

ÉPREUVE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES

FILIÈRE PSI – 2019

DOSSIER N ° 5

Ce dossier est constitué de deux textes, le premier intitulé *Une loi d'échelle universelle pour les dunes* paru en 2008 dans *La Recherche* et le second intitulé *Qu'est-ce qui détermine la taille des dunes ?* paru en 2014 dans la revue *Reflots de la Physique*.

Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes, vous analyserez les concepts physiques sous-jacents aux documents présentés. Vous utiliserez votre culture scientifique pour discuter de façon critique les concepts et modèles physiques discutés dans les textes.

Note importante : vous accorderez une importance particulière aux ordres de grandeur mentionnés et vous tenterez de les justifier.

Remarques

- *L'usage de la calculatrice est interdit pendant la phase de préparation.*
- *Les textes peuvent être annotés pendant la période de préparation. Mais, à l'issue de l'épreuve, tous les documents (brouillons, transparents, et textes) doivent être impérativement remis à l'examineur.*
- *Les candidates et candidats sont invités à éviter d'écrire leur présentation en tout petits caractères, peu lisibles lors de la présentation devant l'examineur.*
- *Le dossier proposé est constitué de reproductions de textes ou d'extraits de textes scientifiques d'origines variées. Ces documents, comme tout document scientifique, peuvent être critiqués, voire contenir des erreurs. Si tel est le cas, cela ne doit pas gêner le/la candidat(e) au cours de sa préparation. Au contraire, il/elle pourra le mentionner au cours de l'exposé ou de la discussion avec l'examineur.*
- *Certains textes ont subi des coupes partielles ; avant l'établissement stable de l'image sur la tablette, le texte coupé peut apparaître brièvement : ce phénomène parasite est à ignorer. De même, l'élimination de pages complètes peut introduire une discontinuité dans la numérotation des pages du document final.*

PHYSIQUE

■ **EN DEUX MOTS** ■ Du sable, du vent, des frottements et la force de gravitation : voici les ingrédients nécessaires à la formation des dunes. Des mesures de terrain associées à des

modélisations ont permis de déterminer les lois de croissance et de déplacement dans l'un des cas les plus simples, celui des dunes en croissant, les « barkhanes ». Ces lois ne dépendent

pas de la nature du grain, ni du fluide qui les met en mouvement. Elles sont applicables aussi aux dunes sous-marines ou à celles qui se forment sur les autres planètes.

Une loi d'échelle universelle pour les dunes

De sable ou de neige, dans le désert, sous l'eau, ou même sur d'autres planètes, les dunes se forment suivant les mêmes mécanismes. On sait enfin les décrire.

CETTE DUNE GÉANTE du Sahara atlantique (le pylône, en bas à gauche de la photographie, donne une idée de sa taille) mesure 600 mètres de large et une quarantaine de mètres de haut.

Laâyoune, principale ville du Sahara occidental, au sud-ouest du Maroc : son port, sa plage, et ses dunes de sable orangé autour de la ville, que certains sillonnent pour soulager leurs rhumatismes, en prenant des bains de sable chaud... Nous autres, physiciens, et notre équipe de recherche en particulier, y allons régulièrement pour étudier les mécanismes de formation des dunes de sable qui, depuis les travaux pionniers du Britannique Ralph Bagnold, au début des années 1940, restent mal compris [1].

Nous avons aussi voulu comparer ces mécanismes avec ceux qui contrôlent les structures composées d'autres sédiments que le sable, formées par l'action d'autres fluides que l'air atmosphérique. C'est ainsi que nous avons découvert que la taille des dunes du Sahara, des rides sous-marines, des dunes de neige, et même de celles présentes sur Mars, est régie par une même relation de proportionnalité. La physique des formes dunaires répondrait ainsi à une sorte d'« universalité », qui permettrait de réaliser des prédictions sur la taille de ces reliefs dans des milieux étonnamment divers [2].

Flux de sable saturé

Il existe différents types de dunes, classées selon le régime de vent et la quantité de sable transporté par celui-ci. Lorsque le vent dominant souffle dans une même direction tout au long de l'année et qu'il y a peu de sable sur le sol, on observe des dunes à l'allure de croissants, comme dans le désert péruvien ou dans les environs de Laâyoune, où elles sont appelées « barkhane ». Elles mesurent quelques mètres de haut, pour plusieurs dizaines de mètres de largeur et de longueur. Ces dunes se déplacent dans le sens du vent, à une vitesse pouvant avoisiner les 70 mètres par an. En raison de leur morphologie et des conditions relativement simples qui concourent à leur formation, ces dunes sont parmi les plus faciles à reproduire en laboratoire et à étudier *via* des simulations numériques.

