

# Pièges à fourmis

Jérôme Crassous<sup>(1)</sup> (jerome.crassous@univ-rennes1.fr), Antoine Humeau<sup>(2,3)</sup>, Samuel Boury<sup>(1,4)</sup> et Jérôme Casas<sup>(2)</sup> (jerome.casas@univ-tours.fr)

(1) Institut de Physique de Rennes, Université Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex

(2) Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte (IRBI), Université François Rabelais, 37200 Tours

(3) Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, 78610 Auffargis

(4) École normale supérieure de Lyon, 69007 Lyon

Les animaux fabriquant des pièges pour capturer des proies sont relativement rares. L'exemple le plus connu est l'araignée qui utilise l'adhésion de sa toile pour fixer la proie. La larve de fourmilion fabrique dans du sable un piège qui tire parti des lois de la friction pour faire glisser la proie (généralement une fourmi) vers le prédateur.

C'est en observant certaines caractéristiques du piège de cet insecte que nous avons été amenés à étudier, puis à mettre en évidence, les particularités de la friction sur un matériau granulaire.

## Un insecte bâtisseur

Les fourmilions font partie d'un ordre d'insectes, les neuroptères qui, à l'état adulte, ressemblent grossièrement à une libellule, et dont un autre représentant plus connu est la chrysope. Aux stades larvaires, le fourmilion mesure entre un et une dizaine de millimètres, et vit dans des milieux sablonneux secs. Il construit son piège en éjectant du sable avec la tête, en même temps qu'il opère un déplacement à reculons en forme de spirale. L'opération, qui dure de l'ordre d'une heure, aboutit à un cratère conique, d'une profondeur de quelques centimètres, dans le sable. Des relevés de la topographie du piège montrent que sa forme est très proche de celle d'un cône, avec un angle constant entre la paroi du cône et l'horizontale (fig. 1a). Cet angle est inférieur de quelques (typiquement 5) degrés à la valeur de l'angle d'avalanche du milieu granulaire. L'angle d'avalanche est l'angle maximal auquel on peut incliner un matériau granulaire avant qu'il ne s'écoule franchement.

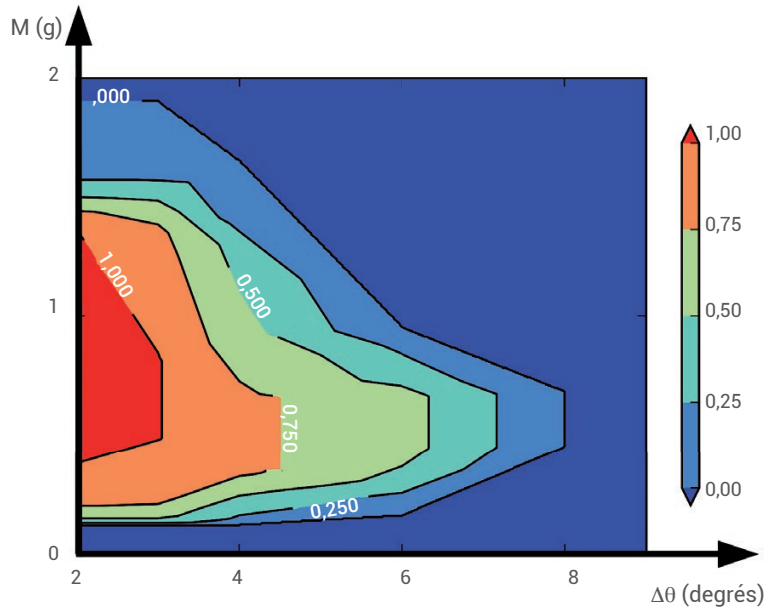
Le fourmilion est enfoui dans le sable vers le bas du piège (fig. 1b). Le piège étant maintenant prêt, le fourmilion attend sa proie. Un insecte s'aventurant sur les pentes du piège a alors tendance à glisser le long de la pente. Le fourmilion n'attend pas que sa proie lui arrive dans les mandibules mais fait des jets ciblés de sable, afin de déstabiliser sa proie. Si celle-ci descend jusqu'au fond du piège, les mandibules du fourmilion se referment sur elle (fig. 1c) et immobilisent la proie, qui se fait dévorer. Le fourmilion n'a pas vraiment le choix de

sa proie, et ne peut que rejeter ce qui ne lui convient pas. Ceci pose la question de comment construire un piège efficace ? Cette construction animale est souvent utilisée afin d'illustrer le concept d'avalanche granulaire. Notre explication est très différente et demande de revisiter certaines lois de la tribologie.

