

PHYSIQUE  
PORTFOLIO

# Arpenteurs des dunes

**Cécile Michaut,**  
journaliste scientifique.



Pour comprendre la formation des dunes, nul besoin d'instruments compliqués. Avec des accessoires rudimentaires, des physiciens ont expliqué la naissance et la vie des barkhanes, dunes en forme de croissant créées par les alizés.

**POUR MESURER LA PROGRESSION ET L'ÉVOLUTION**  
des dunes dans le Sud marocain, les physiciens de  
l'École normale supérieure s'aident de simples piquets.

**P**our des physiciens passionnés par le comportement du sable, quoi de mieux que d'aller l'étudier dans le désert ? C'est ainsi que Stéphane Douady et ses collègues de l'École normale supérieure (ENS) sont partis dans le Sud marocain étudier des dunes en forme de croissant appelées barkhanes. Dans ce laboratoire de sable et de vent, avec quelques instruments rudimentaires, ils ont tenté de comprendre comment les dunes naissent, grandissent, se déplacent, se déforment et meurent parfois, détruites par une tempête.

« Les barkhanes, qui ont une forme de croissant, nous ont semblé les dunes les plus simples à étudier, car elles se forment en présence de vents réguliers comme les alizés », raconte Stéphane Douady. Avoir au

moins un paramètre relativement constant (ici le vent) est une aubaine pour les physiciens, qui aiment simplifier les problèmes. Ils ont choisi d'étudier les barkhanes situées près de Tarfaya, à la latitude des Canaries, car elles étaient proches de la route, donc facilement accessibles.

L'équipe, constituée de quatre chercheurs, a effectué plu-

sieurs missions sur le terrain. Étonnamment, ceux-ci n'ont pas étudié au préalable les travaux existant sur ce sujet, au risque de refaire des recherches existantes. Ils ont seulement regardé les classifications des dunes par les géologues. « Nous sommes venus volontairement de façon naïve, explique Stéphane Douady. C'est notre manière de travailler. Si l'on regarde les travaux antérieurs, les recherches semblent terminées, et cela stérilise notre imagination. L'originalité de nos travaux provient de cette approche sans a priori. Même si l'on refait certaines mesures existantes,

*on apporte toujours quelque chose de plus avec un œil neuf. »*

Les quatre chercheurs ont d'abord observé longuement les dunes : « Celles observées du sol sont très différentes de celles vues d'avion ou depuis un satellite que l'on peut voir sur des

photos, note Stéphane Douady. Sur le terrain, on se sent comme des fourmis. On n'appréhende plus les dunes dans leur ensemble, on a l'impression de ne rien voir. » Première constatation : aucune dune n'est parfaite. Toutes comportent des imperfections, des « nez », petits appendices de sable, ou au contraire des creux appelés « moules ».

### **Le sable met les instruments à rude épreuve, et il faut pouvoir faire des réparations sur place**



L'équipe est revenue à différentes saisons, afin d'observer l'influence des cycles climatiques. « En hiver, le vent n'est pas constant et des tempêtes très fortes se créent. Elles ont une influence énorme sur la forme des dunes », assure Bruno Andreotti, membre du groupe. La morphologie de la barkhane est en effet adaptée au vent régulier et lui offre le minimum de prise. Lorsque le vent souffle en sens inverse, il bouleverse la dune.

Forts de ces constatations, les physiciens ont décidé de mesurer précisément les déplacements et les déformations

des dunes. « Nous n'avons utilisé que des techniques rudimentaires car les conditions sur le terrain sont difficiles : le sable met les instruments à rude épreuve, et il faut pouvoir faire des réparations sur place. De plus, nous aimons cette physique très rustique – et pourtant efficace – ne nécessitant pas d'appareillage sophistiqué », précise Stéphane Douady. Pour analyser la déformation de la dune au cours du temps, l'équipe a planté des piquets régulièrement et observé les variations de la hauteur de sable d'un jour à l'autre ; tandis que pour mesurer le déplacement de la dune entière d'une année sur l'autre, elle a fait le tour de la dune à pied équipée d'un récepteur GPS. Un inclinomètre, permettant de mesurer la pente de la dune en tout point, des rubans gradués de 5 mètres, ainsi que des appareils photo et des caméras pour fixer et analyser les mouvements de la dune, sont les seuls instruments complémentaires. « Nous avons essayé d'autres instruments, comme un cerf-volant, pour tenter de photographier la dune dans son ensemble. Mais cela n'a pas fonctionné. »

