

les Barbades entre 1967 et 1973, a été attribuée à la sécheresse qui sévissait alors au Sahel [56, 57]. Ces poussières proviennent, pour l'essentiel, du Sahara et, plus particulièrement semble-t-il, du nord de la cuvette tchadienne où d'importants dépôts lacustres secs subissent une forte déflation. La quantité et la taille des poussières déposées en Afrique de l'Ouest varient en fonction de la distance à ces zones sources [58]. Pour le Sahel, Orange et Gac [59] estiment ces dépôts à environ 2 t/ha/an - soit une épaisseur de 0,2 mm - dont la moitié serait remobilisée par le vent. Comme ces poussières sont constituées de 82 (au nord du Nigeria [60]) à 97,5 % (à Dakar, [59]) d'argile et de limon, ces apports éoliens peuvent constituer l'une des sources majeures d'éléments fins - et donc de fertilité chimique, surtout en calcium et phosphore - pour les sols sableux du Sahel. Ceci expliquerait, au moins en partie, pourquoi les jachères sahéliennes, à l'inverse des jachères de régions humides [16], présentent fréquemment un pourcentage élevé de croûtes d'érosion [61]. Le travail du sol (notamment les sarclages répétés) tend à appauvrir le sol en éléments fins, et donc à réduire les risques d'encroûtement, voire à les supprimer si les teneurs en argile et limon deviennent inférieures à 5%. A l'inverse, la reconstitution du couvert et l'absence de remobilisation par le travail du sol favoriseraient, dans les jachères, les dépôts de poussière, une augmentation de fertilité chimique, mais aussi un risque d'encroûtement superficiel, donc de ruissellement et d'érosion hydrique.

Conclusion

Ces dernières observations nous conduisent à souligner les très fortes interactions entre sécheresse, encroûtement superficiel, érosions hydrique et éolienne. En un même lieu, les particules disjointes sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie constituent une croûte structurale dont une partie des constituants demeure sur place pour former une croûte d'érosion, l'autre étant mobilisée par l'érosion hydrique en saison des pluies, l'érosion éolienne en saison sèche. En désagrégant les mottes de terre, la pluie prépare l'érosion éolienne. Ces relations se manifestent à de plus vastes échelles de temps et d'espace [62]. Ainsi, l'érosion hydrique du dernier épisode pluvieux, il y a 5 000 à 6 000 ans, a produit des quantités importantes de sédiments bien triés qui se sont accumulés dans des cuvettes continentales. Depuis le début de la phase

actuelle, plus aride, ces sédiments transportés sous la forme de poussières viennent enrichir en éléments fins les dépôts éoliens beaucoup plus sableux de l'épisode aride précédent (entre 20 000 et 12 000 ans BP), y favorisant ainsi l'encroûtement superficiel et l'érosion hydrique.

En savane humide, les espaces entre les touffes n'occupent que quelques décimètres carrés. Au Sahel, les surfaces encroûtées qui séparent les microbuttes sableuses enherbées couvrent couramment plusieurs centaines de mètres carrés. Au Sahara, le maillage régional oppose les grandes plaines argileuses aux dunes et aux regs. Cet accroissement de la maille d'hétérogénéité de la surface du sol avec l'aridité croissante du milieu reflète une intensification des processus de réorganisation superficielle et d'érosion.

Résumé

En dépit de la diminution de la pluviosité annuelle observée au Sahel depuis la fin des années 60, les pluies les plus intenses, et donc les plus érosives, n'ont pas connu la même raréfaction. Elles provoquent la destruction des agrégats à la surface du sol. Les produits de cette désagrégation se trouvent soit entraînés par le vent ou le ruissellement, soit réorganisés sur place, ou à faible distance, pour former une croûte superficielle. Du fait de la diminution du couvert végétal et des teneurs en matière organique des sols, la sécheresse s'est accompagnée d'une nette extension de ces croûtes. Bien que naturels, ces processus se sont accélérés sous l'effet des activités humaines. Le décapage des horizons superficiels et la mise à l'affleurement des horizons gravillonnaires se manifestent particulièrement dans les zones surpâturées ou dans les parcours défrichés pour la mise en culture. L'extension des croûtes superficielles a provoqué une augmentation des coefficients de ruissellement, qu'ils soient mesurés à l'échelle du m² ou à celle des petits bassins versants. De même, la sécheresse a favorisé l'augmentation des érosions ravinante et éolienne et, par voie de conséquences, de la fréquence des brumes sèches. De fortes interactions relient ces processus d'encroûtement superficiel et d'érosions hydrique et éolienne.

À certains égards, l'encroûtement superficiel constitue l'un des éléments d'adaptation du milieu à la sécheresse. Le ruissellement qu'il favorise permet la concentration des ressources, condition indispensable à la survie de la végétation ou au maintien des activités agricoles.

S'il est avéré que la sécheresse au Sahel a provoqué une augmentation de l'encroûtement superficiel, par érosions hydrique et éolienne, il n'en demeure pas moins que dans les régions peu peuplées, la plupart de ces processus restent réversibles. A l'inverse, les dégradations des sols les plus graves s'observent dans les régions les plus denses [63, 64]. Il est donc fort probable au cours des prochaines décennies, que des deux volets climatique et anthropique du « changement global », ce soit le dernier qui revête la plus grande importance vis-à-vis de l'érosion.

Summary

Although annual rainfall has decreased in the Sahel since the late sixties, the same has not applied to erosive, high-intensity rainfall. These intense storms result in slaking of surface soil aggregates. The detached particles are either removed by wind or water erosion or rearranged within a short distance to form a surface crust. Along with drought and the decline in plant cover and soil organic matter content, these crusts have spread considerably. The processes involved, albeit natural, have been accelerated by human activities. The removal of top-layers and subsequent exposure of the gravelly layers beneath is mostly found in areas where the land has been overgrazed or cleared for cultivation. The spread of crusts has triggered off an increase in runoff coefficients, no matter what the scale of measurement: from 1 m² to small watershed. Similarly, drought has also resulted in increased rill and wind erosion and hence the frequency of dust haze. These processes - surface crusting, water and wind erosion - are all closely interlinked.

Érosion éolienne au Sahel et sécheresse

Dans le système « vent-sécheresse-sol », l'approche se fait à trois échelles. Tout d'abord au niveau du sol et de sa physique, par la modification des propriétés mécaniques, hydriques, chimiques et minéralogiques. À moyenne échelle ensuite, par la disparition de la végétation et la mobilisation des sables par le vent. À l'échelle globale enfin, où, du fait de l'accentuation de la déflation et de l'augmentation des poussières dans l'atmosphère, le système participe fondamentalement au processus de désertification.

Parmi les différents processus érosifs agissant à la surface de la Terre, l'érosion éolienne est à la fois très répandue mais aussi assez méconnue. À l'interface terre/atmosphère, les mécanismes de l'érosion éolienne sont plus difficiles à identifier que ceux de l'érosion hydrique. En effet, dans les domaines caractérisés par la sécheresse, les mesures sont moins fréquentes pour le vent qu'elles ne le sont ailleurs pour la pluie, alors que la végétation, même clairsemée, introduit une rugosité de surface souvent complexe à préciser et que les sols, avec leurs multiples états de surface, se comportent de manière variée sous l'effet du vent. Aussi, il serait vain de vouloir hiérarchiser l'ensemble des paramètres du système « vent-sécheresse-sol » qui, pour les uns, définissent l'érosivité du vent et, pour les autres, l'érodibilité du sol dans le milieu sec. Il importe donc, dans l'état actuel des connaissances, de faire avant tout un état de la question.

Les deux principaux effets de l'érosion éolienne sont la déflation entraînant mobilisation et déplacement des particules, et l'accumulation, souvent temporaire, du matériel transporté. Les manifestations les plus tangibles de cette érosion concernent le mouvement des sables,

phénomène immédiatement discernable, souvent préjudiciable pour l'homme et ses activités. Aussi, la mobilisation et le transport des sables ont-ils été bien plus étudiés que ceux des particules plus fines déplacées par le vent. Pourtant, lors de la déflation, la totalité du matériel mobilisable est prise en charge par le vent, des plus fines poussières aux grains de sable les plus grossiers.

Or, la sécheresse intervient à tous les niveaux d'explication du phénomène « érosion éolienne *sensu stricto* » (figure 1). Dans le domaine du végétal, elle contribue à la raréfaction et à la disparition de l'arbre, du couvert herbacé et agit enfin au niveau de la matière organique des sols. La disparition de tout obstacle végétal fait ainsi évoluer la rugosité de surface qui, peu à peu, diminue jusqu'à offrir au vent son plus grand *fetch* et favoriser sa plus grande efficacité. De même, dans le domaine du minéral, la sécheresse intervient au niveau de l'organisation physique du sol, de sa structuration et même de sa texture. Enfin, l'évaporation, exacerbée par le vent, joue aussi son rôle dans la cristallisation des sels et la précipitation d'éléments chimiques, induisant un comportement spécifique des sols vis-à-vis de la déflation.

