

# Qu'est-ce qui détermine la taille des dunes ?

Bruno Andreotti et Philippe Claudin (Philippe.Claudin@espci.fr)

Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), UMR 7636 CNRS - ESPCI - Univ. Paris Diderot - Univ. P. et M. Curie, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05

Nous discutons les mécanismes qui sont à l'origine de la formation des dunes de sable par le vent. Cette analyse permet de comprendre ce qui contrôle la longueur d'onde à laquelle ces dunes apparaissent à partir d'un lit plat.

Nous montrons que l'échelle pertinente est la longueur sur laquelle le flux de sable transporté par le vent relaxe vers sa valeur d'équilibre en réponse à une perturbation. Cette longueur est proportionnelle au diamètre des grains, et également au rapport entre la densité des grains et celle de l'air. Ceci permet de comprendre, par exemple, pourquoi les dunes sur Mars sont plus grandes que sur Terre.

Au-delà de cette échelle initiale, nous montrons que la taille maximale que peuvent atteindre les dunes après fusion et interaction entre elles est limitée par l'épaisseur de la couche convective atmosphérique.

Les physiciens des milieux granulaires ont commencé à s'intéresser à la formation des rides et des dunes de sable il y a une quinzaine d'années, et un article témoignait déjà de cet intérêt dans le *Bulletin de la SFP* en 2002 [1]. Les géologues ont plutôt décrit les formes des dunes et il est utile, pour le contexte général du sujet, de les rappeler brièvement.

La morphologie des dunes a été classifiée en fonction du régime de vent et de la quantité de sable disponible au transport (on montre sur la figure 1 différents types de dunes). Lorsque le vent dominant souffle dans une direction unique et qu'il y a peu de sable sur de la roche dure, on observe des dunes à l'allure de croissants que l'on appelle des barkhanes (fig. 1a). Si, dans les mêmes conditions de vent, le sol est recouvert de sable, les dunes forment des barres transverses au vent (fig. 1c) – on pourrait mettre la dune côtière du Pilat, près d'Arcachon, dans cette catégorie. Si maintenant la rose des vents possède deux directions privilégiées, on observe de longs cordons dunaires alignés dans le sens du flux de sable moyen (dunes dites « longitudinales »), lorsqu'ils naissent comme des doigts à partir d'une source de sable localisée, ou bien à nouveau des barres, à peu près transversales au vent moyen, si on a du sable partout. Enfin, lorsque le vent provient de directions très différentes au cours de l'année, on observe des dunes « en étoile », c'est-à-dire avec plusieurs longs bras qui serpentent (fig. 1b).

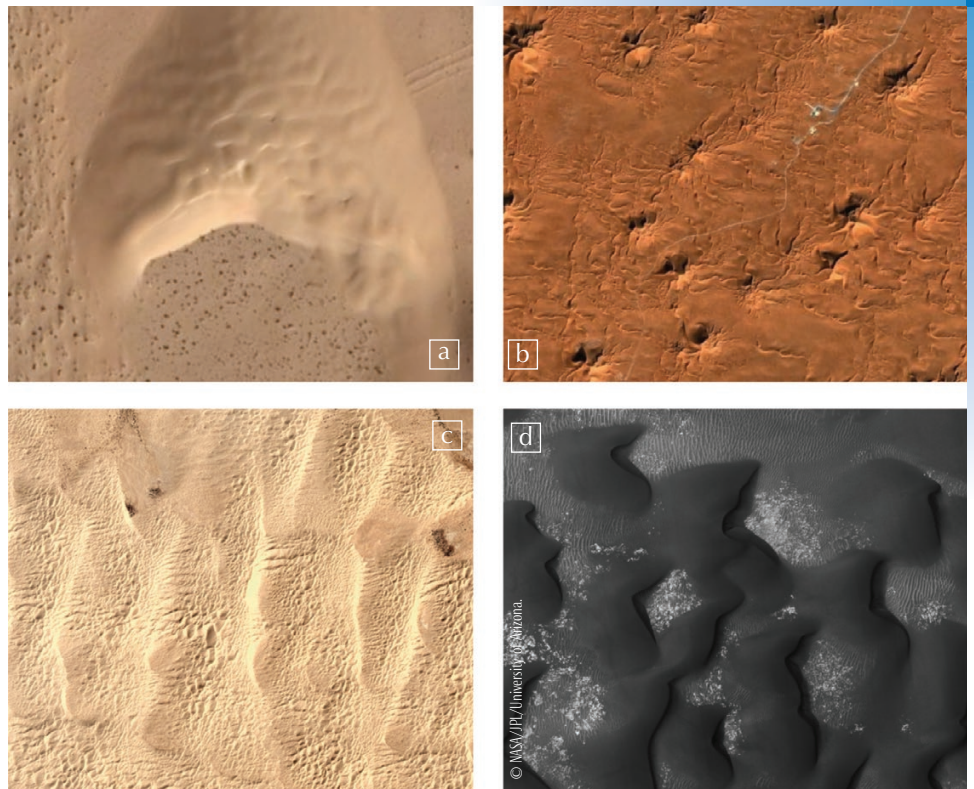
Dans cet article, nous proposons d'aborder une question physique plus générale que celle de reproduire l'une ou l'autre de ces formes. On veut ici comprendre ce qui détermine la taille à laquelle les dunes apparaissent à partir d'un lit plat, et ce qui limite leur taille maximale. Dans toute la suite, on entend par « taille » une échelle horizontale : la longueur ou la largeur de la dune, ou bien une distance typique entre dunes, ou encore, plus techniquement, la longueur d'onde dominante

