé sur une approche erronée. Le barrage vert a été lancé en 1972 pour lutter contre cette progression avec comme slogan « l'algérien avance, le désert recule ». L'Algérie voulait se doter d'une bande boisée NE-SO

d'une quarantaine de kilomètres de large sur les Hauts Plateaux. Ce « barrage vert » entrainait dans un vaste projet de réforme agraire et était destiné à occuper une jeunesse pléthorique et inactive. Toutes les projections de réussites émises à l'amorce du projet ont échoué : aucun effet sur la lutte contre l'ensablement puisque jamais les superficies initialement prévues à reboiser n'ont été atteintes ; l'augmentation du surpâturage par accroissement des troupeaux et la multiplication des erreurs techniques lors du reboisement entraînerent de lourdes pertes. La monospécificité des plantations (essentiellement pin d'Alep) les rend sensibles aux parasites. Après cet échec, l'idée de créer une barrière d'échelle nationale a partout été abandonnée au profit de petits projets intégrés.

Voir aussi page 37



Vent de sable dans la Mare d'Oursi, Oudalan, Burkina Faso.
François Sodter ©IRD

Une meilleure lutte contre l'érosion éolienne requiert ainsi l'attention des décideurs sur la notion d'espace-temps afin d'une part de déceler les seuils de déclenchement de cette érosion et d'autre part de suivre les nouvelles limites fluctuantes des aires menacées par ce mécanisme.

Il est alors nécessaire de prendre en compte l'unité fonctionnelle du Système Global d'Action Éolienne (SGAE, concept développé par la suite), depuis l'aire source de sable jusqu'à l'aire de dépôt. Ces échelles sont essentielles pour mettre en place les moyens de lutte contre l'érosion éolienne et le choix stratégique des aires d'intervention.

La perception des seuils de l'amorce de la dégradation environnementale engendrée par le vent combiné aux principaux facteurs - naturels et humains - déclencheurs de l'érosion éolienne, peut être appréhendée avec succès à l'aide des outils de **téledétection** (images satellites et photographies aériennes). Les mécanismes imbriqués de l'érosion éolienne une fois explicités devront être replacés dans le contexte du Système Global d'Action Éolienne. Les moyens proposés de lutte physique et biologique contre l'érosion éolienne et pour la conservation des ressources montreront comment cette lutte fait partie de la lutte contre la désertification (LCD) et qu'il est impossible de se passer de la communauté internationale.

Les seuils d'amorce de l'érosion éolienne et les facteurs déclenchants de la dégradation mis en évidence par la télédétection



Il est admis maintenant que les facteurs anthropiques (socio-économiques, pression démographique, comme l'exploitation excessive des ressources naturelles, la déforestation, le surpâturage, l'excès d'irrigation et son corollaire la salinisation...) sont de véritables causes déclenchantes de la dégradation environnementale dans les milieux secs. Ces facteurs sont aggravés par leur superposition avec des phases de sécheresse récurrentes ou des « accidents » pluviométriques marqués.

L'homme, tant le paysan que le pasteur, le citoyen ou le décideur politique, joue, par ses activités et ses aménagements, un rôle essentiel de déclencheur de l'érosion éolienne, les accidents climatiques (sécheresses, inondations, paroxysmes d'érosion hydrique et éolienne) étant des accélérateurs de ce processus.

Les mécanismes éoliens deviennent ainsi, dans les milieux secs (qui selon nos observations atteignent au sud du Sahel l'isohyète 600 mm/an), le principal facteur de vulnérabilité des terres agricoles et des aires urbaines en milieux sableux (cas de Nouakchott) et peuvent aboutir à la désertification.

Ce phénomène est en cours dans le Bassin arachidier du Sénégal dont le Nord, à la fin des années 2000, a atteint le stade de dégradation observé au début des années 1970 en Mauritanie à la latitude de Nouakchott (Fall, 2001). Il serait donc idéal, à l'aide des images satellites, des photographies aériennes et des vérifications de terrain, de déceler le plus rapidement possible le seuil d'amorce de l'érosion éolienne afin de pouvoir mettre en place des stratégies préventives de lutte.

Pour cela, chaque État concerné devrait avoir une ou plusieurs équipes permanentes travaillant sur ce problème.

Perception des premiers symptômes de l'érosion éolienne

Le seuil d'amorce de l'érosion éolienne ou la rupture d'équilibre* entre les ressources naturelles et la pression anthropique exacerbée par les crises climatiques, est essentiel à définir, puisqu'il permet d'identifier rapidement dans le temps et dans l'espace les prémices de la dégradation environnementale, avant le stade de dégradation et le stade ultime de désertification. La perception de ces seuils et des degrés dans les prémices de la dégradation reste à améliorer afin de permettre une prise de conscience plus rapide de l'amorce de l'érosion éolienne.

Les signes précurseurs décelables par **télédétection** sont par exemple les **surcreusements** dans la topographie (*blow-out*), l'accroissement de la densité de petits édifices éoliens du type **nebkas**, l'apparition de taches irrégulières de sable mobile, la réactivation du sommet des édifices sableux, le changement de la **réflectance des sols**, etc. Pour cela, il existe des outils d'observation qui doivent être adaptés aux échelles d'observation et complétés par des observations de terrain et des données quantifiées. Encore faut-il que ces signes soient rapidement et bien interprétés, de manière à permettre une intervention rapide et efficace.

* Il s'agit dans les écosystèmes secs d'un état de stabilité des sols et du couvert végétal naturellement ouvert.



*Survol de Nouakchott, ville et bidonville sans verdure. Ensemblement progressif, Mauritanie, 1996.
Yves Boulvert ©IRD*

Les images satellites et le concept du SGAE

Outil de base de l'investigation environnementale, les images satellites permettent de disposer de manière répétitive d'une information riche et exhaustive. En combinant les différentes échelles, les observations sont multiscalaires, depuis l'échelle synoptique avec les satellites METEOSAT et NOAA, jusqu'à l'échelle régionale avec LANDSAT et SPOT.

À partir de ces images satellites, il a été possible de définir le concept de Système Global (ou Régional) d'Action Éolienne (SGAE [ou SRAE]) et d'en cerner les limites (Mainguet, 1984). Un SGAE (ou SRAE) s'avère être un faisceau de courants de transport éolien de particules, jalonnés par des **ergs** ouverts qui communiquent entre eux en donnant des chaînes d'ergs comme par exemple ceux liant le Sahara et le Sahel (Mainguet et Dumay, 1995). Les satellites géostationnaires (ayant une position fixe, METEOSAT pour l'Afrique ou circumpolaires, NOAA pour l'Eurasie) couvrent en général l'ensemble d'un Système Global d'Action Éolienne.

Les images de plus petite échelle, quant à elles, permettent d'identifier les différentes unités du système éolien : aire source, aire de transport et aire d'accumulation. À l'intérieur même de ces unités, il existe un emboîtement d'échelles régi par les méga-obstacles (montagnes et plaines, Mainguet, 1976) et les rugosités topographiques locales (relief, végétation, constructions anthropiques). Les « sous-unités » définies peuvent, par exemple, être une aire d'érosion à l'intérieur d'une unité d'accumulation ou, inversement, une aire d'accumulation à l'intérieur d'une unité où domine l'érosion décelable grâce aux images satellites de grande échelle (satellites SPOT ou LANDSAT).

Lorsque le système est régional, il est alors possible de procéder à la constitution d'une mosaïque d'images, par exemple le Système Régional d'Action Éolienne du Bassin de l'Aral en Asie centrale (Mainguet, Dumay et Létolle, 2002). Les observations plus fines, pour la protection d'infrastructures (bâtiments, routes, canaux d'irrigation, etc.), exigent le recours aux couvertures de photographies aériennes.

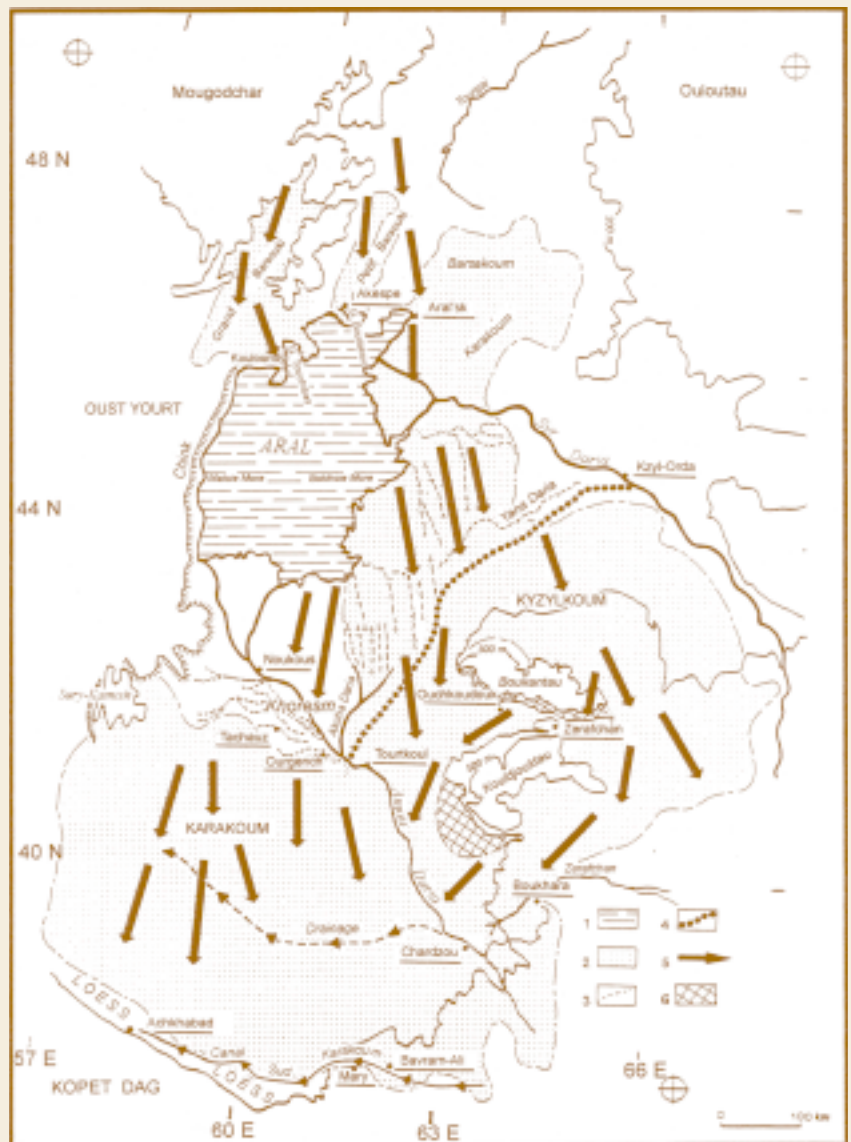
Le système régional d'action éolienne (SRAE) dans la partie orientale du bassin de l'Aral

Le bassin de l'Aral, de 1,8 millions km², couvre 4 % des aires sèches de latitude tempérée. Ce SRAE, étudié sur le terrain et sur les images satellites Cosmos, NOAA et SPOT, s'amorce à la sortie sud du corridor de Tourgai qui unit la plaine sibérienne au bassin de l'Aral. En son centre, il balaye une aire où les images satellites révèlent un dense réseau paléo-hydrographique, les bassins du Sir Daria et de l'Amou Daria, seuls cours permanents, allogènes et, au sud, les cours temporaires du Tedjen et du Mourgab. Il s'achève au pied nord du Khopet Dag (3 349 m) par une bande de loess de 375 km sur 40 km.

À la sortie du venturi de Tourgai, le vent se déleste de sa charge en sable et construit quatre **ergs** au nord du lac Aral : le Grand Barsouki et le Petit Barsouki, l'erg de Barsakoum, l'erg du Karakoum à ne pas confondre avec le grand Karakoum. À leur bord sud, des **barkhanes** vives envahissent les villages de Kulandy et d'Akespe (46°5' N, 60°3' E). Le Grand Barsouki (46° à 48°N, 58°5' à 60°E) a 250 km de long sur 25 à 50 km de large ; au contact de l'Aral près de Koulandy (59°3' N et 46°1' E), il est dans le SRAE le seul à l'ouest du lac. À son aval vent, il butte contre l'escarpement du Tchink. Le Petit Barsouki, de 110 x 30 km, s'amorce à 47°N et 61°E. Ces deux ergs tapissent des paléo-vallées du Quaternaire ancien. Leurs dunes forment une partie des rivages des golfes Boutakov et Touchibas. Le sable provient de dépôts fluvio-glaciaires s'étendant des collines de Mougodjar au sud de l'Oural jusqu'aux plaines du corridor de Tourgai (Irgiz, etc.).

La carte géologique de 1957 à 1 : 7 500 000 attribue au matériel une origine fluviale tertiaire paléogène et un remaniement éolien. Le SRAE longe l'Aral à l'est. La **déflation** dans la steppe kazakhe, au sud de la calotte sibérienne, a fourni le sable des **cordons longitudinaux** NNW-SSE de l'erg nord Karakoum. Le Sir Daria rompt la continuité des ergs et apporte un stock sableux au Kyzylkoum erg amorcé dès sa rive sud. La direction générale NNW-SSE des cordons subsiste au sud du Sir Daria puis s'infléchit à 44° N et devient NNE-SSW, selon un tracé courbe autour de l'Aral qui joue le rôle d'un obstacle au vent.

De ce fait, les dépôts ne s'accumulent pas au maximum du creux du lac ainsi conservé mais sur les premières contre-pentes. L'inflexion se voit sur les images satellites jusqu'à 150 km à l'est du lac, à la limite nord du paléo-delta de l'Amou Daria, où la direction éolienne mesurée sur le terrain est NNE-SSW 10°. Entre le delta du Sir Daria et le sud-est de l'Aral (ancien archipel Akpekti), la granularité s'affine des sables du Kyzylkoum aux



Ce SRAE révèle bien la dimension régionale des courants éoliens qui façonnent l'état de surface des aires sableuses sur 1 500 km du nord au sud.

- 1. Aral • 2. Nappes sableuses et ergs • 3. Paléo-oueds
- 4. Limite ouest des paléo-chenaux fluviaux non colmatés par du matériel éolien • 5. Directions éoliennes majeures dans le système régional d'action éolienne (SRAE) du bassin de l'Aral
- 6. Aires d'abri sous le vent d'obstacles • 7. Limite des ergs

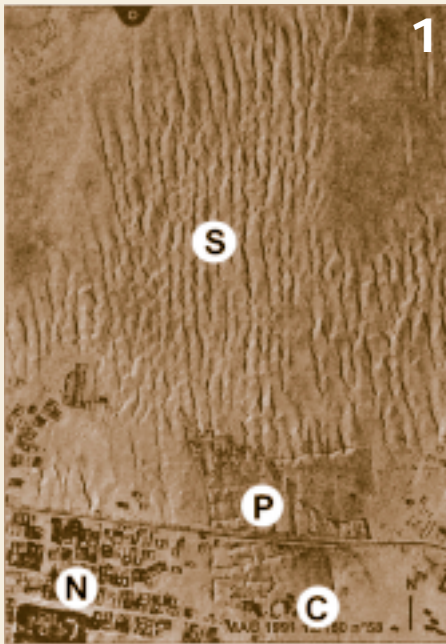
silts du delta du Sir Daria. Le Kyzylkoum était traversé par le paléo-cours du Zana Daria jusqu'au Bronze terminal, lorsque les deltas de l'Amou et du Sir Daria confluaient. Sa partie ouest est constituée de dunes longitudinales qui recoupent le réseau de paléo-vallées détectable sur les images satellites.

Des dunes moins précises forment sa partie est, plus vieille. Les sables du Kyzylkoum atteignent la rive droite de l'Amou Daria et se retrouvent presque immédiatement sur la rive gauche : ainsi s'explique que les alluvions mélangent du matériel éolien fin du Kyzylkoum riche en carbonates (20 à 30%) et des limons alluviaux. Dans ce secteur, les courants éoliens forment un divergent responsable du Grand Karakoum qui succède dans le sens des vents dominants au Kyzylkoum, au nord des loess du SRAE méridional.

D'après Mainguet M., Dumay F. et Létolle R., 2002.

Exemple

Utilisation des photographies aériennes pour l'observation des édifices sableux en Mauritanie



N. Nouakchott • C. Château d'eau • S. Sifs • P. Palissades
1. Photographie aérienne IGN MAU 1991 12/150 n°58 © IGN 1998
2. Croquis d'interprétation réalisé par le LGZD

Sur la photographie aérienne de 1991, la multiplication des sifs et l'ensablement du secteur du château d'eau au nord-est de Nouakchott sont patents.

Les photographies aériennes et l'observation fine des édifices sableux et de leur état de surface

Utilisées en complément des images satellites, les photographies aériennes fournissent des informations plus fines, notamment sur les types d'édifices sableux lorsqu'ils sont individuels et sur leur état de surface. Elles sont l'instrument privilégié pour les études de lutte contre l'érosion dans les aires urbaines (Nouakchott en Mauritanie, oasis du Draa ou autoroute Kénitra-Larache au Maroc). Dans la lutte contre l'érosion éolienne, elles constituent l'outil de diagnostic par excellence des signes précurseurs de la dégradation : **surcreusements éoliens** de la topographie, naissance et allongement des **nebkas**, augmentation du **saupoudrage** ou de **voile sableux**, néoformation de petits édifices éoliens dunaires non décelables sur les images satellites. Enfin les photographies aériennes permettent de réaliser des cartographies fines et précises, base des plans de lutte contre l'ensablement et du suivi individuel des édifices éoliens.

La vérité terrain, étape indispensable de validation

L'analyse combinée des documents satellitaires et des photographies aériennes constitue la base indispensable du travail de terrain. En effet, une connaissance globale préalable des secteurs parcourus sur le terrain permet d'affiner *in situ* la compréhension des aires d'ensablement ou des aires d'érosion et leur dynamique. Sur le terrain, l'œil d'observateur du géographe, outil essentiel, et sa capacité à replacer les paysages dans leur **unité morphodynamique**, vont le conduire à trouver et à échantillonner les secteurs clefs de la dynamique éolienne. Le diagnostic de la nature même des édifices éoliens (**barkhanes**, **sifs**, **cordons longitudinaux**, etc.) renseigne le géographe sur la nature du **budget sédimentaire** local : l'aire est-elle en phase de perte de particules (érosion, soit un budget sédimentaire négatif) ou en période d'ensablement (réception, soit un budget sédimentaire positif) ? Tous les prélèvements de sol prendront ensuite le chemin du laboratoire pour subir des analyses granulométriques (relatives à la dimension des grains), morphoscopiques (relatives à la forme et à l'état de surface des particules, indicateurs des processus de transport) et minéralogiques qui détermineront la provenance géographique (et les mécanismes de transports associés) et géologique des particules, permettant ainsi de valider les observations et les hypothèses avancées.



Transport du bois à usage domestique récolté en brousse, à l'aube, sur la digue du lac du barrage de Sologo (Côte d'Ivoire).
Christian Lévêque © IRD

L'homme, principal acteur du déclenchement de l'érosion éolienne

Marquant une différence de point de vue avec la définition de la désertification proposée par l'Agenda 21 qui place les variations climatiques avant les facteurs anthropiques, nous proposons de placer en première position l'homme (ou les sociétés) comme initiateur des mécanismes de la dégradation éolienne, même si, une fois le processus déclenché, l'homme est à la fois : cause, mécanisme et conséquence...

Cornet (2002) souligne que « *la dégradation des terres se produit lorsque l'homme modifie les équilibres ou les dynamiques naturelles [...]. Les actions humaines sont largement volontaires, parfois liées à l'ignorance et souvent déterminées par l'accroissement des besoins dans un contexte d'évolution technologique insuffisante et d'absence de règles d'accès aux ressources* ». Nous ajouterons : l'utilisation des ressources ne prenant pas en compte les fluctuations climatiques.

