

POURQUOI LE RESEAU EROSION DOIT-IL FAIRE UNE PLACE A L'EROSION EOLIENNE ?

Monique MAINGUET et Frédéric DUMAY

Laboratoire de Géographie Zonale (LGZ) 57,
rue Pierre Taittinger, Université de Reims Champagne-Ardenne, 51 00 Reims.

1. L'érosion éolienne, un autre volet de la dégradation des paysages

Les mécanismes éoliens affectent, de façon plus ou moins sévère, les écosystèmes secs, soit plus de 35 % des terres émergées de la planète :

- toutes les **aires continentales** dans les écosystèmes secs jusqu'à 600-650 mm, au Burkina Faso, par exemple, à partir du nord jusqu'à l'isohyète 650 mm (latitude de Kaya).

Erosion éolienne et érosion hydrique en Afrique interfèrent et peuvent s'aggraver l'une l'autre. En Tunisie, par exemple, il a été observé que l'érosion éolienne est toujours plus sévère lors des saisons sèches qui succèdent à des saisons pluvieuses ayant subi de fortes crues et de graves inondations.

- et les **aires littorales**,

L'érosion éolienne est le mécanisme physique le plus traumatisant jusqu'à l'isohyète 300 mm/an. L'érosion éolienne et l'érosion hydrique sont des processus de dégradation combinés jusqu'à l'isohyète 750 mm/an.

Zhu Zhenda trouve les mêmes seuils en Chine.

Lorsque les précipitations dépassent 750 à 780 mm/an, l'érosion hydrique devient, dans le monde tropical, le mécanisme physique exclusif de la dégradation.

Au niveau des mécanismes, les mécanismes hydriques sont beaucoup mieux étudiés que les mécanismes éoliens. Beaucoup de données ont été réunies, ont été croisées et ont donné lieu à des modèles, ce qui n'est pas le cas pour le vent. Pourquoi ?

Tableau 1

L'eau :

- fluide visible
- obéit à la pesanteur
- est spatialement limitée par les interfluves
- fluide porteur de particules sur une tranche de quelques mètres (sauf turbidites)
- circule dans des bassins versants bien limités
- utilisations diverses (barrages, agriculture, énergie

Le vent

- fluide invisible
- obéit à des différences de pression des masses d'air
- n'est pas spatialement limité
- fluide porteur de particules sur une tranche de quelques kilomètres
- remonte les pentes et ne permet pas de faire appel à la notion de bassin versant
- utilisations limitées (éoliennes)

Cette absence de bassin versant limité nous a conduit à proposer en 1992 pour le vent un autre concept, celui de Système Global d'Action Eolienne (SGAE).

2. La théorie du Système Global d'Action Eolienne (SGAE)

Penser que le vent dans les écosystèmes secs est dangereux essentiellement par sa capacité à générer des dunes, surtout celles qui s'allongent et sont mobiles, est une tendance générale. A l'inverse, le danger réel lié aux actions éoliennes, dans les sites d'érosion, c'est à dire dans les secteurs de source, les aires d'exportation de particules sableuses, les aires de transport de sable et les ergs les aires à Budget Sédimentaire Négatif (BS -), est encore trop souvent négligé.

2.1. Les unités dynamiques d'un SGAE d'échelle synoptique ou régionale

Un SGAE combine une aire de déflation, où le vent prend en charge des particules selon sa compétence, une aire de transport le long de laquelle s'opère un transfert de matériel et où peuvent déjà se former des dunes (barkhanes et sifs) et une aire d'accumulation. Cette dernière peut elle-même devenir aire de réexportation, c'est à dire aire source.

2.1.1. L'aire source.

Les sources du sable -qui peut être transporté par relais, pendant de longues durées et sur de longues distances - sont diverses :

- d'origine marine, comme nous l'avons vu sur le littoral du Balouchistan sur 600 km et sur le littoral atlantique du Sahara ou au Maroc, à Essaouira : le sable est balayé sur le rivage et transporté vers l'intérieur des terres;
- d'origine fluviale : vannage de nappes alluviales et matériel sableux d'oued dont une partie entre dans la compétence éolienne;
- d'origine glaciaire ou péri-glaciaire de matériel morainique;
- d'origine lithologique par ablation ou corrasion des roches dans les aires de transport elles-mêmes, surtout lorsque le substrat est gréseux.

