

# La physique des dunes

H.J. Herrmann<sup>1</sup> and P. Rognon<sup>2</sup>

PMMH, ESPCI, 10, rue Vauquelin, 75231 Paris, France<sup>1</sup>

Université P;et M. Curie, Jussieu, France, 75231 Paris, France<sup>2</sup>

Nous connaissons tous, au moins par des photos ou les images de télévision, les étendues majestueuses de dunes ressemblant à une mer de sable dans le désert. Leurs formes répétitives modelées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs déplacements menacent aussi bien les zones de cultures que les routes ou même les villes. Malgré cela, le mouvement des dunes était encore très mal compris, faute d'équations rendant compte des mouvements superficiels des grains de sable sous l'action hydrodynamique du vent. En effet, il est hors de question de suivre les trajectoires de chacun de  $10^{10}$  à  $10^{12}$  grains d'une dune. Pourtant, grâce à une meilleure compréhension de la physique des milieux granulaires et grâce à la puissance des moyens informatiques actuels, il est aujourd'hui possible de déterminer des équations de mouvement et de les appliquer pour prédire l'évolution des dunes.

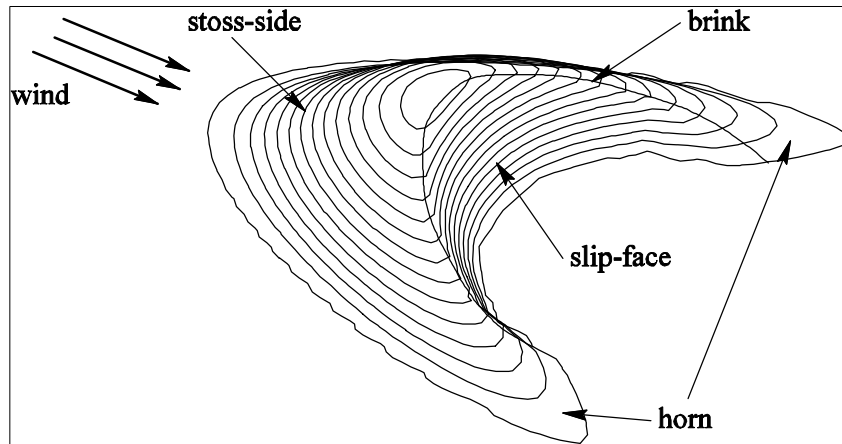


**Figure 1:** La barkhane 5, région de Laâyoune ( Sud-Marocain )

Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de barkhane (voir fig. 1). Elles se forment dans des conditions particulières avec des volumes de sable limités et se déplacent sur un substrat stable sous l'action d'un vent qui vient toujours de la même direction. Leur crête sépare le dos de la dune, incliné de 5 à 20° et le front nettement plus raide ( 32 à 35 ° ) qui se prolonge par deux cornes dans la direction du vent ( voir fig. 2).

Parmi les dizaines de types de dunes existants, la barkhane est la plus étudiée à cause de sa simplicité par rapport à l'entière forme dunaire et à cause de sa vitesse de déplacement (jusqu'à 50-60 mètres par an) qui est un obstacle considérable pour les activités humaines. Elle a été choisie comme exemple dans ce petit article pour montrer les progrès récents réalisés dans la compréhension de la forme et du mouvement des dunes.

Une dune présente une instabilité aérodynamique qui suit son évolution temporelle en couplage direct avec le champ de vitesse du vent autour de la dune. Il est donc nécessaire pour comprendre