Lors de sa glissade, la proie tente de remonter la pente pour échapper à son prédateur. Une étude systématique de l'efficacité du piège a été menée à l'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte à Tours. Pour cela, des fourmis de différentes espèces ont été déposées délicatement sur la paroi des pièges. Les pièges sont tous construits dans un sable modèle et identique (billes de verre de 0,25 millimètre de diamètre), aux propriétés physiques bien définies. À partir de ces données, la probabilité de la capture d'une fourmi en fonction de ses paramètres physiques (masse) ou biologiques (espèce) peut être déterminée. Il ressort de ces mesures que l'efficacité du piège varie avec la masse de la fourmi : des fourmis d'une masse de 2 mg sont capturées avec une probabilité de 55%, probabilité qui chute à 35% pour des masses de 0,5 mg, et à 15% pour 6 mg. Une observation attentive montre également que les fourmis qui sont en difficulté ne déclenchent pas d'avalanches dans le cône, ou alors seulement des perturbations restreintes spatialement, mais plutôt patinent sur un sol qui se dérobe sous leurs pattes, comme si le sol était un tapis roulant. Se pose alors la question de comment décrire la friction solide à la surface d'un tel substrat.



## De la stabilité à la glissade



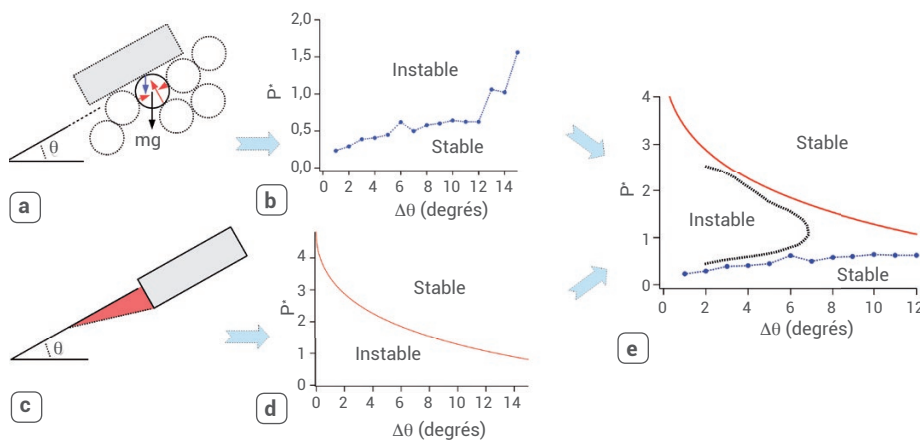
Pour comprendre ce diagramme de stabilité, nous allons d'abord décrire le fonctionnement à très faibles masses. Considérons la répartition des forces dans un matériau granulaire sans objet posé dessus (fig. 3a, sans l'objet). À un angle inférieur à l'angle d'avalanche, le milieu granulaire est en équilibre stable, car chaque grain est en équilibre sous l'effet de son poids et des forces exercées par les grains avec lesquels il est en contact. La stabilité de l'empilement réside dans le fait qu'il y ait au moins une répartition de forces réalisant cet équilibre. L'existence d'une position d'équilibre va dépendre, d'une manière encore inconnue théoriquement, du nombre moyen de contacts par bille, du coefficient de friction entre les grains et de l'angle d'inclinaison. Pour des grains à la surface de l'empilement, les forces intergrains vont être de l'ordre du poids d'un grain.

Si maintenant on applique une force supplémentaire à quelques grains de la surface (ce que l'on fait en posant dessus un objet), cette répartition de forces va être perturbée. On s'attend à ce que la force à appliquer par grain pour déstabiliser l'empilement varie comme le poids d'un grain, et que cette force soit d'autant plus faible que l'empilement est incliné proche de l'avalanche. Des simulations numériques permettent d'estimer quantitativement (fig. 3b) la force moyenne à appliquer pour déséquilibrer l'empilement en fonction de l'écart  $\Delta\theta$  à l'angle d'avalanche.