2.1.2. L'aire de transport éolien.

Une série d'images Spot (1994) nous a permis de mettre en évidence des couloirs privilégiés de migration du sable le long desquels, par ignorance, des villes se sont installées; ainsi Nouakchot se trouve-t-elle sur un axe de cheminement éolien. Toute installation humaine sur un axe de transport éolien est rapidement ensablée.

Un grain de 200 μm parcourt selon Dresch (1982) 830 km par siècle. A l'interface sol-atmosphère, le vent transporteur de sable s'organise, comme l'eau, en chenaux d'écoulement hiérarchisés qui donneraient la tentation de parler de rivières de sable s'ils ne différaient des écoulements hydriques puisque, bien que canalisés par la topographie, ils n'ont pas de berges et peuvent, si les pentes au vent ne sont pas trop rigides, les remonter. 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 est l'escarpement du Kaouar, au coeur du Ténéré : l'erg du Ténéré s'arrête à l'amont

harmattan du relief, laisse la place au revers et à l'escarpement de grès et reprend à quelques kilomètres à l'aval d'une dépression de surcreusement éolien qui longe le pied sous le vent de l'escarpement. L'observation de l'image satellitaire Météosat du 3 janvier 1992 permet d'identifier un axe de cheminement éolien prenant naissance à la latitude de la dépression de Qattara (25 ° N, Egypte) avec une extension maximale atteignant l'écosystème soudano-guinéen.

Dans l'aire de transport, le long d'un même courant, le vent peut être ou non transporteur de particules : fluide transporteur et matériel transporté sont à envisager séparément. Dans les vents sahariens (alizé continental dit *harmattan*) 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.

Les sables des ergs du Sahara septentrional proviennent des produits de la décomposition des roches cristallines et des grès des Atlas, déposés pendant les phases pluviales dans les bas-pays sahariens par des oueds venus du nord de l'Atlas. Fluviatiles dans leur phase initiale de transport, ces sables sont ensuite remaniés par le vent et modelés dans le cadre des ergs. Les ergs sahariens sont vis à vis du sable des aires d'accumulation mais aussi des relais d'arrivée et de départ. Les éolisations successives remanient donc le même matériel. Le matériel des ergs du Sahara méridional et du Sahel aurait une triple origine : 1°- éolienne allochtone saharienne, 2°- fluvatile plus autochtone provenant des épandages d'oueds des massifs montagneux sahariens (Hoggar, Tibesti) ou sahéliens (Aïr, Adrar des Ifoghas) ou 3°- source mineure de la déflation de matériel de décomposition d'origine locale, par exemple les roches cristallines ou grès du nord de la Haute Volta. C'est ainsi qu'un même échantillon de sable peut contenir des grains dont le façonnement peut combiner un aspect fluvatile, éolien ou un subtil mélange de ces deux modes de transport. L'étude morphoscopique des sables du Koweït (vaste secteur d'épandage paléoclimatique) donne des résultats typiques de la combinaison de ces deux modes de transport.

2.1.3. L'aire d'accumulation. Elle peut être au terminus du SGAE mais aussi exister localement chaque fois que le vent rencontre une cause de freinage. Le vent transporteur de sable, face à une contre-pente suffisante pour annuler sa composante verticale 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 verticale. Cette dune d'écho augmentant de volume devient une dune remontante qui s'appuie sur le versant, franchit son sommet et en s'allongeant sur la face sous le vent forme une dune tombante qui en grandissant se transforme en dune linéaire (ou sif).

Champs de dunes et nappes sableuses à topographie indifférenciée sont les deux types d'accumulation sur de vastes superficies. Il nous apparaît que les nappes ne sont pas des formes originelles de dépôt mais un stade où les dépôts initiaux ont déjà subi un aplanissement lors de fluctuations climatiques qui représentent des actions de longue durée, différentes des actions anthropiques qui ont un impact à court terme et peuvent amener des réactivations rapides.