Les peuples sahéliens (les plus touchés au monde par l'érosion éolienne) ont, au cours des périodes anormalement pluvieuses (1950-1960), élargi leur aire cultivée aux dépens de la zone saharo-sahélienne en raison de l'accroissement démographique et de la baisse de fertilité des sols. Ceci a tourné à la catastrophe lors des périodes sèches suivantes et notamment lorsque celles-ci se sont prolongées sur deux décennies (1970-1990).

Les années 1990 ont vu le retour d'une meilleure pluviométrie mais les pressions anthropiques et l'accroissement démographique semblent avoir pris le pas sur les potentialités de résilience (amélioration naturelle) de ces écosystèmes.

La pression démographique, un inducteur de l'érosion éolienne

Au cours de la décennie 1990, les 34 régions les plus sèches du globe, dont la plupart sont situées en Afrique, ont eu une croissance démographique de plus de 3 pour cent par an (Evers, 1996). Dans de nombreux pays secs, la population âgée de moins de 25 ans représente plus de 50 pour cent de la population... C'est dire que le phénomène de démographie « galopante » n'est pas en passe d'être maîtrisé... Cette pression démographique, habituelle dans les phases de développement des pays, est encore, dans les aires agricoles de nombreux pays, synonyme de main d'œuvre et par ce biais de prospérité. Cependant, cet accroissement démographique auto-entretient la dégradation environnementale par la pression sans cesse accrue sur les ressources du milieu.

Dans quelque écosystème que ce soit, une concentration de population crée des nuisances environnementales. Les écosystèmes secs ayant un pouvoir de résilience moindre que les écosystèmes tempérés, les dégradations de l'environnement y sont plus durables. Observations d'autant plus vraies que ces écosystèmes souffrent de crises de sécheresse et que l'environnement est exposé sans protection du couvert végétal. Les concentrations de populations entraînent une surconsommation des ressources pastorales, de bois de construction et de bois de chauffe. Les nomades utilisent habituellement pour se chauffer du bois ramassé lors de leurs déplacements et leur pression sur le milieu est répartie tout au long de parcours savamment tracés au cours des fluctuations de saison, à l'inverse de la sédentarisation qui entraîne du surpâturage et une raréfaction des espèces appétibles. Il en résulte une extension des aires de collecte du bois et de pâturage, créant des poches de dégradation centrifuges.

Les tribulations du sens du mot « désertification »

De l'étymologie latine découle le sens du mot :

- *fication*, action de faire, vient de *fieri*, forme passive du verbe actif *facere* (être fait, se produire, se faire arriver) ;
- *désert* a une double origine latine : l'adjectif *desertus* (inhabité) et le substantif *desertum* (aire déserte).

Le terme désertification a en 1971 dans le Dictionnaire des mots nouveaux de Gilbert, Hachette-Tchou (p. 158) le sens de « *disparition plus ou moins totale de toute activité humaine dans une région abandonnée peu à peu par ses habitants* ». En 1977, la Conférence des Nations Unies sur la désertification propose « *La désertification est la diminution ou la destruction du potentiel biologique de la terre et peut conduire finalement à l'apparition de conditions désertiques. Elle est l'un des aspects de la dégradation généralisée des écosystèmes, et a réduit ou détruit le potentiel biologique, c'est-à-dire la production végétale et animales [...] au moment même où cet accroissement de la productivité était nécessaire pour satisfaire les besoins des populations grandissantes aspirant au développement.* »

Dans la notion écologique d'équilibre entre l'homme et son environnement naturel, c'est bien l'homme le responsable de la désertification : le stade ultime de la dégradation de l'environnement a atteint un degré irréversible, la notion d'irréversibilité méritant d'être discutée. Estimant peu satisfaisante cette dispersion, l'assemblée générale des Nations Unies demande en décembre 1989, au PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement) d'entreprendre une réévaluation du terme afin qu'il puisse être soumis à l'approbation de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) de 1992 à Rio de Janeiro. La définition suivante fut alors proposée par le PNUD à la CNUED en juin 1992 : « *La désertification est la dégradation des terres dans les écosystèmes arides, semi-arides et subhumides secs, résultant essentiellement de l'impact d'actions humaines adverses.* » Sont englobés dans la dégradation des terres le déclin des récoltes, la détérioration de la couverture végétale, l'exacerbation des mécanismes physiques à la surface du sol, la régression qualitative et quantitative des ressources en eau, la dégradation des sols, la pollution de l'air.

La définition du PNUD fut amendée par la CNUED qui proposa en juillet 1992 : « *dégradation des terres dans les aires arides, semi-arides, subhumides sèches, résultant de facteurs variés, incluant des variations climatiques et des activités humaines* ». Dans cette définition, la responsabilité humaine est diluée sans prendre en compte les degrés de sévérité de la dégradation, en particulier le degré ultime, irréversible, qui doit être considéré comme le sens même du mot désertification. En pratique, la dégradation est irréversible lorsque les graines ont disparu du sol, ou lorsque, selon Dregne (1984), le sol a atteint un tel degré de dégradation qu'ayant perdu sa capacité de rétention en eau, les graines qui s'y trouvent encore ne peuvent plus germer.

Si l'on admet que le concept de désertification est synonyme de dégradation des terres, il correspond alors de nos jours au plus dramatique problème environnemental. Mais s'il contient l'idée d'irréversibilité dans le contexte technique et économique actuel, parce que fin d'une série de processus conduisant à un environnement définitivement stérile, il est presque inexistant et, selon Dregne (1984), seulement 0,2% de notre planète seraient touchés.

Nous avons proposé (Mainguet, 1991) la définition suivante étayée par trois décennies d'observations dans les domaines secs d'Afrique et d'Asie : « *La désertification, révélée par la sécheresse, est due aux activités humaines lorsque la capacité de charge des terres est dépassée ; elle procède de mécanismes naturels exacerbés ou induits par l'homme ; elles se manifestent par une détérioration de la végétation et des sols et aboutit, à l'échelle humaine de temps, à une diminution ou à une destruction irréversible du potentiel biologique des terres ou de leur capacité à supporter les populations qui y vivent* ». Les activités humaines réalisent en quelques décennies ce que font quelques millénaires d'évolution naturelle à l'échelle géologique. Cette définition insiste sur les causes humaines, les paramètres climatiques comme la sécheresse agissant comme révélateurs du processus. Pour limiter les imprécisions n'a-t-on pas proposé (UNEP, 1991) de substituer au terme de désertification l'expression dégradation des terres ou dégradation de l'environnement ?

La dégradation de l'environnement liée aux activités humaines se produit dans toutes les écozones, mais c'est dans les plus sèches surtout que l'homme contribue le plus à donner à l'environnement une apparence de désert. C'est pourquoi limiter le terme de désertification aux zones sèches arides, semi-arides sèches ou subhumides sèches est justifié.

En devenant coalescentes (c'est-à-dire en s'unissant entre elles pour devenir plus vastes), les poches constituent une des phases de la désertification et entraînent la population vers les villes, comme cela a déjà été montré au Niger en 1976 (Mainguet, 1976).

La pression économique, un autre inducteur de l'érosion éolienne

L'augmentation de la population sur une aire limitée accroît systématiquement la pression économique et engendre des concurrences pour l'accès aux ressources. Dans les pays secs, ce fait se vérifie par la conquête de nouvelles terres qui ne peut se réaliser qu'aux dépens d'aires marginales et fragiles (exemple des Nouvelles

Terres au Sénégal). La mise en culture de ces terres après défrichage et ameublissement de la tranche superficielle du sol favorise l'amorce de l'action éolienne.

La compétition s'exacerbe plus encore quand elle s'effectue entre sédentaires et nomades, entraînant bien souvent des conflits armés. La pression est également forte pour l'accès aux ressources en eau et aux forages, de plus en plus profonds et réclamant des investissements de plus en plus coûteux.

La pression économique contraint alors de nombreux paysans agriculteurs ou éleveurs à trouver d'autres solutions de survie, comme souvent la migration vers la capitale ou l'installation le long d'axes routiers principaux.

Installations « sauvages » sur les cordons longitudinaux à la périphérie de Nouakchott (Mauritanie)

En 1991, on remarque la différence entre les habitations spontanées (1) sur les cordons (2) qui déclenchent des sifs (3) et les quartiers organisés (4) installés dans la dépression qui sont, eux, relativement protégés. Les nouvelles constructions déstabilisent le cordon et accentuent les risques d'ensablement et créent dans le même temps une rugosité et des turbulences. De nouvelles observations permettent de dire qu'en 1991 des sifs naissent à partir de dômes sableux apparus dans le tissu urbain.

D'après les travaux du LGZD.



Photographie aérienne IGN mission MAU 1991 12/150
photographie n°55 © IGN 1998

Migrations et sédentarisation, à la fois causes et conséquences de l'érosion éolienne

Pour les paysans, et surtout leurs fils, la solution qui consiste à aller travailler dans la capitale est souvent une première étape vers une migration plus lointaine mais aussi plus difficile. Migrations et sédentarisation ont parfois été favorisées par les décideurs politiques et sont aussi le résultat d'une politique hasardeuse d'aménagement du territoire. Par exemple en Mauritanie, la Route de l'Espoir (trans-mauritanienne Nouakchott-Néma d'ouest en est du pays), construite pour désenclaver la partie orientale du pays et créer une unité politique, est devenue un cordon de sédentarisation des nomades venus chercher une hypothétique sécurité alimentaire.

Cette sédentarisation d'une nouvelle frange de population crée une nouvelle pression économique et entraîne à son tour de nouveaux départs vers la capitale, installant là encore des mécanismes d'auto-entretien du flot de migrants vers la capitale. Par ailleurs, les installations « spontanées » (*gazra* ou *kebbe* en hassania) dans les couloirs interdunaires, entre les dunes longitudinales NNE-SSO, introduisent dans la topographie de nouvelles rugosités qui piègent le sable naturellement en transit dans ces couloirs initient des mécanismes de dépôt et d'ensablement.

De plus, les concentrations de population, généralement à la faveur d'un point d'eau et de structures sanitaires le long de cet axe, participent à la destruction de la structure des sols (piétinement, surtout par les sabots très coupants des chèvres, par ailleurs très utiles) et de la maigre couverture végétale environnante, offrant au vent des surfaces de sable meuble, accentuant ainsi les risques d'érosion éolienne.

Les dunes longitudinales au sud de Nouakchott, entre la capitale et Rosso, sont devenues le siège d'un élevage de bovins pour la fourniture en lait de la capitale. Cet élevage développé par des bédouins sédentarisés est très traumatisant pour le milieu naturel car ces anciens pasteurs ont gardé leur habitude d'élevage transhumant sur des parcours très abrégés. Les aires de pâturage souffrent beaucoup. Sans un effort d'amélioration, les dunes actives s'étendront jusqu'à la latitude de Rosso où cependant la pluviométrie annuelle atteint 280 millimètres par an. L'afflux massif de la population est responsable de la dégradation des terres et des ressources, contraignant les populations à de nouveaux exils. Les vagues de sédentarisation et de migrations successives sont aussi responsables de surexploitation des ressources naturelles, surtout lorsqu'elles s'effectuent en îlots de concentration humaine, source de paupérisation et d'éclatement structurel lorsque ces populations échouent vers les centres urbains et en particulier dans les capitales.



Partie sud-ouest du Grand Erg Aouker
sur la piste Toghba - Tamchekket (Mauritanie, décembre 2001)
La violence des pluies provoque le ruissellement concentré qui creuse de
larges ravines (ici profondes de 2 mètres) dans le matériel pris en masse et
rubéfié (devenu rouge) des dunes transverses fixées.
Cet ameublissement du sable d'origine éolienne rend ainsi le matériel
sableux facilement mobilisable par l'érosion éolienne.

© F. Dumay et M. Mainguet

L'urbanisation et la paupérisation, points de départ de l'érosion éolienne

Depuis la fin des années 1960, l'urbanisation des pays en voie de développement est galopante et de nombreux pays souffrent de macrocéphalie urbaine entraînant de sévères problèmes de rééquilibrage économique et des disparités flagrantes de répartition de population.

L'agglomération de Nouakchott, avec ses 800 000 habitants, concentre 30 pour cent de la population mauritanienne, concentration qui engendre des problèmes de délinquance et la prolifération de mendiants et de sans-abris. Cette explosion urbaine a également des répercussions sur les « campagnes » puisqu'il faut nourrir les populations et de ce fait exercer une pression accrue sur les paysans et les amener à pratiquer de plus en plus une agriculture « commerciale » au détriment d'une agriculture vivrière plus respectueuse de l'environnement.

Ceci entraîne les paysans à produire plus, ruinant ceux qui ne le peuvent pas et conduisant ceux qui le peuvent à la stérilisation de leur terre, contribuant à gonfler le flot des migrants vers les villes où la recherche de matériaux de construction pour abriter ces nouveaux arrivants devient à son tour une source de dégradation environnementale : le cordon littoral sableux bordier à l'est de la ville de Nouakchott, en grande partie réactivé, a été tellement exploité qu'il laisse maintenant entrer en certains points l'eau des fortes marées qui inonde le tissu urbain. Toutes les pressions anthropogéniques évoquées précédemment interviennent sur des écosystèmes vulnérabilisés par les paroxysmes climatiques marqués devenus des catastrophes écologiques accentuant les déséquilibres entre la pression anthropogénique, les ressources disponibles et les disparités sociales.

Les facteurs de vulnérabilité de l'environnement inhérents aux écosystèmes secs

Le premier facteur de vulnérabilité, qui devrait être une source de richesse, est le sol. En effet, la diversité de la mosaïque des sols des écosystèmes secs est une richesse mais leur minceur et leur fragilité profitent à l'érosion éolienne notamment sur les sols sableux. Cette fragilité est accentuée par l'érosion hydrique sur les sols argileux, paléosols dont la genèse est ancienne. Les **blow-out** (**surcreusements** dans la topographie) et les ravines sont omniprésents dans les paysages sahéliers.

La fragilité des sols vis-à-vis de l'érosion éolienne

La vulnérabilité des sols des écosystèmes secs est corollaire du temps très long nécessaire à leur genèse du fait de l'absence d'altération chimique des roches. La sécheresse édaphique (relative au sol) favorise la formation de structures pulvérulentes (qui se réduisent facilement en poudre). Les sols sont alors appauvris par un premier processus éolien de vannage des particules sableuses et des fines. La **déflation** (ou balayage par les vents) prend en charge les particules, le vannage les trie et leur redépôt entraîne l'organisation d'une nouvelle génération de dunes mobiles. Ces sols pauvres en matière organique peuvent rapidement devenir stériles par la surexploitation et le vannage éolien ou lorsque les conditions climatiques ne permettent pas leur mise en valeur sauf par l'irrigation. Cette dernière a souvent comme conséquence une salinisation poussée des sols, surtout lorsque l'arrosage est intempestif et que le lavage et le drainage sont défectueux. Lorsqu'un équilibre existe entre la mise en culture et la préservation des sols, il est bien souvent précaire et se dégrade saisonnièrement quand des variations climatiques ponctuelles se font sentir : retard des pluies, sécheresse ou, à l'inverse, excédent pluviométrique inopportun.

Influence des conditions du sol : érosivité et érodabilité

La vitesse du vent à la surface du sol varie selon la rugosité de la topographie. Elle commence à baisser à dix fois la hauteur du sommet de la végétation, des rugosités naturelles et anthropiques. Le vent est retardé par un effet de friction au contact d'une surface sableuse ou de particules meubles. La tranche inférieure d'air a une vitesse nulle sur une épaisseur de $1/30^{\circ}$ environ du diamètre des particules.

Les effets d'un système éolien au niveau du sol varient selon l'**érosivité** des pluies et des vents, et l'**érodabilité** des sols.

Sa capacité d'érosion est diminuée lorsque la valeur de certaines variables augmente \uparrow et lorsque d'autres variables s'abaissent \downarrow :

- **ÉROSIVITÉ** (propriété des précipitations et du vent de générer une érosion ayant pour effet d'enlever la couche superficielle d'un sol, Mainguet et Dumay, 2005) .

Paramètres éoliens :

- Vitesse (\uparrow)
- Fréquences (\uparrow)
- Durée (\uparrow)
- Superficie (\uparrow)
- Cisaillement (\uparrow)
- Turbulence (\uparrow)

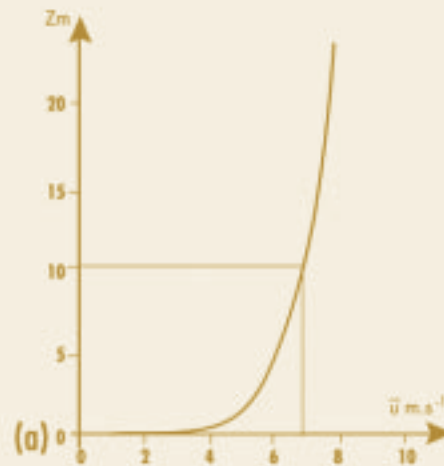
- **ÉRODABILITÉ** (dépend des propriétés du sol)

Paramètres sédimentologiques :

- Taille des particules (\uparrow/\downarrow)
- Hauteur (\downarrow)
- Orientation (\downarrow)
- Abradabilité (\uparrow , capacité d'être érodé et pris en charge)
- Transportabilité (\uparrow , compétence éolienne)
- Matières organiques (\downarrow)

Paramètres de surface :

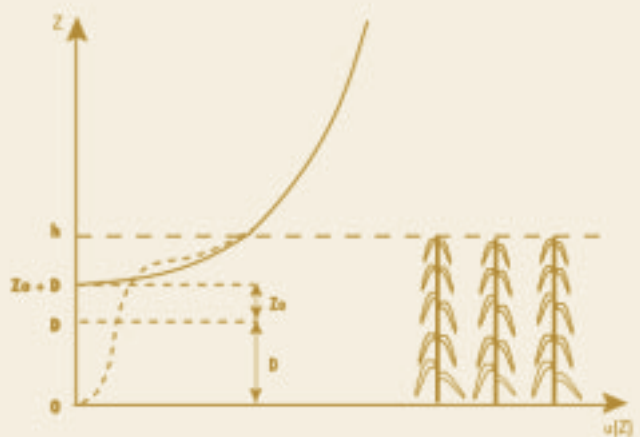
- Végétation : Résidus (\downarrow), Hauteur (\downarrow), Orientation (\downarrow), Densité (\downarrow), Finesse (\downarrow), Degré de couverture (\downarrow)
- Humidité du sol (\downarrow)
- Rugosité du sol (\downarrow)
- Longueur des surfaces (\downarrow)
- Pente des surfaces (\uparrow/\downarrow)



Profil de vitesse du vent au voisinage du sol représenté en coordonnées cartésiennes (a) et semi-logarithmiques (b)

Z_m : hauteur en mètres ; $U, m.s^{-1}$: vitesse du vent ; U^* : force de freinage du sol ; Z_0 : paramètre de rugosité où la vitesse du vent est nulle ; k : constante de Von Karman [= 0,35]

Lorsque le sol est recouvert par une végétation dense de hauteur h , tout se passe comme si le niveau du sol se trouvait surélevé d'une hauteur $D < h$ appelée hauteur de déplacement. Ainsi, lorsqu'un brise-vent est installé, il ne faudra pas tenir compte de sa hauteur totale, mais de sa hauteur diminuée de D .



Effet d'une végétation élevée sur le profil de vitesse

Rôle des crises climatiques dans l'exacerbation de l'érosion éolienne

Les aires tropicales sèches sont le siège d'une variabilité climatique poussée, les moyennes mensuelles ou annuelles ne reflétant pas les distributions pluviométriques chaotiques, même si une phase sèche semblait s'amorcer depuis quelques décennies. En effet, derrière des données pluviométriques déficitaires se cachent des épisodes pluvieux dévastateurs.

