

Marcher sur l'eau

CAROLINE LOUBET

De la semoule modifie l'écoulement de l'eau.

Certains matériaux ne sont ni liquides ni solides, mais un peu les deux à la fois. Pour les explorer, je vous propose quelques expériences avec de la farine de maïs (couramment vendue dans les épiceries ou dans les grandes surfaces sous le nom de *Maïzena*).

Prenez-en un peu et mélangez-la avec de l'eau pour faire une sauce épaisse. On ne peut dire, en observant le mélange immobile, s'il est solide ou liquide. Si l'on donne un coup de poing à la surface, on se heurte à un solide : rien ne bouge, et la main reste sèche. En revanche, si nous penchons lentement le récipient sur le côté, le mélange coule comme un liquide. Seul le temps de réaction que l'on a laissé au mélange a changé, entre les deux manipulations : court dans la première expérience, long dans la seconde.

Chaque matière possède son propre temps de réaction à une contrainte extérieure ; si nous imposons rapidement une contrainte pendant un temps inférieur au temps de réaction de la matière, les molécules ou les agrégats moléculaires

n'ont pas le temps de réagir, et le matériau a un comportement de solide. Inversement, si la contrainte est appliquée en un temps supérieur à ce temps de réaction, le matériau réagit et la matière s'adapte.

On retrouve cette ambiguïté de la matière dans les cathédrales : les vitraux anciens sont souvent plus épais à la base qu'au sommet, parce que la pesanteur agit sur eux depuis des siècles ; le verre, qui paraît solide à notre échelle, ne cesse de couler comme un liquide, mais très lentement. De même, les câbles des ponts suspendus doivent être retendus périodiquement, parce qu'ils s'allongent lentement. Passons à encore plus grandiose : le Globe terrestre. Est-il vraiment solide ? Les remarques précédentes nous rappellent que l'échelle d'observation détermine la réponse à la question. Les montagnes sont immobiles, à l'échelle de la vie humaine, mais elles se sont formées, et elles se forment encore, par plissements de terrain. Les continents, eux, se déplacent les uns par rapport aux autres à la vitesse d'un ongle qui croît, soit quelques centimètres par an. Les

solides seraient-ils ainsi des liquides auxquels on ne donnerait pas le temps de couler ? Voilà qui confirmerait l'idée d'Héraclite, pour qui « tout coule ».

Les mécanismes de fluage des roches sont toutefois différents de ceux qui rendent solides les mélanges d'eau et de farine de maïs. Dans ce dernier cas, le comportement est plutôt analogue à celui du sable mouillé. Quand on appuie doucement sur un tel sable, la pression se transmet en partie par le sable, dont les grains appuient les uns sur les autres, et en partie par le liquide, dans les interstices. Quand la pression est plus forte, le volume total augmente, parce que les grains doivent se séparer pour bouger (sans contrainte, le sable est compact, parce que les grains sont imbriqués). L'augmentation de volume aspire l'eau alentour. La réaction du système est limitée par l'écoulement du fluide : quand on marche sur une plage, le pourtour du pied s'assèche lentement, parce que la migration de l'eau dans les interstices, sous le pied, n'est pas immédiate.

Ainsi quelqu'un qui marcherait lentement sur du sable mouvant s'enfoncerait, parce que les grains auraient le temps de se réorganiser au poser du pied, mais que le retrait, qui est plus rapide, serait impossible : le liquide n'aurait pas le temps de migrer pour s'adapter aux déformations globales du sable. Ce type de comportement des liquides « dilatants » est caractéristique de dispersions très concentrées, telle celle de la farine de maïs dans l'eau.

Voici enfin quelques expériences pour poursuivre vos explorations rhéologiques : dans un saladier, mélangez un paquet de 350 grammes de *Maïzena* (attention à choisir de la farine sans adjonction) et 0,35 litre d'eau, afin d'obtenir un demi-litre de matière.

Plongez-y un doigt, doucement d'abord, puis rapidement ensuite.

Puis amusez-vous à en faire une boule, en ne cessant pas de malaxer la matière ou de faire sauter la boule dans la main. Si vous cessez d'agiter la boule, vous la verrez couler.

Pour apprécier la dureté du mélange, cassez-le en prenant rapidement un morceau que vous soulevez comme une plaque.

Enfin, si vous voulez reproduire un exploit du Nouveau Testament, faites une quantité supérieure de mélange et emplissez un grand bac : vous pourrez alors courir à la surface sans vous enfoncer.