Le danger lié aux effets du vent est surtout perçu dans la phase d'accumulation, lorsque le sable envahit les aires d'activité humaine, ce qui n'est qu'une des

facettes du danger éolien, comme cela a déjà été signalé. Les risques existent également dans les aires d'érosion proprement dite (aires de déflation) et dans les aires de transport du matériel sableux. Il est utile de prendre conscience que ces trois types d'aires à dominante tantôt d'accumulation, tantôt d'érosion, tantôt de transport ont une organisation spatiale en Systèmes Globaux d'Action Eolienne (SGAE). Contrôler les effets du vent exige la reconnaissance du système dans sa totalité et la nécessité de diagnostiquer l'unité dans laquelle se trouve le secteur à protéger.

Au Sahara, des courants éoliens lient ces trois aires, le long desquelles sont disposés des ergs, qui, comme nous l'avons montré (Mainguet 1972) forment des chaînes d'ergs. Le long de ces courants se produit à long terme une dérive des sables à travers le Sahara vers le Sahel, dérive discontinue dans le temps et dans l'espace; dans le temps, elle est plus efficace pendant les phases sèches du climat lorsque les vents sont plus puissants; dans l'espace les aires rocheuses sans couverture sableuse la favorisent, les ergs ou champs de dunes la freinent.

Après l'étude des SGAE dans l'espace, leur place dans le temps s'éclaire par le schéma de Reichelt (1992) :

- étape 1 = extension maximale, au Pléistocène supérieur (entre 17 000 et 15 000 BP), du désert Ogolien, plus vaste que le Sahara actuel;
- étape 2 = période humide de l'Holocène, qui favorise une pédogénèse fixatrice des dunes et le développement d'une steppe herbeuse à arborée;
- étape 3 = réamorçage de la sécheresse vers 7000 BP. L'erg Ogolien fixé se réactive avec une accélération sous l'effet des pressions humaines. Nous pouvons replacer dans ce schéma notre propre théorie du bilan sédimentaire : aux étapes 1 et 2 le budget sédimentaire (BS) est positif, à l'étape 3 le BS devient négatif. Ceci nous semble en fait une des meilleures expressions de la désertification du Sahel, pour ceux qui cherchent à la prouver.

2.2. Définition d'un SGAE fermé ou ouvert

Un SGAE est un système dynamique, fermé ou ouvert :

- Dans un **SGAE fermé**, qui pourrait être qualifié d'endoréique, les particules sont importées et accumulées mais l'exportation est négligeable : le Taklamakan, en Chine, profond bassin entouré de hauts massifs montagneux, sources de son matériel, en est le plus vaste exemple (Mainguet et Chemin 1988). L'erg du Mourzouk dans sa moitié nord-ouest est un autre exemple, au Sahara.

- Un **SGAE ouvert** est un système qui, après importation et accumulation de particules, peut subir une ré-exportation : le système Sahara - Sahel en est le plus vaste exemple. Le Sahel a été pendant longtemps une aire d'accumulation de matériel éolien saharien, en partie, et de matériel fluviatile sahélien remanié. Mais lors de la dernière crise de sécheresse 1968-1985, aux effets de laquelle s'est ajoutée la dégradation engendrée par les activités humaines, le Sahel est devenu partiellement une aire d'exportation. Cette exportation est liée à la réactivation de secteurs autrefois pourvus d'une couverture végétale ouverte, certes, mais protectrice.

Un SGAE possède un amont et un aval. A l'échelle de l'ensemble Sahara-Sahel, l'amont du système est au nord du désert, avec les ergs nord sahariens -Ergs

Oriental et Occidental-, l'aval du système est constitué par les ergs vêtus du Sahel.