Les sécheresses récurrentes accentuent la vulnérabilité vis-à-vis de l'érosion éolienne

Le Sahel a connu quatre sécheresses majeures depuis le début du 20^e siècle (1900-1903, 1911-1920, 1939-1944, 1968-1985), cumulant ainsi pratiquement 35 années de pluviométrie considérée comme déficitaire. On ne peut donc pas s'étonner de voir les pouvoirs publics mettre en avant le critère de sécheresse inhérent à l'écosystème comme cause principale de désertification de ces dernières décennies... Ni que les vents de poussières, en étroite corrélation avec les périodes de sécheresse, donnent à penser que les épisodes secs sont responsables de l'exportation d'une partie de la fraction fine des sols... principale source de fertilité et de la structure de ceux-ci. Notons aussi que les dernières sécheresses des années 1980 ont retenu l'attention des bailleurs de fonds et des décideurs politiques compte tenu de leur médiatisation. Il est admis que la sécheresse n'est pas une situation d'exception dans les écosystèmes dits secs mais doit au contraire être prise en compte comme un postulat dans la gestion locale des stocks alimentaires pour ne pas avoir recours à l'importation massive d'aide alimentaire qui ne fait qu'entraîner vers les capitales des flux migratoires élevés venus chercher là des ressources alimentaires faciles à capter...

Il est erroné d'avancer que les sécheresses sont les seules causes de la désertification puisqu'elles font partie des caractères même des écosystèmes arides et semi-arides. Une terre bien utilisée se remet des sécheresses au retour de bonnes années pluvieuses mais de mauvais usages du sol accroissent la dégradation des terres.

Les excédents pluviométriques participent à la déstructuration du sol

Les contrastes climatiques sahéliens sont « exceptionnels » : une période de sécheresse peut être entrecoupée d'épisodes climatiques pluvieux dévastateurs...

Dévastateurs pour les récoltes mais aussi pour les habitations de banco (mélange de terre argileuse et de paille hachée, séchée) à toits plats qui se gorgent d'eau et s'effondrent (exemple de Tichit en Mauritanie, oasis du 9^e siècle en zone hyperaride, dont de nombreuses maisons se sont effondrées lors des violentes pluies de 1999). Un paroxysme pluvieux violent et très bref dans le temps peut donc être aussi meurtrier qu'une longue période de sécheresse ! Sur les sols fragilisés, préalablement dénudés par la sécheresse et par la surexploitation, les pluies brutales détruisent la cohésion des sols, provoquent des larges incisions, engendrent de profondes ravines et déposent en aval de petits cônes de déjection du matériel ameubli, rendant ainsi mobilisable par le vent, dès le retour de la période sèche, une fraction du sol auparavant prise en masse. À l'inverse, mais tout aussi dommageable pour l'agriculture, les fortes pluies combinées au vannage éolien laissent en place des **croûtes de battance** stériles.

Il semble également que les années d'excédent pluviométrique conduisent les populations locales à abandonner la gestion parcimonieuse des ressources pour tirer le meilleur profit de cette « largesse climatique » souvent imputée à Dieu... Le retour à la normale n'en est que plus difficile !

Zoom

La sécheresse édaphique, résultat de l'érosion éolienne

Dans les années 1950, une couverture végétale naturelle, surtout graminéenne, fixait toutes les aires sableuses de l'Afrique semi-aride recevant plus de 150 mm/an de précipitations. Depuis, le surpâturage a conduit ces surfaces sableuses, pendant la saison sèche, à une exposition aux mécanismes éoliens et à la perte de l'horizon A.

L'exportation éolienne de l'horizon A a elle-même conduit à l'affleurement de l'horizon B, alors soumis, tout d'abord, à un effet appelé en anglais *scalding*, c'est-à-dire une sorte de polissage par les grains en saltation (mode de transport des grains par bonds successifs) rendant la surface imperméable à l'infiltration des eaux de pluie. Cette situation la rend sensible à l'érosion hydrique : **splash**, avec phénomènes de **compaction**, qui alors aboutit à des phénomènes d'**encroûtement** ou de **ruissellement** avec apparition du **rillwash**. Ce sol compacté se comporte comme une



Mauritanie, 2001, marge méridionale de l'Aoukar. Comme en témoignent les touffes végétales perchées, l'érosion éolienne a exporté la tranche supérieure du sol. L'érosion éolienne combinée à l'érosion hydrique est responsable de l'aire de glaçage totalement infertile.

© F. Dumay et M. Mainguet

roche sur laquelle l'érosion éolienne peut faire apparaître des stries de **corrasion** et des dépressions éoliennes de type *blow-out*.

Tous ces phénomènes sont ce qui a été appelé la sécheresse édaphique (sécheresse au niveau du sol) :

- la végétation souffre d'un déficit à la fois d'humidité et d'oxygène ;
- les graines lors de la germination sont incapables de pénétrer la couche supérieure indurée, se dessèchent et sont exportées par les vents.

Les mécanismes de l'érosion éolienne à l'interface homme-nature

A l'interface sol-atmosphère, dans la dynamique terrestre, les actions éoliennes s'organisent en grandes unités dynamiques d'échelle synoptique, continentale, appelées Système Global d'Action Éolienne (SGAE) couvrant l'ensemble du Sahara et du Sahel. À l'échelle régionale, il s'agit d'un Système Régional d'Action Éolienne (SRAE), dans lesquelles l'homme interagit par ses activités. El-Baz (1988) a utilisé le terme de Système Régional d'Action Éolienne pour qualifier la circulation globale balayant l'Égypte du Nord au Sud.

Ces unités éoliennes sont également soumises aux obstacles orographiques, aux conditions édaphiques, à la végétation et parfois aux incidences climatiques. La dynamique éolienne ne se limite pas à l'ensablement, même si ce processus est le plus visible et perçu à court terme comme le plus dérangentant. Pour comprendre la dynamique éolienne et permettre une meilleure lutte contre ses effets traumatisants, il est nécessaire de la replacer dans le Système Global d'Action Éolienne et d'en voir toutes les faces : érosion, transport, accumulation.

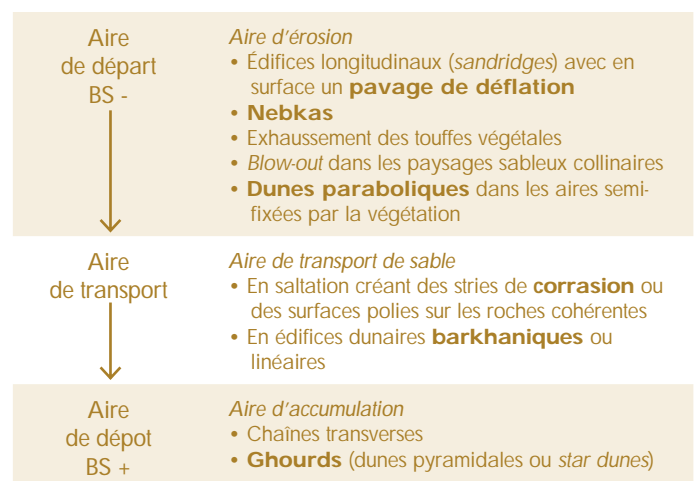
Le Système Global d'Action Éolienne : unité naturelle et lieu de vie

Un Système Global d'Action Éolienne est composé d'une juxtaposition de petites unités en interrelation qui sont regroupées en trois unités principales différenciées par leur **budget sédimentaire** transcrit dans l'environnement par les édifices ou les formes éoliennes qu'elles renferment. Ces trois sous-unités qui se succèdent selon la direction du vent sont : une aire à budget sédimentaire négatif par le départ de particules, une aire de transport des particules et une aire à budget sédimentaire positif par l'accumulation de particules.

Dans chacune de ces sous-unités peuvent s'emboîter des échelles locales encore plus petites. Selon l'aire d'insertion, des activités anthropiques provoqueront des traumatismes différents et les moyens de lutte appropriés sont eux aussi nécessairement différents. Ces trois unités ne peuvent être dissociées les unes des autres pour la compréhension globale de la dynamique éolienne. La perception du système, vu sa taille, nécessite de recourir à l'utilisation des images satellitaires.



La théorie du SGAE a été lancée en 1972 (Mainguet, 1972) à partir de l'analyse d'une mosaïque de photographies aériennes de l'IGN (Institut Géographique National) du Tchad septentrional et après de nombreuses missions sur le terrain. En effet, il a pu être mis en évidence l'existence d'un courant éolien unique, transporteur de sable (discontinu dans le temps et l'espace) sur plusieurs centaines de kilomètres, reliant la Libye au Tchad, puis, contournant le massif du Tibesti, s'étendant jusqu'au Niger. Ces observations ont été confirmées et complétées par l'utilisation des images METEOSAT, outil précieux pour observer les interconnexions entre les **ergs** saharo-sahéliens.



Budget sédimentaire (BS) en milieu sableux saharo-sahélien



Sifs à tendance ghourdique.
N'Beika, Mauritanie.
Jean-Jacques Lemasson © IRD

Aire de départ du matériel éolien

Une aire de départ (ou aire source) est un secteur de **déflation** où prédominent les processus d'érosion et d'exportation de particules. Les effets du vent diffèrent selon le substrat :

- en milieux rocheux nu se produisent des simples phénomènes d'usure appelés « **corrasion** » façonnant des **kaluts** ;
- en milieux alluviaux caillouteux le vent emporte la matrice sableuse en laissant des galets façonnés en **dreikanter** ;
- et en milieu sableux le vent opère un vannage qui, à l'échelle géologique, laisse au stade terminal un **pavage de déflation**.

Paradoxalement, l'érosion participe également au façonnement d'édifices éoliens individuels ou coalescents comme les **dunes paraboliques** qui résultent d'un processus de **déflation** dans des sables à topographie monticulaire fixés par un couvert végétal. Le vent profite d'une brèche dans la couverture végétale pour surcreuser le monticule sableux et développer un édifice dunaire dont le versant concave au vent est composé de sable vif alors que le versant sous le vent est fixé par la végétation. Le danger de cet édifice est la disparition par déflation d'aires de culture ou de pâturage et la migration des particules composant le corps même de l'édifice sableux.

Un autre type de dune propre aux aires d'exportation dominante est le **cordon longitudinal**. Ce sont des dunes d'érosion dont l'axe est parallèle au vent dominant. D'après Jordan (1964), ce sont les dunes les plus représentées de la planète allant même jusqu'à couvrir 72 pour cent du Sahara ! Ceci confirme l'hypothèse que le Sahara est un désert qui se vide de son sable depuis, probablement, la fin de l'Holocène.

Ce mécanisme d'exportation du sable saharien, à l'échelle géologique de temps, a nourri les nappes sableuses du Sahel, grenier à mil de la zone sahélienne (Mainguet, 1985). Les cordons longitudinaux peuvent atteindre quelques centaines de kilomètres de long et une largeur de 200 à 1 500 mètres. Ils sont séparés par des couloirs de **déflation** de 500 à 3 500 mètres de large. Vifs en milieu aride et hyper-aride, leur stabilité est atteinte lorsqu'ils sont couverts d'un **pavage de déflation** composé de particules grossières.

En milieu semi-aride (précipitations annuelles comprises entre 150 et 600 mm/an), ces cordons sont normalement fixés par un couvert végétal. Cependant, la destruction du pavage et/ou le surpâturage ont pour effet de les réactiver et de les transformer en réservoir de sable... Traditionnellement, les populations se sont installées dans les dépressions interdunaires.

Les effets du vent selon le substrat dans l'aire de départ

• Pavage de déflation



Pavage de déflation. État de surface d'un cordon longitudinal de l'erg Akchar (Mauritanie)
© F. Dumay et M. Mainguet

• Dreikanter

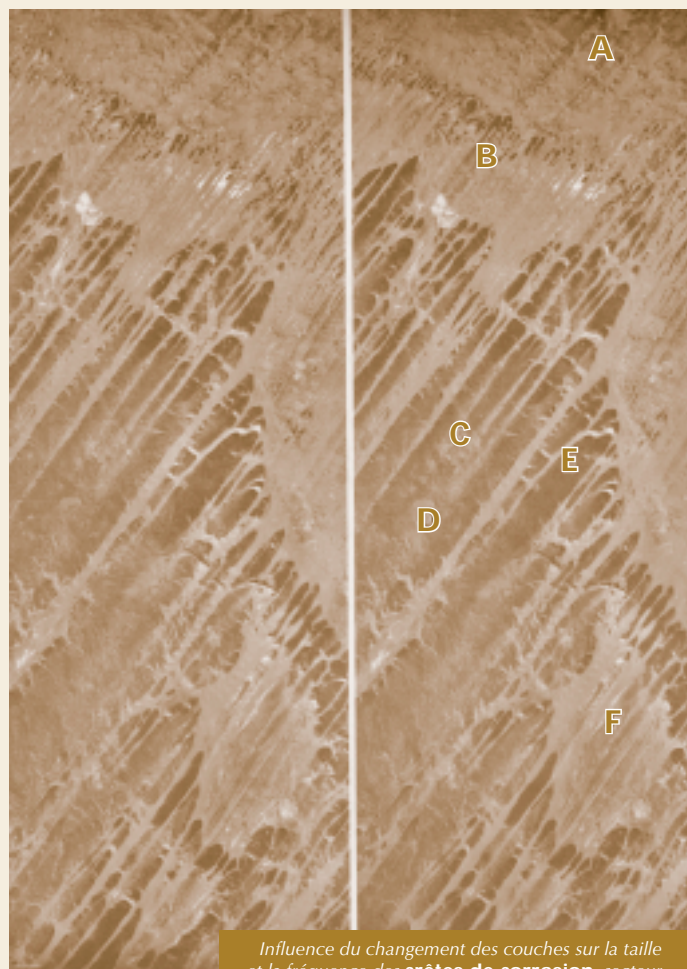


Le **dreikanter** est un caillou façonné en forme de pyramide, généralement à trois faces avec une base plate, des arêtes adoucies et une surface dépolie, que l'on rencontre à la surface des déserts, ou dans des couches géologiques mises en place sous un climat de type aride avec des vents forts chargés de sable en saltation.
© M. Mainguet

• Crêtes de corrasion

Les variations longitudinales de la taille et la fréquence des crêtes gréseuses, en liaison avec les changements de couches, apparaissent sur ces photographies. Quatre secteurs de caractère homogène se succèdent du NE au SW :

- Secteur désordonné **A**, où les crêtes ne sont pas bien formées.
- Secteur de crêtes fines **B**, bien formées, séparées du secteur **C** par un escarpement auquel coïncide un changement de largeur des crêtes.
- Les crêtes en **C** sont beaucoup plus larges. Les mieux formées sont immédiatement après l'escarpement. À distance de ce dernier, dans le sens du vent, les sillons deviennent moins profonds.



Influence du changement des couches sur la taille et la fréquence des **crêtes de corrasion**, secteur de Sol-Solé (18°30'N, 19°20'E), Bembéché, Tchad (Photographies aériennes AE 54-55, NE-34-XIV, n° 254-255 ; échelle : 1/50 000).

- Le secteur **D** montre l'interférence de deux systèmes de crêtes avec naissance périodique d'un sillon plus profond. La patine la mieux conservée est située immédiatement derrière l'escarpement, secteur d'immunisation maximum probable des crêtes **E**. Les plus belles crêtes correspondent à une topographie calme ainsi qu'à des aires avec **barkhanes** donc soumises à une moindre corrasion. En **F**, une cuvette hydro-éolienne ondulée avec des dépôts lacustres striés dans le prolongement des stries du grès. Il y a changement de dimension et de fréquence à la rencontre de tout obstacle topographique car les diaclases (fracture d'une roche) conservent leur direction au changement de banc, mais leur périodicité change.

D'après Mainguet, 1972.



Réactivation en sifs dans le Trarza dans la banlieue est de Nouakchott (Mauritanie). Les sifs de réactivation, composés de sable blanchi par hydromorphie, sont obliques au vent dominant (l'harmattan) responsable des cordons longitudinaux paléoclimatiques. Ils viennent barrer obliquement les couloirs interdunaires. © F. Dumay et M. Mainguet

Actuellement, la réactivation des **cordons longitudinaux** libère du sable qui, remanié localement, donne une nouvelle génération de dunes de type **sif** qui s'allongent obliquement aux cordons traversant les couloirs interdunaires, où ils sont canalisés et remaniés en **édifices barkhaniques** ou en **voile sableux** actif.

Le sable, libéré des cordons et remanié, transite alors dans les couloirs interdunaires où les installations humaines créent des obstacles favorisant son blocage, multipliant ainsi les risques d'un ensablement qui, à l'origine, est dû à un phénomène d'érosion... C'est le cas en Mauritanie dans l'**erg** du Trarza, où les populations sont obligées de fuir les espaces interdunaires - autrefois utilisés comme routes - progressivement comblés par du matériel de réactivation locale. D'autre part il semble que ce phénomène soit auto-entretenu par la population. En effet, en fuyant les dépressions interdunaires et leur sable en transit, celle-ci s'installe massivement sur les cordons longitudinaux, détruisant ainsi la structure des sols rouges hérités de paléoclimats plus humides, avec une prise en masse des sables et libérant ainsi encore plus de matériel mobilisable par le vent.

Aire à dominante de transport éolien

À l'interface sol-atmosphère, le sable est transporté par relais pendant de longues durées (millénaires) sur de grandes distances le long de chenaux d'écoulements hiérarchisés qui donnent la tentation de parler de « rivières de sable ». Ces écoulements éoliens diffèrent des écoulements hydriques. En effet, bien que canalisés par la topographie, ils n'ont pas de berges et ils remontent les versants peu raides exposés au vent. Le long des aires de transport, la rugosité peut s'accroître et atteindre un seuil tel que l'aire devient localement une aire de dépôt. L'inverse est également vrai, l'exemple le plus original étant l'escarpement du Kaouar (Niger) au cœur du Ténéré. En effet, le désert du Ténéré s'arrête à l'amont du relief exposé à l'harmattan, puis laisse place au revers et

à l'escarpement de grès. Il reprend ensuite à quelques kilomètres à l'aval d'une dépression de **surcreusement éolien** qui longe le pied sous le vent de l'escarpement.

Dans l'aire de transport, le long d'un même courant, le vent peut être ou non transporteur de particules. Le vent transporteur et le matériel transporté doivent être envisagés séparément. Dans des vents d'origine saharienne, le matériel déposé sur les bordures des déserts n'a pas forcément la même origine lointaine ; il a pu être pris en charge partout le long du courant éolien. Le sable migre soit sous forme de grains de sable, de voile de saltation ou soit sous forme de dunes.

Zoom

Les **nebkas** : indicateurs d'une érosion éolienne et d'un transport à courte distance



Nebka et voile sableux dans l'Inchiri (Mauritanie, 2005). © F. Dumay et M. Mainguet

Les **nebkas**, ou flèches sableuses (au premier plan), sont de bons indicateurs de la déflation et du transport éolien à courte distance. Elles se forment sous le vent de petits obstacles tels des blocs de pierre ou des végétaux buissonnants isolés, qui abaissent localement la vitesse du vent et provoquent un dépôt. Elles peuvent atteindre une hauteur de 50 centimètres. Ici le vent souffle de l'arrière à l'avant de la photographie.

Aire d'accumulation sableuse

Une aire d'accumulation est une aire où prédominent les processus de sédimentation. Elle peut être au terminus du SGAE mais aussi exister localement chaque fois que le vent rencontre un obstacle. Par exemple, le vent transporteur de sable, face à une contre-pente suffisante pour annuler la composante verticale du vent qu'elle a elle-même engendrée, dépose son sable sur la pente si celle-ci est faible ou sous forme de dune d'écho à une certaine distance de l'obstacle si la pente est forte jusqu'à la verticale. Une dune d'écho, en augmentant de volume, devient une dune remontante qui s'appuie sur le versant, franchit son sommet et, en s'allongeant encore, devient une dune linéaire (ou **sif**).

C'est dans cette aire d'accumulation sableuse que les préoccupations de lutte contre l'ensablement sont majeures. Là encore, c'est la typologie des édifices éoliens qui permet de définir la nature du **budget sédimentaire**. Ainsi, dans une aire d'accumulation se côtoient, selon les régimes éoliens : des **barkhanes**, des **sifs**, des **ghourds**, édifices qui ont en fait plusieurs rôles : ce sont des réservoirs de sable, des dunes de transport (excepté le ghourd qui est une dune immobile) et surtout des édifices d'accumulation de sable.