**Figure 2:** Morphologie de la barkhane.

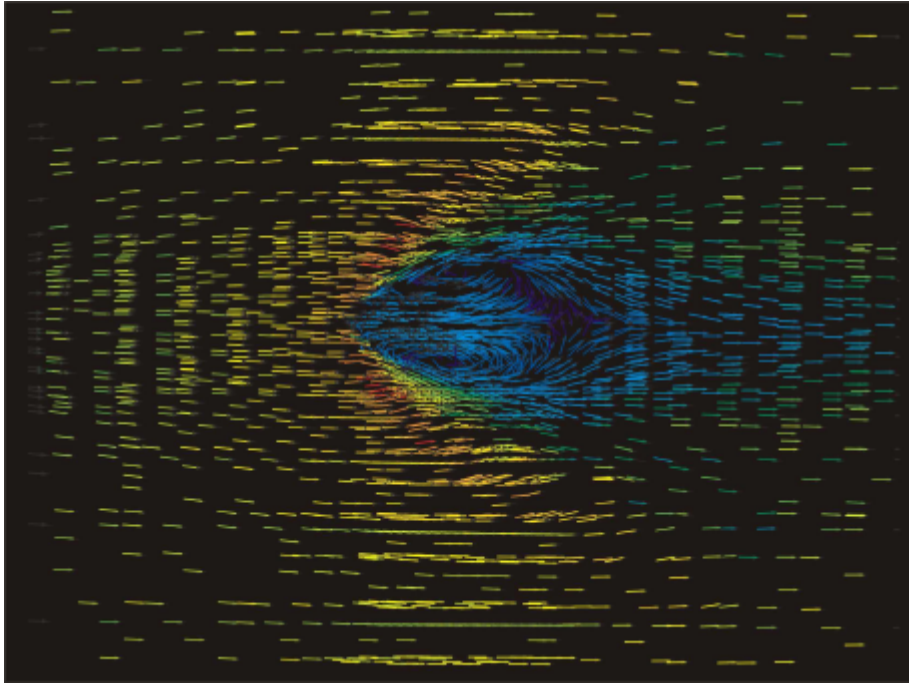
l'évolution et la forme d'une dune, de connaître celle du champ de vent correspondant. Celui-ci est en général dans un régime turbulent en trois dimensions développé à toutes les échelles autour de la topographie dunaire. Mais en moyenne, le profil de vitesse en fonction de la hauteur suit une loi logarithmique établie depuis Prandtl en 1925, avec, à sa base, une "couche-limite" dans laquelle l'écoulement est essentiellement laminaire où les grains sont arrachés et transportés.

Pour différentes raisons il est actuellement impossible d'expérimenter l'évolution d'une dune entière dans une soufflerie. Le calcul du champ de vitesse du vent sur les topographies variables du désert a demandé un effort numérique considérable qui se réalise aujourd'hui avec de logiciels commerciaux comme FLUENT. Sur la figure 3, est représentée la projection de la vitesse de l'air au sol autour d'une barchane calculée avec FLUENT. On reconnaît très bien les deux rouleaux de convection à faible amplitude qui se forment dans la direction du vent, c'est-à-dire engendrés par la barchane elle-même.

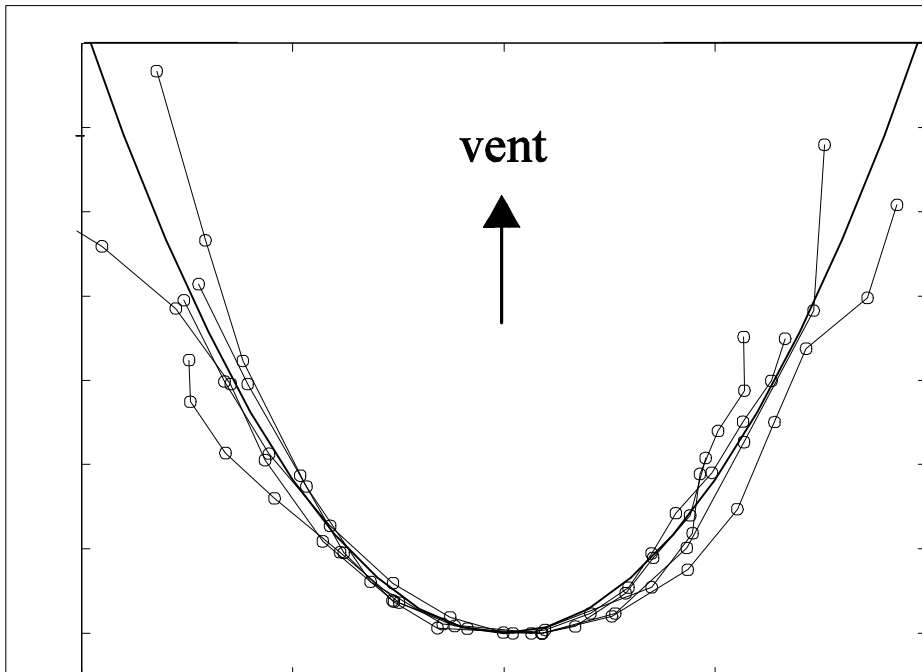
Heureusement, dans les années 70 et 80, les mathématiciens Jackson et Hunt ont développé une technique pour réduire le calcul du champ tridimensionnel de vitesse à une équation intégral-différentielle à deux dimensions, la hauteur étant éliminée de l'équation. Ceci permet de réduire considérablement le temps de calcul. Cette expression qui est valable pour de faibles changements de topographie s'est révélée très efficace pour notre propos qui consiste à connaître la force de cisaillement qu'exerce le vent sur la surface.  $\tau$  étant relié à la vitesse du vent  $u_*$  par la relation :