Dans le système éolien saharien les ergs sont disposés **en chaînes** le long de courants éoliens conformes à l'harmattan; ils sont reliés par des aires de transport où se produit un déplacement de sable par une saltation discontinue dans le temps et dans l'espace en dessinant des déviations et des subdivisions autour des méga-obstacles que sont les massifs montagneux.

Le SGAE saharien se divise en courants que nous avons détectés dès 1972 à la suite de l'étude du système de kaluts à l'est du Tibesti (Mainguet 1972) et qui se trouvent confirmés par les images satellites surtout de Météosat : une étude sur des documents du 20 mai 1972 au 25 janvier 1973 confirme que ces courants, conformes à l'harmattan, se divisent comme lui à la rencontre des méga-obstacles, principalement le massif Regueibat, de part et d'autre duquel ils traversent à l'ouest l'erg Iguidi, à l'est l'erg Chech, l'ensemble Hoggar-Tassili, le Tibesti et le Jebel Marra. Ces courants suivent donc les alizés continentaux NE-SO dans les zones arides et semi-arides; à la latitude du tropique du Cancer dans le Sahel leur direction devient ENE-OSO puis E-O. Cette déflexion dextre des courants éoliens peut être attribuée, près de l'équateur, à la force de Coriolis.

Le courant le plus occidental du Sahara court le long de la côte atlantique du SE du Cap Juby près de Tarfaya (Maroc) au SE du Cap Blanc (Mauritanie). De 800 km de long, il se compose d'un voile sableux mobile et de barkhanes pouvant atteindre une hauteur de 15 m -6 à 10 m en moyenne- et une largeur de 75 m -15 à 35 m en moyenne-, individualisées ou groupées (Querroum 1990). Favorisées par le substrat rocheux, les barkhanes se déplacent en moyenne de 25 m/an. La taille modale du sable est de 220 μm . A Layyoune, selon Oulehri (1990), le courant a 7,5 km de large et, entre 1980 et 1988, a déplacé 55 à 220 $\text{m}^3/\text{m}/\text{an}$, ce qui donnerait un total annuel de 0,4 à 1,6 millions de m^3 . Sarnthein et Walger (1974), estiment le volume de sable déplacé par le train de dunes, immédiatement au NE du Cap Blanc, sur une section de 80 km, à 93 000 m^3/an et la saltation 50 à 100 fois supérieure soit 50 à 70 -130 $\text{m}^3/\text{an} / 80 \text{ km}$.

La limite spatiale de l'érosion éolienne n'est pas facile à circonscrire : au nord du Sahara une étude complète de l'amorce des dépôts éoliens et de la spatialisation de l'aire de déclenchement du phénomène dunaire est encore à faire.

Le danger des activités éoliennes est à triple facette :

- danger par érosion, vannage et déflation, fuite des sols, exportation des composants fertiles
- danger par transport avec abrasion des végétaux, augmentation de l'ETP ou, exemple plus original, usure des rails de la voie ferrée de Mauritanie
- danger par accumulation sableuse ou invasion dunaire

3 - Pour le vent, carence dans l'analyse des processus

3.1. Le transport éolien

Dans la lutte contre l'érosion éolienne, il est impossible d'échapper à une

estimation scientifique, par la télédétection et les méthodes de sédimentologie, des modes de transport éolien et du volume de particules déplacées. Deux ateliers internationaux sur la *Physique de prise en charge et de déplacement éolien du sable*, se sont tenus à l'Université d'Aarhus, au Danemark, en 1985 et en 1990, permettant une meilleure compréhension de ces problèmes.

Le transport éolien se fait selon deux échelles :

3.1.1.. Le mouvement des particules grain par grain

Les modes de transport éolien ont été rangés en quatre types redéfinis par Anderson et autres (1988, 1990) :

- la **traction**, ou **roulage** (*creeping* pour les Anglo-Saxons), lorsque les particules, trop lourdes pour être soulevées, sont mobilisées par roulage sur la surface; ce mode de déplacement peut probablement mouvoir des galets et des blocs par ripage;

- la **reptation**, intermédiaire entre le roulage et la saltation, implique un court et bref saut des particules;

- la **saltation** est une forme de transport éolien par bonds. Elle est amorcée soit par une pression directe sur les grains, soit par l'impact, lors de leur chute, des autres grains en saltation.