Les dunes ne se livrent pas facilement et requièrent des mesures fréquentes. Pour suivre leur évolution tout au long de l'année, l'équipe ⇨



**UN « EMBRYON » DE DUNE.** Celui-ci évoluera en dune plus grande ou succombera. Les barkhanes possèdent en effet une taille minimale, de quelques dizaines de mètres de long et de 1 mètre de haut. Si la dune est trop petite, le vent arrache plus de sable qu'il n'en dépose, et elle disparaît.



# PHYSIQUE

## PORTFOLIO



**HICHAM ELBELRHITI**, doctorant marocain, étudie l'évolution de la forme d'une dune. Il plante de nombreux pics et observe chaque jour la hauteur du sable sur ces repères. L'inclinomètre (à gauche) permet de mesurer la pente de la dune à chaque point.



**PERPENDICULAIRES À LA DIRECTION DU VENT**, LES RIDES DU SABLE peuvent changer en quelques heures. Elles sont un précieux indicateur de l'évolution des alizés.



**UNE SIMPLE CORDE GRADUÉE DE PLUSIEURS MÈTRES** suffit pour mesurer la taille et la forme des dunes.

Les dunes ne se déplacent  
que de quelques  
mètres par an, mais  
elles changent parfois  
de forme en quelques jours

⇒ de l'ENS a noué un partenariat avec l'université d'Agadir et codirige la thèse d'un physicien marocain, Hicham Elbelrhiti, qui effectue des mesures quasi quotidiennes sur ces dunes. « Elles se déplacent lentement, de quelques mètres par an. En revanche, elles changent parfois de forme en quelques jours, après une tempête. Quant aux rides présentes sur ces dunes, leur formation est très rapide, quelques heures seulement, décrit Pascal Hersen, qui prépare lui aussi une thèse dans le laboratoire parisien. Les chercheurs qui ne venaient qu'une seule fois avaient une vision statique des dunes. Or, la dune change continuellement de forme, certaines parties s'épaississent, d'autres s'amincissent. »

La plus grande interrogation concerne les conditions de formation de ces dunes. La plupart des spécialistes pensaient qu'elles naissaient lorsque le sable poussé par le vent rencontrait un obstacle. « Or, nous avons montré sur des expériences en soufflerie au laboratoire du Cemagref, à Grenoble, que les petits tas de sable de quelques dizaines de centimètres n'étaient pas stables. Ils se désagrègent sous la pression du vent. De même, sur le terrain, nous n'avons pas vu de dunes de hauteur inférieure à un mètre. Comment les dunes naissent-elles si elles ne passent jamais par une

période embryonnaire ? », se demande Bruno Andreotti. Au contraire, toutes les dunes qu'il a vu se former possédaient une longueur et une largeur minimales de 20 mètres. D'où l'idée que c'est la longueur de la dune dans le sens du vent qui conditionne sa stabilité, sa croissance se déroulant ultérieurement en hauteur.

« Lorsque le vent arrache un grain de sable au sol, ce dernier atterrit, éjectant d'autres grains qui sont à leur tour accélérés par le vent. Une "réaction en chaîne" se crée ainsi, avec toujours plus de grains soulevés. Réciproquement, le vent perd de l'énergie à soulever les grains de sable. Il n'a plus assez de puissance pour soulever de nouveaux grains. Un équilibre est atteint quand le vent dépose autant de sable qu'il en sou-

lève. Cet équilibre n'est possible que si la dune est assez longue, afin qu'un nombre suffisant de grains soit soulevé et redéposé sur une même dune », explique Stéphane Douady. Cette description rend compte à la fois de la taille minimale des dunes et de l'existence de dunes alors qu'aucun obstacle n'est présent [1]. Les dépôts de sable proches d'obstacles, appelés nebkhas, n'ont pas une forme de croissant et sont figés.

Mais l'équipe de l'ENS est allée plus loin. Elle a expliqué la

### En remplaçant l'air par de l'eau, la taille des dunes est divisée par mille : une échelle adaptée au laboratoire

[1] B. Andreotti et al., Eur. Phys. Journ. B, 28, 321, 2002.