GENEVIÈVE
COUDÉ-GAUSSEN

CREGEPE
Université de Caen
14032 Caen cedex, France

Références

1. Bagnold RA. *The physics of blown sand and desert dunes*. Londres : Methuen, 1941 ; 265 p.
2. Gillette DA, Blifford IH, Fenster CR. Measurements of aerosol size distribution and vertical fluxes of aerosols on land subject to wind erosion. *J Appl Meteor* 1972 ; 11 : 977-87.
3. Chepil WS. Soil conditions that influence wind erosion. *US Dept Agri Tech Bull* 1958 ; 1185.
4. Pye K, Soar H. *Aeolian sand and sand dunes*. Londres : Unwin Hyman, 1990 ; 396 p.
5. Rognon P, Druilhet A, Ide H, Coudé-Gaussen G, Poncet Y, Chapuis A. Attempt to correlate vegetation and soil surface conditions with turbulence in the process of dust rise in the Sahel (Tillabéri, Niger). In : Schwartz, Slinn, eds. *Precipitation scavenging and atmosphere exchange*. Washington : Hemisphere Publishing Co, 1992 ; vol. 2 : 885-96.
6. Chepil WS, Woodruff NP. The physics of wind erosion and its control. *Adv Agron* 1963 ; 15 : 211-302.
7. Wilson SJ, Cooke RU. Wind erosion. In : Kirby, Morgan, eds. *Soil erosion*. 1980 : 217-51.
8. Greeley R, Iversen JD. *Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan*. Cambridge : Cambridge University Press, 1985 ; 333 p.
9. Logie M. Influence of roughness elements and soil moisture on the resistance of sand to wind erosion. In : Yaalon, ed. *Aridic soils and Geomorphic processes*. *Catena suppl* 1 1982 : 161-73.
10. Wolfe SA, Nickling WG. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progr Physic Geogr* 1993 ; 17 : 50-68.
11. Van Bavel CHM, Fritschen LJ. Energy balance of bare surfaces in arid climate. In : Eckardt, ed. *Methodology of plant eco-physiology*. Paris : Unesco, 1965 : 99-107.
12. Chepil WS. Dynamics of wind erosion : I-Nature of movement of soil by wind. *Soil Sci* 1945 ; 60 : 305-20.
13. Chepil WS. Properties of soil which influence wind erosion : V-Mechanical stability of structure. *Soil Sci* 1951 ; 72 : 465-78.
14. Marshall JK. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution. *Agric Meteorol* 1971 ; 8 : 269-92.
15. Gillette DA, Stockton PH. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces. *J Geophys Res* 1989 ; 94 : 12885-93.
16. Smalley IJ. Cohesion of soil particles and the intrinsic resistance of simple soil systems to wind erosion. *J Soil Sci* 1970 ; 21 : 154-61.
17. Bisal F, Hsieh J. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Sci* 1966 ; 102 : 143-6.

L'érosivité : les facteurs aérologiques de l'érosion éolienne

Pendant longtemps, il y a eu, à propos de l'action érosive du vent, un grand retard méthodologique dans le domaine des mesures de terrain, ce qui explique le peu d'intérêt porté à son étude. Les recherches se sont surtout limitées à des modèles expérimentaux en soufflerie, après les travaux fondamentaux de Bagnold commencés dès 1935 [1] et dont les principaux acquis n'ont pas été, depuis, remis en cause. Il a fallu attendre les années 70, avec les recherches de

Gillette [2], pour que l'expérimentation passe du laboratoire au terrain et que des préoccupations d'ordre agronomique sensibilisent l'opinion scientifique à l'érosion éolienne des sols.

Le vent : un fluide en écoulement

De manière théorique, les principes mécaniques qui régissent le rôle du vent en tant que facteur de l'érosion éolienne relèvent de la dynamique des fluides. Le vent est un écoulement de l'air dont la dynamique varie (parmi d'autres paramètres comme la pression ou la température) en fonction de la distance au sol et des inégalités de surface (rugosité) de ce dernier.

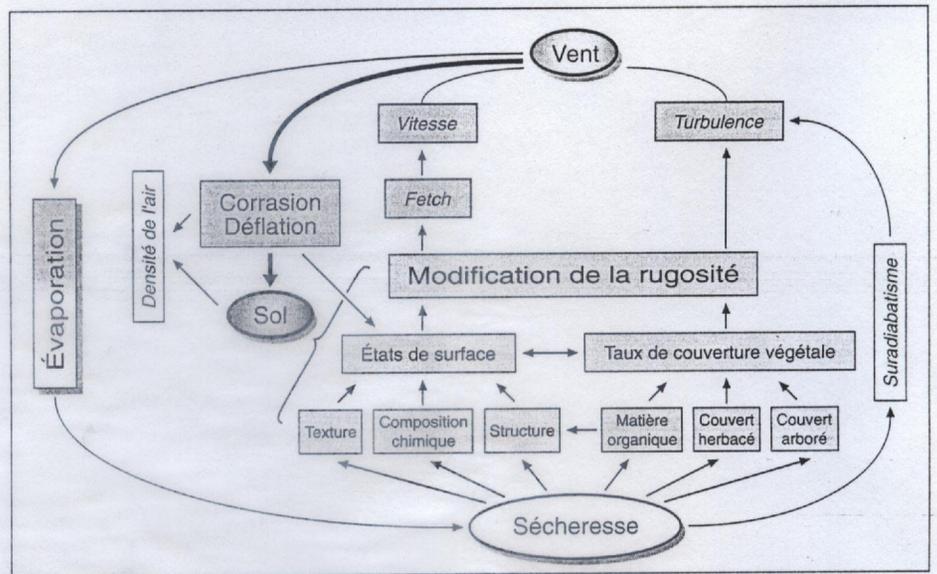


Figure 1. Les composantes de l'érosion éolienne dans le système « vent-sécheresse-sol ».

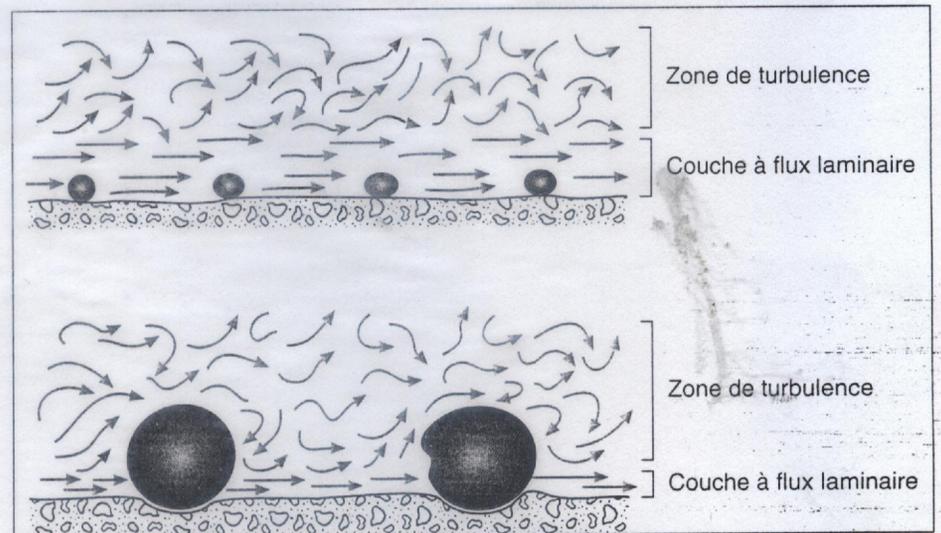
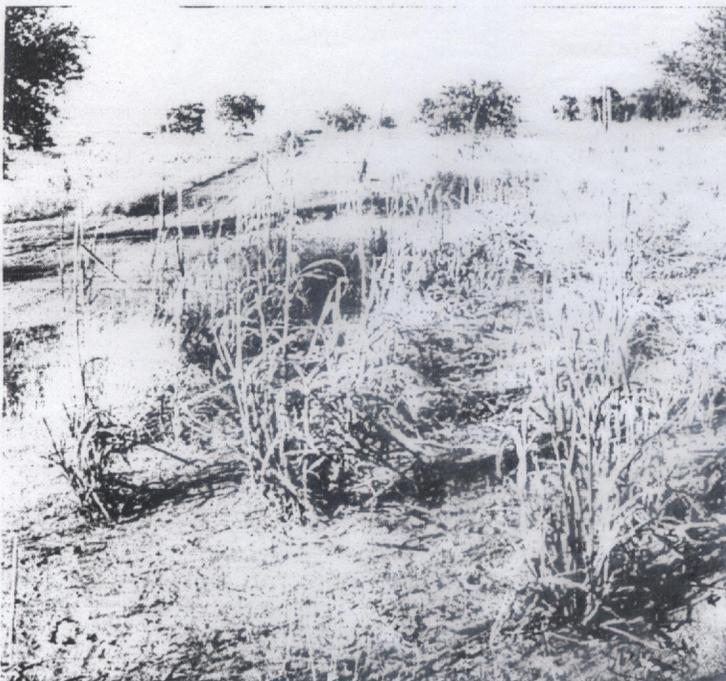


Figure 2. Types d'écoulement de l'air sur des particules reposant sur le sol (d'après Chepil [3] ; Pye et Soar, [4] modifiés).



