

Adhésion Visqueuse

Biomécanique

DUHEM Antoine

PAGES Gabin

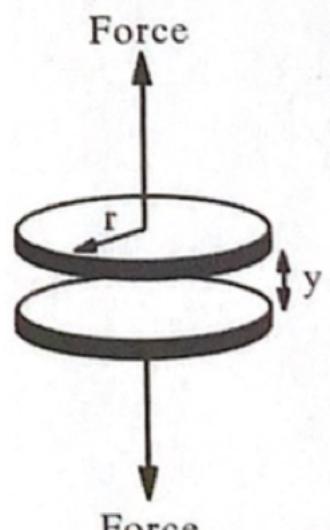
27 février 2023

Adhésion et répulsion de Stefan

Afin de tenter de définir ce qu'est l'adhésion visqueuse, nous pouvons prendre l'exemple suivant : deux plaques sont totalement immergées dans un fluide et on essaye de les éloigner l'une de l'autre. Dans cette situation, une force doit être appliquée sur le fluide pour le contraindre à passer entre les deux plaques ce qui implique donc qu'une force est nécessaire pour séparer les deux plaques. On comprend alors assez bien qu'il y a un phénomène d'adhésion entre les deux plaques. La question que nous pouvons nous poser désormais est celle ci : dans quelle mesure ce phénomène d'adhésion a lieu ?

D'après Stefan, physicien et mathématicien, la force d'attraction entre les deux plaques peut être prédite comme :

$$F = \frac{3\pi\eta R^4}{2h^3} \frac{dh}{dt}$$



Avec $dh/dt = dy/dt$ la variation de distance entre les deux plaques en fonction du temps. La capacité du fluide à créer cette force de résistance à l'éloignement des deux plaques est directement liée à sa viscosité dynamique.

A titre d'exemple un gastéropode a une surface de contact au sol de 3,14 centimètres carrés, avec une épaisseur d'eau entre l'animal et la surface sur laquelle il est de 10 µm, il faudrait environ 50 Newton pour écarter l'animal de la surface.

Problèmes de la loi de Stefan

La loi de Stefan n'est cependant pas utilisable dans tous les cas de figures. En effet cette loi dépend de la vitesse à laquelle les deux corps sont séparés l'un de l'autre. Si la vitesse de séparation des deux objets est très lente, alors la force nécessaire serait très faible, il n'y aurait donc d'adhésion que si la vitesse de séparation est suffisante. Cela pose problème avec la force de gravité qui s'applique en permanence et qui devrait donc empêcher les gastéropodes de tenir à l'envers sur une paroi, il se trouve qu'en pratique ils s'accrochent sur le



même principe qu'une ventouse.

Dans le cas inverse, si nous voulions arracher l'animal de sa surface à une vitesse d'1 cm/s, la force nécessaire serait de 470 N. Sur cette surface, cela représenterait une dépression de quasiment 15 atmosphères, à laquelle l'eau liant les deux surfaces

subirait un phénomène de cavitation (apparition de bulles de vapeur).

Un autre aspect de la loi de Stefan qui est intéressant à commenter, est le fait que pour une situation d'adhésion traditionnelle, la force de séparation est directement proportionnelle à la surface, ce qui n'est pas le cas pour la loi de Stefan. Pour la loi de Stefan, la force par unité de surface est proportionnelle au rayon au carré.

$$\frac{\mathbf{F}}{\pi r^2} = \mu \frac{3r^2 dy/dt}{2y^3}.$$

Cette très forte dépendance à la viscosité du fluide et à la taille de la surface n'a pas rendu le phénomène d'adhésion visqueuse favorable aux organismes terrestres.

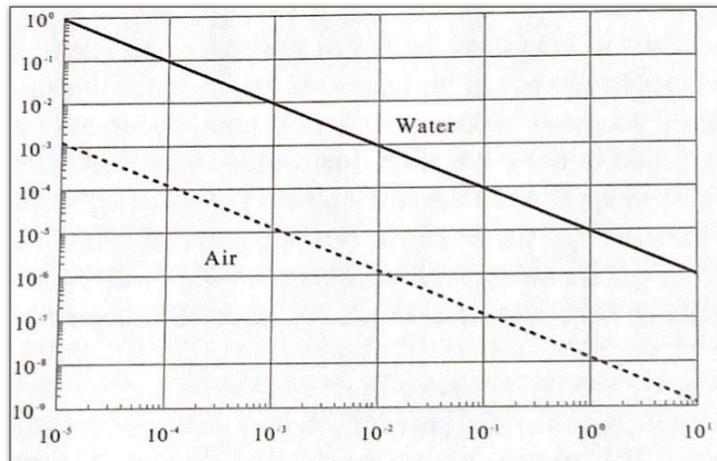
Dans le cas opposé, où les deux plaques seraient poussées l'une contre l'autre, avec donc, un dh/dt négatif ; le rythme auquel les deux plaques se rapprocheraient décroîtrait à mesure que le temps passe si la force appliquée était constante. Il faudrait donc théoriquement un temps infini afin que les deux plaques se touchent. L'équation de départ ne peut naturellement pas s'appliquer au niveau moléculaire du gaz ou du liquide. On arrive cependant à réarranger l'équation pour trouver le temps nécessaire de contact avec une force donnée :