du phénomène d'instabilité à l'origine de la formation de ces dunes. Sur les photos aériennes (fig. 1), c'est cette taille horizontale que l'on voit et que l'on peut mesurer facilement. La taille verticale lui est, en pratique, proportionnelle – le rapport d'aspect d'une barkhane est typiquement de l'ordre de 1/15.

## Transport de sable

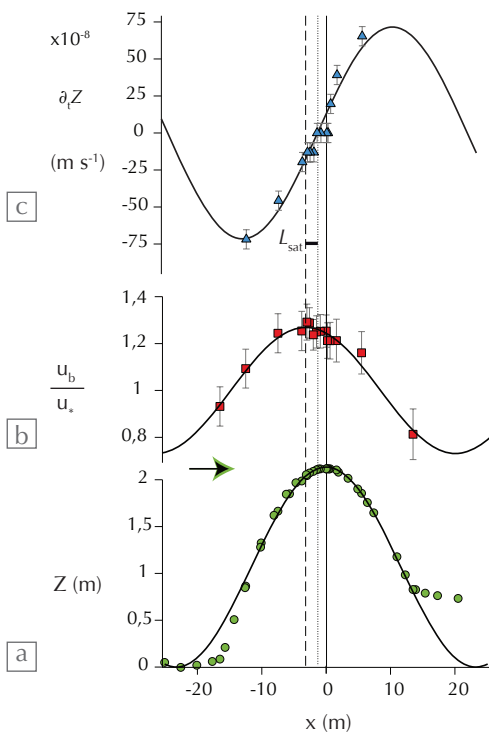
Que se passe-t-il lorsque le vent souffle sur un lit sableux, que ce soit sur une dune ou sur la plage ? Si la vitesse du vent n'est pas assez grande, le sable reste immobile. Au-dessus d'un certain seuil en revanche, les grains de la surface sont entraînés par le vent, font de petits sauts, et viennent percuter d'autres grains du lit qui se mettent en mouvement à leur tour. Pour un vent constant de force donnée et un lit plat, il existe une quantité maximale de sable qui peut être ainsi transportée par unité de temps. On l'appelle le flux de sable saturé. Il correspond à un équilibre entre l'écoulement d'air qui entraîne les grains et, en retour, les grains qui freinent l'écoulement. Ce flux saturé est d'autant plus important que le vent est fort.

Si l'on gravit la face au vent d'une dune avec un anémomètre, on constate que le vent augmente au fur et à mesure que l'on prend de l'altitude. En plantant des baguettes munies d'un niveau de référence, on peut également constater que cette face amont de la dune s'érode. Du point de vue du flux de sable, ces deux observations sont bien cohérentes : si le flux augmente avec le vent le long du dos de la dune, la quantité supplémentaire de sable transportée est prélevée sur la dune elle-même. Réciproquement, vent et flux décroissent lorsque l'on descend la face aval et l'on y observe conséquemment le dépôt du sable. C'est cette érosion d'un côté et ce dépôt de l'autre côté de la dune qui permet son déplacement.



**1. Exemples de dunes de différentes morphologies.**

(a) Photo aérienne d'une barchane au Sahara Atlantique. Le vent souffle du haut vers le bas (flèche). On note l'instabilité primaire sur le dos de la dune. Échelle approximative de la zone photographiée : 300 m.  
 (b) Photo aérienne de dunes étoiles en Algérie, près de Hassi-Messaoud. Échelle approximative de la zone photographiée : 6 km.  
 (c) Photo aérienne des dunes transverses des Algodones (Californie, USA). Le vent souffle de gauche à droite (flèche). Échelle approximative de la zone photographiée : 6 km.  
 (d) Photo du champ de dunes dans le cratère martien Kaiser. Le vent souffle de gauche à droite. Échelle approximative de la zone photographiée : 3 km.