Lors de la saltation, les grains sont soulevés obliquement et transportés, avant de retomber presque verticalement; ils dessinent ainsi des bonds et, en retombant, éjectent d'autres grains; il y a un phénomène d'auto-entretien. Avant d'être soulevé, le grain vibre dans une position stationnaire; la vitesse critique de détachement doit être supérieure à la force de friction entre les grains. La vitesse de détachement (u^*t) est minimum pour les particules de 0,08 à 0,1 mm (fig. 20), expliquant la vulnérabilité des loess -dont les particules ont précisément un mode de cette taille- vis à vis de l'érosion éolienne.

Selon Bagnold (1941) :

$$u^*t = A \left(\frac{\phi_s - \phi}{\phi} g D \right)^{1/2}$$

où: ϕ_s = densité de l'air

ϕ = densité des grains

g = accélération de la pesanteur

D = diamètre équivalent du grain

A = coefficient empirique dépendant de la fonction du nombre de Reynolds $u^*D\nu$

u^* = vitesse de friction

ν = viscosité cinématique de l'air.

Un grain soulevé verticalement par de l'air en mouvement rencontre une résistance de direction opposée à celle de cet air. Durant la saltation le grain se meut en rotation et retombe selon un angle α donné par l'équation de Bagnold :

$$\frac{V^*}{V} = \tan \alpha$$

où: V^* = vitesse terminale de chute de grain (m /s)
 V = vitesse de l'air (m /s)
tan = tangente

Lors de la saltation la texture du substrat intervient : un substrat cohérent favorise la saltation, alors qu'un substrat meuble la freine. Le nuage de grains en saltation atteint une hauteur de 10 cm à 1 m et même 2 m sur une surface de galets; ces chiffres varient selon le degré de rugosité de la surface, avec une densité maximale entre 9 et 60 cm; la saltation est la plus dense entre le sol et 25 cm au-dessus du sol; c'est dans cette tranche aussi que l'agressivité du vent vis à vis des végétaux est maximale, la partie basse des plantes est susceptible d'être la plus endommagée. Dans les dunes les graminées possèdent souvent à leur base de nombreuses feuilles séchées protectrices. Ces observations confirment le pouvoir abrasif donc traumatisant des particules en saltation sur les végétaux bas.

- La **suspension**, mécanisme de transport des poussières, est le mode qui permet aux particules fines terrigènes d'atteindre 3000 m d'altitude et de parcourir des distances intercontinentales. Il y a mise en suspension lorsque la vitesse des fluctuations verticales associées aux turbulences de l'air est supérieure à la vitesse de retombée des grains

$$W_f = K d^2 \text{ (Loi de Stokes)}$$

où d : diamètre, K : $\rho_s g / 18 \mu$

et où ρ : densité du grain, g : accélération, μ : viscosité de l'air

3.1.2. Le mouvement du sable sous forme collective de dunes :

- migration dunaire : édifices barkhaniques et barkhanes,
- élongation des dunes : les dunes linéaires ou sifs.

3.2. Profil vertical du vent

Beaucoup de travaux ont été réalisés au niveau de la **prise en charge de la particule** et sur le profil vertical du vent à l'intérieur de la couche limite. Le vent est un écoulement turbulent dont la vitesse moyenne à l'intérieur de la couche limite varie avec l'altitude suivant une loi logarithmique pour une atmosphère stable c'est à dire avec une température potentielle uniforme sur la hauteur de la couche limite :

$$U(z) = 5,75 U^* \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

avec z = hauteur en mètres,
 z_0 = rugosité en mètres,
 $U(z)$ = vitesse moyenne à la hauteur z (m/s)
 U^* = vitesse de frottement (m/s)

La rugosité de surface z_0 correspond à la hauteur en dessous de laquelle la vitesse du vent semble nulle. Elle est fonction de l'état de surface (présence de végétation, d'habitations, ...) et est indépendante des forces du vent. Cependant la rugosité ne correspond pas à la hauteur des obstacles; elle est approximativement

égale au 1/30 du diamètre des grains qui constitue la surface.