$$\tau = \rho u_*^2$$

où  $\rho$  est la densité du vent et  $u_*$  le préfacteur du profil logarithmique et donc une mesure pour la vitesse globale du vent.

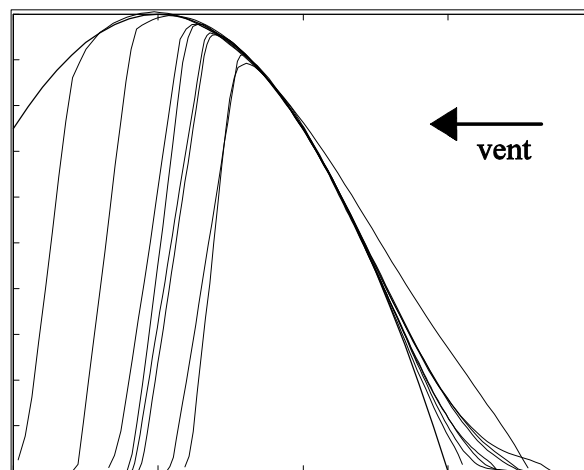


**Figure 3:** Vitesse au sol sur une barchane calculée par FLUENT. Chaque trait donne la direction du vent et sa couleur la vitesse sur une échelle linéaire entre zéro = violet et rouge par la vitesse maximale. La crête sépare la région de vitesse croissante à gauche de la région bleue où apparaissent deux rouleaux de convection de faible vitesse.



**Figure 4:** Projection de la forme des crêtes des barchanes de tailles différentes superposés de manière qu'elles passent tous par le même point de symétrie. Le trait noir continu est un ajustement parabolique [5].

Le cisaillement qu'exerce le vent sur le sable à la surface de la dune génère l'écoulement du sable. Cet écoulement, étudié en détail par le brigadier britannique Bagnold pendant et après la deuxième guerre mondiale, s'effectue sous trois formes différentes : la suspension pour les tout petits grains, inférieurs à 50 microns, le "reptation" pour les grains les plus lourds et la "saltation", un mécanisme très particulier où les grains suivent des trajectoires ballistiques, entraînés par le vent ou éjectés par l'impact de grains antérieurs. Un grain éjecté est accéléré en fonction du gradient de vitesse des vents et, lors de son impact il éjecte un certain nombre de nouveaux grains qui à leur tour entraînent le départ de nouvelles particules. Cette réaction en chaîne fait que le nombre de particules en saltation augmente exponentiellement jusqu'à une certaine saturation au delà de laquelle le vent serait trop ralenti par la perte de moment liée au transport des particules. Ainsi l'écoulement de surface par saltation correspond à une valeur  $Q_s$ , pour laquelle depuis Bagnold [1], il existe des expressions empiriques, vérifiées soigneusement dans des souffleries [2,3]. Mais le processus entier de la saturation n'avait jamais été pris en compte avant le travail de Sauermann et al. [4] qui montre comment la saltation s'amplifie jusqu'à la saturation. On définit une longueur caractéristique  $l$  qui est un multiple du saut individuel d'un grain (comprise entre 10 et 20 mètres) et s'avère d'être de l'ordre de la taille de la dune. L'autre longueur importante est donnée par la taille  $\lambda$  de la région écrantée (bleu) de la figure 3. Si  $l = \lambda$ , les grains peuvent passer au-delà de la dune, tandis que si  $l$  est plus petit, les grains sont piégés derrière la dune et participent ainsi à sa progression. D'où cette ambiguïté : la dune piège le sable et c'est le sable piégé qui participe à l'édification de la dune. La description mathématique pour décrire l'évolution de l'écoulement du sable local  $q$  est dans sa forme la plus simple une équation logistique, ceci a été vérifié sur une barkhane de 30 mètres de hauteur proche du village brésilien de Jericuacuara. On a évalué l'équation sur toute la surface et montré qu'il faut tenir compte du démarrage du processus de saturation pour reproduire les valeurs de  $q$  au pied de la dune et pour mettre la dune en mouvement [4].