▲ Photo 1. Des arbres dans la savane (Niamey, Niger).

▼ Photo 3. La rigidité des plants de mil alignés (Tillabéri, Niger).



▼ Photo 5. Un recouvrement caillouteux du sol (île de Sal, Cap-Vert).



▲ Photo 2. Le couvert ras de la steppe (confins du Grand Erg Oriental, Tunisie).

Planche 1. La rugosité à diverses échelles d'approche : une grande variété des états de surface rencontrés par le vent.
(Clichés G. Coudé-Gaussen)



▲ Photo 4. La flexibilité des graminées (Tillabéri, Niger).

▼ Photo 6. Un sol nu (Mari, Niger).



Si on considère de l'air s'écoulant sur une surface lisse, le mouvement général des molécules peut s'effectuer régulièrement en filets parallèles à cette surface : c'est un écoulement laminaire. Si les filets d'air s'enchevêtrent, s'enroulent sur eux-mêmes, etc., il s'agit d'un écoulement turbulent.

Dans la couche limite, à cause de la viscosité, on observe un ralentissement de la vitesse du vent à l'approche de la surface du sol. Sur une épaisseur infime au-dessus du sol, l'écoulement est laminaire (sous-couche laminaire) et au contact même de la surface, la vitesse s'annule par adhérence. Au-dessus, l'écoulement est turbulent. Aussi, compte tenu du fait que le vent se traduit, en milieu naturel, par un écoulement essentiellement turbulent, on pourrait être amené à négliger le rôle de la sous-couche laminaire dans le processus initial d'érosion du sol. Mais ce serait oublier que la mobilisation

du matériel par le vent concerne des particules souvent de très petite taille (argiles, limons et sables fins) qui peuvent être totalement immergées dans le flux laminaire (figure 2) [3, 4].

Les composantes du vent

Classiquement, on a pratiqué la mesure du vent moyen (V_m), surtout de sa direction longitudinale (U'). Or, si l'étude de la direction horizontale est importante pour l'aviation (orientation des pistes) ou pour combattre le risque d'ensablement (orientation des brise-vent), son intérêt est moindre pour l'érosion des sols. En revanche, les composantes transversales (V') ou verticales (W') du vent sont très importantes, mais n'ont été mesurées que depuis peu pour des raisons techniques [5]. En conséquence, la turbulence du vent, qui s'exprime dans ces trois dimensions et dont l'action est pri-

mordiale pour la mobilisation des particules, a longtemps été méconnue elle aussi, ayant donné lieu plus à des considérations théoriques qu'à de réelles mesures, en particulier dans le cadre de la théorie de similitude.

En fait, la turbulence correspond à des variations de vitesse extrêmement rapides que l'on commence à mesurer. Sa variabilité nécessite en effet des capteurs-enregistreurs à très haute fréquence (par exemple, 4 096 points pour 3 mn d'enregistrement), mais aussi des moyens informatiques puissants capables de traiter le plus grand nombre de données [5]. La turbulence peut être dynamique, allochtone, liée aux variations des champs de pression. Elle peut être statique, liée à la présence d'obstacles fixes (microreliefs, façons culturales, arbres...) ou flexibles (graminées, cultures). Enfin elle peut être thermique, ce qui est l'état le plus spécifique des do-

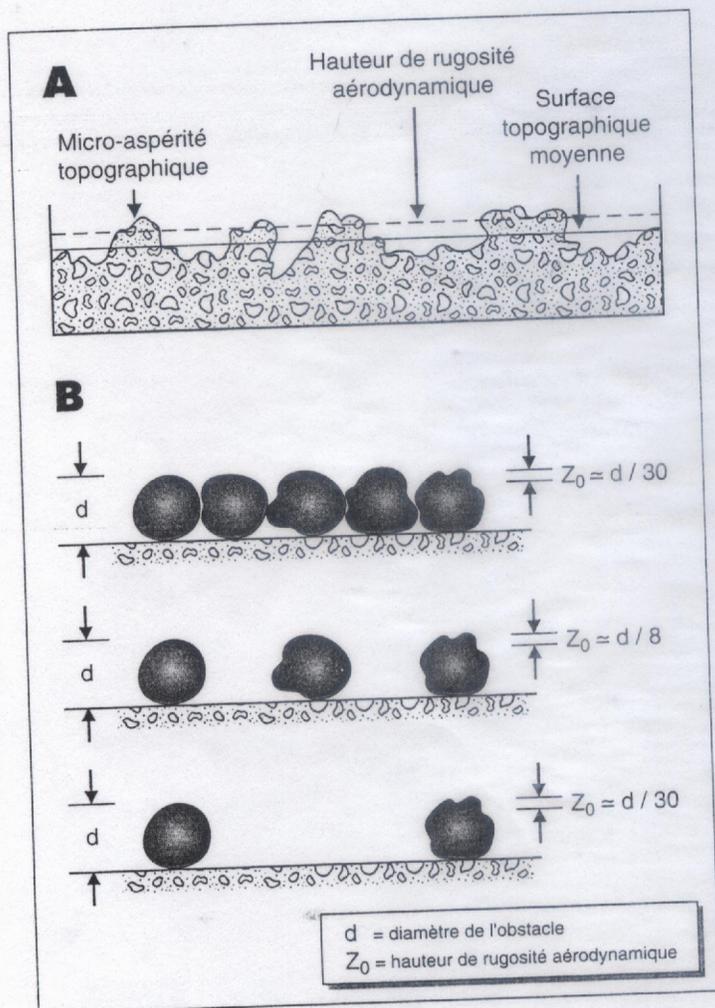


Figure 3. A/ Incidence des micro-aspérités du sol sur la surface aérodynamique (d'après Chepil et Woodruff [6] modifié). B/ Rôle de l'espacement des obstacles au sol sur la hauteur de rugosité aérodynamique (d'après Greeley et Iversen [8] modifié).

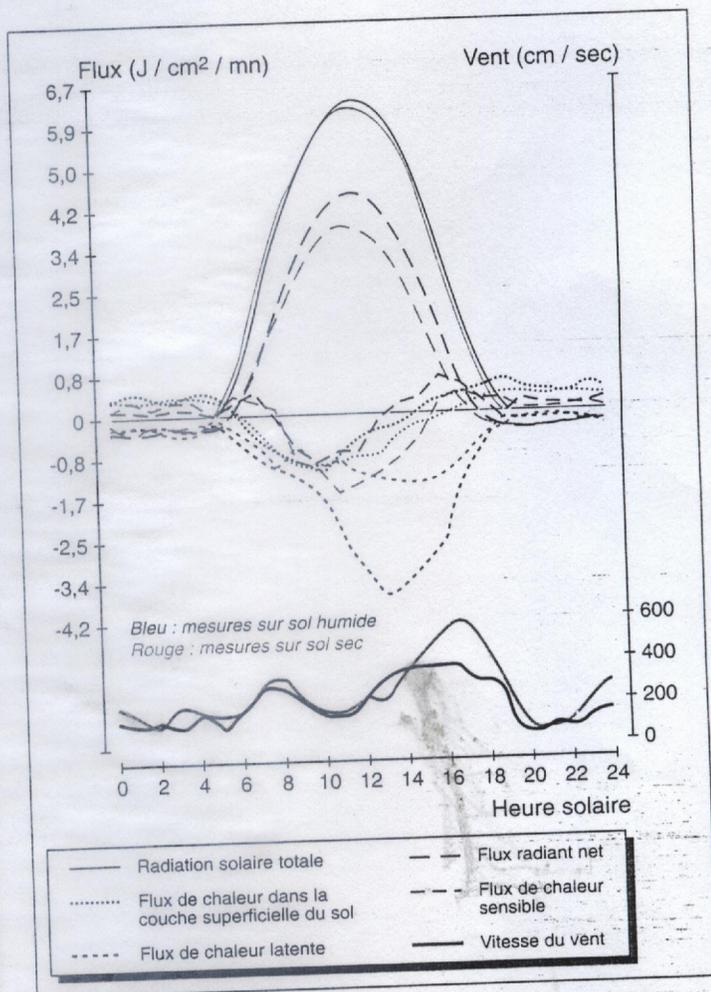


Figure 4. Balance énergétique en milieu semi-aride (Tempe, Arizona) sur sol nu humide (29 avril 1961) et sol nu sec (2 mai 1961) (d'après Van Bavel et Fritschen [11] modifié).