La vitesse de frottement U^* a effectivement la dimension d'une vitesse mais est

simplement un symbole mathématique ayant pour expression $\sqrt{\frac{\Gamma_p}{\rho}}$

avec Γ_p contrainte exercée par le vent sur la surface du sol et ρ densité de l'air

Lorsque la vitesse du vent dépasse une valeur seuil, la force de frottement qu'il exerce sur les particules est responsable de la mise en mouvement des particules, soit U^*_t : force de frottement seuil

Hormis tous ces travaux sur ces données, il subsiste de nombreuses lacunes graves :

- au niveau des **dunes** elles-mêmes et de leurs relations avec le vent : classification des dunes selon leur dynamique
- au niveau des **champs de dunes** : aires dunaires rassemblant des dunes de même types,
- au niveau des **ergs** rassemblant des dunes de types différents,
- et au niveau des **chaines d'ergs**.

Les travaux du Laboratoire de Géographie Zonale portent depuis 1973 sur toutes ces questions.

3.3. Propositions pour la classification des dunes

On peut distinguer :

- i - Les dunes de piégeage des particules éoliennes par un végétal :
 - nebkas et rebdous;
- ii - les dunes intermédiaires entre transport et dépôt :
 - dunes linéaires (sifs),
 - barkhanes et édifices barkhaniques;
- iii. - les dunes de dépôt :
 - édifices transverses : chaînes barkhaniques et chaînes transverses, lorsque le sable est disponible en abondance.
 - dunes pyramidales (ghourds),
- iv. - les dunes d'érosion :
 - dunes longitudinales et dunes paraboliques.

L'envahissement par les dunes est considéré comme le danger majeur dû aux effets du vent; il est indispensable de connaître leur dynamique afin d'être en mesure de juguler les différents types de danger qu'elles représentent. Pour rendre la réponse plus claire, nous proposons une classification des dunes selon les différents paramètres qui gèrent leur dynamique.

3.4. Classification des dunes selon le degré d'activité de surface

Les dunes peuvent être rangées en trois familles selon le degré de mobilité du sable : dunes actives, dunes fixées, dunes stabilisées.

Le terme de **dune active**, ou **dune vive**, est réservé aux édifices éoliens mobiles

ou à matériel mobilisable, indépendamment de la taille des particules (il existe des dunes d'argile, de limon, de sablon, de sable ou des quatre tailles mélangées) ou de la nature minéralogique des grains.

Un édifice sableux perd ses caractéristiques de dune vive et devient une **dune fixée** dès qu'interviennent des mécanismes pédogénétiques (prise en masse ou agrégats), par exemple lorsque les particules sont agrégées par de l'oxyde de fer ou de la silice, ou encroûtées par du gypse ou des carbonates. Une fixation mécanique naturelle peut résulter d'un vannage qui laisse à la surface des édifices un pavage de grains grossiers de taille supérieure à la compétence éolienne.

Les **dunes stabilisées** par une couverture végétale constituent la troisième famille ; ce sont les dunes du Sahel au sud du Sahara et du Rajasthan. Lorsque se produisent des changements de climat ou des dégradations par suite de surexploitation, un processus de réactivation intervient sur ces dunes.

Dans les aires de dunes continentales, la limite dunes vives/dunes fixées (ou à couverture végétale) correspond à l'isohyète 100 mm/an lorsque les précipitations sont de saison froide et à celle de 150 mm/an lorsque les précipitations sont de saison chaude, c'est à dire de juin à septembre pour le Sahel. Les dunes vives n'existent pas naturellement lorsque les pluies sont supérieures à ces valeurs; elles ne résulteraient alors que de dégradations engendrées par l'homme, majorées par les sécheresses. Leur sable devenu mobilisable, ces dunes auparavant fixées se transforment en réservoirs de particules dispersables par le vent et constituent un danger potentiel pour les exploitations humaines situées à l'aval-vent.