La genèse d'une barkhane, qui appartient à la famille des dunes transverses, c'est-à-dire alignées perpendiculairement à la direction éolienne dominante, exige un régime éolien monodirectionnel. Elle migre

dans le sens du vent qui souffle de la face convexe à la face concave de l'édifice selon la direction de son axe de symétrie. La mobilité de la barkhane la rend dangereuse pour les infrastructures humaines, puisqu'elle traverse les routes et voies ferrées ou s'accumule au vent des constructions et des villages situés sur sa trajectoire. Lorsque les édifices sont freinés (ralentis) par le couvert végétal ou la micro-rugosité édaphique, leur coalescence aboutit à la formation de chaînes **barkhaniques** et d'un réseau de chaînes transverses qui forment de vastes **ergs** de dépôt : l'Aoukar en Mauritanie en est un exemple.

Les sifs ou dunes linéaires, au profil effilé et sinueux, sont obliques à deux vents dominants. Ils atteignent plusieurs dizaines de kilomètres de long, quelques dizaines de mètres de large et une hauteur de 20-30 mètres. Ils résultent de la combinaison de ces deux vents et naissent de l'allongement d'une aile barkhanique ou dans l'aire de recollement sous le vent d'un obstacle ou de la réactivation de **cordons longitudinaux**. Le matériel sableux qui les compose migre en traversant leur crête parallèlement au pied de leur versant. Le bas des versants et la base des sifs se comportent comme de véritables rails de transport de sable, d'où leur étroitesse permanente et leur dynamique privilégiée d'allongement. Les sifs de la périphérie urbaine de Nouakchott se sont allongés de 450 mètres entre 1984 et 1991. Ils migrent, dans le sens de la résultante des vents qui les façonnent, par « reptation », c'est-à-dire par ondulation latérale de leur corps. Ainsi, lorsqu'ils sont suffisamment proches les uns des autres, les basculements saisonniers

Zoom



1. Barkhane
a : front - b : revers
c : crête - d : aile



2. Chaîne transverse



3b. Faisceau de sifs

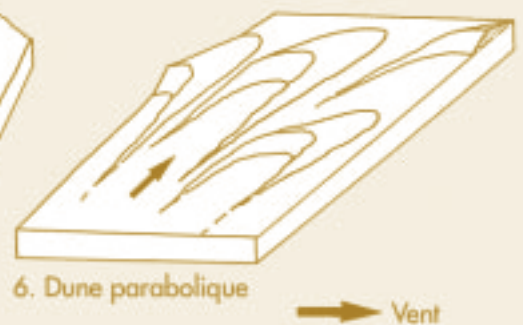
3a. Sif individuel



4. Ghourd



5. Cordon longitudinal
1 : cordon dunaire
2 : couloir interdunaire



6. Dune parabolique

→ Vent

Les différents types d'édifices éoliens

Les ripplemarks, indicateurs de déflation et de vannage

Ce sont des rides sableuses constituées de particules grossières de tailles supérieures à la capacité d'exportation éolienne. Les ripplemarks sont résiduels : ils sont l'expression de la déflation et du vannage. Une erreur commune est de penser que les ripplemarks sont des formes indicateurs de dépôt. En fait, leur présence indique un remaniement et une exportation des particules les plus fines.



Ripplemarks. Partie septentrionale du deuxième faisceau de cordons dunaires de l'erg Akchar (Mauritanie, 2005).
© F. Dumay et M. Mainguet

peuvent les rendre coalescents et aboutir à des édifices complexes en forme de tresse ou de bouquet de sifs. L'allongement de ces dunes les rend particulièrement dangereuses pour les infrastructures humaines : elles viennent quotidiennement barrer la Route de l'Espoir en Mauritanie. Contrairement aux **barkhanes** qui ne font que traverser les infrastructures, les sifs ne migrent pas mais s'allongent de manière durable et viennent véritablement obstruer les voies de communication ou les canaux lorsque ceux-ci leur sont perpendiculaires.

Les **ghourds**, qui sont les édifices d'accumulation les plus hauts de la planète (jusqu'à 400 mètres de hauteur) sont des dunes pyramidales à trois ou quatre bras d'une envergure de 500 à 3 000 mètres, façonnées par des vents dont le régime est pluridirectionnel. La juxtaposition de nombreux ghourds conduit à des aires complexes appelées champs ghourdiques dont les édifices peuvent être alignés selon une direction transverse par rapport au vent principal ou alignés parallèlement au vent principal comme à l'amont vent du Grand Erg de Bilma au Niger. Les champs de dunes ghourdiques pourraient être le fruit d'une extension complexe à partir d'autres formes dunaires (barkhanes), le régime éolien étant devenu pluridirectionnel. L'extension d'un bras transverse au vent finit par donner des chaînes ghourdiques selon McKee (1979) à Hassi Messaoud dans le Grand Erg Oriental (Algérie). Nielson et Koçurek (1986) ont observé que de petits ghourds, formés en hiver, se transforment en barkhanes en été lorsque le vent redevient monodirectionnel, ce qui fait suggérer à Pye et Tsoar (1990) qu'il existe une taille minimum à la pérennisation des ghourds.

Ce sont de véritables réservoirs de sable : au Maroc la « dune mère » - N'Teguedei de la vallée du Draa - nourrit un train de barkhanes qui ensable la vieille oasis de Tinfou. Ces dunes sont une plaie pour les activités humaines : le balancement saisonnier de leur bras divergents gêne le passage de tout axe de communication (Mainguet et Chemin, 1979).

Les modes de transport des particules éoliennes : effets sur la population, l'agriculture et les infrastructures humaines

La prise en charge des particules éoliennes (ou déflation) opère par vannage des particules (tri selon la granularité des grains). Ces particules, une fois en mouvement, sont responsables de la **corrasion** : usure des roches ou des feuillages par abrasion mécanique. La prise en charge et la mise en mouvement des particules de sable par le vent exigent une vitesse supérieure à la vitesse de friction, généralement estimée à 4 mètres par seconde pour un substrat composé de particules de taille entrant dans la compétence éolienne (capacité de transport). Les sables éoliens ont des modes (taille la plus fréquente dans l'échantillon) compris entre 125 et 250 micromètres.

Le transport par le vent affecte les particules depuis la taille des poussières jusqu'à deux millimètres de diamètre, faisant ainsi varier les échelles de déplacement de plusieurs milliers de kilomètres à quelques mètres, occasionnant, selon leur taille, des traumatismes différents sur les populations humaines et sur l'environnement. Les processus de prise en charge des particules, d'érosion et de transport sont des mécanismes discontinus dans l'espace et dans le temps.

Le transport éolien en suspension

La suspension -ou diffusion turbulente- est le mode de transport des particules fines de 1 à 100 micromètres. Elle affecte les particules organiques et minérales telles que les argiles, limons, silts, sablons et produits chimiques. Elle est capable de les transporter sur des distances intercontinentales jusqu'à des altitudes de 3 à 4 000 mètres. Les particules inférieures à 20 micromètres (par exemple les poussières volcaniques) restent de nombreux mois en suspension et font plusieurs fois le tour de la Terre.

■ La dimension transcontinentale du transport des particules en suspension et son influence sur le climat, les plantes et les monuments

Les particules en suspension interviennent dans le cycle de l'eau, en particulier lors de la formation des nuages, des brouillards et des précipitations. Elles influencent le climat en absorbant ou en diffusant le rayonnement solaire. Accumulées sur les feuilles des végétaux, elles peuvent entraver la photosynthèse en bouchant les stomates et jouer un rôle de polluant par exemple lorsque ce sont des particules salées.

■ Les effets nocifs des particules en suspension sur la santé humaine

La toxicité des particules en suspension est essentiellement due aux particules de diamètre inférieur à 10 µm, les plus grosses étant arrêtées puis éliminées au niveau du nez ou des voies respiratoires supérieures. Le rôle des poussières en suspension a été montré dans le cas de certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, dans le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès dus aux affections cardio-vasculaires ou respiratoires, notamment chez les sujets sensibles. Les poussières provoquent également des affections oculaires.



Amorce d'une tempête de sable dans le secteur de Chtam (Maroc, 2005).
© F. Dumay

Les poussières éoliennes jouent un rôle dans la pédogenèse (processus de naissance et de formation des sols) et la fertilisation d'aires situées très loin de leurs aires de départ. Par exemple, à la Barbade (Antilles), le volume annuel de poussières accumulées s'est accru de 8 à 42 grammes par m² entre 1967 et 1973 alors que, pendant cette même période, les vents de poussières augmentaient en zone saharo-sahélienne. En 1998, en Chine, une tempête de poussières de six jours a transporté des loëss de la région d'Urumchi jusque dans la ville de Guilin, distante de plus de 2 000 kilomètres (H. Guang, communication orale, 2001). Inoue et Naruse (1987) ont montré que le diamètre des particules éoliennes était décroissant dans la direction éolienne depuis la Chine de l'Est jusqu'au Japon. Ceci témoigne donc de l'attention particulière qui doit être portée aux retombées de poussières éoliennes participant à la pédogenèse de l'archipel japonais et de la Corée, où les parcelles cultivables sont d'autant plus précieuses qu'elles sont rares !

À l'échelle de l'Afrique, le Sahara est une région qui s'appauvrit en particules fines exportées en suspension par le transport éolien vers le continent sud américain, le Groenland et l'Europe, mais aussi redistribuées plus régionalement vers la forêt tropicale du Golfe de Guinée, participant ainsi à la fertilisation des sols de la forêt équatoriale. Depuis les années de sécheresse dans le Sahel (1973-1986), une nette augmentation du nombre de jours de vents de poussière (déterminés comme jours où la visibilité est inférieure à 1 000 mètres) a été observée.

Ces vents de poussières sont responsables de perturbations dans la circulation aérienne et terrestre, du fait de la faible visibilité. Ils ont également des répercussions sur la santé des personnes en affectant, entre autres, les systèmes respiratoires et cardio-vasculaires.

Le transport éolien par saltation

Le terme de saltation a été utilisé la première fois pour définir le déplacement des particules dans l'eau. Le vent étant comme l'eau un fluide, le terme de saltation s'est naturellement appliqué au mouvement des particules dans l'air et désigne le déplacement des grains de sable par bonds successifs. La saltation affecte les particules de 100 à 600 micromètres. Une fois le mouvement amorcé par le vent, la saltation est en partie auto-entretenu par l'impact résultant de la collision créée par la chute des grains de sable sur le substrat, propulsant ainsi d'autres particules sableuses qui, à leur tour, retombent quelques centimètres à quelques mètres plus loin et soulèvent de nouvelles particules sableuses.

Le déplacement des grains de sable s'effectue généralement à une hauteur inférieure à 50 centimètres mais il peut atteindre deux mètres lorsque croît la rugosité du substrat (**reg** de galets par exemple). La saltation est un mode de déplacement traumatisant pour la végétation, compte tenu de l'abrasion engendrée par le bombardement répétitif des grains sur les feuilles et les tiges des végétaux.

À une échelle microscopique, le sable en saltation crée des lésions sur la cuticule cireuse formant l'épiderme des feuilles et conduit à augmenter l'évaporation de l'eau des plantes. Les feuilles ainsi traumatisées se dessèchent plus vite que les feuilles saines. Sur les boutons floraux, les effets du vent sont responsables d'un arrêt de la floraison en desséchant les boutons. La pollinisation est également affectée par des vents violents, desséchants et dispersants et les fruits peuvent aussi être endommagés par la saltation : avec des vents de plus de 6 à 7 mètres par seconde des scarifications apparaissent et des vents de 10 à 12 mètres par seconde font tomber les fruits. Pour des vents turbulents et de plus de 12 mètres par seconde, des verses apparaissent dans les champs de céréales pouvant faire chuter la production de 40 pour cent.

En outre, des graines ou des plantes adultes basses peuvent être enterrées sous des dépôts sableux ou, à l'inverse, déracinées. Les graminées sont sensibles à des vents de 6 mètres par seconde tandis que les plantes ligneuses sont endommagées lorsque les vents atteignent 12 mètres par seconde. Les expériences d'Armbrust et Paulsen (1973) ont montré que les vents affectent également les activités chimiques des plantes.

Le transport éolien par la traction et le roulage

Ce sont des modes de transport des particules de sable grossier (diamètre supérieur à 630 µm) qui ne peuvent pas être soulevées par le vent. Le vent est néanmoins capable de déplacer des blocs ou des galets par ripage (déplacement latéral).



Représentation des différents modes de transport (d'après Pye et Tsoar, 1990)

Lors du déplacement des particules éoliennes, un tri granulométrique s'opère en fonction de leur taille décroissante selon la direction éolienne. Ce tri s'effectue au cours du transport et joue un rôle considérable sur la redistribution des sols avec soit un appauvrissement par érosion soit un enrichissement par apport de fines et de particules organiques. Ceci a des conséquences sur la redistribution spatiale des populations humaines qui abandonnent des terres devenues stériles par exportation éolienne pour de nouvelles terres. De nombreuses aires marginales ont ainsi été mises en culture au Nord Sahel où l'érosion et la fuite des sols sont déjà amorcées.

Zoom

Influence de la topographie sur le transport éolien

Les applications par Bernoulli (physicien suisse, 1700-1782) de la loi de Boyle (selon laquelle, pour les fluides en mouvement, le produit de la pression par la vitesse est constant) donnèrent naissance au principe de Venturi. Ceci signifie pratiquement que, dans un courant d'air, à toute augmentation de la vitesse, correspond une baisse de la pression. Ainsi, des filets d'air convergents se comportent comme s'ils circulaient à travers un rétrécissement, avec un accroissement de la vitesse et une baisse de la pression. À l'inverse, lorsque ces mêmes filets d'air divergent, la pression s'accroît tandis que la vitesse décroît.

Il faut comprendre que ce modèle s'applique à tout obstacle en relief (colline, montagne, dune, talus de route, immeuble, etc.) et aussi à des obstacles en creux, comme une dépression. Il peut paraître paradoxal que, dans la ligne du vent, la contrepente d'une dépression puisse être un accélérateur du vent. La valeur de la pente des versants au vent d'un obstacle joue considérablement sur le transport éolien de sable :

- Dans le cas d'un obstacle à forte pente au vent, la vitesse du vent s'accélère à l'approche de l'obstacle car les filets d'air sont comprimés et la pression est fortement diminuée. À la base de l'obstacle, les filets d'air disposent d'un espace suffisant pour s'écarter les uns des autres, tandis que la pression augmente, la vitesse diminue; un dépôt de particules se produit à la limite de l'aire de turbulence engendrée par l'obstacle là où la vitesse du vent devient presque nulle. L'influence maximum sur le vent est produite par un obstacle imperméable vertical (mur ou palissade) perpendiculaire au vent.
- Un obstacle perméable possédant une porosité de 50 pour cent (brise-vent par exemple) produit une diminution de la vitesse de l'air sans affecter le tracé des filets d'air. La sédimentation sableuse au vent et sous le vent dépend alors de la porosité et de la forme de l'obstacle. Pour une porosité supérieure à 50 pour cent, le profil des dépôts sédimentaires est long et bas tandis qu'une porosité inférieure à 50 pour cent donne un profil court et élevé. La dynamique associée à la forme et la hauteur des obstacles orographiques est développée par Rémini (2002).

Les techniques de lutte contre l'érosion éolienne

Dans les analyses préalables au choix d'une stratégie de lutte contre l'ensablement, il est essentiel de distinguer d'une part le déplacement de particules individuellement et d'autre part la migration d'un édifice dunaire. Il est tout aussi nécessaire de distinguer les courants éoliens et les flux de sable. Les premiers sont régis par des situations météorologiques synoptiques et régionales alors que les seconds le sont par des conditions en majorité régionales ou locales dont dépendent la prise en charge, le transport et le dépôt, selon des mécanismes physiques de substitution de charge* commandés par la topographie, la couverture végétale et les infrastructures humaines.

La lutte contre la menace éolienne, qui s'exprime notamment en combattant l'appauvrissement en sable et l'ensablement, doit prendre en compte le bilan sédimentaire, le type d'édifice dunaire et doit également faire la différence entre :

- la mobilité dans les aires sources, à bilan sédimentaire négatif, où les particules meubles doivent être bloquées,
- la mobilité dans les aires de transport où le courant éolien doit être dévié pour éviter l'ensevelissement des infrastructures humaines et,
- la mobilité dans les aires de dépôt, à bilan sédimentaire positif (Mainguet, 1995), où c'est l'excès d'ensablement qui est en cause.

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise ainsi en deux étapes :

- La première étape replace le site à protéger dans le Système Global d'Action Éolienne ou dans le Système Régional d'Action Éolienne, en tenant compte de la topographie et du type de dune ou de sable mobile. Cette phase aboutit à l'estimation de la superficie à stabiliser ou à protéger.
- La seconde étape est la phase opératoire (FAO, 1988) dont les objectifs sont de réduire la vitesse du vent à la surface du sol, par exemple en augmentant la rugosité superficielle de ce sol, tout en améliorant son humidité pour permettre la densification du couvert végétal (Diatta, 1994).

* Lorsqu'un vent dépose sa charge, il retrouve de l'énergie disponible et peut en aval vent reprendre une nouvelle charge.



Quand le vent souffle, les routes d'accès sont rapidement envahies par le sable. Région de Moudjéria en Mauritanie, 1999.
Michel Dukhan ©IRD

Les techniques de lutte contre l'ensablement ont une valeur locale

Les méthodes de protection utilisées et les normes établies varient selon l'expérience propre de chaque pays, selon les particularités du périmètre traité, la nature et la disponibilité en matériaux locaux naturels ou artificiels, mais aussi selon la stratégie politico-économique établie en fonction des objectifs recherchés. L'efficacité des techniques reste locale et n'est pas généralisable à d'autres sites menacés : c'est là un des points critiques de la lutte contre l'ensablement.

Cependant, dans tous les cas, les critères d'évaluation des résultats par rapport à la protection des infrastructures et des agglomérations déterminent le choix des techniques, tantôt pour favoriser les accumulations en amont-vent des aménagements, tantôt pour disperser les dépôts.

Projet d'amélioration au Niger

Le reboisement au Niger des Dallols Bosso et Maouri (larges vallées fossiles affluentes du fleuve Niger, orientées du nord au sud) en *Acacia albida* pour améliorer les rendements en mil a aussi abouti à empêcher la **déflation** du sable fin fluvial hors du lit des dallols. Ce sable fin, à excellente capacité de rétention en eau, est favorable à la culture du mil.

L'évaluation de l'efficacité des techniques de lutte contre l'ensablement est, elle aussi, généralement ponctuelle et liée directement au taux de réussite de chaque opération. Les résultats enregistrés sur le terrain et le niveau de protection assuré aux infrastructures, dont les agglomérations (Mainguet et Chemin, 1982 dans les palmeraies et oasis du Kaouar au Niger ; Bisson, 1983 et Gravier, 1993, à Moudjéria en Mauritanie), restent ainsi, avec le coût, les principaux critères d'appréciation de cette efficacité.

L'efficacité de la lutte par rapport aux infrastructures et aux aménagements constitue par ailleurs un critère déterminant du choix des techniques à développer. Toutes les méthodes doivent prendre en compte :

- l'accès des paysans et des nomades à leurs champs et à leurs pâturages ;
- une bonne distribution des productions agricoles ;
- l'organisation traditionnelle des villages ;
- les coûts financiers des techniques de lutte et surtout de leur maintenance.