Références

18. Duchaufour P. *Pédologie : sol, végétation, environnement*. Paris : Masson, 1991 ; 299 p.
19. Chepil WS. Properties of soil which influence wind erosion. IV-State of dry aggregate structure. *Soil Sci* 1951 ; 72 : 387-401.
20. Chepil WS. Properties of soil which influence wind erosion. II-Dry aggregate structure as an index of erodibility. *Soil Sci* 1950 ; 69 : 403-14.
21. Chepil WS. Properties of soil which influence wind erosion. III-Effect of apparent density on erodibility. *Soil Sci* 1951 ; 71 : 141-53.
22. Imeson AC, Verstraten JM. The microaggregation and erodibility of some semi-arid and mediterranean soils. *Catena suppl* 1989 ; 4 : 11-24.
23. Gillette DA. A wind-tunnel simulation of the erosion of soil : effect of soil texture, sand-blasting, wind speed and soil consolidation on dust production. *Atmos Environ* 1978 ; 12 : 1735-43.
24. Nickling WG, Gillies JA. Emission of fine-grained particulates from desert soils. In : Leinen, Sarnstein, eds. *Paleoclimatology and Paleometeorology : modern and past processes of global atmospheric transport*. Dordrecht : Kluwer Academic Publ, 1989 : 136-65.
25. Chepil WS. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Proc Soil Sci Soc Amer* 1956 ; 20 : 288-92.
26. Hillel D. *Soil and water : physical principles and processes*. Londres : Academic Press, 1971 ; 288 p.
27. Yoder A. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *J Amer Soc Agron* 1936 ; 28 : 337-51.
28. Hélin S. *Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres*. Thèse. Paris, 1938 ; 70 p.
29. Hutter W. Action des compressions sur la structure d'un sol. *Ann Agron* 1966 ; 17 : 37-52.
30. Tessier D. *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux*. Thèse Sciences. Paris 7/Inra, 1984 ; 361 p.
31. Tessier D. Organisation des matériaux argileux en relation avec leur comportement hydrique. In : Decarreau, éd. *Matériaux argileux : structure, propriétés et applications*. Paris : Soc franç minéral cristallogr, 1990 : 387-440.
32. Nickling WG, Ecclestone M. The effects of soluble salts on the threshold shear velocity of fine sand. *Sedimentology* 1981 ; 28 : 505-10.
33. Nickling WG. The stabilizing role of bonding agents on the entrainment of sediment by wind. *Sedimentology* 1984 ; 31 : 111-7.
34. Tricart J. Influence des sols salés sur la déflation éolienne en Basse Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Rev Géomorph Dyn* 1954 ; 5 : 124-32.

maines chauds et secs car il exige des sols nus et un échauffement considérable. Ainsi, un très fort échauffement produit un transfert radiatif qui provoque une grande instabilité diurne (intense brassage vertical) et, dans l'après-midi, une convection libre s'opposant à la rugosité.

Les paramètres de surface comme facteurs aérologiques

Le profil du vent tient compte de la hauteur, la largeur, la forme, et l'espace des éléments composant la rugosité. Cette dernière se manifeste à différentes échelles contrôlant la vitesse et la turbulence du vent (*planche 1*). Au sol, la présence de micro-aspérités, de gros grains de sable, de petits galets induit certes une turbulence et le fractionnement de la sous-couche laminaire (*figure 2*). Mais il y a aussi transfert vers le haut (de l'ordre de $1/30^{\circ}$ du diamètre de l'objet reposant sur le sol) de la surface aérodynamique au-dessus de laquelle s'exerce seulement l'action érosive du vent (*figure 3a*) [6, 7]. En fait, la hauteur de la rugosité aérodynamique n'est pas seulement fonction de la dimension des micro-obstacles, mais aussi de la variabilité de leur espacement au sol (*figure 3b*)

[8]. Ainsi, des études en soufflerie ont montré que des obstacles épars (billes, graviers) peuvent augmenter la déflation si leur taux de couverture est faible. Au contraire, leur couvert plus dense a un effet protecteur au-delà d'un seuil critique (dit point d'inversion), directement proportionnel aux dimensions des objets et augmentant avec la vitesse du vent [9].

A une autre échelle, les inégalités de la topographie ou du couvert végétal influent aussi directement sur les flux éoliens : ils les dévient, les freinent ou les accélèrent. Par exemple, la végétation provoque une turbulence de sillage en arrière des obstacles, elle subdivise de grands tourbillons en tourbillons plus petits, etc. [10]. Suivant la structure de ce couvert végétal (taille, organisation, hétérogénéité, répartition verticale de la densité de biomasse), les résultats peuvent être très différents. Il y a soit protection du sol, soit au contraire une augmentation de la dissipation de l'énergie cinétique par turbulence, par génération de turbulence de sillage, et donc une attaque plus violente du sol [5].

• Le suradiabatisme intervient lors de la forte élévation de température d'un sol sec. L'état hydrique du sol modifie beaucoup le flux net radiatif par sa couleur et son albédo (*figure 4*) [11]. Ainsi, le sol

Figure 5. Incidences de la première dessiccation sur le volume apparent et l'organisation générale de matériaux argileux [d'après Tessier [30]].

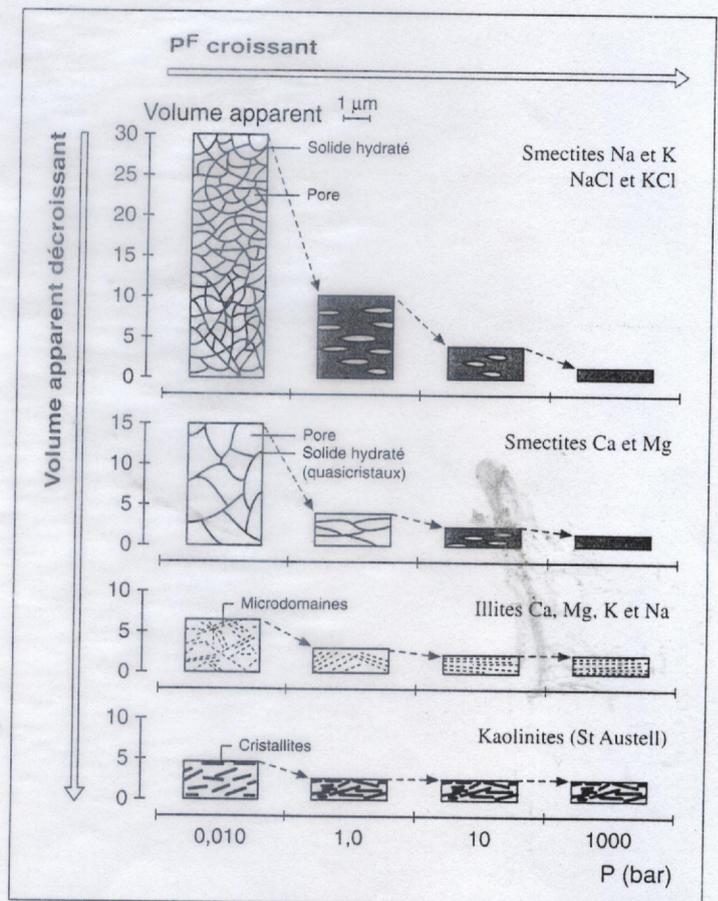
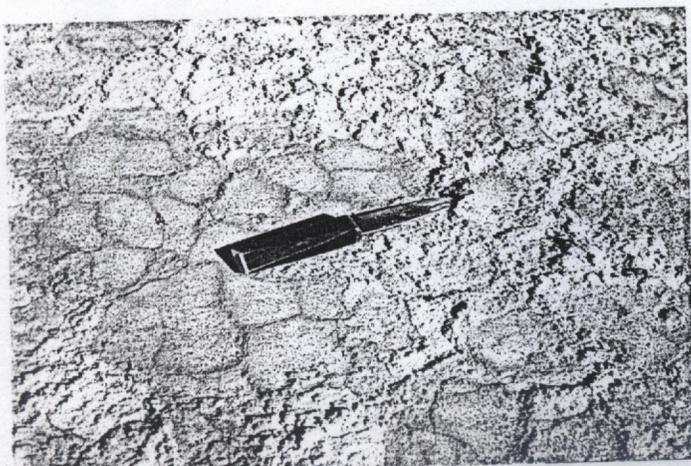


Planche 2. Le rôle antithétique des sels face à l'érosion éolienne. (Clichés G. Coudé-Gaussen)



▲ Photo 7. Le glaçage de surface du sol (Garaet et Tarf, Algérie).



▲ Photo 8. La pulvérisation du sol (Sebkhia Areg el Markhezen, Tunisie).

Planche 3. Les encroûtements généralisés.
(Clichés G. Coudé-Gaussen)

Photo 10. Une coupe dans un encroûtement de glakis (Matmata, Tunisie).



▲ Photo 9. Un encroûtement gypseux (Djeffara, Tunisie).



◀ Photo 11. Un encroûtement calcaire feuilleté (Essaouira, Maroc).



Planche 4.
La pellicule rousse.
 (Clichés G. Coudé-Gaussen)



◀ Photo 12. Le voile sableux (Sebkha Mekerrhane, Algérie).

Photo 13. Détail de la pellicule rousse (Sebkha Mekerrhane, Algérie).
 ▼

absorbe plus ou moins d'énergie suivant sa couleur : les couleurs sombres d'un sol humide absorbent alors que les teintes plus claires d'un sol sec réfléchissent. Cette énergie dans les sols humides sert avant tout à vaporiser l'eau du sol (chaleur latente) qui échappe ainsi à l'échauffement de l'air. Mais, dans les sols secs, elle augmente l'échauffement du sol au point de modifier la turbulence d'origine thermique et d'accroître la capacité de portance de l'air.