3.5. Classification des dunes selon le régime éolien

En 1931, Aufrère propose une classification dynamique des dunes selon le régime éolien et distingue :

- les **vents en conjonction** : ce régime correspond à une direction dominante; il est appelé par Fryberger **unimodal resserré** lorsque dans un régime unimodal les vents sont situés dans une fourchette étroite ou **unimodal dispersé** lorsque la fourchette est large, c'est le régime des alizés. Un régime monodirectionnel peut comporter des vents de diverses directions mais seule une direction possède des vents efficaces c'est à dire ayant la capacité de prendre en charge des particules. Pour des sables éoliens typiques la vitesse de prise en charge se situe entre 3,5 et 4 m/s.

- les **vents en opposition** : régime qui correspond à deux directions dominantes faisant entre elles un angle de 180° : le *chergui* et le *sahéli* du Maroc méridional, l'*alizé* et le *sirocco* des sud algérien et tunisien, la mousson et l'*alizé* du Sahel, par exemple;

- les **vents incidents** : ce sont les **régimes bi-directionnels** ou localement les régimes monodirectionnels subdivisés par les obstacles topographiques. Fryberger (1979) les appelle bimodal aigus ou obtus;

- les **vents multidirectionnels** : ce sont des régimes complexes qui comportent au moins trois directions dominantes.

3.6. Classification des dunes selon le bilan sédimentaire

Préalable utile pour définir le type de dune et partant de la stratégie de combat adaptée à la dégradation liée aux actions éoliennes, nous avons proposé (Mainguet 1984, Mainguet et Chemin 1985), pour définir la dynamique des aires sableuses (dunes, champs de dunes, ergs) la notion de **bilan sédimentaire sablo-éolien**, :

- **bilan sédimentaire positif (BS +)** lorsque, dans un secteur soumis à des vents porteurs de particules sableuses, le dépôt est quantitativement plus élevé que l'exportation;

- **bilan en équilibre** : lorsque l'arrivage et le départ de particules s'égalisent;

- **bilan sédimentaire négatif (BS -)** lorsque, dans un secteur soumis à des vents porteurs de particules sableuses, la déflation et l'exportation sont supérieures à l'apport.

Tableau 2 : **BILAN SEDIMENTAIRE ET TYPES DE DEPOT**

BILAN SEDIMENTAIRE	1. POSITIF APPORT > DEPART <i>Accumulation dominante</i>	2. NEGATIF APPORT < DEPART <i>Déflation dominante</i>
REGIME EOLIEN	TYPES DE DUNES	TYPES DE DUNES
Un vent dominant	- Edifice barkhanique - Barkhane - Chaîne barkhanique - Dune transverse	- Dune longitudinale (à pavage de type reg) - Edifice parabolique (genèse en milieu à couverture végétale).
Deux vents dominants	- Dune linéaire (sif)	
Trois ou plus de trois directions éoliennes	- Dune en pyramide (ghourd)	

La notion de bilan sédimentaire permet de classer l'ensemble de tous les édifices éoliens en **deux familles** (tableau 2) :

- **les dunes de dépôt** lorsque le bilan sédimentaire est positif; ce groupe de dunes se range en trois sous-familles : les dunes transverses dans un régime éolien monodirectionnel, les dunes linéaires (sifs), réponse à un régime bi-directionnel et les dunes en pyramides, réponse à un régime tri- ou multi-directionnel.

- **les dunes d'érosion** lorsque le bilan est négatif; dans cette famille des dunes de déflation, deux sous-familles : les dunes longitudinales et les édifices paraboliques.

Si la genèse de dunes que nous avons appelées dunes de dépôt par accumulation de sable est tout à fait admise, ce n'est pas encore le cas des dunes d'érosion, résultant d'une déflation prépondérante dans une aire sableuse.

Toutes les dunes se rangent donc selon le bilan sédimentaire combiné au régime éolien et se classent en fonction du degré de mobilité de leurs particules.