Des enfants ont couru sur de l'eau additionnée de farine de maïs, pour les caméras d'Archimède, le magazine scientifique d'Arte : ils ne s'y enfonçaient pas.

Caroline LOUBET est coordinatrice de l'Association des ateliers des Petits Débrouillards en Île-de-France.

Les hologrammes

Un hologramme est l'enregistrement sur un film à grain très fin d'une image optique tridimensionnelle réalisée à l'aide d'un faisceau laser. Contrairement à la photographie, qui enregistre uniquement l'intensité d'une onde lumineuse réfléchie par un objet (ce qui produit des zones claires et sombres sur un film), un hologramme enregistre à la fois l'intensité et la direction, ou phase, de la lumière. L'information sur l'intensité et la direction est contenue dans la figure d'interférence entre l'onde réfléchie par l'objet et une

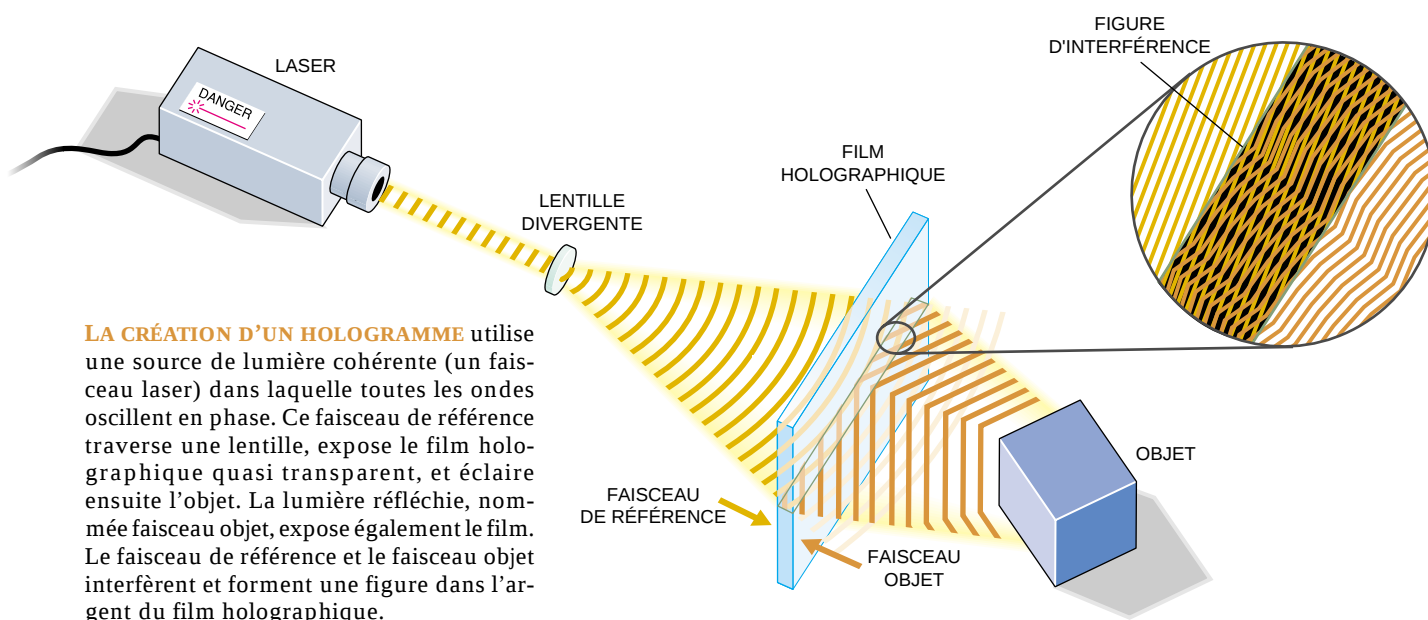
onde de référence. Les deux ondes qui interfèrent créent sur le film des zones brillantes, quand elles sont en phase, et des zones sombres, quand elles sont en opposition de phase.