[2] B. Andreotti et al., Eur. Phys. Journ. B, 28, 341, 2002.

[3] P. Hersen et al., Phys. Rev. Lett., 89, 264301, 2002.



**LES BARKHANES ONT ÉTÉ BOULEVERSÉES** par les tempêtes hivernales, qui ont créé des formes complexes.

forme caractéristique des barkhanes, qui ressemblent à un croissant dont les cornes pointent dans la direction du vent. Pour bien comprendre comment se forme la dune, le plus simple est d'imaginer un tas de sable soumis à un vent constant. Le sable, soulevé à l'arrière arrondi de la dune, se dépose à l'avant de celle-ci, puis retombe le long de la pente par une minuscule avalanche. Ces grains tombent en bas de la dune et sont bientôt enfouis par les grains suivants. C'est ainsi que la barkhane avance. Or, les bords d'un tas de sable contiennent moins de sable que le centre. Ces bords avancent donc plus rapidement que le centre, car il y a moins de sable à transporter. D'où l'apparition de cornes sur les rebords de la dune [2]. « Bien sûr, la réalité est plus compliquée, car on n'a pas un tas de sable bien formé au départ », précise Pascal Hersen.

Suivant cette description des dunes, les barkhanes devraient être instables : les petites devraient perdre encore davantage de sable qu'elles n'en reçoivent et rapetisser jusqu'à disparaître, tandis que les grosses devraient gagner toujours plus de sable et devenir colossales. « Or, sur des couloirs de plus de 300 kilomètres étirés dans la direction moyenne du vent, toutes les barkhanes sont de taille équivalente », remarque Bruno Andreotti. Responsables de cette uniformisation : les tempêtes, qui perturbent les dunes. Les plus imposantes offrent davantage de prise au vent que les petites, et sont donc plus sensibles aux vents violents en sens contraire aux alizés, qui les déforment, voire les cassent. La forme des dunes est le reflet de leur histoire. Une dune âgée de cinq ans porte tous les stigmates des tempêtes qu'elle a subies.

Pour prouver que ce modèle des barkhanes est correct, rien ne vaut une reconstitution fidèle de la dune en laboratoire. Mais il est difficile d'engendrer une dune de plusieurs dizaines de mètres dans un laboratoire parisien. L'équipe de l'ENS a réussi à contourner ce problème : la longueur minimale des dunes est proportionnelle au rapport de densité du sable et de l'air. Si l'on remplace ce dernier par un fluide plus dense, comme de l'eau, les grains de sable se déplaceront plus lentement et, sur une distance plus faible, la taille des dunes est considérablement réduite. Avec l'eau, le rapport des densités entre le sable et le fluide passe de 2 000 à 2, la taille des dunes est donc divisée par mille. À l'aide d'un « aquarium » rectangulaire, de grains de sable et de



**PASCAL HERSEN, APRÈS AVOIR CRÉÉ UNE BARKHANE ARTIFICIELLE ROUGE DANS UN « AQUARIUM », PRÉPARE UN TAS DE SABLE VERT QUI DEVIENDRA UNE BARKHANE SOUS L'EFFET DU COURANT. LA PRESSION DE L'EAU SUR LE SABLE AUTORISE LA FORMATION DE DUNES DE QUELQUES DIZAINES DE CENTIMÈTRES ALORS QUE, DANS L'AIR, ELLES MESURENT AU MINIMUM PLUSIEURS DIZAINES DE MÈTRES.**

courants imitant les alizés, de magnifiques barkhanes de quelques centimètres se sont formées et se sont déplacées [3]. Reste à simuler l'effet des tempêtes, afin de reconstituer tous les « défauts » si caractéristiques qui participent à la beauté des barkhanes. ■■

**C. M.**

Reportage photo : Hubert Raguet

#### POUR EN SAVOIR PLUS

■ Jacques Duran, *Sables émouvants. La physique du sable au quotidien*, Belin, 2003.

■ [www.lps.ens.fr/~hersen/data\\_ns/dunes/Dunes.html](http://www.lps.ens.fr/~hersen/data_ns/dunes/Dunes.html)