Une barkhane se déplace lorsque la vitesse du vent dépasse un certain seuil. À la surface du sol, la force de cisaillement compense alors la gravité et les forces de contact qui s'exercent sur les grains. Ils se retrouvent ainsi entraînés par le vent, avant de retomber, plus loin, sur la dune.

Pour un vent de vitesse constante, il existe une quantité maximale de sable pouvant être transportée par unité de temps. C'est le « flux de sable saturé », qui est d'autant plus important que le vent est fort. À mesure que le vent met de plus en plus de grains en mouvement, ceux-ci absorbent l'énergie cinétique du fluide. La vitesse du vent diminue alors à la surface de la dune. Un équilibre est finalement atteint pour une longueur dite de « saturation ». Cette distance est de l'ordre de 2 mètres.

En gravissant, dans le sens du vent, les dunes proches de Laâyoune avec un anémomètre, on constate que la force du vent et donc aussi le flux augmentent avec l'altitude. Passé le sommet, vent et flux diminuent à mesure que l'on descend de l'autre côté. En amont, le vent qui se charge en sable conduit ainsi à un phénomène d'érosion, mesurable en y plantant des baguettes munies d'un niveau de référence, et en aval, à un processus de dépôt. Ce transfert de matière de part et d'autre du sommet de la dune explique pourquoi elle se déplace dans le sens du vent.

Mais comment expliquer qu'elle puisse « grandir » spontanément ? Les modèles de la mécanique des fluides permettent de répondre. Ils indiquent en effet que les écoulements turbulents autour d'un obstacle, par exemple le sommet d'une dune, ne sont pas exactement symétriques. Le point où le vent est le plus fort se situe légèrement en amont du sommet, à une distance de l'ordre du dixième de la longueur de la dune. Pour déterminer le point où le flux de sable est maximal, il faut prendre en compte la longueur de saturation.

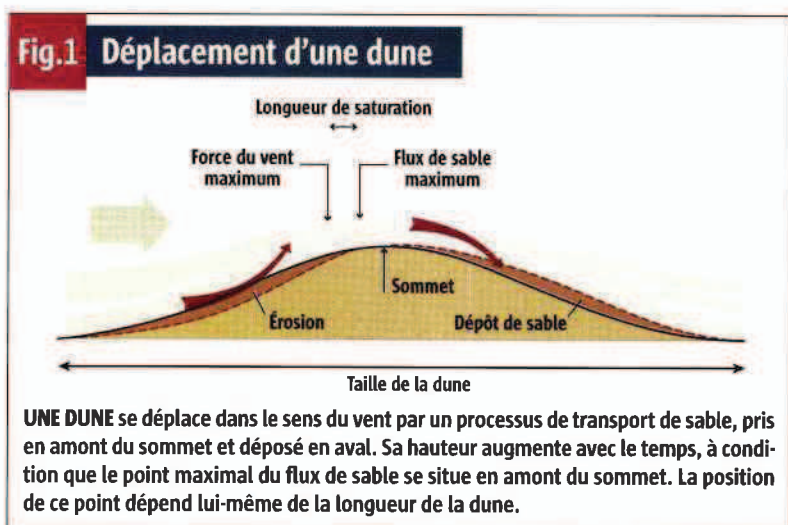
Deux cas de figure se présentent alors. Dans le premier, le point où le flux de sable est maximal se trouve en aval du sommet [fig. 1]. Celui-ci est par conséquent continuellement érodé, et le monticule finit par disparaître, dispersé par le vent. Dans le second, ce point se situe en amont : du sable se dépose au sommet de façon régulière, et la hauteur de la dune croît progressivement. Les conditions de croissance d'un tas de sable dépendent ainsi étroitement de sa longueur initiale.

L'analyse mathématique de ce processus montre qu'il existe une certaine longueur pour laquelle le taux de croissance d'une dune est maximal, autrement dit le plus grand. Elle vaut environ douze fois la longueur de saturation, soit une vingtaine de mètres. Cette valeur correspond à ce que l'on qualifie de « taille élémentaire » des dunes.