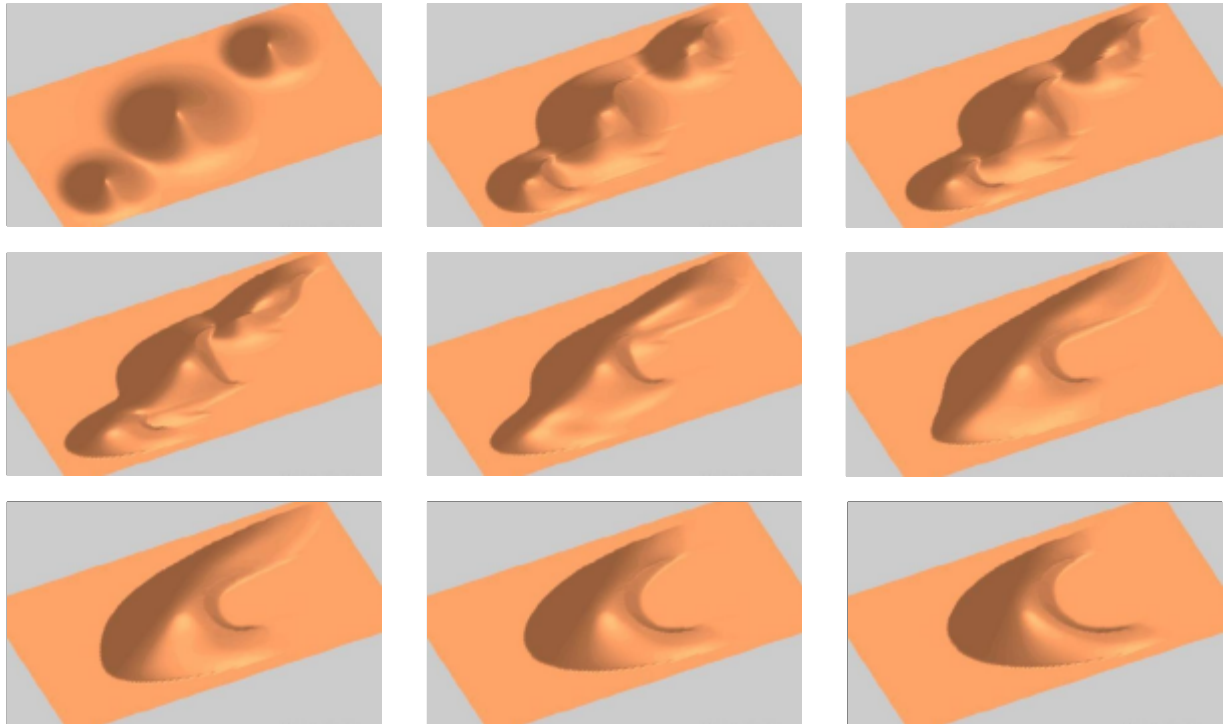
**Figure 5:** Coupe selon le plan de symétrie de barkhanes d'hauteur différente. Les échelles (hauteur et longueur) ont été adoptées pour chaque dune de manière à superposer les pentes des dos des dunes (cf. fig. 2). Le trait noir continu est un ajustement parabolique, ref. [6].

La troisième équation qu'il faut faire intervenir pour fermer le système est la conservation de la masse qui relie la hauteur du relief à l'écoulement. Les trois champs à calculer sont  $t(x,y)$ ,  $q(x,y)$ , et  $h(x,y)$ . On obtient  $t$  à partir de  $h$  par l'équation de Jackson et Hunt,  $q$  à partir de  $t$  par l'équation logistique et  $h$  à partir de  $q$  par la conservation de la masse. Mais il faut aussi tenir compte que, depuis Coulomb, nous savons que le sable sec ne peut pas avoir une pente locale plus grande que celle donnée par l'angle de repos  $\theta \sim 35^\circ$ . Une fois cet angle atteint, l'écoulement se fait par des avalanches, dont le moteur est la gravité.