Après l'enregistrement, lorsqu'on éclaire le film holographique développé avec de la lumière blanche, la figure d'interférence agit comme une multitude de minuscules miroirs placés à des myriades d'angles. Ces miroirs réfléchissent la lumière à la surface de l'hologramme exactement dans la même direction que celle réfléchie par l'objet

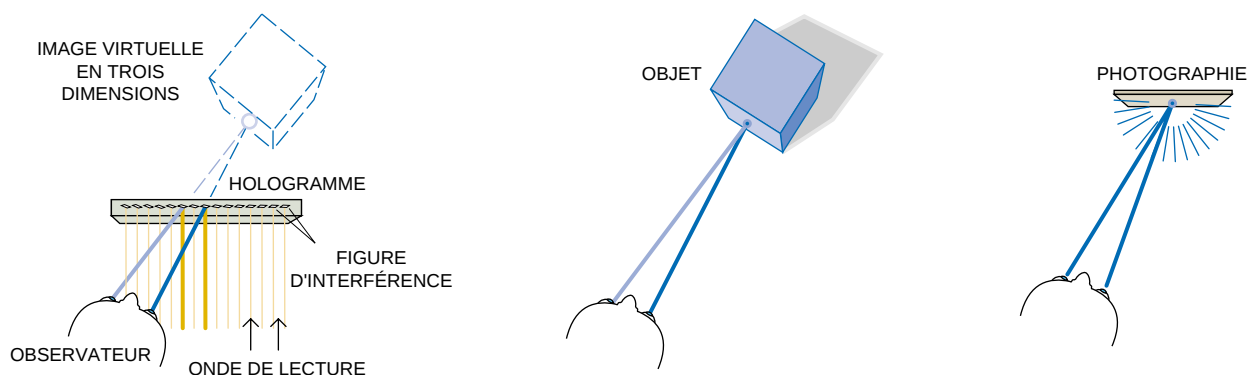
initial. Chaque œil à un angle de vue différent parce que l'intensité des ondes réfléchies varie selon leur direction ; ainsi, l'observateur voit en relief.

Un unique hologramme équivaut à de nombreuses photographies classiques, chacune prise d'une direction différente et mise au point à différentes profondeurs de champ.

Stephen BENTON, Groupe d'imagerie spatiale du Laboratoire des média, Institut de technologie du Massachusetts



LA CRÉATION D'UN HOLOGRAMME utilise une source de lumière cohérente (un faisceau laser) dans laquelle toutes les ondes oscillent en phase. Ce faisceau de référence traverse une lentille, expose le film holographique quasi transparent, et éclaire ensuite l'objet. La lumière réfléchie, nommée faisceau objet, expose également le film. Le faisceau de référence et le faisceau objet interfèrent et forment une figure d'argent du film holographique.



LA LECTURE D'UN HOLOGRAMME requiert un éclairage sur le film qui provient de la même direction que le faisceau de référence. La figure d'interférence sur le film d'argent diffracte et réfléchit la lumière de façon à recréer l'orientation et l'intensité de l'onde lumineuse du faisceau objet original. Pour un même point de l'objet, chaque œil voit la lumière arriver d'un point différent de la figure d'interférence (à gauche). En répétant cette opération pour chaque point de l'objet, l'observateur voit une

image virtuelle en trois dimensions flotter derrière l'hologramme. L'hologramme imite la manière dont on perçoit un objet réel : la nature de la lumière réfléchie varie avec l'angle de vue. Cette variation est indiquée par la différence de couleur entre les rayons atteignant chaque œil pour l'hologramme et l'observation de l'objet réel (à gauche et au centre). À l'inverse, une photographie en deux dimensions réfléchit la même intensité de lumière dans toutes les directions (à droite).

Illustrations de Boris Starosta



Fractures

H. VAN DAMME • F. DUVAL • Y. ABDELHAYE

On fracture des gels pour étudier la fracturation de la roche.

L'industrie pétrolière se préoccupe des fracturations : afin de mieux récupérer les combustibles fossiles piégés dans les roches, elle injecte de l'eau sous pression et espère une dilatation des interstices créés par les fracturations, dilatation qui facilitera la circulation du pétrole vers les stations de pompage.

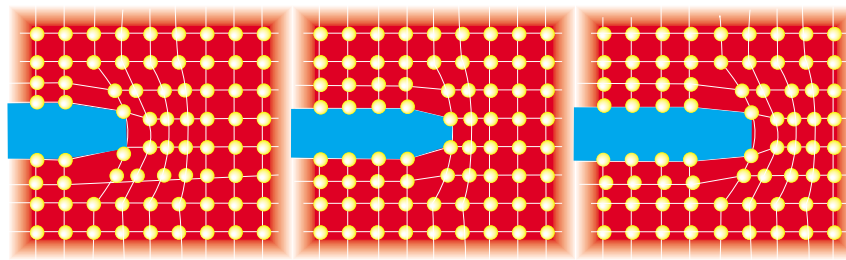
Comment la roche se fissure-t-elle ? La rupture s'amorce au point d'injection du liquide quand la pression du liquide est supérieure à la limite de rupture de la roche. La fissure est un plan vertical, parce que c'est dans cette direction que l'ouverture de la fissure est le moins contrecarrée par le poids des couches supérieures qui la refermeraient.