Philippe Claudin et Bruno Andreotti sont chercheurs au laboratoire de physique et de mécanique des milieux hétérogènes (ESPCI/CNRS/université Pierre-et-Marie Curie/université Denis-Diderot).
Philippe.Claudin@espci.fr
Bruno.Andreotti@espci.fr

[1] R. Bagnold, *Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Springer, 1941.

[2] P. Claudin et B. Andreotti, *Earth and Planetary Science Letters*, 252, 30, 2006.





LA FORCE DU VENT qui souffle au-dessus d'une dune dépend de l'altitude. Des mesures de terrain, à l'aide d'un anémomètre, permettent de la quantifier, comme ici sur le bras d'une barchane, dans les environs de Laâyoune. © GROUPE MORPHODYNAMIQUE (PMMH)

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

⇔ Le mécanisme expliquant la formation des dunes est décrit comme une interaction entre le vent et du sable. Peut-il être appliqué à n'importe quel fluide s'écoulant au-dessus d'une matière granulaire quelconque ? On devrait, dans ce cas, retrouver le même rapport de proportionnalité entre la taille élémentaire et la longueur de saturation des autres formes dunaires, exemple de ce que les physiciens qualifient de « loi d'échelle ». L'analyse des mécanismes d'interaction entre les grains de sable et le fluide montre que cette longueur de saturation est, en première approximation, proportionnelle au produit de la taille des grains transportés et du rapport entre la densité des grains et du fluide considéré. En déterminant l'ensemble de ces paramètres, il devient alors possible de tester l'« universalité » du mécanisme de formation des dunes.

Billes de verre

En Antarctique, par exemple, on observe des dunes de neige fraîche, lorsque les conditions atmosphériques le permettent : les flocons ne doivent pas adhérer au sol, et ne pas se coller entre eux. Ces flocons sont bien plus gros que les grains de sable, mais ils sont aussi plus aérés, et plus légers. Le produit de la taille des grains et de leur densité est sensiblement le même pour la neige et le sable. On vérifie ainsi que la taille élémentaire des dunes de neige vaut, comme pour les barchanes du Sahara, une vingtaine de mètres.

Que devient notre loi d'échelle pour un autre type de fluide, tel que l'eau ? Pour étudier les dunes sous-marines en laboratoire, on utilise une plaque immergée, coulissante, sur laquelle on dépose un tas de billes de verre, dont le diamètre et la densité sont déterminés de façon précise [3]. Après 50 centimètres de déplacement latéral, la plaque est stoppée. Puis elle revient à sa position initiale, assez lentement pour que les billes ne bougent pas. Le tas de billes ressent alors

l'effet d'un courant unidirectionnel, et se transforme progressivement en une barchane « modèle réduit ». Celle-ci ne mesure en effet que quelques centimètres. Rapportées à la densité du fluide, huit cents fois plus importante que celle de l'air, ces rides présentent toutefois le même rapport de proportionnalité que nous avons déterminé entre la taille élémentaire et la longueur de saturation.

Nous avons voulu tester la pertinence de cette loi d'échelle dans un milieu plus exotique : la planète Mars, où un vent de dioxyde de carbone souffle dans une atmosphère soixante fois plus légère que sur Terre. Entre 1999 et 2006, la sonde américaine Mars Global Surveyor a photographié des dunes dont la ressemblance avec ses cousines terrestres est frappante, sauf que leur taille élémentaire est de 600 mètres environ. Les robots Spirit et Opportunity ont fourni, pour leur part, des clichés des grains composant ces dunes. En comparaison avec le sable terrestre, les grains sont deux fois plus petits, et leur composition chimique indique qu'ils sont un peu plus denses. Là encore, nos calculs montrent que la relation mathématique est respectée. D'où l'idée de s'en servir pour faire des prédictions, comme savoir si les dunes martiennes sont mobiles, et si oui, sur quelle échelle de temps. On utilise alors le fait que le temps, pour que la hauteur d'une bosse de sable croisse de quelques pour-cent, soit lié au flux moyen de sédiments transportés. Pour déterminer la valeur de ce flux, il faut connaître la fréquence avec laquelle le vent martien souffle suffisamment fort pour transporter les sédiments. Considérant les fortes variations de température et le fait que le sol se retrouve souvent gelé, on estime cette fréquence à seulement quelques jours par an. Nos prédictions indiquent alors que les dunes martiennes se déplaceraient en plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines, de siècles. Elles seraient donc « actives », mais pas à l'échelle humaine et des programmes spatiaux.