- Un accroissement de la densité de l'air intervient lors de la mobilisation éolienne des particules à partir d'un sol sec. C'est le facteur essentiel de la poussée exercée par le fluide. De par sa charge en particules, le vent devient beaucoup plus agressif (effet d'abrasion) et l'érosion éolienne en est accrue.



**L'érodibilité des sols :
 l'influence de la sécheresse
 sur les paramètres de surface**

L'appréciation de l'érodibilité par le vent dans les milieux marqués par la sécheresse ne résulte pas de la simple addition des rôles respectifs des différents paramètres du sol, compte tenu des rétroactions dans le système qui défient toute tentative de hiérarchisation. Il faut donc examiner, au sein du classique inventaire des facteurs de l'érosion éolien-

ne dressé par Chepil [12], ceux des paramètres édaphiques qui peuvent être influencés par la sécheresse. Mais, auparavant, il convient de définir les forces qui s'exercent à l'interface air/sol.

Les forces en jeu

- L'érosion éolienne est fonction de l'opposition de deux forces : le vent et la résistance du sol. L'érodibilité des sols dépend principalement de leur stabilité

mécanique [6, 13]. Celle-ci est définie comme la résistance d'un sol sec à la rupture par un agent mécanique telle la force du vent (déflation) ou l'abrasion à partir de matériaux transportés par le vent (corrasion).

Les sols, du fait de leur diversité, répondent différemment à l'énergie cinétique qui leur est appliquée. Il est donc indispensable de connaître leurs états de surface car on y trouve à la fois des éléments non érodables et des particules mobilisables par le vent. L'absorption

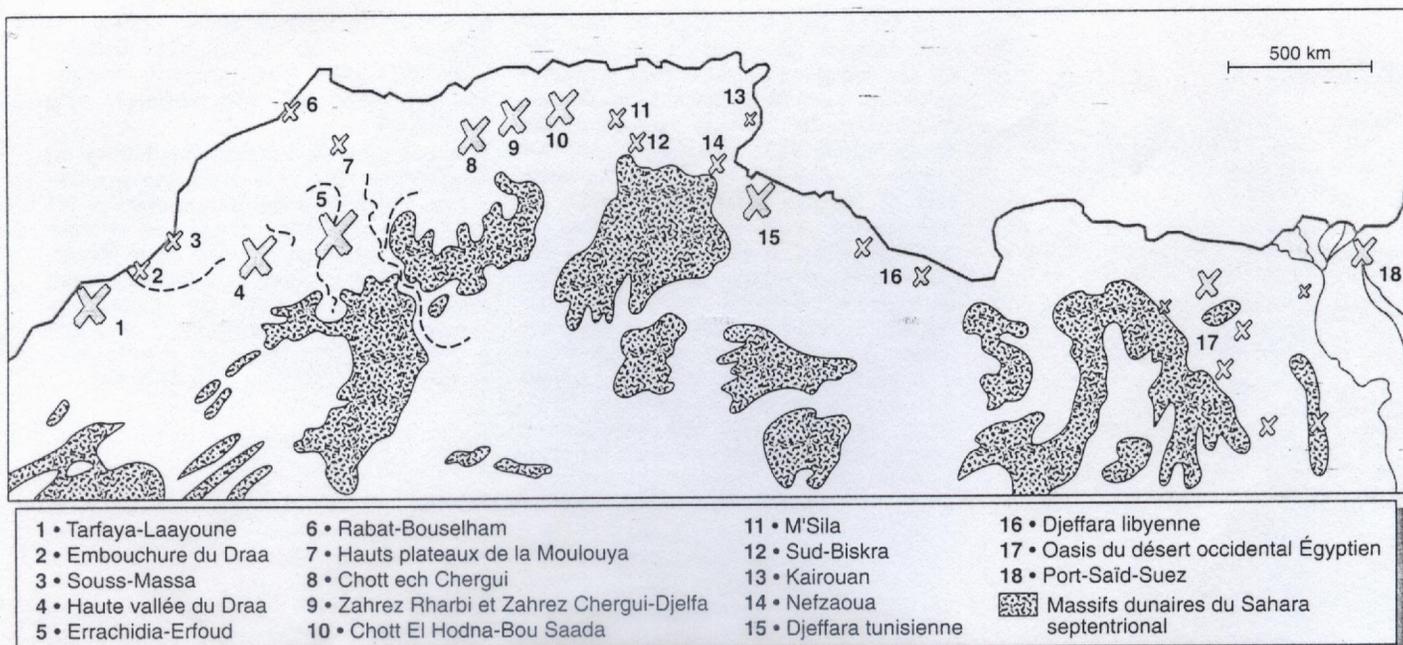


Figure 6. Les sites sensibles au risque d'ensablement au nord de l'Afrique, d'après diverses sources écrites et orales.

d'une partie de l'énergie du vent par les obstacles non érodables est sans doute une composante majeure de sa dynamique au contact du sol, mais elle n'a pas concrètement débouché sur des travaux et mesures de terrain, en particulier dans les domaines secs. Seules quelques études en soufflerie ont permis d'en apprécier l'effet [14, 15] : comme les éléments non érodables absorbent une partie de l'énergie éolienne, il en résulte une protection relative de la surface érodable. Cela réduit d'autant la quantité de matériel entraîné par le vent, car beaucoup de particules théoriquement mobilisables par ce vent ne l'ont pas été ou ont été très vite abandonnées au sol.

- Différentes forces s'appliquent aux particules exposées à un flux turbulent. Trois forces tendent à les mobiliser : le soulèvement qui agit verticalement, l'entraînement qui agit horizontalement et l'impact ballistique ou réaction en chaîne. Mais trois forces contraires s'opposent à cette mobilisation : le moment, la gravité qui est directement opposée au soulèvement, et la cohésion interparticulaire [8].

Le soulèvement n'a pas été pris en compte lors des premières considérations théoriques ou expériences en soufflerie car considéré comme insignifiant. Pourtant, bien que de moindre importance que l'entraînement, il est notable. Répondant à la pression négative s'exerçant au sommet de la particule, sa force est proportionnelle à la rugosité et à la vitesse de friction.

La vitesse d'entraînement (U_*) des parti-

cules est fonction de la pression de cisaillement exercée par le vent sur la surface et de la densité de l'air. Vitesse d'entraînement et pression de cisaillement croissent avec la vitesse du vent. À partir d'un point critique – le seuil d'entraînement (U_{*c}) de Bagnold [1] – les particules du sol sont délogées et se mobilisent.

Les propriétés mécaniques des sols

Les propriétés mécaniques et physiques des sols sont déterminées par les forces s'exerçant entre les particules qui les composent. De plus, il y a interaction de ces particules et des phases gazeuse et liquide à l'intérieur du sol.

- La texture, ou mode de répartition en taille des particules à l'intérieur d'un sol, est un élément fondamental de l'érodabilité par le vent. Elle détermine la facilité avec laquelle un sol peut être érodé. Les forces de cohésion sont importantes pour les particules inférieures à $100 \mu\text{m}$, mais elles n'existent pas entre les plus grosses particules, du moins tant qu'elles ne sont pas reliées par un film d'eau. Aussi, dans un système sec, les forces de cohésion peuvent être relativement simples, se concentrant par exemple aux points de contact entre les particules quand il s'agit de sables granulométriquement homogènes, ce qui est toutefois assez rare [16]. Mais quand il y a mélange granulométrique, avec participation de particules argileuses, les interactions deviennent plus complexes. En général, de forts taux d'argiles et silts forment de lourds agrégats ou des mottes, alors que de

faibles taux facilitent dispersion et érodabilité [17].

- La structure du sol correspond à l'agencement des particules entre elles. Cette organisation des particules en formes géométriques reconnaissables, les agrégats [18], influence la réponse du sol aux contraintes extérieures du vent.

La connaissance de la distribution en taille des agrégats est importante car l'érosion éolienne est fonction des taux d'agrégats érodables par le vent [19-22].

Exceptionnellement, les agrégats jusqu'à 2 mm peuvent être érodables et mobilisables. Mais le seuil généralement retenu grâce à l'expérimentation en soufflerie est de $840 \mu\text{m}$ [23, 24]. La densité des agrégats, ou rapport entre la masse des agrégats et le volume des particules du sol (volume poral compris), est une notion importante pour l'érosion éolienne car elle détermine la vitesse du vent nécessaire à l'érosion des petites particules du sol et des agrégats. Elle peut être aussi corrélée avec la stabilité à sec des agrégats ou avec d'autres paramètres.

Les propriétés hydriques des sols

L'eau peut affecter l'érosion éolienne par l'impact qu'elle peut avoir sur les sols lors du *splash*, ou en contribuant à la formation d'une pellicule de battance. Mais elle intervient plus constamment à l'intérieur même du sol par ses alternances d'humectation et de dessiccation.