Vers une approche intégrée de la lutte contre l'érosion éolienne

Une lutte efficace exige de prendre en compte, dans les aménagements, les risques liés aux mécanismes éoliens consécutifs aux activités humaines et aux aménagements eux-mêmes, afin de les intégrer dans un programme de protection :

- des villages et des agglomérations ;
- des infrastructures et des équipements publics : aéroports (Salama *et al.*, 1991), routes (Aïci, 1980 ; Lémineould Elhacen, 2000), canaux ;
- des oasis (Selassi, 1983), des parcelles de culture (Chepil, 1959) et des ouvrages d'irrigation, pour préserver la superficie des terres agricoles et augmenter leur valeur en aménageant l'environnement naturel, en créant un microclimat favorable et en permettant la restauration de la faune et de la flore. Dans le sud et l'est du Maroc, les *séguías* (canaux d'irrigation en terre) et les *khetaras* (galeries drainantes pour acheminer l'eau des nappes phréatiques vers les terres de culture) sont souvent colmatées par du sable mobile et exigent des barrières végétales de protection.

La réussite des programmes de lutte suppose l'utilisation et la valorisation des spécificités écologiques et humaines locales pour minimiser les coûts et rendre les solutions viables pour les communautés (Eren, 1985).

Des projets de lutte contre la mobilité des sables, avec un programme de coopération technique comme celui passé entre le gouvernement marocain et la FAO

(Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) puis la GTZ (Coopération allemande, *Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*), ont été mis en place à Zagora (Maroc) dès 1978. Ce type d'approche intégrée suppose que toute stratégie sectorielle soit appréhendée dans ses relations avec les politiques des secteurs connexes comme, dans le cas du monde rural, une coordination entre les secteurs concernant les points d'eau sur les parcours, l'amélioration des pâturages et les mesures plus générales sur l'agro-sylvo-pastoralisme.

Toutes ces méthodes de lutte contre les méfaits éoliens se fondent sur une double stratégie : la lutte mécanique et la lutte biologique, pour limiter la prise en charge, le transport des particules et contrôler l'organisation de la distribution du sable lors de son dépôt et de son accumulation et surtout de le fixer sur place.

La lutte mécanique contre l'ensablement

Dans la plupart des cas, la stabilisation mécanique est le préalable indispensable à la fixation durable des sables mobiles et des édifices dunaires à court et moyen terme. Elle empêche le sable d'être mobilisé pendant un temps assez long afin de permettre à la végétation de s'installer.

Cette technique de lutte est à préconiser lorsque les secteurs à protéger ont des sols salés et où les précipitations sont inférieures à 60 millimètres par an. Elle regroupe toutes les techniques de stabilisation des masses sableuses en mouvement et la prévention des dépôts sableux. Trois séries sont à distinguer : la palissade, le mulch et la méthode aérodynamique. Les objectifs sont :

- fixer le sable dans l'aire source si sa superficie est peu étendue (cas des dunes littorales de Somalie et du Maroc) ;
- fixer les dunes elles-mêmes, c'est-à-dire stabiliser le sable de la face au vent pour l'empêcher de migrer vers la face sous le vent, ce qui est nécessaire dans le cas des **barkhanes** en ayant recours à des procédés de fixation variés. Liu Shu (1986) a montré en Chine des barkhanes détruites grâce à une couverture herbeuse semée dans les couloirs interdunaires.



*Carroyage de plaques de fibrociment et mise en défens.
Une première rangée de plaques de fibrociment a été rehaussée par la
pose d'une deuxième rangée de plaques (Tunisie, décembre 1993).*

© F. Dumay

La technique de la palissade perpendiculaire au vent dominant

La palissade oppose à la force du vent dominant un obstacle linéaire qui diminue la vitesse du vent, engendre une réduction de la capacité de charge, un blocage du sable et donc un dépôt du sable à son niveau. Il en résulte la formation d'une dune artificielle, « dune d'arrêt » si la palissade a une orientation perpendiculaire au vent dominant ou « blocage en défilement » dans le cas d'un positionnement de la palissade selon un angle de 120 à 140° avec la direction du vent (FAO, 1988).

Dès que l'accroissement vertical de l'accumulation sableuse due à la palissade dépasse la hauteur de celle-ci, le sable n'est plus piégé mais transporté au-delà, d'où la nécessité d'ériger une nouvelle palissade au-dessus de la première (méthode traditionnelle déjà utilisée dans les oasis algériennes au début du 20^{ème} siècle).

Hamidov (1974), souligne que les plaques en fibrociment peuvent être remontées et utilisées plusieurs fois et que leur durée de vie est cinq fois supérieure à une palissade végétale. Lorsque ces palissades rehaussées atteignent une hauteur telle que la dune artificielle atteint son profil d'équilibre, une nouvelle palissade doit être construite en amont-vent de la première. Selon Watson (1990), l'accumulation en hauteur cesse quand le versant sous le vent devient trop abrupt et trop instable, entraînant un phénomène d'avalanche.

L'efficacité de la palissade exige qu'elle soit perméable au vent, pour en limiter la vitesse sans favoriser la genèse de tourbillons. Elle dépend de son orientation par rapport au vent dominant, de son profil et de son tracé : bandes linéaires, croix, damiers, cercles et des types de dépôts sableux alentour, du traitement préalable de la surface à protéger et surtout de la localisation dans le SGAE et dans le SRAE.

Elle repose aussi sur le positionnement de la palissade, sur sa perméabilité, elle-même fonction de sa densité, la porosité optimale étant de 40 à 50 pour cent. En cas de régime éolien pluri-directionnel et de vents violents avec formation de tourbillons, le dispositif doit être complété par un quadrillage de tout l'espace compris entre deux palissades successives grâce à un réseau de lignes d'arrêt délimitant entre elle des carrés ou des losanges. Kaul (1985) propose des haies vives comme amorce d'un programme global de réafforestation des aires dunaires.

La saltation transporte 95 pour cent des sables dans les 30 centimètres au-dessus de la surface du sol (UNSO, 1991). Il est donc inutile que la hauteur des palissades excède de beaucoup cette hauteur. Pour les dispositifs d'arrêt, l'entretien doit être continu, avec des interventions immédiates sur les brèches qui favorisent l'accélération de la vitesse du vent.

Exemples

■ Longue palissade de fibrociment destinée à protéger le lycée, nord-ouest du Lycée de Boudnib (Maroc, mars 2005)

Malheureusement cette palissade, qui n'est pas perpendiculaire au vent dominant (le Sahéli), est mal orientée et n'est pas du tout entretenue. À l'arrière plan, les accumulations sableuses ont franchi cette palissade et, au premier plan, les brèches, en augmentant la vitesse du vent, participent activement à la **déflation** du matériel sableux transporté par saltation en direction du village... Cette palissade est actuellement plus un handicap qu'une protection pour le village puisqu'elle est en train de créer un véritable réservoir de matériel sableux déjà en parti remobilisé par le vent à quelques mètres à peine de la lisière de l'agglomération !



© F. Dumay et M. Mainguet

■ Mise en place d'une réalisation anti-incursion de sable pour protéger la palmeraie (sud-ouest de la palmeraie de Ait Ben Omar au Maroc)



© F. Dumay et M. Mainguet

Il s'agit d'une bande de carroyage de palmes de plusieurs centaines de mètres, orientée NW - SE 330°, perpendiculaire au Sahéli. Elle comporte trois carreaux de palmes (1) puis, sous le vent du carroyage, 6 à 9 rangées de tamaris plantés en quinconce dans de petites cuvettes (2). Ce carroyage a été mis en place en 2002. Après trois ans, les carreaux en amont vent sont remplis de sable (3) : cette bande de protection mécanique remplit donc bien son rôle de blocage en amont vent de la palmeraie. La plantation de Tamaris souffre cependant d'un arrosage déficient. L'ensemble du système représente une stratégie intéressante car fonctionnelle à moyen terme et non plus à court terme ; elle assurera une protection contre l'ensablement pour une génération et pour plusieurs générations si la fixation biologique fonctionne.

Si le dispositif comporte plusieurs rangées de végétaux, l'espace entre deux palissades peut être de 20 à 25 fois leur hauteur sans perte d'efficacité. Les conditions d'approvisionnement en matériaux et les prix de revient sont déterminants pour la confection des palissades.

Plus que des palissades isolées ou disposées en série, des quadrillages carrés ou losangés ont été réalisés pour faciliter le piégeage et l'immobilisation du sable. Leurs dimensions prennent en compte l'intensité du vent à neutraliser, la pente des versants, la forme des dunes et la hauteur du maillage, variable avec la nature des végétaux employés : stipes de palmiers ou palme, Alfa (*Stipa tenacissima*, plante herbacée graminéenne) au Maroc, roseaux en Tunisie, rachis de doums ou *Leptadenia pyrotechnica* en Mauritanie.

À titre d'exemple, les dimensions moyennes des mailles utilisées sur les dunes présahariennes du Maroc sont de 10 x 15 mètres à leur sommet, de 3 x 3 mètres sur les versants et de 4 x 4 mètres dans les dépressions (FAO, 1988). Des végétaux sont plantés ou semés à l'intérieur des mailles pour renforcer la stabilisation des sables. Dans les dunes de Shapotou, les scientifiques chinois reconnaissent le maillage bas (20 à 30 cm) comme étant la seule solution fixatrice de sable en attendant la formation d'une **croûte biologique** qui stabilisera et protégera le sol des forces érosives.



Fixation des dunes au nord-est de la palmeraie d'Ait Ben Omar (Maroc, mars 2005).
La fixation réalisée ici combine une fixation mécanique de l'édifice éolien par un quadrillage de palmes tressées et une fixation biologique composée d'espèces arbustives.

© F. Dumay et M. Mainguet

Exemple

Un programme de fixation des dunes au Maroc



Localité de Tinrheras (Maroc, 2005).
© F. Dumay et M. Mainguet

Ce programme a été réalisé par le service des Eaux et Forêts dans les années 1980. Un carroyage de palmes et d'*Andropogon gayanus* a précédé la fixation biologique composée essentiellement de *Tamaris*. Sur ces dunes, s'est développée une croûte biologique fine et encore fragile.

Palissades de végétaux locaux

Les conditions d'approvisionnement en matériaux et les prix de revient, incluant le transport et la maintenance, déterminent le choix de réalisation des palissades. Les quadrillages végétaux coûtent relativement chers et pourrissent ou brûlent rapidement. Les palissades en palmes tressées sont utilisées dans les oasis et en zone sahélienne en fonction de la disponibilité des ressources locales et des usages traditionnels. Leur intérêt est une longévité de 3 à 4 ans, longévité augmentée par un entretien assidu pour lutter contre le déchaussement, la chute et l'ouverture de brèches et un rehaussement périodique et répétitif par une nouvelle palissade placée sur la précédente jusqu'à ce que la dune artificielle atteigne son profil d'équilibre.

Édifiées en amont-vent des parcelles de culture, les palissades contribuent également à l'augmentation de la production agricole de 30 à 100 pour cent en diminuant l'évapotranspiration, comme c'est le cas en Égypte. Selon la taille et le degré de dessiccation des palmes, leur nombre moyen par mètre linéaire varie de 10 à 40 d'après les expériences menées en Tunisie et au Maroc (FAO, 1988). En Mauritanie, *Leptadenia pyrotechnica* est utilisée le long de la Route de l'Espoir. Sa cueillette est réalisée avec précaution pour ne pas nuire à son renouvellement naturel.

Les végétaux utilisés peuvent être :

- des branchages provenant de *Tamarix* (*Tamarix spp.*), de *Retam* (*Retama raetam*) ou encore de *Leptadenia pyrotechnica*, etc.
- des résidus de récolte (tiges de mil par exemple).

Le recours aux branchages doit s'effectuer avec discernement afin de ne pas dégrader la végétation spontanée environnante.

Palissades en matériel synthétique

Les palissades peuvent être un grillage synthétique résistant aux rayons solaires, avec des mailles de 6 x 6 millimètres ou un filet plastique. Dans la steppe algérienne, des mailles plastiques de 4 x 4 millimètres ont été utilisées avant une fixation biologique. Golinski et Lindbeck (1979) proposent des filets de plastiques pour fixer des dunes littorales. Bilbro et Stout (1999) analysent l'effet des palissades en tubes plastiques expérimentées avec succès en Ouzbékistan dans la région de Tashkent (Mainguet, 1991). La pose du grillage nécessite des piquets de bois de 1,50 mètres, dont 30 centimètres sont enfouis dans le sol, et des fils de fer pour attacher le grillage aux piquets (FAO, 1988). En Mauritanie, à 20 kilomètres à l'Est de la capitale, sur la Route de l'Espoir, les filets synthétiques sont moins efficaces que les palissades de *Leptadenia pyrotechnica*, sont plus chers et polluent esthétiquement le paysage.

Les plaques en fibrociment (FAO, 1988) sont fragiles, coûteuses et à éliminer lorsqu'elles contiennent de l'amiante. Elles n'ont en fait été utilisées qu'à titre expérimental ou pour pallier les difficultés d'approvisionnement en palmes. Leur recours se limite aux aires de transport où l'objectif recherché est de réduire l'alimentation en sable de dunes menaçantes. Les cas de réussite sont peu nombreux : moins de 15 pour cent en ce qui concerne l'expérience marocaine dans les palmeraies de la vallée du Draa. L'inefficacité semble surtout liée à l'absence d'étude préalable de la dynamique éolienne locale ou régionale dans le cadre d'un SRAE donc à un choix médiocre de localisation et d'orientation de ces plaques. Par exemple, dans le désert du Kyzyl Koum, au nord de Boukhara (Ouzbékistan), les plaques sont placées parallèlement aux axes routiers et non perpendiculairement au vent transporteur de sable.

Exemple

Palissade en matériel synthétique (Mauritanie)



Mauritanie 2001, PK 22 de la Route de l'Espoir.
© F. Dumay et M. Mainguet

La méthode utilisée ici reposait sur l'idée fautive qu'une « dune d'arrêt du sable » parallèle à l'infrastructure à protéger à une distance de 20 mètres de la Route de l'Espoir pouvait permettre le blocage du sable envahissant la route. Véritable échec, cette méthode a abouti dans l'année de sa mise en place à créer à proximité de la route de véritables réservoirs de sable débordant largement sur la chaussée.

De plus, l'opacité des plaques crée des tourbillons de vent sauf si elles sont perforées pour en assurer la perméabilité. Le rehaussement de ce type de palissades consiste à extraire partiellement les plaques en place jusqu'à ce qu'elles atteignent, de nouveau, une hauteur d'un mètre au-dessus du sol.

Palissade réalisée en tresse de palmes, régulièrement rehaussée jusqu'à l'obtention d'une dune avec un profil d'équilibre (Tunisie, décembre 1993). Sous le vent de cette dune artificielle une barrière végétale a été plantée. On peut cependant regretter que des prosopis et des eucalyptus aient été choisis.

© F. Dumay et M. Mainguet



La technique du *mulch* pour minimiser l'érosion éolienne

Utilisé pour bloquer le sable dans les aires de départ ou de transfert, le *mulching* consiste à couvrir le sable d'objets naturels ou artificiels pour former une couche protectrice selon une densité plus ou moins grande et aussi uniforme que possible afin de supprimer la prise en charge éolienne au niveau du sol, empêcher le mécanisme de saltation, et conserver l'humidité en augmentant la cohésion du sol et ainsi permettre la restauration du couvert végétal.

Mulch végétal et minéral

Le paillage par des produits ligneux secs ou par des résidus de productions agricoles, comme des éteules de millet, de sorgho ou de blé, protège le sol et améliore sa structure par apport de matière organique. Les résidus végétaux constituent les meilleurs matériaux pour le mulch quand ils sont disponibles localement et peu coûteux, à condition de ne pas priver le bétail d'une ressource fourragère.

Michels *et al.* (1998), dans le Sahel à l'ouest du Niger, estiment que 2 tonnes par hectare d'éteules de mil sont efficaces mais ne sont pas disponibles dans les conditions locales. Dans les mêmes aires expérimentales, Buerkert *et al.* (1996) ont mesuré une baisse de 36 à 67 pour cent du transport de sédiments dans la tranche d'air de 10 centimètres au-dessus du sol après un épandage de tiges de mil à raison de 2 tonnes par hectare. Bastow *et al.* (1978) décrivent trois types de mulch à partir de résidus de seigle, pailles et chaux incorporés aux sables. Dans le désert du Rajasthan en Inde, des expérimentations ont fixé efficacement les sols sableux cultivés en coupant les tiges de céréales à une hauteur de 30-40 centimètres, pour laisser en place 1,5 à 2,2 tonnes par hectare de résidus de végétaux (CAZRI, 1984).

Au Maroc, dans la région d'Essaouira, 25 tonnes de branchages de genévrier rouge se sont avérées nécessaires pour recouvrir un hectare de sol sableux, ce qui suppose une grande disponibilité en matériaux (ce qui n'est pas le cas). Au Niger, le paillage est limité car la biomasse disponible est faible et les résidus agricoles, comme les tiges de mil ou de sorgho, ont d'autres usages domestiques (mur de case, de jardin, etc.).

Une protection peu épaisse n'est efficace qu'en cas de vent faible. Lors de vent fort, elle peut accroître le transport des particules par turbulence autour des tiges. Toutefois, la quantité de mulch nécessaire varie selon la texture du sable (FAO, 1988). La texture des matériaux impose des précautions spécifiques : un paillage trop fin doit être compacté, enseveli ou mélangé à des substances agglutinantes pour constituer un mortier de terre à paille.

Des matériaux trop grossiers peuvent créer une rugosité et faciliter le départ du sable. Pour une efficacité accrue, le paillage sera accompagné par une scarification du sol.



Berger maure conduisant son troupeau de chameaux dans un pâturage d'arbres et de buissons. La rosée de nuit apporte un peu de verdure aux animaux affamés. Sud mauritanien.

Michel Dukhan © IRD

La productivité des cultures de coton augmente de 66 à 79 pour cent en disposant des résidus de coton autour des racines ou en mélangeant les plants avec des cultures de sorgho ou de mil.

Le mulch peut également être une couche d'argile. Cette technique a été employée pour fixer les dunes littorales en Somalie, mais elle a été un semi-échec car elle a favorisé le déclenchement d'une érosion hydrique sévère sur les versants des dunes. En Tunisie, une couverture de terre d'environ 2 centimètres, stabilisée par des arrosages, a été apportée.

Cette méthode est appliquée aux talus des bords de routes sahariennes du Maroc. Elle a l'avantage de limiter l'évaporation des sols donc d'améliorer la rétention en eau des sols sableux et d'accroître les disponibilités en eau pour les végétaux. Zakirov (1980), décrit la mise en place d'une couche d'argile de 20 centimètres sur les versants sableux le long de la voie ferrée transcaspienne et du Türksib (Turkestan-Sibérie).

Mais une couverture d'argile suppose, pour être efficace, des précipitations inférieures à 300 millimètres par an,



sinon une rapide et intense érosion hydrique se déclenche, comme ce fut le cas en Somalie. En Afghanistan, l'argile est collectée et répandue sur le sable à l'aide de bulldozers.

Les eaux de pluie et les pulvérisations sont également fixatrices de sable, l'eau donnant aux grains une cohésion donc une résistance à l'érosion éolienne. Le facteur limitant de cette méthode est la disponibilité en eau dans les écosystèmes secs. En effet, en Égypte, cette technique a été une réussite dès 1950, jusqu'à la construction du barrage « Essad El Ali » (FAO, 1988) qui a supprimé l'eau auparavant disponible.

Mulch synthétique ou chimique

Les produits synthétiques comme les agents structurants polymères sont utilisés en Algérie et en Égypte. Il peut s'agir soit de films plastiques fixés sur le sol, qui empêchent l'évaporation et évitent les **encroûtements** superficiels, soit de mèches acryliques constituées d'un assemblage de filaments plastiques (50 kg par hectare), ou encore de fibres textiles disposées parallèlement les unes aux autres (50-60 kg par hectare).

En Algérie, des vieux pneus aplatis sont utilisés à raison de 1 600 pneus par hectare, mais l'effet esthétique est déplorable.