Les dunes martiennes se déplaceraient... en plusieurs centaines de siècles

Enfin, en 2007, l'exploration d'un autre recoin de notre système solaire a souligné à quel point le mécanisme de formation des dunes semblait universel. Il s'agit de Titan, satellite de Saturne, où une atmosphère de méthane s'écoule sur des grains de composition encore inconnue. Les photographies envoyées par la sonde Cassini-Huygens ont révélé l'existence de grands cordons réguliers, interprétés comme des dunes longitudinales. Ces clichés ne permettent pas de distinguer des structures élémentaires, mais nous avons utilisé la loi d'échelle pour prédire leur taille. Les données disponibles conduisent ainsi à une valeur de l'ordre du mètre, résultat certes théorique, mais qui reste le seul, à ce jour, en raison de la trop faible résolution des images radar. ■ P. C. et B. A.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Un site complet sur la physique des dunes et des tas de sable.
<http://tinyurl.com/yt64bo>

■ Photographies de dunes martiennes prises par Mars Global Surveyor.
www.msss.com/moc_gallery/

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).

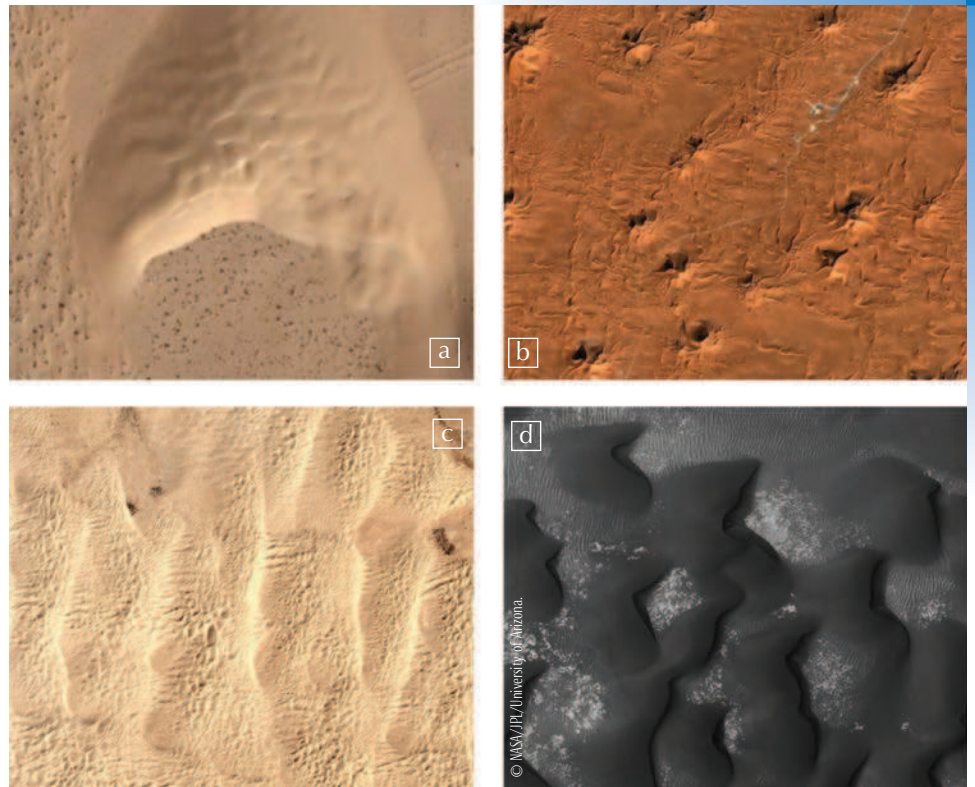
Dans cet article, nous proposons d'aborder une question physique plus générale que celle de reproduire l'une ou l'autre de ces formes. On veut ici comprendre ce qui détermine la taille à laquelle les dunes apparaissent à partir d'un lit plat, et ce qui limite leur taille maximale. Dans toute la suite, 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