## De la glissade à l'empreinte

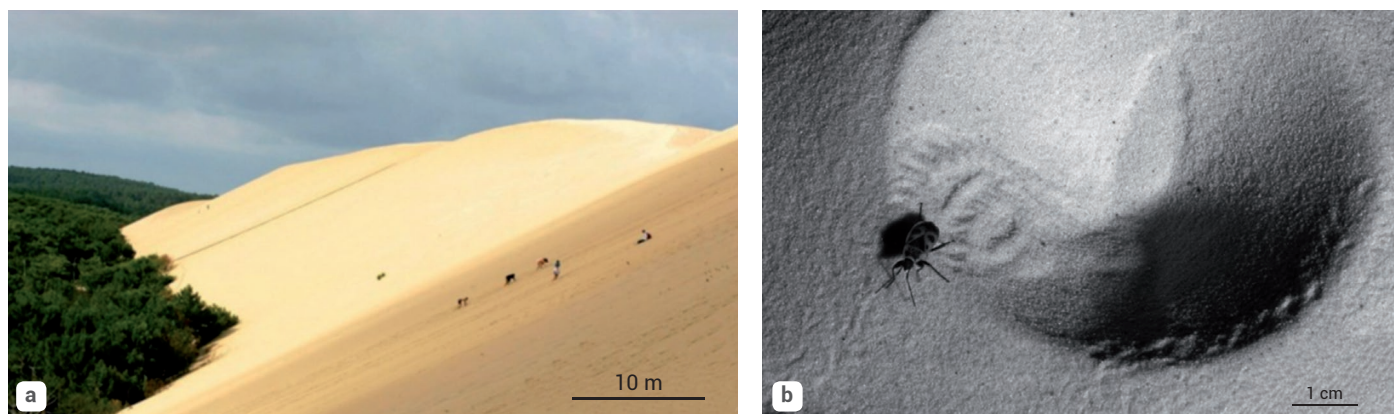
Quand l'empilement est déstabilisé, le support commence à s'écouler. Le matériau devenant fluide, l'objet va s'enfoncer dedans : c'est par exemple la situation d'un marcheur dont les pieds s'enfoncent dans le sable. Pour un matériau totalement liquide au repos, cet enfoncement serait donné par le principe d'Archimède. Pour un matériau granulaire, les forces de friction entre grains réduisent cet enfoncement. La profondeur à laquelle s'enfonce un objet posé sur une surface sableuse horizontale a été mesurée expérimentalement comme étant réduite approximativement d'un facteur dix par rapport à un fluide. La situation est similaire sur un plan incliné et

**2. Diagramme de stabilité d'un objet posé sur une pente granulaire.** La couleur représente la probabilité que l'objet glisse sur la pente. La probabilité est portée en fonction de l'écart au seuil d'avalanche,  $\Delta\theta = \theta_a - \theta$ , et de la masse  $M$  de l'objet. L'objet, de surface inférieure plane  $\Sigma = 140 \text{ mm}^2$ , est posé sur un milieu composé de billes de verre de diamètre  $d = 2,2 \text{ mm}$ .



### 3. Interprétation du diagramme de stabilité d'un objet sur une pente granulaire.

- Sans objet, chaque grain (de masse  $m$ , diamètre  $d$  et densité  $\rho$ ) est en équilibre sous l'action de son poids  $mg$  et des forces intergrains représentées en rouge. Quand un objet de masse  $M$  est posé dessus, il exerce une force supplémentaire (en bleu) qui modifie l'équilibre.
- Pression adimensionnée  $P^* = Mg/\Sigma\rho gd$  à appliquer pour déstabiliser l'empilement en fonction de l'écart au seuil d'avalanche. Simulations numériques bidimensionnelles pour un objet de longueur  $6d$ .
- Un objet lourd qui s'enfoncé doit pousser un coin de matériau (en rose).
- Pression  $P^*$  à appliquer pour stabiliser l'objet sur une pente granulaire.
- Diagramme de stabilité obtenu expérimentalement dans l'espace  $(P^*, \Delta\theta)$ . La combinaison des mécanismes (a-b) et (c-d) définit une petite zone d'instabilité entre les courbes rouge et bleue. La courbe noire en pointillés correspond à une probabilité de glissement de 0,5.