**2. Érosion d'une dune de sable soumise à un vent unidirectionnel.**

(a) Profil de la dune  $Z(x)$  (cercles verts ; ligne continue verticale : position du sommet). Le vent souffle de gauche à droite (flèche).  
 (b) Profil de la vitesse de vent près du sol  $u_b(x)$  (carrés rouges ; ligne tiretée verticale : position du maximum normalisée par la vitesse de cisaillement du vent  $u_*$ ).  
 (c) Profil du taux d'érosion  $dZ(x)/dt$  (triangles bleus ; ligne pointillée verticale : position du point d'érosion nul). Lignes grasses : ajustement par une fonction cosinus. On note la distance  $L_{sat}$  entre le maximum de la vitesse (figure b) et le taux d'érosion nul (figure c). Données issues de [2].

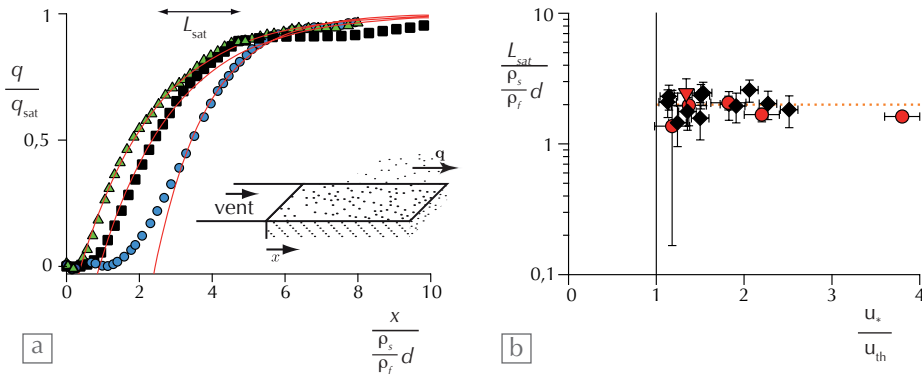
**Formation des dunes**

Pour qu'une bosse puisse se mettre à croître spontanément, il faut qu'il y ait dépôt sur son sommet, et donc que le flux de sable atteigne son maximum en amont de celui-ci. Or, l'écoulement d'un fluide turbulent autour d'un obstacle n'est pas symétrique, et ceci même si ce dernier, lui, est symétrique. Nous avons mesuré la vitesse du vent près du sol, le long d'une bosse de sable assez plate (fig. 2a), et on voit que le point où le vent est le plus fort est légèrement en amont de son sommet (fig. 2b). En outre, en mesurant le taux d'érosion sur ce même profil de dune, on constate que le point d'érosion nul, correspondant par conservation de la matière au maximum du flux de sable, est décalé vers l'aval par rapport à ce point de vent maximal (fig. 2c). Ce décalage vient du fait que le flux de sable est en retard par rapport au vent, et ne s'équilibre avec sa valeur saturée qu'après une longueur  $L_{sat}$  dite « de saturation ». Nous avons également étudié cet effet en soufflerie, et mesuré une longueur  $L_{sat}$  de l'ordre du mètre (fig. 3). La condition de croissance d'une bosse de

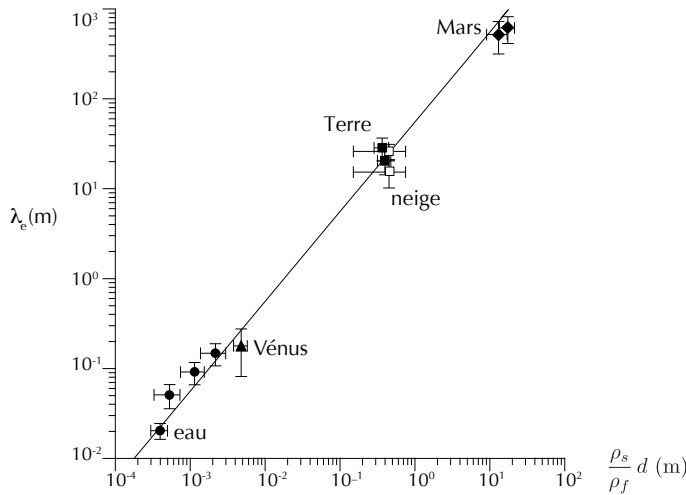
sable résulte donc de la compétition entre le décalage, en amont du sommet, du point de vent le plus fort et le décalage, en aval de ce point-là, du point de flux maximal. L'analyse linéaire de ce processus d'instabilité montre qu'il existe une taille (une longueur) de bosse  $\lambda_e \approx 25 L_{sat}$  (une vingtaine de mètres) pour laquelle le taux de croissance est le plus grand. C'est cette longueur d'onde  $\lambda_e$  à laquelle apparaissent spontanément les dunes à partir d'un lit plat, et que l'on appelle la « taille élémentaire » des dunes.