- L'eau dans le sol influence la force de cisaillement du vent. La résistance du sol

Références

35. Chamard P. Environnement et développement. Références particulières aux États sahéliens membres du CILSS. *Sécheresse* 1993 ; 4 : 17-23.
36. Mainguet M. *Desertification. Natural background and human mismanagement*. Berlin : Springer-Verlag, 1991 ; 305 p.
37. Vogt T. Problèmes de genèse des croûtes calcaires quaternaires. *Bull Centre Rech Explor Prod Elf-Aquaine* 1984 ; 8 : 209-21.
38. Coudé-Gaussen G, Rognon P. Contrasting origin and character of Pleistocene and Holocene dust falls on the Canary Islands and southern Morocco: genetic and climatic significance. In : Pye, ed. *The dynamics and environmental context of aeolian sedimentary systems*. Londres : Geol Soc Spec Pub, 1993 ; 72 : 277-91.
39. Coque R. *La Tunisie présaharienne. Étude géomorphologique*. Paris : A. Colin, 1962 ; 488 p.
40. Barndorff-Nielsen, Willets, eds. *Aeolian grain transport*. Acta Mechanica Suppl 1 et 2. Vienne : Springer-Verlag, 1991.
41. Coudé-Gaussen G. *Les poussières sahariennes*. Paris : John Libbey Eurotext, 1991 ; Coll. Sciences en marche ; 485 p.
42. Bertrand JJ. *Action des poussières sahariennes sur le pouvoir glaçogène de l'air en Afrique de l'Ouest*. Thèse Sciences. Clermont-Ferrand, 1977 ; 197 p.
43. Prospero JM, Nees RT. Dust concentrations in the atmosphere of the Equatorial North Atlantic : possible relationship to Sahelian drought. *Science* 1977 ; 196 : 1196-8.
44. Middleton NJ. Effect of drought on dust production in the Sahel. *Nature* 1985 ; 3316 : 431-4.
45. Prospero JM, Nees RT. Impact of the African drought and El Niño on mineral dust in the Barbados trade winds. *Nature* 1986 ; 320 : 735-8.
46. Walsh RPD, Hulme M, Campbell MD. Recent rainfall changes and their impact on hydrology and water supply in the semi-arid zone of the Soudan. *Geographical J* 1988 ; 154 : 181-98.
47. Mensching H, Ibrahim F. The problem of desertification in and around arid lands. *Applied Sci Develop* 1977 ; 10 : 7-43.
48. Middleton NJ. Desertification and wind erosion in the western Sahel : the example of Mauritania. *Research Paper of Oxford* 40, 1987 ; 25 p.
49. Barone JB, Ashbaugh LL, Kusko BH, Cahill TA. The effect of Owens Dry Lake on air quality in the Owens valley with implications for the Mono Lake area. *Amer Chem Soc Symp Ser* 1981 ; 167 : 326-46.
50. Gill TE, Cahill TA. Playa-generated dust storms from Owens Lake. In : Hall, Doyle-Jones, Widawski, eds. *The history of water : eastern Sierra Nevada, Owens Valley, White-Inyo Mountains*. UCLA, 1992 ; 4 : 63-73.
51. Coudé-Gaussen G. Les poussières éoliennes présentent-elles un risque pour la santé ? *Sécheresse* 1992 ; 4 : 260-4.

à la force de délogeage du vent est ainsi fonction de sa teneur en eau : un sol sec est généralement plus érodable qu'un sol humide et l'érodabilité décroît en fonction du carré de l'augmentation de l'humidité [25]. En effet, l'humidité suscite la cohésion des particules entre elles et influence le taux d'infiltration. En cela, la texture du sol est donc très importante. Dans le cas des sables, l'eau de surface s'évapore rapidement du fait de la grande porosité de cette formation meuble. Lorsque les particules fines dominent dans le sol, les molécules d'eau sont adsorbées sur la surface des grains par des forces électrostatiques [26]. Aussi, quand survient une dessiccation ultérieure, l'eau s'évapore mais les particules restent liées fortement entre elles.

- L'eau à la surface du sol joue aussi un grand rôle. Après une phase de sécheresse, lorsqu'un agrégat sec se trouve à nouveau au contact de l'eau, la succion capillaire attire avec force la phase liquide vers son centre. L'air emprisonné provoque alors l'éclatement de l'agrégat en agrégats plus petits [27] qui seront plus facilement emportés par le vent. De même, dans les agrégats, les retraits/gonflements dus aux argiles gon-

flantes peuvent provoquer la rupture des liaisons interparticulaires, d'où des fissures qui isolent des agrégats plus petits, également plus vite mobilisés ultérieurement.

Une pellicule de battance peut aussi se développer sous l'impact des gouttes d'eau, mettant en jeu principalement les particules argileuses et silteuses. L'induration s'effectue au moment de la dessiccation qui provoque un rapprochement des particules. Les forces de liaisons augmentent alors (Van der Waals), ainsi que la cohésion générale du sol et cette prise en masse [28, 29] nuit à l'érodabilité.

Les propriétés chimiques et minéralogiques

La résistance du sol à l'érosion éolienne est aussi influencée par le comportement de ses composants chimiques, minéraux ou organiques.

- La matière organique est un élément de stabilité pour les sols. Comme agent hydrophobe, elle réduit la mouillabilité des agrégats et diminue les risques d'éclatement lors d'une humectation. Mais n'ayant que des taux très faibles dans les sols secs, désertiques ou semi-

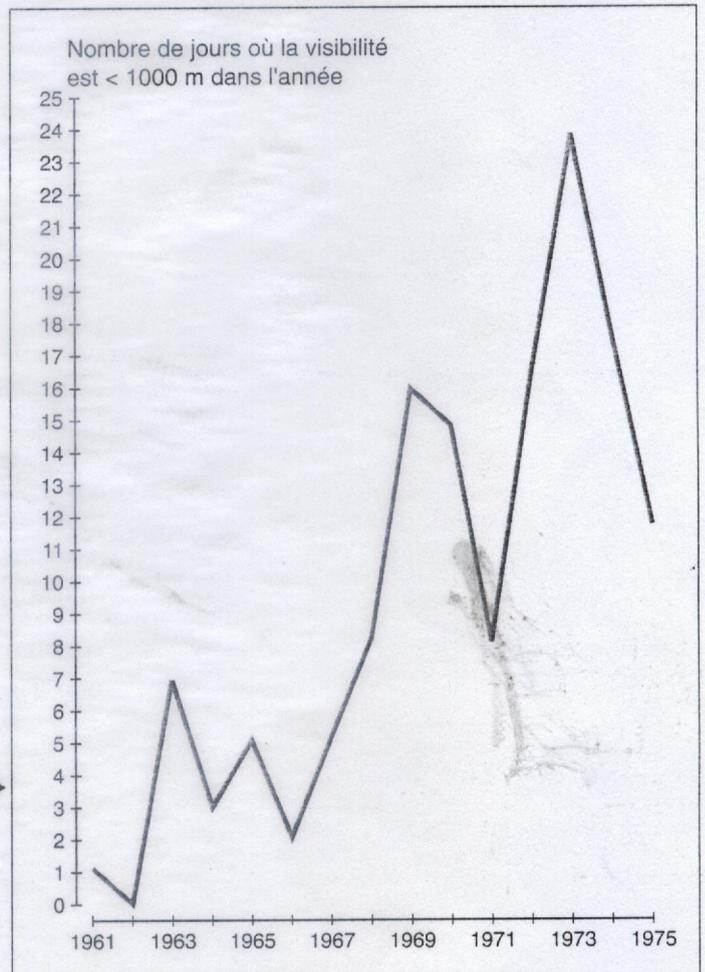


Figure 7. L'augmentation du phénomène « poussière » à El Fasher (Soudan) avec l'apparition de la grande sécheresse sahélienne (d'après Mensching et Ibrahim [47]).



Photo 14. Ensablement d'une oliveraie (Ben Gardane, Tunisie). (Cliché G. Coudé-Gaussen)

désertiques, elle n'est donc pas un facteur essentiel du système « érosion éolienne ».

- Les minéraux argileux sont un élément important de l'érodibilité des sols par leurs proportions et, surtout, leur nature. Une force électrique dépendant des propriétés de charge des argiles associée entre eux les domaines argileux et contribue à augmenter la stabilité des agrégats. L'évolution de la teneur en eau se traduit par des changements dans l'organisation de ces argiles (orientation/désorientation des particules, taille et structure interne des particules). Le niveau de dessiccation intervient fortement sur les propriétés du système. Au cours de la dessiccation (figure 5) [30] une réorganisation des particules, mises en contact face à face, s'opère pour les illites et les kaolinites. Quant aux smectites, on note la disparition progressive des pores, l'obtention d'un parallélisme strict des feuillets et, de ce fait, un volume minimal [30, 31]. Les smectites, occupant à l'état sec un volume plus faible que les autres argiles, confèrent ainsi à la croûte de surface une résistance plus grande à la pénétration. De même, la chlorite tend à augmenter la cohésion des croûtes superficielles et donc à réduire l'érodibilité.