Bouchaud et al. [5] ont introduit, depuis, des équations de mouvement d'une surface à l'angle de repos, qui assurent la fixation du sable sur une telle surface. Cette dynamique est active sur les talus d'avalanches, appelés slip face en anglais, qui sont si caractéristiques des lignes de crête des barkhanes comme celle de la figure 2, et qui s'étendent d'une corne à l'autre dans la direction du vent dominant.

La solution de notre système d'équation pour obtenir des barkhanes implique donc l'identification de la crête et l'application de l'équation de Bouchaud, Catess, Ravi, Prakash et Edwards (BCRE)[5] sur la face du talus d'avalanches. Ensuite il faut donner une configuration initiale, à partir d'une bosse d'allure gaussienne et, s'il s'agit d'un champ de barkhanes, tenir compte des conditions sur les bords, déterminées par l'écoulement imposé. Ceci est l'affaire d'un calcul numérique direct.

Les résultats ont montré qu'en accord avec nos mesures effectuées à Laayoune [6], les profils transversaux des barkhanes et la forme de la crête sont des paraboles (voir fig. 4). En reproduisant les lois d'échelle pour des barkhanes de différentes tailles, nous avons montré qu'il existe une linéarité entre hauteur, longueur et largeur des dunes et dans la position de l'apex de la crête en fonction de la hauteur (voir fig. 5). Le programme rend compte aussi de la loi selon laquelle la vitesse de la barkhane est inversement proportionnelle à sa hauteur. Mais il permet aussi de faire des "expériences" qui seraient impossibles à effectuer au laboratoire à cause des différences d'échelles temporelles et spatiales ou, sur le terrain, à cause des grandes fluctuations du vent. Nous avons par exemple observé que la barkhane constitue une forme finale stationnaire d'un grand nombre de configurations initiales (voir fig. 6), et vérifié son invariance par translation. Nous avons enfin observé que la formation du talus d'avalanches n'apparaît qu'à partir d'un certain volume initial confirmant, par des moyens numériques, que la barkhane doit avoir une taille minimale pour devenir une forme stable.



**Figure 6:** Evolution temporelle de trois bosses gaussiennes initiales sous l'action d'un vent venant de la gauche. La condition initiale a été choisie de façon à ressembler le plus possible aux formes embryonnaire sur le terrain. Les images successives ont été construites après 0, 1, 2 iterations. On reconnaît que après 100 iterations la forme de la barchan reste identique.

Cette technique, présentée ici pour calculer l'évolution d'une masse de sables dunaires sous l'action du vent, présente un intérêt non négligeable pour des pays comme la Mauritanie, engagés dans la lutte contre l'ensablement qui menace constamment une grande partie du pays. Elle pourrait être utilisée pour tester les différentes méthodes conçues pour empêcher l'ensablement des régions habitées ou des routes et des voies ferrées et, de plus en plus, pour la destruction des dunes [7]. Ainsi, certains défis technologiques pourraient être relevés grâce à ces progrès au niveau théorique.

### **Bibliography**

1. R. A. Bagnold, Proc. Royal Soc. London 225, 49 (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear.
2. M. Sorensen, in Proc. Int. Workshop Physics of Blown Sand (Univ. of Aarhus, Denmark, 1985, Vol. 1, pp. 141-190.
3. Lettau and Lettau, Bulk transport of sand by the Barchan of the Pampa de la Joya in Southern Peru, Zeitschrift für Geomorphologie, N.I., 1969, pp. 182-195.
4. G. Sauermann, K. Kroy, and H.J. Herrmann, Saturation Transients in Saltation and their Implications on Dunes Shapes, preprint (2001).

5. J.P. Bouchaud, M.E. Cates, J.R. Prakash, and S.F. Edwards, A Model for the Dynamics of Sandpile Surfaces, *J. Physique I* **4**, 1383, (1994).
6. G.Sauermann, P.Rognon, A.Poliakov et H.J.Herrmann, The shape of the barchan dunes of the Southern Morocco, *Geomorphology*, **36**,1-2,pp.47-62
7. J.Meunier et P.Rognon, Une méthode écologique pour détruire les dunes mobiles, *Sécheresse*, **11**, 4, pp.309-316.