Des amendements chimiques non phytotoxiques (substances qui n'occasionnent pas de dommages aux végétaux, dosées à 100 à 150 kg/ha/an), de type Unosol 096, Helsel 801, Agrofix 614, Shell Sandfix, Hydromal, Agrosel, Polyacrilamide ou Petroset SP, sont pulvérisés pour fixer les sables mobiles et permettre la réinstallation de la végétation. La stabilisation des sables avec des produits chimiques n'en est qu'à ses débuts. Elle est surtout appliquée aux dunes littorales (Égypte, Lybie, Algérie) à cause des besoins en eau pour la dilution des substances.

L'inconvénient de cette technique est son coût prohibitif, comme pour les émulsions de latex ou de résine vinyliques synthétiques obtenues à partir d'acétylène. Papanyas et Makhsudov (1984) ont appliqué deux préparations (K9 et SSB) sur les sols sableux d'Ouzbékistan pour prouver leur efficacité dans la fixation des sols : elles ont réduit l'évaporation et favorisé la formation d'une **croûte** résistante à l'érosion éolienne.

Les produits pétroliers et les huiles minérales ont été utilisés dès les années 1960 en Libye, en Iran, en Algérie et en Arabie Saoudite. Ces produits ont été épanchés en couverture continue ou en bandes alternant avec des bandes végétales dans la vallée de Ferghana en Ouzbékistan ou bien pulvérisés pour stabiliser les sables, notamment aux abords des infrastructures humaines.

Ils constituent une couche qui limite l'évaporation au niveau du sol mais ils polluent esthétiquement les sites, ce qui ne milite pas en faveur de leur utilisation. Ces produits se regroupent en trois types :

- L'asphalte et le bitume, pulvérisés en une couche de faible épaisseur (Algérie, Tunisie, Maroc, Iran et Égypte), exigent une surveillance constante pour réparer rapidement par colmatage, les dommages causés par le passage de machines ou d'êtres vivants. Ces émulsions sont répandues à raison d'une tonne à l'hectare.
- Les huiles lourdes ou de graissage, au contraire, pénètrent en profondeur et permettent une fixation plus durable des sables. Depuis une dizaine d'années, l'Algérie les a expérimentées avec des épandages en bandes parallèles ou en V, à raison de 2 à 9 tonnes par hectare (FAO, 1988).
- Très courantes, les huiles brutes ne sont qu'une solution à court terme car la couche protectrice de 0,5 cm qui recouvre le sable ne l'imprègne pas. Toutefois, trois ans de stabilisation suffisent pour que la végétation colonise l'espace et la technique offre donc une solution à moyen terme (FAO, 1988).

Les liants chimiques ont été très utilisés en ex-URSS. Les gazoducs de la ville d'Ourgouentch (Ouzbékistan) sont protégés selon ces techniques. Certains produits, comme la nérosine, jugés toxiques, sont cependant utilisés à raison de 300 tonnes par hectare pour protéger les gazoducs et même des routes intra-urbaines (Podgornov, 1973). Les résultats de ces épandages restent cependant discutables, le sable recouvrant très rapidement la pellicule qu'ils forment.

Les méthodes aérodynamiques pour l'évacuation du sable

Il s'agit de techniques qui utilisent le vent lui-même pour évacuer le sable grâce à sa force et à sa vitesse. Les aménagements ne doivent pas entraver la circulation du sable; il faut donc informer les populations et mettre en œuvre des procédés élaborés, copiés sur des pratiques anciennes, pour évacuer le sable grâce à l'énergie éolienne.

Ce type de déblayage du sable repose sur l'effet aérodynamique des modifications de la vitesse et de la direction du vent, sur des regains de vitesse ou des turbulences qui permettent au vent de reprendre les accumulations par augmentation de sa capacité de charge.

Utilisation de la force du vent pour le dessablement

Le sable peut être évacué par accroissement de la vitesse du vent par :

- une orientation systématique des rues parallèles à la direction du vent dominant (Mainguet, 1991) avec, si possible, une surélévation et une orientation des portes et des fenêtres à l'opposé du principal courant éolien ;
- des édifications successives de palissades autour des parcelles et des jardins pour créer un phénomène de substitution de charge et désensabler les terres de culture, comme à Fachi au Niger (FAO, 1988) ;
- la pose traditionnelle, sur la crête de chaque édifice **barkhanique**, de blocs de pierres de 20 à 50 centimètres de diamètre pour créer des turbulences comme dans les oasis dans la région de Merzouga (sud marocain), et en Mauritanie au nord de la voie ferrée de la SNIM (Société nationale industrielle et minière) Zouérate-Nouadhibou, où des cônes de matériel grossier sont construits sur la crête des **barkhanes** en amont vent de la voie ferrée. Pour les grosses dunes, la vitesse du vent est augmentée par l'ajout de stipes de palmiers posés sur les alignements de pierre (FAO, 1988).

Exemple

Lutte contre l'ensablement d'une ligne de chemin de fer en Mauritanie

La voie ferrée (1) est perpendiculaire au courant éolien N-S qui génère des trains **barkhaniques** qui régulièrement franchissent la voie occasionnant des déraillements. Dans ce secteur, la SNIM utilise une méthode aérodynamique pour disperser les édifices dunaires en amont de la voie. Cette technique consiste à édifier des cônes (2) (avec du matériel de remblais) sur la crête de la **barkhane**. Les turbulences engendrées par ces cônes de déblai métriques participent au démantèlement de la dune. Le sable franchit alors la voie sous forme de **voile sableux** en saltation.



Frontière nord de la Mauritanie le long de la ligne de chemin de fer Nouadhibou-Zouérate (2001).

© F. Dumay et M. Mainguet

Profilage des obstacles et utilisation de la technique du Venturi

La méthode aérodynamique consiste aussi à réaliser un profilage des obstacles rencontrés par le vent. Ceci engendre un phénomène de compression tel que la vitesse du vent n'est pas décélérée au contact de la contre-pente des obstacles; de ce fait, les dépôts sableux sont évités. Le profilage sur une largeur moyenne de 25 mètres de chaque côté de la chaussée est maintenant employé en Afrique du Nord pour les routes, au Mali dans le secteur des Daouanas pour les canaux et les pipelines.

Sachant que la vitesse du vent est accélérée par une convergence et ralentie par une divergence, la technique du Venturi, testée dans le sud du Maroc, consiste à construire, aux abords immédiats des infrastructures, un ouvrage en dur suivant un plan incliné et de forme trapézoïdale pour accroître la vitesse du vent aux abords immédiats de la chaussée ou de la voie ferrée, comme à Shapotou en Chine.

Le dépôt forcé des particules en amont-vent des infrastructures humaines

Pour empêcher l'ensablement, la création de dunes artificielles au vent de l'infrastructure à protéger (plantations, routes, villages) est préconisée. Cette méthode suppose une palissade en fibrociment ou en plastique, perpendiculaire en amont-vent dominant, à 200 mètres au moins de la structure à protéger et non immédiatement contre elle comme cela se pratique encore de nos jours couramment en Mauritanie sur les 30 premiers kilomètres de la Route de l'Espoir, à l'est de la capitale. Cependant, si la source de sable est trop riche, cette méthode est inefficace. Pour la Route de l'Espoir, une des solutions pourrait être une bande de reboisement en amont-vent, c'est-à-dire au nord de la route.

Techniques biologiques de lutte contre l'ensablement

Le développement d'une couverture végétale permanente s'avère être la seule forme de lutte durable contre les effets délétères du vent et doit faire suite aux techniques mécaniques de stabilisation et de fixation des sables et des dunes, coûteuses, inesthétiques et dont les effets sont temporaires. Des bandes enherbées le long des axes de communication ont été tentées avec succès en ex-URSS. L'érosion éolienne diminue de façon exponentielle avec l'augmentation de la couverture. La réussite de la mise en œuvre des techniques biologiques est liée à la prise en compte convenable des conditions écologiques locales et implique un postulat : la présence d'eau dans le sol à une profondeur accessible aux végétaux ou l'arrosage des plants jusqu'à ce que leur système racinaire atteigne les nappes phréatiques.



Acacia raddiana : cette espèce d'acacia est l'arbre du Ténéré par excellence. À son pied pousse une graminée, Panicum turgidum. En arrière-plan, la grande dune de Gorset. Désert de l'Air Ténéré, Niger, 2004.

Patrice Cayré © IRD

Rôle de la végétation pour lutter contre l'érosion éolienne en milieu sableux

Les dunes des déserts chauds tropicaux sont formées de sables essentiellement quartzueux donc presque stériles pour les végétaux susceptibles de fixer les dunes vives ou pour les cultures sur dunes fixées. Pour accroître la fertilité des sables et enrichir le sol en matière organique, il est utile de favoriser la symbiose entre des microorganismes fixateurs d'azote, apportés dans l'eau d'arrosage, et une plante.

En effet, la quantité d'azote du sol conditionne la densité du couvert végétal. D'autre part, l'installation de la végétation est conditionnée par la structure du sol : Arnagueldiev (1979) souligne qu'en Asie Centrale, la destruction de la structure de la nappe sableuse par des travaux de construction préalables a rendu impossible toute plantation pendant les quatre années suivantes.

Les techniques biologiques regroupent toutes les techniques consistant à accroître le couvert végétal par des espèces herbacées, buissonnantes, arbustives ou arborées jouant un rôle de fixateur de sables. Au Mexique, on a eu par exemple recours à des plants de *Prosopis juliflora* et à un tapis d'espèces annuelles.



Rebdou : édifice limono-sableux généré par le vent par piégeage de particules. La touffe végétale responsable du piégeage s'exhausse hors du dépôt au fur et à mesure que celui-ci s'élève. Mauritanie. Olivier Barrière © IRD

Au Burkina Faso, sous 350 millimètres par an de précipitations, la régénération de la couverture herbeuse s'est faite dans les aires dénudées grâce à un labour superficiel pour faciliter la germination et la croissance des plantes et à une mise en défens de 2 à 3 ans. La durée nécessaire de mise en défens peut atteindre 10 à 12 ans si les précipitations ne sont que de 100-120 millimètres par an, comme dans le Sud tunisien.

Au Sénégal, le filao *Casuarinas spp.*, importé d'Australie, est massivement planté sur des sols pauvres en azote, pour constituer une barrière verte de Dakar à Saint-Louis et entraver la progression des sables mobiles. Au Niger, les espèces choisies pour enrichir les sols sont *Acacia albida*, *A. senegal* et *A. adansonia*. La pauvreté des sols en azote n'affecte pas la croissance des végétaux qui possèdent des racines chevelues sécrétant du mucilage contenant du sodium réduisant l'action des bactéries consommatrices d'azote dans la rhizosphère.

En Somalie, les efforts de fixation des dunes soutenus par la Banque Mondiale reposent sur le choix d'espèces végétales à croissance rapide, de type *Prosopis*. Cependant, *Prosopis juliflora* est un arbre dont la croissance n'est réussie que dans les aires basses, possédant une nappe bien alimentée, ce qui n'en fait pas un bon fixateur de dunes car il y est souvent déchaussé ou enseveli par les sables mobiles. De plus, cet arbre élimine les végétaux locaux et appauvrit considérablement les sols. En ex-URSS, des bandes végétales d'*Haloxylum* ont été également plantées de part et d'autre d'axes de voies ferrées.

Les espèces psammophiles (qui aiment le sable vif comme *Aristida pungens* dans le Sahel) ont souvent des caractéristiques morphologiques et physiologiques particulières, notamment les graminées dont les racines ont un développement horizontal jusqu'à 15 mètres. Le type de végétation dépend du spectre granulométrique des sables. Par exemple, pour le Proche-Orient :

- sur des sables grossiers ou peu mobiles : *Aristida coerulescens*, *Salsola vermiculata*, etc.
- sur des sables très grossiers soumis à la **déflation** : *Astragalus gyzensis*, etc.
- sur des dunes mobiles : *Retama raetam*, *Haloxylum schmittianum*, *Euphorbia paralias* ou *Calligonum comosum*.

Le choix des espèces végétales pour l'amélioration biologique dépend de leur résistance aux facteurs environnementaux (climat, sol, action anthropique), de leur mode de reproduction et de leur productivité en bois ou en fourrage, etc. Ainsi, dans certaines situations, on a recours aux *Eucalyptus* (Maroc), à *Prosopis juliflora* et à *Tamarix spp.*, sélectionnés pour leur croissance rapide, bien qu'*Acacia raddiana*, espèce à croissance plus lente, soit écologiquement mieux adapté dans le Sahel semi-aride.

Le semis est une autre technique de reconstitution de la couverture végétale mais il faut souvent répéter jusqu'à trois fois le même semis. Pour lutter contre la déflation dans les oasis, l'établissement d'un couvert végétal pluristrates reste intéressant par association de végétaux car il diminue l'insolation donc l'évaporation et le dessèchement du sol et empêche la prise en charge éolienne.

En Chine centrale, 1 300 hectares de dunes dénudées ont été transformés par les paysans en une station expérimentale pour le semis d'espèces variées. Après deux ou trois ans, les espèces *Salix psammophila*, *Hedysarum scoparium*, *Hedysarum laeve* et *Artemisia sphaerocephala*, ont produit une couverture végétale de 25-37 pour cent sous une pluviométrie de 150 millimètres par an en moyenne.

Au Maghreb, une pluviométrie supérieure à 200 ou 300 millimètres par an pendant les saisons d'hiver et de printemps accompagnée d'une mise en défens peut suffire à restaurer la végétation. Les espèces végétales adaptées et permettant une stabilisation efficace des nappes sableuses sont *Saccharum aegyptiacum*, *Tamarix articulata*, *Ammophila arenaria* et *Artemisia spp.* Cette technique est praticable sur de vastes superficies mais son efficacité dépend de la stabilisation préalable des sols et du degré d'humidité de la couche superficielle des sols (FAO, 1988).

Les techniques biologiques dépendent des conditions offertes par l'écosystème dans lequel elles sont mises en œuvre. Elles sont alors possibles avec ou sans irrigation ou arrosage d'appoint, par régénération naturelle, par plantation ou par semis, à l'aide de pépinières ou non, avec une protection nécessaire contre l'arrivée du sable mobile, après sélection des végétaux en évitant les « aliens » (plantes allochtones) et en préférant les plantes autochtones et notamment les espèces ligneuses. En Mauritanie, Meunier a proposé l'introduction systématique de *Prosopis juliflora*, arbre allochtone, ce qui s'est avéré désastreux surtout aux yeux des populations locales qui appellent cet arbre « l'arbre du diable » car il contrarie l'installation d'autres végétaux ; dans les palmeraies, il nuit aux palmiers et assèche les puits lorsqu'ils sont proches.

Brise-vent et barrières végétales

Guyot et al. (1986) décrivent comment « dans les régions de plaines, là où le paysage était plus ou moins occupé par des formations ligneuses végétales de hauteur et de densité variées, les opérations agricoles ont entraîné l'élimination de ces formations pour constituer des parcelles entièrement ouvertes. Il en résulte généralement, sur de vastes superficies, une augmentation de la vitesse du vent qui a pour conséquence une réduction de la fertilité du sol et une diminution de la productivité agricole. C'est en raison du caractère néfaste de l'effet du vent sur la production agricole et l'élevage que les aménageurs ont reconnu l'utilité des brise-vent considérés comme l'une des mesures de conservation parmi les plus efficaces destinées à obvier aux dangers que crée l'absence d'arbres en terrain découvert (...). En dépit de l'utilité incontestée des brise-vent, très peu d'actions d'ensemble ont été menées pour généraliser leur emploi comme outils de protection dans les aménagements ruraux (...) ».

Les brise-vent sont des couvertures partielles composées d'une ou plusieurs rangées d'arbres et/ou de buissons. Ce sont des barrières qui réduisent la vitesse et la turbulence du vent dans leur voisinage, sur les faces

au vent et sous le vent. Leur efficacité varie au cas par cas et dépend :

- du profil de la bande végétale,
- de la perméabilité de cette bande végétale,
- des possibilités d'arrosage et/ou de drainage,
- de l'aire à protéger,
- et des disponibilités financières.

L'efficacité de la végétation pour limiter la mobilité des particules en diminuant la vitesse du vent à la surface du sol varie avec la densité de la canopée (strate supérieure des arbres) qui sert de piège à sable. Cette efficacité est également fonction de la morphologie des plantes (forme de la canopée, longueur du tronc), qui affecte le flux de sable. Les végétaux buissonnants isolés sont, dans les aires de transport, le point d'ancrage de petites dunes de type **nebkas**.

Zoom

Rapport de vitesse et efficacité des brise-vent

« Un freinage maximum du vent est atteint avec un espacement (entre deux brise-vent) de 5 fois la hauteur (H) du brise-vent. Selon toutes les expériences, l'espacement optimum pour l'agriculture se situe entre 15 et 25 H ». L'effet d'un brise-vent peut être évalué par « le rapport entre la vitesse moyenne du vent réduite par le brise-vent et celle du vent non perturbé à la hauteur et à la distance considérées ». Pour définir ce rapport, les termes de « rapport de vitesse », « vitesse relative », « vitesse relative du vent », « efficacité » sont utilisés et font tous référence à la réduction de la vitesse du vent pour une vitesse et une hauteur données. L'équipe chinoise de Lanzhou définit l'efficacité des brise-vent par l'équation suivante :

$$K = (Q_0 / Q_1) \times 100 \%$$

Avec Q_0 = quantité de sable bloquée, Q_1 = quantité maximale de sable potentiellement transportable, K dépend aussi de la porosité, de la disposition et de la hauteur du brise-vent ainsi que de la charge transportée (Ling Yuquan, 1994).

Des expérimentations menées dans la soufflerie du Centre International d'Érémologie de l'Université de Gand (Belgique) ont tenté de déterminer la configuration optimale des brise-vent. L'effet de cinq brise-vent sur la réduction de la vitesse du vent, en ligne simple et en deux combinaisons de plusieurs lignes, a été évalué. Les aires de **déflation** et de dépôt de sable ont été précisées à partir de la mesure de la vitesse du vent et comparées avec des données expérimentales de transport de sable.

Le dépôt de sable commence à des vitesses du vent inférieures à trois mètres par seconde. Des brise-vent avec une porosité uniforme en hauteur ont donné l'aire protégée la plus longue car ils engendrent un dépôt de sable à des distances de cinq hauteurs en amont de la barrière et de 22 en aval de la barrière. Un brise-vent avec une partie inférieure dense est plus efficace pour la réduction de la vitesse du vent qu'un brise-vent avec une partie supérieure dense.

Plusieurs techniques ont été testées en lignes simples ou en quadrillages car la configuration optimale des brise-vent n'est pas encore évidente. Les recherches ont démontré que l'effet brise-vent s'arrêtait à une longueur égale à 15 - 25 fois la hauteur du brise-vent, selon le rapport de vélocité.

Gupta *et al.* (1984) précisent que certaines espèces utilisées dans les brise-vent, comme *Cassia siamea* (espèce arborée), sont plus efficaces pour réduire l'érosion éolienne et les pertes en sol qu'*Andropogon gayanus* ou qu'*Oxytenanthera* (graminées pérennes). Il est alors préconisé d'alterner la hauteur des rangées. L'orientation des barrières végétales dépend des courants éoliens dominants. En régime bidirectionnel, elles seront perpendiculaires aux deux vents et donc dans le cas de dunes linéaires (**sifs**), obliques aux édifices eux-mêmes.

De nombreuses expériences ont permis de démontrer que les rideaux de brise-vent ont sur les rendements agricoles un effet positif très sensible malgré l'ombre qu'ils apportent et la concurrence par les racines. Leur effet est marqué dans les pays où la saison végétative est courte et sèche. De bons résultats ont été obtenus dans des régions arides et semi-arides où il a été souvent relevé une augmentation de productivité de 80 à 200 pour cent. D'après Guyot *et al.* (1986), des brise-vent de 10 mètres de haut espacés de 150 à 250 mètres, entraînent une réduction des rendements jusqu'à la distance de 5 à 10 mètres. Au-delà, les rendements croissent jusqu'à tripler et les auteurs concluent que « jusqu'à une distance d'une centaine de mètres - à mi-distance entre des brise-vent espacés de 150 à 250 mètres -, l'arbre exerce un « télé-rôle » (rôle à distance) sur la fertilité du champ. La compétition des brise-vent avec les cultures (...) se traduit par une baisse de production, comparée à celle de l'aire témoin, dans une bande dont la largeur est comprise entre 0,5 et 1 H* ».