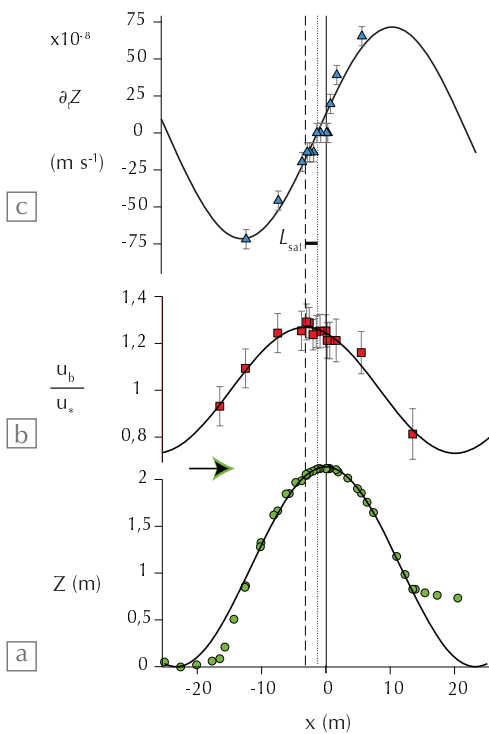
Que se passe-t-il lorsque le vent souffle sur un lit sableux, que ce soit sur une dune ou sur la plage ? Si la vitesse du vent n'est pas assez grande, le sable reste immobile. Au-dessus d'un certain seuil en revanche, les grains de la surface sont entraînés par le vent, font de petits sauts, et viennent 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].

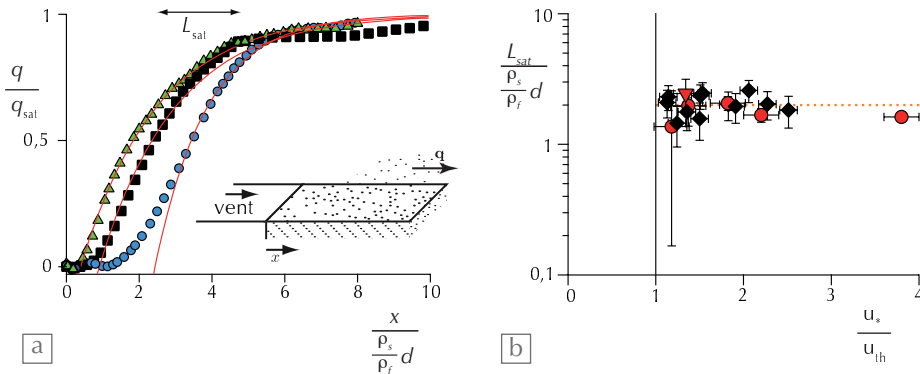
Formation des dunes

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

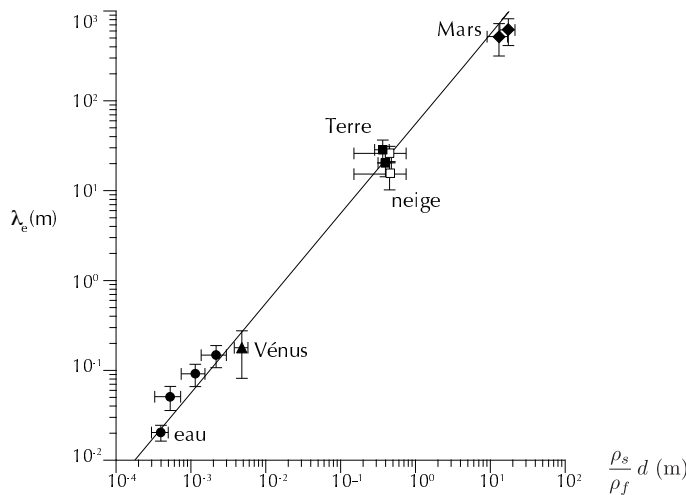
sable résulte donc de la compétition entre le décalage, en amont du sommet, du point de vent le plus fort et le décalage, en aval de ce point-là, du point de flux maximal. L'analyse linéaire de ce processus d'instabilité montre qu'il existe une taille (une longueur) de bosse $\lambda_e \approx 25 L_{sat}$ (une vingtaine de mètres) pour laquelle le taux de croissance est le plus grand. C'est cette longueur d'onde λ_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 ρ_s/ρ_f , indépendamment de la vitesse du vent (fig. 3). On peut alors tester la loi d'échelle entre λ_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