Deux types de dunes occupent une place à part et peuvent être envisagés comme des **édifices de transport** : les **barkhanes**, croissants de sable qui se meuvent dans leur totalité et les **sifs** ou dunes linéaires, édifices le long desquels le sable migre comme le long d'un rail de transport; le danger qu'elles représentent pour l'homme réside dans leur allongement, qui n'est pas toujours facile à circonscrire.

4. Rappel de quelques grandes questions de recherche fondamentale non résolues

4.1. Relations entre les dépôts sableux, le climat et la couverture végétale

Les épisodes d'accumulation de sable et de genèse de dunes sont souvent interprétés comme synonymes d'épisodes arides ou hyperarides. Une telle affirmation ne peut plus être admise et doit être fortement critiquée. En effet, comme en témoignent toutes les phases de sécheresse observées au XX^e siècle, à chaque période de sécheresse accrue correspond une activité éolienne accrue avec des vents majorés et une exportation du sable hors des domaines concernés et non une accumulation de particules.

De plus on observe que 1/5^e du Sahara est couvert de sable alors que les couvertures actuelles les plus épaisses sont à sa bordure sahéenne méridionale. Il est donc aussi nécessaire de confronter l'accumulation éolienne avec le freinage des vitesses du vent et la densité des couvertures végétales.

Les relations entre les changements régionaux des champs de pression atmosphérique, la déflation, le transport et l'accumulation éolienne ne sont pas connues et l'affirmation qu'aux aires de hautes pressions persistantes correspondent des aires de dépôts doit être discutée.

4.2. Développement des ergs et topographie

Pourquoi l'accumulation sableuse se fait sous forme de voile sableux, de couverture sableuse épaisse, de dunes isolées ou de champs de dunes et d'ergs n'est pas expliqué. Beaucoup d'auteurs affirment que les grands ergs sont localisés dans les bassins. Cette affirmation est à vérifier. Même si elle se vérifie, dans le cas du Taklamakan, bloqué dans un bassin intra-montagnard de Chine, cette affirmation est tout à fait fautive pour les ergs du bassin de l'Aral, Karakoum et Kyzylkoum, respectivement à l'est et au sud du lac Aral, sur une pente se relevant doucement vers le sud. Le Grand Erg Occidental et le Grand Erg Oriental, au nord du Sahara, ne sont pas plus dans des bassins. Les ergs du bassin du Tchad

sont tous à une altitude supérieure à la dépression du Bodélé, au nord-est du lac Tchad qui n'est lui-même que la seconde aire la plus basse du bassin du Tchad. Il semble même que les dépressions localisées sous le vent de couloirs éoliens actifs aient tendance à subir un surcreusement éolien, la dépression du Bodélé pouvant elle-même être interprétée comme une dépression éolienne.

4.3. L'orientation des dunes et le concept de Budget Sédimentaire (BS)

Dans les ergs, à partir d'aires dunaires d'orientations différentes, certains ont cru pouvoir diagnostiquer plusieurs épisodes secs sans prendre en compte la notion de budget sédimentaire. En effet, un même erg peut juxtaposer des aires alimentées en sable tandis que d'autres sont en phase de budget sédimentaire négatif, c'est à dire de perte en sable; c'est le cas du Grand Erg Oriental, alimenté en sable au nord avec un budget sédimentaire positif exprimé par des édifices sableux transverses, tandis que la partie sud se démaigrît, avec un BS - exprimé par des cordons longitudinaux. En effet, à un BS + d'apport dominant de sable répondent des édifices à disposition transverse tandis qu'une aire d'exportation est formée d'édifices longitudinaux et paraboliques, à BS -.

La conception d'un projet de lutte contre l'érosion éolienne (dont les méthodes peuvent être mécaniques, biologiques ou chimiques) doit, pour être menée avec efficacité, intégrer cette notion de globalité du Système Eolien.

Le volet **Méthodes mécaniques et biologiques de lutte contre l'érosion éolienne** devrait être traité dans un second temps et constitue un autre aspect clé de l'érosion éolienne.