* H étant la hauteur du brise-vent, N.D.L.R.

En dépit du bilan positif des brise-vent sur la production agricole, les agriculteurs ignorent l'importance de la protection qu'ils apportent, n'en voyant souvent que les inconvénients : terrain perdu, mécanisation rendue plus difficile, réduction de la récolte du fait de l'ombre et de la concurrence des racines, habitat d'oiseaux de type kélé kélé ou mange-mil en Afrique et prétendent qu'arbres et buissons sont des « dortoirs à parasites ».

Garczinski (2000) affirme qu'« aucune overdose technico-scientifique ne ruine autant agriculture, environnement et santé que raser arbres, arbustes et buissons champêtres, depuis l'Équateur jusqu'au cercle polaire : erreur de sauvages et d'agronomes ».

Reboisement et ceintures boisées : leur rôle dans la lutte contre l'érosion éolienne dans le cadre de l'amélioration environnementale

Le reboisement par l'installation, après un semis de végétation pérenne graminéenne, d'un couvert végétal arbustif ou arboré, est la méthode efficace à long terme pour la fixation des sables et des dunes mais elle implique une sélection soigneuse des végétaux.

Pour la fixation des dunes linéaires (**sifs**), les plantations doivent être effectuées dans les couloirs interdunaires et sur la moitié inférieure des deux versants des édifices (Mainguet, 1991) et non pas, comme cela se voit trop souvent, sur la totalité de l'édifice.

L'effet abrasif des grains de sables transportés sur le feuillage et les jeunes pousses, la mise à nu des racines par **déflation** et l'ensevelissement, sont les risques majeurs qu'encourt la reforestation. Ainsi, pour certaines espèces, il est préférable de repiquer des plants hauts de 80-100 centimètres, produits en pépinières et dont les racines atteignent 20 à 40 centimètres.

Protection de la ligne de chemin de fer de la Société Nationale d'Industrie Minière reliant Nouadhibou à Zouérate (Mauritanie, décembre 2001). Placés à l'intérieur de fûts métalliques, les jeunes plants de prosopis sont ainsi à l'abri de l'abrasion éolienne. Cette barrière verte est destinée à protéger la ligne de chemin de fer de la SNIM Nouadhibou-Zouérate dans un secteur particulièrement exposé à l'arrivage de matériel éolien.

© F. Dumay et M. Mainguet





Vue de la ville de Nouakchott (Mauritanie) depuis l'immeuble le plus haut de la capitale. Le quartier administratif, situé au sud de la ceinture verte (arrière plan de la photographie) est un des quartiers les plus verdoyants de la ville (décembre 2001).

© F. Dumay

L'idée des barrages verts est apparue dans les années 1950 en URSS et en Chine, en particulier avec le projet expérimental d'un « mur vert » planté autour du désert de Gobi pour protéger la Chine de l'avancée des sables. Cette technique de ceinture végétale a également été utilisée au Baloutchistan (Pakistan) dans la vallée de Mastung.

Les ceintures boisées ont été conçues au départ dans un but urbanistique. Les premiers exemples datent du début du 20^{ème} siècle, autour de Londres et de Jérusalem (Cohen, 1994). Leur objectif était de circonscrire le développement anarchique du tissu urbain et d'agrémenter la ville avec un peu de verdure. Elles restaient toutefois limitées en superficie.

Les projets de grande envergure pour lutter contre la désertification sont plus récents. Les réalisations entreprises en Chine, au début des années 1960 durant la révolution culturelle, avaient comme objectif la lutte contre l'ensablement dans le désert de Taklamakan.

Le « Barrage-Vert » en Algérie, s'inspirant du modèle chinois, a été entrepris dans la décennie 1970 pour lutter contre un arrivage supposé de sable saharien, alors qu'en fait le sable mobile résulte d'une érosion favorisée par le surpâturage, les incendies et le défrichement (UNESCO, 1988). Les dimensions initiales prévues étaient de 1 500 kilomètres de long et de 20 à 40 kilomètres de large. Cette barrière végétale s'inscrivait dans un programme d'aménagement agro-sylvo-pastoral. Le projet a connu plusieurs phases de maturation. En 1968, a été entrepris au niveau de la Wilaya de Djelfa, dans la plaine de Moudjebara, un immense chantier de reboisement, véritable précurseur du barrage vert.

Durant cette même période furent réalisés les reboisements de Mergueb, réserve intégrale au nord de

Bou-Saada. En 1972, le président Houari Boumediene décrète à Saïda le lancement du « Barrage vert ». Avec la révolution agraire, l'aménagement des parcours steppiques devait constituer la troisième phase de la révolution agraire et les reboisements la quatrième phase.

Les premiers reboisements du « Barrage-Vert » ont débuté d'une manière effective en 1974. L'objectif était d'occuper une jeunesse pléthorique et de relever le défi d'un immense chantier de reboisement devant doubler au bout de dix ans la superficie forestière qui, au lendemain de l'indépendance, était à peine de trois millions d'hectares. Au début des années 1980, la conception de ce « Barrage-Vert » a évolué, de reboisements monospécifiques vers des aménagements intégrés. Des reboisements des bandes routières entre les villes d'Ain-Ousséra et de Djelfa et entre Djelfa et Bou-Saada ont été réalisés par les militaires dans le cadre de leur service national. À partir de 1992, avec le désengagement de l'armée des actions civiles, c'est le service forestier qui reprend en mains les travaux du « Barrage-Vert » mais les interventions se limitent actuellement à des opérations de fixation des dunes continentales.

La première ceinture verte implantée en périphérie nord de la ville de Nouakchott (Mauritanie), commencée dès 1975 à l'initiative de la Fondation Luthérienne Mondiale, tente de protéger la ville contre l'avancée des dunes mobiles. D'une superficie de 325 hectares plantés en *Prosopis juliflora*, avec 2 500 pieds par hectare, elle s'avère peu efficace. La FAO a repris la question à la fin des années 1990 et l'a remplacée, en 1991, par le projet « Protection de l'Environnement et de Reboisement Villageois », financé par la Fédération Luthérienne Mondiale. Au seuil du 21^{ème} siècle, le projet est à nouveau à l'ordre du jour sous forme de barrière verte au nord-est de la ville.

Localisation		Méthodes	Résultats/ Inconvénients
TUNISIE	Gouvernorat de Médenine	<ul style="list-style-type: none"> Reboisements et mise en défens Création de 500 km de palissades et de carroyages (tôles ondulée et fibrociment sur bourrelet sableux artificiel: <i>tabia</i>) 2^{ème} temps : fixation biologique avec <i>Eucalyptus</i>, <i>Calligonum</i>, <i>Ratama</i>, <i>Tamarix</i>... 	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration des parcours Tentatives de remplacer les tôles par des palmes, moins chères
	Gouvernorat sud Tunisie	<ul style="list-style-type: none"> Fixation mécanique : contre-dune et carroyage de fibrociment, tige de roseaux et stipes de palmiers 	<ul style="list-style-type: none"> 6 942 km de <i>tabias</i> érigés. La technique utilisant des plaques percées a été abandonnée car jugée inefficace. Dans les secteurs les plus exposés, il faut rehausser les plaques 4 à 5 fois par an... nécessitant une main d'œuvre abondante
		<ul style="list-style-type: none"> Fixation biologique, développement de pépinières 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité de transporter les plants sur de longues distances occasionnant des pertes sévères. Priorité donnée aux espèces autochtones Superficie reboisée : 11 ha
		<ul style="list-style-type: none"> Mise en défens et arrosage des plantations 	<ul style="list-style-type: none"> Manque d'eau et mauvaise qualité de l'eau
Bilan : Il faut améliorer l'encadrement des travaux réalisés en pépinières et améliorer les méthodes de plantation ; avoir une meilleure connaissance des espèces végétales les mieux adaptées aux milieux dunaires ; améliorer les techniques d'irrigation ; sensibiliser les populations locales pour susciter leur aide.			
MAROC	en milieu continental	<ul style="list-style-type: none"> Intervention locale Lutte mécanique avec palissades végétales ou fibrociment et mailles plastiques. Quadrillages et régime éolien bidirectionnel Lutte biologique 	<ul style="list-style-type: none"> Coût moindre mais résultat peu probant Nécessité d'entretien de ces palissades Implique une teneur en fines >2% et une irrigation
	en milieu littoral	<ul style="list-style-type: none"> Installation d'un cordon artificiel perpendiculaire au vent dominant Couverture du sol par des branchages locaux Fixation biologique par plantation ou ensemencement 	<ul style="list-style-type: none"> Mauvaise estimation des directions éoliennes Coupes sur les arbustes locaux Pression pastorale forte et manque d'entretien du cordon
Bilan : Actions jugées trop ponctuelles et portant sur des cas « d'urgence » sans véritable plan de protection globale ; problème de gestion des périmètres de mise en défens ; une meilleure participation des populations locales est souhaitable.			
MAURITANIE		<ul style="list-style-type: none"> La sécheresse des années 70-80 suscite les programmes de lutte contre l'ensablement : <ul style="list-style-type: none"> Protection mécanique de la Route de l'Espoir par des filets et branchages de <i>Leptadenia pyrotechnica</i> À la sortie de Nouakchott : quelques reboisements de <i>Prosopis juliflora</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Inefficace car technique inadaptée aux édifices à traiter Espèce non recommandée car élimine la végétation locale : disparition de la végétation arbustive et herbacée dans un rayon de 70 km autour de Nouakchott
Bilan : Absence de travail à l'échelle globale (faible utilisation des images satellites) ; nécessité d'une véritable politique de mise en défens autour de la capitale ; ce pays manque de cadres juridiques notamment d'un code des pâturages et de lois foncières.			
NIGER	Régions Zinder et Diffa	<ul style="list-style-type: none"> Étude du modelé dunaire Fixation mécanique : création de dunes artificielles avec mise en place de palissades de végétaux locaux Fixation biologique Recours au paillage 	<ul style="list-style-type: none"> 300 km de palissades et de claies 1 274 000 plants sur une aire dunaire de 912 ha 197 ha de mise en défens Bonne participation de la population avec 426 532 journées de travail Malheureusement utilisation uniquement d'espèces arbustives
Bilan : Bonne approche participative, fin de l'exode rural ; un millier d'hectares de dunes ont été fixés.			



Carroyage en tresses de palmes,
Palmeraie de Boria (Maroc, 2005).
© F. Dumay

Quelques coûts des techniques de lutte contre l'érosion éolienne

Au Maroc, d'après Khardi (ingénieur des Sciences du sol et de la conservation de l'eau, communication orale, 2005), la fixation mécanique utilisant pour le carroyage des stipes de palmes de 80 centimètres de haut a un coût de 13-14 dirhams* par mètre linéaire.

Il faut 3 200 mètres linéaires pour fixer un hectare. La fixation biologique réalisée sous le vent de ces palissades coûte 8 000 à 10 000 dirhams auxquels il faut ajouter les coûts de l'irrigation et de l'entretien. Dans de nombreuses palmeraies marocaines, les phoéniculteurs vendent les palmes à l'unité (0,65 à 1 dirham), ce qui leur procure un complément de revenu mais affaiblit considérablement les végétaux.

La pauvreté, l'hétérogénéité de l'information et la disparité des aires géographiques (surfaces à traiter, origine de l'ensablement, volume de sable à traiter, etc.) ne permettent pas de préconiser une solution selon le critère économique. Il faut combiner les critères de coûts à d'autres critères comme le matériel localement disponible, les ressources hydriques, la main d'œuvre, etc.

* 1 euro = 10,975 dirhams (cours d'avril 2006)

Techniques	Coûts en euros			
	Maroc	Algérie	Égypte	
Palissades	palmes	2 197 par km	165 par ha	424-970 par km
	branchages	2 377 par km	311 par ha	60 par km
	résidus de tournesol			233-1 206 par km
	fibrociment		1 600 par ha	
Quadrillage	palmes (<i>Phoenix dactylifera</i>)	6 351 par ha		792 par km
	alfa (<i>Stipa tenacissima</i>)	5 043 par ha		
	résidus de tournesol			265 par km
	mailles plastiques		3 335 par ha	
Mulching	branchages	444 par ha		1 431 par ha
	rétam (<i>Retama raetam</i>)	407 par ha		
	paille de riz			64-97 par ha
	argile			127 par ha
	pneus usagés		267 par ha	
	bitume généralisé		603 par ha	96-318 par ha
	bitume en bande		166 par ha	60-73 par ha
film		4 900 par ha		
Haies végétales		566 par ha		

Coûts comparatifs en euros des différentes techniques de lutte contre l'érosion éolienne d'après les expériences marocaines, algériennes et égyptiennes
km : kilomètre ; ha : hectare

Espoir dans la lutte contre l'érosion éolienne

Dans les régions sèches, les paysages sableux sont ceux qui sont les plus affectés par les change-ments. Au milieu du 20^{ème} siècle, dans le Sahel au sud du Sahara, entre les isohyètes 150 mm et 600 mm, les aires sableuses étaient vêtues par une steppe sahélienne ; depuis, avec les sécheresses récurrentes et les activités humaines, une nouvelle génération de dunes est apparue dans les anciennes aires dunaires fixées par une pédogénèse paléoclimatique.

Au niveau de la genèse de cette nouvelle génération de dunes, ce qui a changé au cours des dernières décennies, est l'échelle de temps des phénomènes. Alors qu'il a fallu des millénaires aux grands **cordons longitudinaux** pour se mettre en place, deux décennies suffisent pour les remanier le plus généralement en **sifs**, quelquefois en **édifices barkhaniques**. Les moyens de lutte doivent donc nécessairement composer avec ce changement de rythme qui, de géologique, passe à une échelle historique humaine (25 ans).

Il est à présent acquis, grâce à la recherche fondamentale, que la lutte contre l'érosion éolienne ne peut se contenter de se placer à une échelle locale. En effet, la découverte que les unités de dynamique éolienne ont une dimension continentale, ce qui est le cas du Sahara et du Sahel, doit amener à travailler à l'échelle régionale ou synoptique. Toute lutte contre l'érosion éolienne doit aborder des formes et des ensembles avec leurs liens et leurs rétroactions dans l'espace et proposer aussi des solutions à l'échelle moyenne de temps, c'est-à-dire une ou deux générations.


La lutte contre l'érosion éolienne se divise en :

- un volet diagnostic, qui a progressé grâce aux outils modernes de recherche (**téledétection**, sédimentologie) mais qui comporte encore des faiblesses au niveau de la perception de l'emboîtement des échelles, de l'échelle synoptique à l'échelle locale, et au niveau de la compréhension de la dynamique des différents types de dunes ;
- un volet thérapie : les progrès ont été notables mais on se heurte encore au coût des opérations et, plus encore, aux exigences psychologiques et financières de maintenance.

Trouver les bonnes solutions est une tâche difficile mais il s'agit surtout de préconiser les solutions utilisant les matériaux locaux, par exemple les stipes de palmiers dans les palmeraies au nord du Sahara ou des branches de *Leptadenia pyrotechnica* au sud du Sahara, de préférence aux plaques de fibrociment ou aux filets de plastique, plus coûteux, esthétiquement peu réussis et qui empêchent la circulation normale de l'eau en profondeur lorsqu'ils sont enfouis dans le sable. Il faut aussi préconiser les solutions à moyen terme en recherchant une fixation biologique, là encore avec des végétaux locaux plutôt qu'avec des végétaux allochtones.



Ja Ragdou, Niger. Forte dégradation, traces visibles du couvert arboré disparu.
Olivier Barrière © IRD



Acronymes et abréviations utilisés dans le texte

- C3ED : Centre d'économie et d'éthique pour l'environnement et le développement
- CNUED : Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement
- CSFD : Comité Scientifique Français de la Désertification
- EGCS : Réseau francophone sur l'érosion et la gestion conservatoire des eaux et des sols
- FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
- GTZ : Coopération allemande, *Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*
- IGN : Institut Géographique National
- IRD : Institut de recherche pour le développement
- ISCO : *International Soil Conservation Organisation*
- LCD : Lutte contre la désertification
- LGZD : Laboratoire de géographie zonale pour le développement
- PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement
- SGAE : Système Global d'Action Éolienne
- SNIM : Société nationale industrielle et minière, Mauritanie
- SRAE : Système Régional d'Action Éolienne
- UMR : Unité mixte de recherche
- UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
- UVSQ : Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

Au campement, prendre le thé occupe une place centrale dans le déroulement de la journée. Cet instant de détente est aussi un moment d'échange et d'information. In Waggar, Niger.

Edmond Bernus © IRD



Références bibliographiques

Aïci M., 1980. *Étude pédobiologique des bandes routières reboisées de la région de Djelfa*. Mémoire d'ingénieur, INA, Alger, 64 p.

Armbrust D.V. et Paulsen G.M., 1973. Effect of wind and sandblast injury on nitrate accumulation and on nitrate reductase activity in soyabean seedlings. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 4(3): 197-204.

Arnagueldiev A., 1979. *Péski centralnoy tchasti Karakoumov i méri borbi s ney*. Achkhabad : Ilim, Turkménistan. 121 p.

Bastow J., Peck W., Astill C. et Roebuck D., 1978. Wind erosion three methods of lessening the damage caused by the big blow. *British Sugar Beet Review*. 46: 14-17.

Bilbro J.D. et Stout J.E., 1999. Wind velocity patterns as modified by plastic pipe wind barriers. *Journal of soil and water conservation*. 54 (3) : 551-556.

Bisson J., 1983. De la mobilité des terroirs à la stabilisation de l'espace utile : l'exemple du Gourara (Sahara algérien). In: Larbi Talha. Coll. *Annuaire de l'Afrique du Nord*, CNRS Éditions, Paris. 22 : 389-399.

Buerkert B. et al., 1996. (Eds.). *Wind erosion in West Africa: The problem and its control*. Proc. Int. Symp., Stuttgart, Germany. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany.

CAZRI, 1984. *Research Highlights 1959-1984*. Central Arid Zone Research Institute, Jodhpur, India.

Chepil W.S., 1959. Wind erodibility of farm fields. *Journal of Soil and Water Conservation*. 14: 214-219.

Cohen S.E., 1994. Greenbelts in London and Jerusalem. *Pl. the Am. Geogr. soc. of N.Y. Geographical review*. Jan 1994: 74-89.

Cornet A., 2002. La désertification à la croisée de l'environnement et du développement. In : MAE. *Johannesburg, Sommet Mondial du Développement Durable. Quels enjeux ? Quelle contribution des scientifiques ?* Paris : 93-134.

De Noni G., Viennot M., Asseline J., Trujillo G., 2001. *Terres d'altitude, terres de risques. La lutte contre l'érosion des sols dans les Andes*. Collection Latitude 23, Édition de l'IRD, Paris. 219 p.

Diatta M., 1994. *Mises en défens et techniques agroforestières au Sine Saloum (Sénégal). Effet sur la conservation de l'eau, du sol et sur la production primaire*. Thèse de Doctorat, Inédit, Université de Strasbourg, France. 202 p.

Dregne H.F., 1984. Combatting desertification: evaluation of progress. *Environm. Conserv.* 11(2): 115-12.

El-Baz F., 1988. Origin and evolution of the Desert. *Interdisciplinary Science Reviews, J.W. Arrowsmith Ltd.* 3(4): 331-347.

Eren T., 1985. Agro-forestry in arid and semi-arid zones. In: FAO. *Sand dune stabilization, shelterbelts and afforestation in dry zones*. FAO Conservation Guide 10, Rome: 169-174

Evers Y.D., 1996. *The social dimension of Desertification. Annotated bibliography and Literature Review*. UNER, UNRISD, IIED. 154 p.