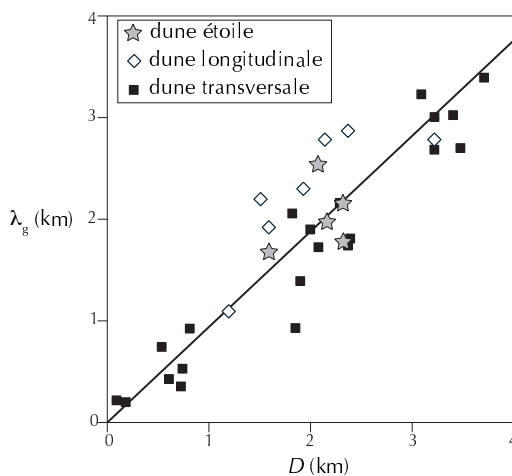




3. Mesure de la longueur de saturation du flux de sable dans une expérience en soufflerie.
 (a) Flux de sable q en fonction de la distance x (normalisée par la longueur de trainée) au début du lit de sable (cf. schéma de l'expérience en insert). Ces courbes montrent la relaxation de q vers sa valeur saturée q_{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_{sat} .
 (b) Longueur de saturation L_{sat} en fonction de la vitesse de cisaillement du vent u_s , telle qu'elle est définie en turbulence à partir de la contrainte de cisaillement, normalisée par la vitesse de cisaillement seuil u_{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 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^(a)). Nous avons également utilisé des expériences faites en soufflerie avec du 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 λ_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 λ_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 proportionnalité 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.

Comment se forment les rides éoliennes sur les dunes de sable ?

Ce travail a fait l'objet d'une actualité scientifique de l'INSIS (CNRS) du 20 octobre 2014.



© Bruno Andreotti.

1. Rides sur des dunes du Sahara Atlantique.

Sur Terre comme sur Mars, les flancs des dunes de sable sont typiquement décorés de rides éoliennes, dont la régularité est particulièrement impressionnante (fig. 1). Mais la formation de ces rides reste une énigme. Le modèle « classique » proposé jusqu'à présent prédit effectivement la formation de rides, mais espacées d'une distance de quelques grains seulement. Or, dans la réalité, les rides éoliennes sont espacées d'une distance 100 à 1000 fois supérieure.

Philippe Claudin et Bruno Andreotti, du laboratoire de Physique et mécanique des milieux hétérogènes (CNRS/ESPCI/UP6/UP7), et Orenco Duran, de l'université de Brême (Allemagne), ont développé un modèle numérique inédit qui résout cette énigme. Ce modèle décrit ainsi le mécanisme de formation des rides éoliennes : les grains emportés par le vent délogent, lorsqu'ils atterrissent, des grains immobiles du lit de sable. Les grains délogés font alors des petits sauts, plutôt vers le haut, et s'accumulent pour former la crête des rides. Les grains qui contribuent le plus à la croissance des rides sont ceux qui atterrissent après avoir parcouru une distance proche de l'espacement des rides déjà formées. Ce mécanisme « de résonance » est l'élément central de ce nouveau modèle numérique : il prend en compte l'espacement des rides pour expliquer leur croissance.

Lorsque les rides émergent à partir d'un lit de sable initialement plat, leur espacement est le résultat d'un compromis entre ce mécanisme de croissance et un mécanisme de transport des grains vers l'aval de la pente de chaque ride. Le modèle prédit notamment, en accord avec les observations expérimentales, que l'espacement des rides, ainsi que la vitesse avec laquelle elles « avancent » sous l'effet du vent, augmentent linéairement avec la force du vent.

Les simulations ont également montré que le produit de l'espacement entre les rides et de leur vitesse de propagation est proportionnel au flux moyen de sable transporté par le vent. Comme l'espacement et la vitesse de propagation des rides éoliennes peuvent être facilement mesurés à partir de photos suffisamment résolues, ce nouveau modèle permet d'estimer à distance, à partir de simples calculs, les transports de sable ayant lieu sur Terre, comme sur Mars (où l'espacement des rides est de l'ordre de plusieurs mètres).

Contacts

Philippe Claudin (Philippe.Claudin@espci.fr)

Référence

[1] O. Duran, P. Claudin et B. Andreotti, "Direct numerical simulations of eolian sand ripples", *PNAS* **111** (2014) 15665-15668.

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.