Une fois créée, la fissure continue de se propager presque sans consommation d'énergie, parce que de l'énergie est récupérée lors de son ouverture. En effet, le liquide qui ouvre une fissure déforme d'abord le matériau, ce qui dépense de l'énergie ; puis, quand le fond de la fissure s'ouvre, la déformation cesse à l'endroit initialement déformé, ce qui restitue l'énergie «élastique» : celle-ci déforme alors le matériau plus avant (voir la figure).

Pour modéliser ce phénomène, nous avons utilisé une argile de synthèse, la laponite, en suspension dans de l'eau : cette suspension forme un gel, qui simule la roche. Un tel gel réagit élastiquement quand on lui applique un effort modéré : quand on cesse de lui appliquer des forces de déformation, il reprend sa forme initiale. En revanche, quand les déformations sont excessives, le gel s'écoule. Nous y injectons une résine époxy, qui reproduit l'eau, et nous observons que la fracturation est différente selon les viscosités respectives de la résine et du gel.

Quand la résine est bien plus visqueuse que le gel, à la vitesse d'injection, elle forme une goutte (ci-dessus à gauche). Au contraire, quand la résine est peu visqueuse, le gel est fracturé. À faible vitesse d'injection (quelques millimètres par seconde), plusieurs plans de fractures apparaissent, et chaque plan de fracture se divise, au bout d'un certain parcours en plusieurs plans de fractures secondaires (voir la figure de la page ci-contre).

Ces expériences révèlent trois phénomènes. Le premier concerne le front d'invasion : stable sous la forme d'une goutte qui gonfle lorsque c'est le fluide le plus visqueux qui envahit l'autre (pensons à du miel qui coule dans de l'eau), il devient instable dans le cas inverse, et le front devient irrégulier.



Un liquide qui comprime le fond d'une fissure déforme le matériau : de l'énergie mécanique est stockée. Quand les liaisons entre atomes lâchent, sous la contrainte appliquée, cette énergie de déformation est libérée et se propage, sous la forme d'une onde de pression (non représentée ici) le long des flancs de la fissure. La pression se reporte ensuite au fond de la fissure, qui poursuit sa propagation.

D'autre part, bien que les gels de laponite soient bien moins rigides que des métaux ou que des roches, le fluide injecté peut les fracturer, parce que, comme dans les solides tels les roches, l'énergie élastique est restituée lorsqu'une fissure s'ouvre et se propage. Ce type de propagation était inattendu dans le cas des gels.

Enfin, le troisième phénomène est le plus étonnant : c'est la très grande instabilité de la fracture, quand sa vitesse augmente. Dans les métaux ou dans les roches, la théorie de la mécanique des milieux continus prévoit un changement de direction des contraintes en pointe de fissure, lorsque la vitesse de la pointe atteint environ la moitié

de la vitesse du son dans le matériau : le son, en effet, est la propagation de variations de pression, et sa vitesse est la vitesse maximale de propagation des variations de pression dans le matériau. Or une fissure qui s'ouvre s'accompagne de variations de pression (des compressions, puis des décharges ; lors de la rupture) ; comme ces variations de pression ne peuvent se déplacer à vitesse supérieure à la vitesse du son, et comme le liquide est injecté de force dans le matériau, la fissure est bloquée, et elle se poursuit alors latéralement, dans des directions où elle ne se propageait pas encore à la vitesse du son. C'est l'explication de ces plans de fracture inclinés par rapport au plan de fracture initial, vertical. À leur tour, ces plans de fractures secondaires peuvent se diviser en plans de troisième

ordre, et ainsi de suite : ainsi se forme la structure divisée que l'on voit sur la photographie.

Dans une roche ou dans un métal, la vitesse du son est très élevée (environ 1 000 mètres par seconde), de sorte que le phénomène de déviation de fissures est rare. Dans un

gel, toutefois, la vitesse des ondes n'est que de quelques centimètres ou décimètres par seconde : on atteint bien plus facilement les régimes d'instabilité de fractures.

Des phénomènes d'instabilité des fractures se produisent-ils à grande profondeur, dans les roches ? C'est peut-être l'étude de matériaux mous, en laboratoire, qui le dira.

Henri VAN DAMME est directeur du Centre de recherche sur la matière divisée du CNRS et de l'Université d'Orléans. Franck DUVAL et Yehidj ABDELHAYE sont chercheurs dans ce centre.