Fall O., 2001. *L'érosion éolienne dans le bassin arachidier du Sénégal: causes, mécanismes et solutions*. Thèse de doctorat, Laboratoire de Géographie Zonale pour le Développement, Université de Reims, France. 355 p. Inédit.

FAO, 1988. *Manuel de fixation des dunes*. Cahiers Conservation n°18, Rome. 68 p.

Garczinsky F., 2000. *Nouvelle 5 bis*. 14 p. Cemagref, Grenoble, France. Inédit.

Golinski K.D. et Lindbeck K.E., 1979. Woven plastic for coastal dune-forming fences. *Journal of Soil Conservation Service of New South Wales*. 35: 26-29.

Gravier M., 1993. Moudjeria, un village mauritanien face à la désertification. *Science et changements planétaires, Sécheresse*. 4(1) : 31-36.

Gupta J.P., Rao G.G.S., Rmakrishna Y.S. et Rao B.V.R., 1984. Role of shelterbelts in arid zone. *Indian farming*. 34(7): 29-30.

Guyot G., Delecolle R. et Ben Salem B., 1986. Brise-vent. *Cahier FAO Conservation* 15. Rome.

Hamidov H., 1974. *Priménénié cémentno pestchanikh sméséy s dobavkami dla prédotvrachéniya déflacii podvijnikh péskov*. Press de l'Institut Polytechnique, Tachkent. 27 p.

Inoue K. et Naruse T., 1987. Physical, chemical, and mineralogical characteristics of modern aeolian dust in Japan and rate of dust deposition. *Soil Science and Plant Nutrition*. 3: 327-345.

Jordan W.M., 1964. Prevalence of sand-dune type in the Sahara desert. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.* 82: 104-105.

Kaul R.N., 1985. Sand dune fixation and afforestation. Traditional procedures for dune fixation: the hedge system. In: FAO. *Sand dune stabilization, shelterbelts and afforestation in dry zones*. FAO Conservation Guide 10 : 65-70.

Lemine Ould Elhacen M., 2000. *Infrastructures routières en milieux sableux : environnement bioclimatique et morphodynamique de la Route de l'Espoir (Mauritanie)*. Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France. Inédit. 228 p.



Désert de l'Air Ténééré, Niger. Caravane conduite par un Touareg, à proximité des monts Bagzan.
Patrice Cayré © IRD

Ling Y., 1994. The distributive heterogeneity of sand transporting quantity along horizontal direction. *Journal of experimental mechanics*. 9(4): 335-352.

Liu Shu, 1986. Osnovnye sposoby zakrepleniya podviznykh peskov v Kitae. (Principaux procédés de la fixation des sables mobiles en Chine). *Problemy osvoeniya pustyni*. 3: 76-79.

Mainguet M., 1972. *Le Modelé des grès. Problèmes généraux*. Thèse de Doctorat d'État, Institut Géographique National. (In: Études de Photo-interprétation), France. 2 vol., 72 tableaux, 105 stéréogrammes, 333 fig. phot. 637 p.

Mainguet M., 1976. Étude géodynamique de l'effet d'obstacle topographique dans le transport éolien: Résultats obtenus à l'aide des images aériennes et satellites au Sahara. *Société Franç. de Photogram.* Bull. n° 61 : 31-38.

Mainguet M., 1976. *Localisation d'une unité écologique expérimentale dans la région de Maradi (Niger). Reconnaissance morphodynamique des 100 000 ha du périmètre Tchadoua-Mayahi*. GERDAT, Paris, LGPZ, Reims, 52 p + pl I à V et 2 cartes hors-texte.

Mainguet M., 1984. A classification of dunes based on aeolian dynamics and the sand budget. In: El-Baz F. (éd.). *Deserts and Arid Lands*. M. Nijhoff Publ., Hollande: 30-58.

Mainguet M., 1985. Le Sahel, un laboratoire naturel pour l'étude du vent, mécanisme principal de la désertification. In: Barndorff-Nielsen O.E., Moller J.T., Rasmussen K.R. et Willetts B.B. (eds), *Proceedings of international workshop on the physics of blown sand*. Dept. Theoretical Statistics, Institute of Mathematics, Univ. Aarhus, Danemark, Mem. n°8: 545-561.

Mainguet M., 1991. *Desertification. Natural background and human mismanagement*. Springer, Series in physical environment, vol. 9, Springer-Verlag. 306 p.

Mainguet M., 1995. *L'Homme et la Sécheresse*. Masson, Paris. 335 p.

Mainguet M. et Chemin M.C., 1979. *Lutte contre l'ensablement des palmeraies et des oasis dans le Sud marocain. Rapport technique : étude préliminaire de l'avancement des sables. Apport de la photo-interprétation, de la télédétection, et des critères géomorphologiques de terrain*. Rapport TCP/MOR/6702. FAO, Rome. 32 p.

Mainguet M. et Chemin M.C., 1982. *Formulation d'un programme de lutte contre l'ensablement des palmeraies de Bilma, Niger*. FAO/UNSO. 106 p.

Mainguet M. et Dumay F., 1995. Transaharan Wind Flows analysed on Meteosat 4 satellite imagery. Resources, urban, sand & wind, Desert Technology III, Lake Motosu, Japan. *Journal of Arid Land Studies*. 53 : 89-94.

Mainguet M., Dumay F. et al., 2005. *Dictionnaire de Géographie*. Sous la direction de G. Wackermann. Éd. Ellipses, Paris.

Mainguet M., Dumay F. et Létolle R., 2002. Géologie. Le Système Régional d'Action Éolienne (SRAE) du Bassin de l'Aral (Kazakhstan, Ouzbékistan et Turkménistan). The Regional Aeolian Action System of the Aral Basin. *Compte-rendu à l'Académie des Sciences*. 334 (2002) : 475-480.

MC Kee E.D., 1979. *A study of Global Sand Seas*. United States Government Printing Office, Washington, 429 p.

Michels K., Lamers J.P.A. et Buekert A., 1998. Effects of wind-break species and mulching on wind erosion and millet yield in Sahel. *Exp. Agric.* 34: 449 - 464.

Nielson J. et Koçurek G., 1986. Surface processes, deposits and development of star dunes: Dumont dune field, California. *Bull. Geol. Soc. Am.* 99: 177-186.

Papanyas K.P. et Makhsudoc K.M., 1984. Chemical protection of sandy loam soils from wind erosion. *Problems of desert Development*. 4: 95-99.

Podgorn A.S., 1973. *Priménenié nérosina dlya zakrépléniya I oblécéniya péskov na trassakh gazoprovodov*. Presse de l'Institut d'Agriculture d'Achkhabad, Turkménistan. 23 p.

Pye K et Tsoar H, 1990. *Aeolian sand and sand dunes*. Unwin Hyman, London. 396 p.

Rémini B., 2002. *Méga-obstacles et dépressions, leurs influences sur la dynamique éolienne, les ergs et l'ensablement des espaces oasiens*. Thèse de Doctorat, Laboratoire de Géographie Zonale pour le Développement, Université de Reims Champagne-Ardenne, France. 208 p.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO*. 70. Rome, 420 p.

Salama M., Deconink J.N., Lofty M.F. et Riser J., 1991. L'ensablement de Nouakchott -exemple de l'aéroport. *Science et changements planétaires, Sécheresse*. 2(2) : 101-109.

Selassi M.L., 1983. *Lutte contre l'ensablement des palmeraies du Maroc, Rapport sur la consultation en météorologie*. PNUD, FAO, FO: DP/MOR/78/017, n°6. 49 p.

UNEP, 1991. *Status of Desertification and implementation of the UN Plan of Action to Combat Desertification*. Nairobi, 94 p.

UNESCO, 1988. *La lutte contre la désertification en Algérie. L'expérience du barrage vert en Algérie*. Séminaire organisé dans le cadre du Projet-pilote de lutte contre la désertification dans le Sud tunisien, 24-29 nov. 1986, MAB/UNESCO, PNUE.

UNSO, 1991. *Sand encroachment control in Mauritania*. Tech. Publ. Series, n°5. Office to Combat Desertification and Drought, New York. 45 p.

Watson A., 1990. The control of blowing sand and mobile desert dunes. In: Goudie A.S. (éd.). *Techniques for desert reclamation*. Wiley Publishers, UK: 35-85.

Budget sédimentaire éolien ou bilan sédimentaire

éolien : On parle de budget sédimentaire éolien positif lorsqu'un secteur reçoit plus de particules qu'il n'en exporte (il y a accumulation éolienne) et de budget sédimentaire éolien négatif lorsque dans un secteur le départ de particules est supérieur à l'arrivée.

Cordons longitudinaux : Édifices sableux allongés séparés par des couloirs de déflation. Ils s'alignent dans la direction des vents dominants.

Corrasion : Usure des surfaces de roches cohérentes par le vent chargé de particules abrasives. Érosion due au choc des grains de sable transportés par le vent.

Croûte biologique : C'est un feutrage de lichens et/ou de mousses qui recouvrent et fixent les sables vifs. C'est le premier stade de fixation biologique de sables mobiles (dunes, nappes sableuses, etc.).

Croûte de battance : Destruction de la structure du sol sous l'effet de la pluie avec formation d'une pellicule ou d'une mince croûte superficielle, continue et consistante dite de battance.

Compaction : Création d'un état compact (réduction des vides et accroissement de la densité) par tassement naturel.

Déflation : Balayage par le vent des débris meubles et fins du sol.

Dreikanter : Caillou de forme pyramidale à trois côtés taillés par l'action des vents de sable du désert (terme d'origine allemande).

Dune parabolique : Dune dissymétrique en forme de fer à cheval, à concavité au vent. Sa disposition par rapport à la direction du vent constructeur est inverse de celle de la barkhane.

Édifice barkhanique ou barkhane : Dune de sable mobile, sous forme de croissant, et dont les crêtes pointent vers la direction du vent.

Encroûtement : Processus de formation d'une croûte.

Erg : Région du Sahara couverte de dunes (mot d'origine arabe).

Érodabilité : C'est une mesure de la facilité avec laquelle le sol est érodé, qui est liée à la sensibilité des sols ou des matériaux superficiels à être arrachés et transportés par le ruissellement. Cette sensibilité est liée à la stabilité structurale, mais elle dépend aussi de l'état physique de la surface : tassement, travail du sol, battance.

Érosivité de la pluie : Aptitude de la pluie à provoquer les phénomènes d'érosion.

Ghourd : Dune dominante, plus ou moins pyramidale, caractérisée par un réseau étoilé de crêtes sinueuses qui circonscrivent des chaudrons (terme d'origine arabe).

Kaluts : Système de crêtes et couloirs creusés dans une roche cohérente par le vent chargé de particules. Le terme vient d'Iran, où les kaluts sont creusés dans une molasse d'âge miocène.

Nebka : Petite accumulation éolienne liée à la croissance d'un buisson ou d'un arbuste, souvent prolongée par une flèche dunaire développée à l'abri du vent (terme d'origine arabe).

Pavage de déflation : Concentration en surface d'éléments grossiers et jointifs, dû à l'enlèvement par balayage des éléments plus fins du sol par les vents.

Réflectance des sols : Rapport de l'intensité du rayonnement réfléchi au rayonnement incident sur les sols.

Saupoudrage ou voile sableux : Il s'agit d'un voile de sable sous forme de couche peu épaisse, obtenu par un saupoudrage des surfaces par les grains de sables.

Reg : Surface couverte de fragments rocheux, dégagés par vannage éolien et dont la taille varie du grain de sable grossier au bloc (terme d'origine arabe).

Rillwash : Érosion hydrique sous forme de filets d'eau ou rigoles. S'oppose à l'érosion en nappe ou *sheet-wash*.

Ruissellement : Acheminement des eaux de pluie sur les versants.

Sif (ou dune linéaire) : Édifice allongé, étiré sur toute sa longueur (2 à 3 kilomètres de long et 30 à 50 mètres de large) possédant deux versants qui se rejoignent en une crête aigüe (terme d'origine arabe).

Splash : Déplacement par rejaillissement des fragments individualisés après destruction des agrégats ou de la structure du sol.

Surcreusement éolien : Il se produit lorsque l'érosion éolienne après avoir surcreusé la nappe sableuse, atteint le substrat rocheux et l'érode.

Télétection : Ensemble de techniques mises en œuvre à partir d'avions, de ballons, de satellites, et qui ont pour but d'étudier soit la surface de la terre (ou d'autres planètes), soit l'atmosphère, en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés. Elle permet d'inventorier les ressources terrestres, d'améliorer les prévisions météorologiques, etc.

Unité morphodynamique : Unité de paysage où les données topographiques, structurales (lithologie, stratigraphie et tectonique) et dynamiques sont les mêmes.

Voile sableux : Saupoudrage diffus des particules sableuses à la surface du sol.

Résumé

L'érosion éolienne est un mécanisme qui peut à lui seul ou en combinaison avec d'autres causes physiques ou socio-économiques aboutir à la désertification, c'est-à-dire à la dégradation sévère ou irréversible des ressources en eau et en sol. Avec une meilleure connaissance de ce phénomène, le modèle des années 1970 qui dissocie 3 phases (causes, mécanismes, conséquences) est obsolète compte-tenu des nombreuses rétroactions générées et des liens insidieux qu'elles entretiennent. Un combat efficace contre les méfaits de l'érosion éolienne exige de déceler dans le temps les seuils de déclenchement à l'aide des outils de télédétection (images satellites et photographies aériennes), de limiter et de localiser dans l'espace les phénomènes observés. Toute intervention sur le terrain ne peut-être efficace sans connaissance préalable des mécanismes de l'érosion éolienne à l'interface sol-atmosphère.

À l'interface sol-atmosphère, les actions éoliennes s'organisent en unités dynamiques d'échelle continentale appelées Système Global d'Action Éolienne (SGAE) -couvrant le Sahara et le Sahel- ou régionale (balayant l'Égypte du nord au sud), appelées Système Régional d'Action Éolienne (SRAE), dans lesquelles l'homme interagit par ses activités. Un SGAE se divise en trois aires (aires de départ de particules, de transport éolien, d'accumulation), chacune pouvant se retrouver en plusieurs points du SGAE.

La lutte contre la menace éolienne, qui s'exprime notamment contre l'appauvrissement en particules d'argile, de limons ou de sable et, à l'inverse, contre l'ensablement, doit prendre en compte le bilan sédimentaire, le type d'édifice dunaire et faire la différence entre : -la mobilité dans les aires sources où les particules meubles doivent être bloquées ; -la mobilité dans les aires de transport où le courant éolien doit être dévié pour éviter l'ensevelissement des infrastructures humaines et -la mobilité dans les aires de dépôt où c'est l'excès d'ensablement qui est en cause.

La première étape replace le site à protéger dans le SGAE ou dans le SRAE, en tenant compte de la topographie et du type de dune ou de sable mobile et aboutit à estimer la superficie à stabiliser ou à protéger. La seconde étape est la phase opératoire visant à réduire la vitesse du vent à la surface du sol par des stratégies mécaniques et biologiques. La réussite des programmes de lutte suppose l'utilisation et la valorisation des spécificités écologiques et humaines locales pour minimiser les coûts et rendre les solutions viables pour les communautés.

Mots clés : Dynamique éolienne, désertification, télédétection, système global d'action éolienne, réhabilitation, activités anthropiques

Abstract

Wind erosion - alone or combined with other physical or socio-economic causes - is a mechanism that may induce desertification, i.e. a severe or irreversible degradation of water and soil resources. Now this phenomenon is better understood, the model of the 70's that dissociated three stages (causes, mechanisms, consequences) has been discarded, in view of the many feedbacks and insidious links generated by wind erosion. Efficiently combating the damaging effects of wind erosion requires the timely detection of triggering thresholds with remote sensing tools (satellite images and aerial photographs), and the spatial delimitation and positioning of the phenomena observed. No field operations can be effective without knowing beforehand wind erosion mechanisms at the land-atmosphere interface.

At the land-atmosphere interface, wind actions are organised in dynamic units of continental scale (the so-called Global Wind Action System - GWAS) that covers the Sahara and Sahel regions - or regional scale (sweeping across Egypt from North to South), called Regional Wind Action System (RWAS), in which man interacts with its activities. A GWAS is divided into three areas (particle source, wind transportation, accumulation), each of them likely to be found in several places of the GWAS.

Combating wind-induced threats, that materialises among others by fighting against clay, silt and sand particle losses, and conversely, against sand invasion, should take into account the sediment balance and the kind of dune involved, and distinguish between:

- . mobility in source areas where mobile particles should be fixed,*
- . mobility in transportation areas where wind streams should be deflected so as to prevent human infrastructures from being filled with sand, and*
- . mobility in deposition areas where sand invasion is at stake.*

The first stage consists in defining the site to be protected in relation to the GWAS or RWAS (taking into due consideration the topography and the kind of dune or mobile sand involved), and in assessing the surface to be stabilised or protected. The second stage is the operating stage that aims at reducing wind velocity at ground level through mechanical and biological strategies.

To be successful, programmes aimed at combating wind erosion need to use and valorise local ecological and human specificities in order to minimise costs and to find out solutions viable for the communities involved.

Key words: Wind dynamics, desertification, remote sensing, global wind action system, rehabilitation, human activities

Couverture (photo montage) :

Paysage : Irrigation en milieu aride, Tunisie - J. Pouget © IRD

Homme : L'homme, de la tribu Aït-atta, et son âne,

se rendent au marché d'Aït Hanî, Haut Atlas, Maroc, 2005 © F. Dumay

Dans la même collection

Numéros déjà parus

La lutte contre la désertification : un bien public mondial environnemental ? Des éléments de réponse... (M. Requier-Desjardins et P. Caron, janv. 2005)
Disponible aussi en anglais

La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification (G. Begni, R. Escadafal, D. Fontannaz et A.-T. Nguyen, mai 2005)
Disponible aussi en anglais

Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification (M. Mainguet et F. Dumay, avril 2006)

Désertification et adaptation des agro-écosystèmes : apports d'une agriculture en semis direct sur couverture végétale (M. Raunet)

Coûts économiques et sociaux de la désertification (M. Requier-Desjardins et M. Bied-Charreton)

Synthèse des projets de recherche et développement du CSFD en Afrique

Restauration des milieux dégradés en zones arides et semi-arides (É. Le Floc'h et J. Aronson)

Biodiversité et désertification (A. Sarr)

Pastoralisme et désertification en zone subsaharienne (Ph. Lhoste et B. Toutain)

La révolution pastorale en Méditerranée et son impact sur la désertification (A. Bourbouze)

Biens, ressources naturelles et pauvreté dans les sociétés pastorales : quelles approches ? (A. Bourgeot)

Désertification et gestion des ressources en eau

L'information environnementale pour l'aide à la décision

Changement climatique et désertification

Arbres, arbustes et produits forestiers non ligneux



Ministère délégué à la Recherche

1 rue Descartes
75231 Paris CEDEX 05
France
TÉL.: &33 (0)1 55 55 90 90
www.recherche.gouv.fr



Ministère des Affaires étrangères

20 rue Monsieur
75007 Paris
France
TÉL.: &33 (0)1 53 69 30 00
www.diplomatie.gouv.fr



**Ministère de l'écologie et
du Développement durable**

20 avenue de Ségur
75302 Paris 07 SP
France
TÉL.: &33 (0)1 42 19 20 21
www.ecologie.gouv.fr



Agence Française de Développement

5, rue Roland Barthes
75598 Paris CEDEX 12
France
TÉL.: &33 (0)1 53 44 31 31
www.afd.fr



**Secrétariat de la Convention
des Nations Unies sur la lutte
contre la désertification**

P.O. Box 260129
Haus Carstanjen
D-53153 Bonn
Allemagne
TÉL.: &49 228 815-2800
www.unccd.int



Agropolis

Avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
TÉL.: &33 (0)4 67 04 75 75
www.agropolis.fr



POUR NOUS CONTACTER



CSFD
Comité Scientifique
Français de la Désertification
Agropolis International
Avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
TÉL.: &33 (0)4 67 04 75 44
Fax: &33 (0)4 67 04 75 99
csfd@agropolis.fr
www.csf-desertification.org