$$t = -\frac{3\pi\mu r^4}{4Fy^2} + \text{constant}$$

Application biologique

Cette solution est applicable dans un contexte biologique, dans le cas d'un insecte atterrissant sur une fleur par exemple. La solution ne représente pas quelque chose d'exact mais une approximation réaliste. Notons qu'un organisme aquatique de la même taille qu'un organisme terrestre a besoin d'appliquer 70 fois la force de l'organisme terrestre sur la même période de temps.

Considérons un organisme de la forme d'un disque, d'épaisseur L , et d'un rayon 10x plus grand R . Sa densité étant 1080 kg/m³. On constate que le temps d'arrivée de l'organisme à une distance à laquelle il peut « attraper » la surface est bien plus court dans l'air que dans l'eau.



Dans l'absolu le temps est assez courts dans les deux cas.

Au lieu d'imaginer une situation où l'organisme voyage d'une distance proportionnelle à sa taille, mettons nous dans le cas où l'organisme doit se déplacer d'une distance fixe ; les oursins et les étoiles de mer se déplacent en utilisant un mouvement de

marche aquatique : de petits tubes se soulèvent de la surface, s'avancent d'une petite distance, puis se reposent sur la surface.

Typiquement, le petit tube doit être à une distance

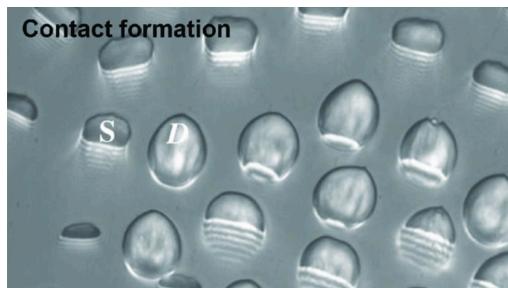
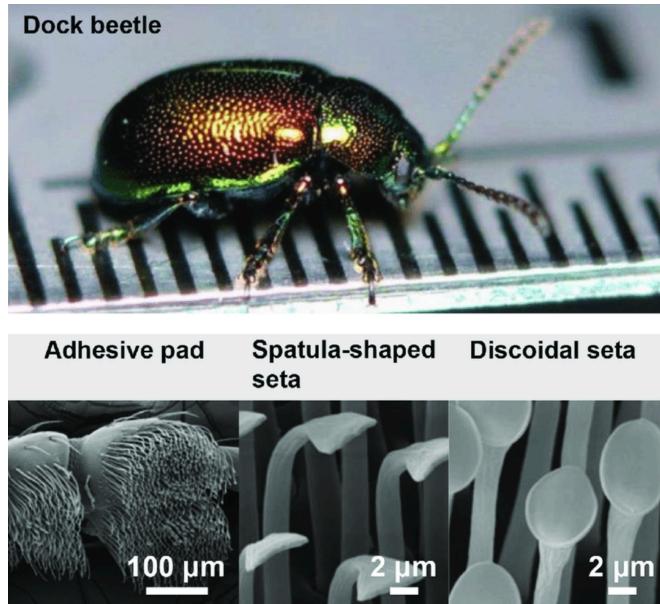
de $10 \mu\text{m}$ afin de regagner un contact adhésif. Nous constatons que plus le rayon du tube est fin plus le temps de contact est court. En conclusion, afin de maintenir une vitesse de déplacement raisonnable les « piétons » des fonds marins doivent avoir de petits « pieds » ou tubes.



Dans l'air, ce problème est beaucoup moins important du fait de la viscosité dynamique bien inférieure.

Vue en détail

On se propose ici de regarder en détail la manière dont un coléoptère adhère aux surfaces. Nous pouvons voir que ses pattes sont couvertes de petites spatules enduites de sécrétions adhésives. Comme expliqué précédemment, le problème de temps de rapprochement des spatules au sol est beaucoup moins important dans l'air.



En revanche le coléoptère bénéficie de l'adhésion de Stefan sur chacune des spatules en forme de disque constituant ses pâtes, comme beaucoup d'insectes volants.

Conclusion

La loi de Stefan ne sert pas à expliquer totalement les phénomènes d'adhésion en milieu visqueux entre deux corps, mais elle peut donner des approximations intéressantes. Les animaux terrestres utilisent d'autres principes comme la succion pour les escargots, ou la sécrétion de fluides adhésifs pour les insectes volants. Chez les animaux aquatiques des fonds marins nous retrouvons aussi une colle sous marine sécrétée par les « podias ». L'adhésion est donc le résultat d'une combinaison de plusieurs phénomènes.