- Les sels ont un rôle ambivalent vis-à-vis de l'érosion éolienne. Parmi les éléments qui assurent la stabilité des agrégats, citons le fer et l'aluminium. Mais le calcium sous forme de carbonates est moins efficace que le gypse. Quant au magnésium, il est préjudiciable à l'agrégation dès qu'il excède 50 % des bases totales. Les teneurs en sodium échangeable (> 15-20 %) facilitent la dispersion des argiles sous l'effet du splash et, donc, la formation des croûtes de surface. De

même, la présence de sels solubles favorise la formation des croûtes (planche 2 - photo 7). D'une manière générale, la concentration des sels en surface augmente la vitesse du seuil d'entraînement des particules [32, 33]. D'autres expériences en soufflerie ont d'ailleurs montré que la présence de sels augmentait la taille des agrégats et, par conséquent, réduisait l'érosion éolienne. Mais, d'un autre côté, la cristallisation des sels par action mécanique détruit les agrégats, donc la structure du sol (planche 2 - photo 8). En cela, elle favorise l'érosion éolienne [34].

Les conséquences de la relation sécheresse/érosion éolienne aux échelles locale et régionale

Dans les domaines secs où l'érosion éolienne domine, la dégradation des sols se manifeste par :

- un changement dans la texture des sols et dans leur potentiel de fertilité du fait des processus de déflation et de vannage sélectif ;
- la disparition des horizons superficiels du sol, habituellement les plus propices à la végétation et aux cultures, la mise à nu parfois quasi instantanée des systèmes racinaires des arbres et des plantes cultivées et, à plus ou moins long terme, l'apparition en surface d'encroûtements stériles ;
- le développement de voiles sableux qui s'avèrent à leur tour parmi les outils les plus efficaces de l'érosion éolienne.

La disparition de la végétation

- La conjugaison de vents forts accentuant l'évaporation et de températures élevées entraînant une perte en eau du sol amène au point de flétrissement permanent. Lorsque les plantes ne peuvent plus extraire l'eau des pores les plus fins et que les forces de rétention sont supérieures ou égales à la succion racinaire, le point de flétrissement permanent est atteint. Si la valeur caractéristique de p_f 4,2 est couramment admise dans les domaines tempérés, on sait que cette valeur varie pour les plantes des milieux secs où une telle limite est certainement dépassée. En effet, la pression osmotique des cellules racinaires s'élève en fonction de l'adaptation à la sécheresse pour les xérophytes et à la salinité pour les halophytes. Mais cette adaptation xérophytique a aussi ses limites et, au-delà d'un certain seuil, la plante se dessèche et meurt.

De plus, un vent fort chargé de sable est un agent redoutable de criblage pour les jeunes pousses qui, ne se développant pas de façon satisfaisante, peuvent de ce fait disparaître plus rapidement.

- Ainsi la sécheresse au Sahel a eu pour conséquence un appauvrissement de la flore, tant au niveau des plantes herbacées que des arbres. Les graminées vivaces telles que *Andropogon gayanus* et *Andropogon amplexans* ont pratiquement disparu du nord du Sahel. Des peuplements entiers d'*Acacia senegal* ont été décimés en Mauritanie et au Niger, ainsi que les *Prosopis africana* ou les *Balanites aegyptiaca* [35]. Bien entendu, dans cette situation de crise écologique, les facteurs anthropiques et socio-économiques ont nécessairement joué un rôle important qu'il faut prendre en compte, même s'il n'est pas question ici d'entrer dans le débat, trop souvent plus idéologique que scientifique, de la causalité première de la désertification [36].

Les encroûtements généralisés

- Les croûtes sont des accumulations superficielles plus ou moins indurées, développées sur diverses roches, sols ou formations superficielles des régions sèches. Elles sont surtout formées de carbonate de calcium, mais il existe aussi des croûtes d'origine gypseuse (planche 3 - photo 9). La question de la genèse de ces encroûtements et de la provenance du CO_2Ca se pose depuis plus d'un siècle et elle reste toujours controversée [37]. D'après l'hypothèse pédologique, les croûtes proviendraient de l'accumulation progressive des carbonates lors du lessivage vertical ou latéral de l'horizon supérieur d'un sol. A cela s'oppose l'hypothèse sédimentaire privilégiant l'apport des particules carbonatées par ruissellement sur les versants ou par sau-



Photo 15. Soulèvement d'aérosols salins sur l'Owens Lake (Californie, États-Unis).
(Cliché G. Coudé-Gaussen)

poudrage éolien. Le rôle du vent est effectivement le seul à expliquer l'existence de calcifications et de croûtes sur des roches siliceuses comme les schistes, quartzites et granites du Sud marocain [38]. D'ailleurs l'hypothèse éolienne est également retenue pour les croûtes gypseuses en Tunisie [39].

- Dans les zones semi-arides, les croûtes s'opposent à la végétation et aux cultures par leur extension, leur continuité et leur forte induration. Lorsqu'elles constituent des dalles compactes, épaisses parfois de plusieurs mètres à la surface des versants, des glacis ou des terrasses, elles sont complètement stériles et interdisent aux racines des arbres de pénétrer (planche 3 - photo 10). Certes, les faciès tuffeux ou feuilletés peuvent être suffisamment friables pour laisser passer les racines (planche 3 - photo 11). Mais, trop souvent, le degré de cimentation est tel qu'il faut les démolir à la barre à mine ou à l'explosif pour pouvoir pratiquer quelques cultures...

La fourniture et la mobilisation des sables

- La déflation intervient dans les formations tendres ou meubles. Il s'agit d'un enlèvement de fines particules par le vent s'exerçant surtout sur les surfaces dénudées et sèches, à long fetch. Lorsque le stock mobilisable le permet, la déflation s'opère tant que la concentration en particules est compatible avec la compétence du vent. Quand le sol affecté comporte des fragments d'un calibre supérieur à la compétence des vents les plus forts, il en résulte un van-

nage aboutissant à leur concentration sous la forme de pavages graveleux ou caillouteux, les microregs et regs.

- La corrosion est un processus fournisseur de particules aux dépens d'un matériel cohérent. En effet, l'abrasion éolienne résulte de l'impact des grains transportés par le vent sur une cible, entraînant un transfert d'énergie cinétique. La collision peut d'ailleurs endommager le grain et/ou la cible. En principe, plus l'énergie cinétique développée est importante (grain très gros ou à vitesse très grande), plus l'abrasion est poussée.

Le jet de sable (*sand-blasting*) est ainsi réputé comme agent de corrosion. Il s'agit là d'un processus primordial de production de particules fines immédiatement disponibles pour l'érosion éolienne [23]. En effet, lors de la saltation [40], le jet de sable prélève de petites esquilles à la surface des plus grosses particules résistantes qui s'amenuisent peu à peu (comminution). Par ailleurs, il peut aussi désagréger les grosses particules fragiles et agrégats à la surface du sol.

- Il résulte de ces différents processus l'accumulation à la surface du sol d'un voile sableux allochtone, épandage de sable de faible épaisseur mais extrêmement mobile, bien connu sur les marges nord-sahariennes sous le nom de pellicule rousse [41]. En effet, ses grains doivent leur couleur rougeâtre au piégeage, dans leurs caries superficielles, de revêtements argileux riches en fer. Ce voile de sables fins est indépendant des substrats (roches, sables dunaires, dépôts lacustres, sols de sebkha, etc.) sur lesquels il transite (planche 4). La pellicule rousse est réactivée au moindre

chasse-sable car sa population granulométrique dominante se situe vers 85-95 μm , dimension compatible avec l'entraînement optimum du sable par le vent comme l'avait bien montré expérimentalement Bagnold [1]. Le rôle dynamique de la pellicule rousse est très important car elle est l'outil immédiat du vent qui trouve dans ses quartz l'agent abrasif le plus efficace de tous les substrats.

Les conséquences de la relation sécheresse/érosion éolienne à l'échelle globale

Un risque éolien majeur : l'ensablement

Les régions du monde où le risque d'ensablement est le plus important sont les bordures désertiques : marges du Sahara, des déserts du Moyen-Orient, de l'Asie centrale et du nord de la Chine/Mongolie. On peut y ajouter aussi les déserts américains et même l'ouest des Grandes Plaines aux États-Unis.

Ces problèmes ont pris une grande acuité en Afrique du Nord (figure 6) où les sables mobiles (parfois fixés en nebkhas mais surtout réactivés en voiles sableux, voire en barkhanes) occasionnent un ensablement préjudiciable aux aires cultivées (photo 14), aux palmeraies des oasis, au maintien des voies de communications et, parfois, à l'habitat. Au Maroc, le phénomène se développe surtout dans le sud et le sud-est du pays. En Algérie, en dehors de la zone saharienne, ce sont surtout les Hautes Plaines qui sont le plus touchées par le phénomène : 500 000 hectares de formations éoliennes s'étendent au nord de l'Atlas saharien dans les trois bassins endoréiques des Chott Chergui, Zahrez Gharbi et Chergui et du Hodna. Le plus important des cordons de 200 kilomètres de long, 5 à 7 kilomètres de large et atteignant 15 mètres de haut est composé de dunes vives très mobiles qui livrent aux alentours un grand stock de sable. En Tunisie, c'est la zone pré-saharienne et la Djefara qui sont les plus touchées par l'ensablement. En outre, après les inondations de 1969, des formations dunaires sont aussi apparues dans la région de Kairouan.