La longueur de saturation résulte de l'inertie des grains : il faut une certaine distance pour les accélérer à la vitesse du vent. En calculant l'accélération d'un grain soumis à une force de traînée turbulente, on montre que cette distance est proportionnelle à la longueur de traînée, c'est-à-dire au produit du diamètre  $d$  des grains par le rapport de densité particule-air  $\rho_s/\rho_f$ , indépendamment de la vitesse du vent (fig. 3). On peut alors tester la loi d'échelle entre  $\lambda_e$  et le produit  $(\rho_s/\rho_f) d$  en analysant la taille des dunes dans différents environnements (fig. 4). Sur Terre, la densité de

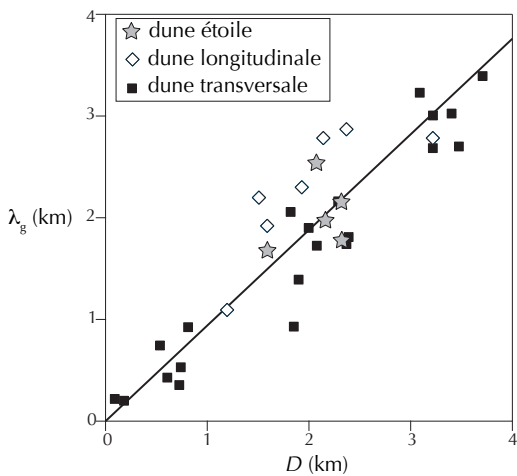




**3. Mesure de la longueur de saturation du flux de sable dans une expérience en soufflerie.**  
 (a) Flux de sable  $q$  en fonction de la distance  $x$  (normalisée par la longueur de trainée) au début du lit de sable (cf. schéma de l'expérience en insert). Ces courbes montrent la relaxation de  $q$  vers sa valeur saturée  $q_{\text{sat}}$  pour trois vitesses de vent. Lignes continues rouges : ajustement exponentiel  $q = q_{\text{sat}} [1 - \exp(-(x-x_0)/L_{\text{sat}})]$  avec une longueur de saturation  $L_{\text{sat}}$ .  
 (b) Longueur de saturation  $L_{\text{sat}}$  en fonction de la vitesse de cisaillement du vent  $u_*$ , telle qu'elle est définie en turbulence à partir de la contrainte de cisaillement, normalisée par la vitesse de cisaillement seuil  $u_{\text{th}}$  au-dessous de laquelle il n'y a pas de transport de grains. Les symboles correspondent à des mesures en soufflerie (losanges noirs) et sur le terrain (cercles rouges). Données issues de [3].



**4. Loi d'échelle montrant la proportionnalité de la taille « élémentaire » des dunes avec la longueur de trainée, pour différents environnements.** Ronds noirs : rides aquatiques correspondant à des grains de différentes tailles. Triangle noir : dunes en soufflerie haute pression. Carrés noirs : dunes éoliennes terrestres. Carrés blancs : dunes de neige. Losanges noirs : dunes martiennes. Données issues de [4].



**5. Loi d'échelle montrant la proportionnalité de la taille « géante » des dunes avec l'épaisseur de la couche convective atmosphérique, pour des dunes de différentes formes** (cf. encart). Données issues de [5].

»»»

l'air qui nous entoure est de  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , la taille des grains de quartz qui constituent les dunes est de l'ordre de  $0,2 \text{ mm}$ , et leur densité de  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Sur Mars, l'atmosphère est environ 60 fois plus légère, les grains sont presque deux fois plus petits et leur composition chimique indique qu'ils sont un petit peu plus denses. Avec ces nombres, en faisant le rapport des tailles de dunes, on retrouve bien le facteur d'environ 30 entre les dunes de quelques 600 m de long sur Mars (fig. 1d) et celles de 20 m sur Terre. Dans le cas aquatique au contraire, le facteur d'ordre 800 entre la densité de l'eau et celle de l'air conduit à des dunes de taille centimétrique (qu'on appelle alors des rides<sup>(a)</sup>). Nous avons également utilisé des expériences faites en soufflerie avec du  $\text{CO}_2$  sous haute pression, reproduisant les conditions atmosphériques qui règnent sur Vénus, ainsi que des photos de dunes de neige en Antarctique. L'ensemble de ces points s'aligne très bien, sur presque cinq décades, confirmant ainsi la validité de la loi d'échelle proposée (fig. 4).