#### 4. Gravir une pente granulaire proche de l'angle d'avalanche n'a rien d'impossible.

(a) Grimpeurs sur la face d'avalanche de la dune du Pilat. (Photo Franck Perrogon). (b) Punaise s'échappant d'un piège de fourmilion. Dans les deux cas, les pentes sont à quelques degrés de l'angle d'avalanche.

l'objet s'enfonce légèrement dans le sable. Cet enfoncement va stabiliser l'objet sur la pente. En effet, pour glisser l'objet doit maintenant pousser du matériau (fig. 3c). La force à appliquer pour pousser le matériau est estimée par la méthode dite du « coin de Coulomb ». Pour un coin avec un angle donné, on calcule, en supposant une loi de friction solide pour le matériau, la force à appliquer pour pousser le coin. Puis on cherche l'angle du coin pour lequel cette force est minimale. Toutes choses égales par ailleurs, cette force diminue (conformément à l'intuition) mais ne s'annule pas (résultat un peu surprenant) lorsque l'inclinaison du tas tend vers l'angle d'avalanche. Si cette force est plus grande que la composante tangentielle du poids de l'objet posé, elle arrête le glissement. Cette force dépend de l'enfoncement de l'objet (qui dépend lui-même du poids), de l'angle d'inclinaison, et du rapport longueur/surface de l'objet. On peut donc estimer le poids nécessaire pour stabiliser l'objet sur sa pente (fig. 3d). Gravir une pente granulaire proche de l'angle d'avalanche n'a rien d'impossible : il faut être suffisamment lourd pour s'enfoncer dans le sol, et ainsi pouvoir s'appuyer sur le matériau granulaire. La figure 4 en montre deux exemples : des grimpeurs sur la face d'avalanche de la dune du Pilat et une punaise « gendarme » s'échappant d'un piège de fourmilion.

Si maintenant on combine ces deux limites d'instabilité sur un même diagramme (fig. 3e), on se rend compte que la zone d'instabilité est en fait assez restreinte dans l'espace des paramètres pression - écart au

seuil. Pour glisser, il faut que l'objet soit suffisamment lourd pour déstabiliser l'empilement, mais suffisamment léger pour ne pas s'enfoncer lors de sa glissade. Pour un objet d'une taille de quelques grains, le minimum de stabilité arrive quand la pression exercée  $Mg/\Sigma$  est de l'ordre de la pression  $\rho g d$  exercée par une couche de billes.

Revenons maintenant à nos fourmis. La pression exercée par une fourmi sur un substrat solide dépend de sa surface de contact, qui est assez délicate à déterminer précisément. Nous pouvons malgré tout estimer qu'une fourmi de 2 mg posée sur un milieu granulaire (avec  $d = 0,25$  mm), et pour laquelle la probabilité d'être capturée est maximale, exerce une pression proche de 2,7 fois la pression exercée par une couche de billes. Cette pression est proche de celle pour laquelle le minimum de stabilité se produit. À l'opposé, la punaise de la figure 4b exerce une pression équivalente à 40 couches de billes, et peut donc remonter la pente.

## Conclusion

La violation des lois d'Amontons-Coulomb pour la friction sur une pente granulaire provient ici de la déformabilité du substrat qui peut se mettre à couler sous l'effet d'une pression appliquée, et cette particularité de la physique de la friction a été utilisée de manière opportuniste par le fourmilion.

De nombreux points restent à préciser. La description théorique de la déstabilisation de la surface libre sous l'effet d'une force localisée en surface serait à mener. Le rôle de l'inertie est aussi à préciser en examinant les lois de la friction dynamique. La géométrie de l'objet doit jouer de manière importante sur l'enfoncement : on peut skier sur des dunes !

Avec des millions d'espèces qui sont autant de solutions à une myriade de problèmes, les insectes sont une source importante de bio-inspiration, au-delà de leur beauté et étrangeté. ■

### Pour en savoir plus

- J. Crassous, A. Humeau, S. Boury et J. Casas, "Pressure-Dependent Friction on Granular Slopes Close to Avalanche", *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017) 058003.
- A. Humeau, J. Rougé et J. Casas, "Optimal range of prey size for antlions", *Ecological Entomology*, **40** (2015) 776-781.
- B. Andreotti, Y. Forterre et O. Pouliquen, *Les milieux granulaires. Entre fluide et solide*, EDP Sciences (2011).
- C.J. Parisot, « La larve de fourmilion, propagation d'ondes dans le sable », vidéo CNRS Images, <http://videotheque.cnrs.fr/doc=4072>