Un risque éolien plus insidieux : la brume sèche

- Les aérosols sous forme de poussières minérales en suspension dans l'atmosphère constituent une des caractéristiques climatiques importantes des régions sèches. On les appelle brume

sèche en Afrique. La brume sèche, très fréquente au sud du Sahara de novembre à mars, envahit de très grandes surfaces (plusieurs millions de km²) et met en jeu des quantités considérables de matériel ainsi mobilisé en suspension par le vent. La présence de poussières dans l'atmosphère se traduit par une réduction de la visibilité au sol due à la diffusion optique des particules en suspension dans l'air. À partir des zones sources, le déplacement de la brume sèche est régi par les vents dans les basses couches de l'atmosphère. Au nord de la convergence intertropicale, le flux général souffle de l'est-nord-est : c'est l'Harmattan. La brume sèche parcourt de grandes distances à des vitesses variables qui peuvent atteindre 50 km/h [42].

• On a constaté une forte augmentation de la brume sèche pendant la dernière période de grande sécheresse au Sahel. La durée et l'intensité de la sécheresse qui a sévi de 1968 à 1984 sont exceptionnelles pour le XX^e siècle. Des études de retombées de poussières d'origine saharienne aux Barbades indiquent une nette corrélation entre déficit pluviométrique au Sahel et concentration de poussières. Toutefois, cette dépendance entre poussières et sécheresse n'est pas immédiate : elle ne s'opère qu'après deux ou trois ans de latence. Cela suggère évidemment que les sols ne sont vulnérables à la déflation qu'après deux ou trois ans de sécheresse prolongée [43-45].

Sur place, au sol, la déflation éolienne s'est manifestée par une augmentation des tempêtes de poussières de l'est à l'ouest du continent, du Soudan à la Mauritanie. Au Soudan, la relation entre sécheresse et augmentation de la déflation éolienne est évidente. Ainsi, dans la partie orientale du pays, la station d'El Fasher, qui se situait entre les isohyètes 300 et 400 mm pour la période 1920-1939, a « glissé » sur l'isohyète 200 mm pendant la période 1965-1984 [46]. Or, pendant celle-ci, le nombre de journées où la visibilité était inférieure à 1 000 mètres s'est énormément accru (figure 7) [47], traduisant l'importance croissante de la brume sèche, donc l'augmentation corrélative de l'érosion éolienne des sols [47]. En Mauritanie, la moyenne annuelle du nombre des tempêtes désertiques a pu aller jusqu'à décupler comme à Boutimilit. Dans ce secteur, les plus forts accroissements de vents de sable ont été enregistrés dans les villes les plus méridionales : de 1 à 7 à Nouakchott et Kiffa, de 1 à 8 à Tidjikja [48].

• Les conséquences de la présence en grande quantité de poussières en suspension dans l'atmosphère sont nombreuses et variées. La plus évidente est la réduction de la visibilité qui gêne la circulation routière et aérienne, occa-

sionnant de multiples accidents, comme on l'a souvent déploré dans l'Ouest américain. Mais les aérosols minéraux contribuent aussi à aggraver la pollution atmosphérique des grandes villes des régions sèches. L'un des cas les plus originaux, actuellement suivi par les chercheurs californiens, est celui de l'Owens Lake, sans doute le plus grand producteur de poussières salées du continent américain (photo 15). Ses émissions, véhiculées par des vents du nord, sont l'une des sources essentielles du smog intense qui sévit sur Los Angeles [49, 50].

Les poussières agissent donc sur la santé des hommes en provoquant allergies, asthme, bronchites, conjonctivites, etc. et peuvent aller jusqu'à entraîner la mort [51]. La nocivité physiologique des poussières dépend principalement de leur teneur en quartz (silicose), de la durée

d'inhalation et de la taille des particules. Toutes ces maladies liées aux poussières éoliennes se développant dans les régions arides et semi-arides doivent donc leur particularité à ces deux composantes climatiques : sécheresse et vent.

Conclusion

Il paraît donc évident que le vent est l'une des composantes majeures de l'évolution de l'environnement dans les régions les plus sèches du globe. En conséquence, le risque éolien devrait être pris en compte, beaucoup plus qu'il ne l'est, dans toutes les analyses de la désertification et dans les propositions sur ses remèdes

Résumé

Les interactions entre l'érosion éolienne et la sécheresse se font sentir à trois niveaux scalaires : à l'échelle du sol, par des modifications de ses propriétés ; à moyenne échelle, par la disparition de la végétation, par l'érosion des sols induite et la mobilisation des sables par le vent ; à l'échelle globale, par une accentuation généralisée de la déflation et l'augmentation induite de l'injection des poussières dans l'atmosphère qui participent au processus de désertification.

Dans le système « vent-sécheresse-sol », l'étude des facteurs aérologiques permet de cerner les paramètres de l'érosivité qui contrôlent la dégradation du sol par le vent. En outre, la sécheresse, en modifiant les caractères mécaniques, hydriques, chimiques et minéralogiques des sols accroît leur érodibilité face au vent.

À l'échelle locale et régionale, les conséquences de la relation sécheresse/érosion éolienne sont : une disparition de la végétation par perte en eau du sol et appauvrissement de la flore ; une dégradation des horizons superficiels du sol et l'apparition en surface d'encroûtements généralisés et stériles ; la mobilisation de voiles sableux par le vent accentuant le processus érosif. À l'échelle globale, le développement de deux risques éoliens sur les marges désertiques traduit l'interaction de la sécheresse et de l'érosion des sols par le vent : ensablement néfaste aux activités et aménagements humains et augmentation de la brume sèche aggravant la pollution atmosphérique.

Summary

Interactions between wind erosion and drought work on three different scales : soil, by modifying its properties ; medium (*i.e.* local and regional), through the disappearance of plant cover and resulting soil erosion and sand transport ; and global, by the general increase in deflation and resulting dust injection into the atmosphere, further contributing to the desertification process.

In the « wind-drought-soil » system, studying aerological factors makes it possible to determine the parameters of erosion which control aeolian degradation of soil. Drought, by altering the mechanical, hydric, chemical and mineralogical characteristics of soil, increases its susceptibility to wind erosion.

The consequences of the drought/wind-erosion relationship on the local and regional scale are : disappearance or reduction of plant cover due to soil water loss ; degradation of the upper soil horizons and outcropping of large, barren duricrusts ; wind transport of sand-sheets with its ensuing increase in the erosion process. On a global scale, the interaction of drought and wind-erosion of soil on desert borders causes an increase in two wind-damage phenomena : sanding up, creating difficulties for human activity and land management, and increased dry haze worsening the already polluted atmosphere.

Un microrelief provoqué par l'alternance dessiccation/humidification : les *gilgais*

L'alternance de dessiccation et d'humidification peut provoquer, dans certains sols formés de matériel gonflant sous l'action de l'eau, des microreliefs spécifiques. Les dépressions argileuses tropicales connaissant des périodes successives de sécheresse et d'inondation sont particulièrement propices au développement de ces microreliefs, appelés *gilgais*, dont l'extension déborde cependant largement ce domaine.

Des microreliefs couverts de végétation existent dans de très nombreuses régions du globe et présentent des genèses diverses sous des physionomies générales grossièrement semblables. Une première grande catégorie de ces microreliefs a une origine biotique soit végétale, soit animale. On connaît ainsi les truchines constituées par une végétation de cypéracées dans les marais, les touradons liés à l'accumulation de sédiments autour de touffes végétales sur les rives des étangs littoraux. Les termitières, les fourmilières, les taupinières, les nids de rongeurs spermophiles fournissent de nombreux exemples de microreliefs d'origine animale. Une deuxième grande catégorie est constituée de microreliefs causés par l'alternance d'états – et principalement de volumes – du sol sous l'influence de la température (gel-dégel) ou de l'hydratation (dessiccation-humidification). L'alternance gel-dégel provoque des microreliefs périglaciaires connus sous le nom vernaculaire islandais de *thufurs* [1]. L'alternance de gonflement du sol sous l'action de l'eau et de retrait lié à la dessiccation engendre des microreliefs désignés depuis 1911 dans la littérature scientifique sous le terme vernaculaire

australien de *gilgai* [2] et par une multitude de noms locaux : *melonhole*, *crab-hole* en Australie, *hog-wallow*, *buffalo-wallow*, *Mima mounds*, *devil-devil* aux États-Unis, mottureaux en France, etc.

Description des formes élémentaires

Les *gilgais* se présentent sous forme de bosses et de creux avec une amplitude verticale variant de quelques centimètres pour les moins développés, comme à Jorwerd en Frise néerlandaise (figure 1, Eurasie 4), à parfois plus d'un mètre comme dans quelques sites du Queensland (figure 1, Australie 10).

Les microreliefs les plus simples sont constitués par des buttes grossièrement hémisphériques, sortes de dômes surmontant une surface plane (photos 1, 2 et 3). Ils peuvent aussi présenter une forme allongée, dont la longueur est comprise entre deux et dix fois la largeur, ou même sous forme de véritables rides, lorsque la longueur excède dix fois la largeur [3].

FERNAND VERGER

École normale supérieure
École pratique des hautes études
45, rue d'Ulm
75 005 Paris, France.