### Dunes géantes

Après les premiers instants de sa formation, le motif initial des dunes n'est pas dans un état stationnaire. Il évolue sur des échelles de temps plus longues : suite à des processus d'interaction entre dunes et d'accumulation de sable, les dunes grossissent, sont plus distantes, et peuvent devenir « géantes ». Cette taille géante  $\lambda_g$  semble, elle, stationnaire et bien sélectionnée. Parmi les dunes géantes célèbres, on peut citer les dunes étoilées que l'on trouve dans le grand erg oriental algérien ou bien dans le désert de Rub el Khali de la péninsule arabique. Ces dunes atteignent 100 m de haut et sont espacées les unes des autres de 2 à 3 km. Il existe aussi des dunes transverses géantes en Chine ou encore des dunes longitudinales géantes en Namibie.

Nous avons trouvé que la taille maximale que les dunes peuvent atteindre est limitée par l'épaisseur de l'atmosphère, indépendamment de leur forme, par un effet de confinement. Dans les régions désertiques, l'atmosphère possède une structure verticale bien marquée. En altitude elle est stratifiée en densité de manière stable, alors que près du sol, on observe une couche convective bien mélangée, due au chauffage de l'air par le sol. Entre ces deux régions, il existe une fine couche dite « d'inversion », analogue à la surface libre d'une rivière. L'épaisseur D

de la couche convective (*i.e.* l'altitude de la couche d'inversion) dépend des variations saisonnières de la température au sol. Elle varie de quelques centaines de mètres dans les déserts côtiers où les échanges thermiques sont tempérés par la présence de l'océan, à plusieurs kilomètres dans les déserts continentaux. Il en va de même pour la taille des dunes géantes, et la figure 5 montre la proportionnalité entre  $\lambda_g$  (la distance typique entre grandes dunes) et  $D$ .

L'exploration d'un autre recoin de notre système solaire a récemment souligné à quel point la formation de dunes est universelle. Il s'agit de Titan, un des satellites majeurs de Saturne où s'écoule du méthane sur des grains de composition encore spéculative. Les images radar envoyées par la mission Cassini-Huygens ont en effet montré de grands cordons réguliers qui ont été interprétés comme des dunes longitudinales. Ces photos ne permettent pas de distinguer des structures élémentaires, mais on peut par contre utiliser la loi de proportion précédemment décrite pour en prédire la taille. Les données disponibles conduisent à une valeur de l'ordre du mètre – trop petite pour être observable – et ces dunes longitudinales seraient plutôt des dunes géantes, en accord avec les estimations atmosphériques. ■

(a) Les rides aquatiques ne sont pas de même nature que les rides éoliennes, objets de la brève ci-contre.

## Références

Publication de la SFP :

- 1• H.J. Herrmann et P. Rognon, « La physique des dunes », *Bulletin de la SFP* **134** (2002) 6-7.

Articles donnant la source des données montrées sur les figures 2 à 5 :

- 2• P. Claudin, G.F.S. Wiggs et B. Andreotti, "Field evidence for the upwind velocity shift at the crest of low dunes", *Boundary-Layer Meteorology* **148** (2013) 195-206.
- 3• B. Andreotti, P. Claudin et O. Pouliquen, "Measurements of the aeolian sand transport saturation length", *Geomorphology* **123** (2010) 343-348.
- 4• P. Claudin et B. Andreotti, "A scaling law for aeolian dunes on Mars, Venus, Earth, and for subaqueous ripples", *Earth and Planetary Science Letters* **252** (2006) 30-44.
- 5• B. Andreotti, A. Fourrière, F. Ould-Kaddour, A.B. Murray et P. Claudin, "Giant aeolian dune size determined by the averaged depth of the atmospheric boundary layer", *Nature* **457** (2009) 1120-1123.

Une revue récente :

- F. Charru, B. Andreotti et P. Claudin, "Sand ripples and dunes", *Ann. Rev. Fluid Mech.* **45** (2013) 469-493.