



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.

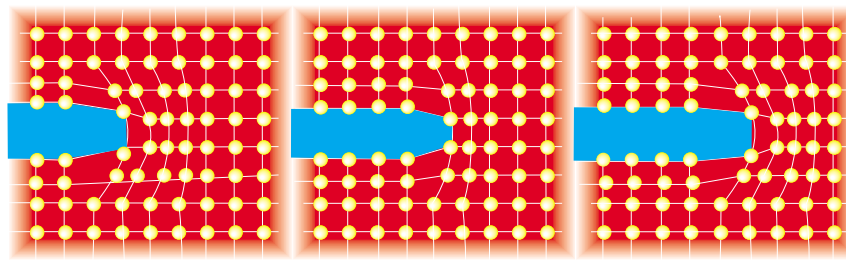
Comment la roche se fissure-t-elle ? La rupture s'amorce au point d'injection du liquide quand la pression du liquide est supérieure à la limite de rupture de la roche. La fissure est un plan vertical, parce que c'est dans cette direction que l'ouverture de la fissure est le moins contrecarrée par le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



Géologie

Volcans

Bernhard Edmaier et Angelika Jung-Hüttl. Éditions Nathan, 1997.

Ce beau livre rassemble de superbes photographies de volcans qui soulignent leurs relations avec les hommes et les éléments naturels : eau, glace, végétation. On peut y admirer des volcans dans tous les environnements : sommets montagneux, vallées encaissées, désert, savane, steppe, glacier. On nous montre différents édifices et structures volcaniques, dont certaines sont spectaculaires, comme ces gigantesques tunnels naturels formés par une coulée de lave qui se refroidit au contact de l'air et laisse une carapace solidifiée. On comprend que les volcans créent leurs propres paysages et qu'ils sont sources de richesses pour l'homme. La beauté des paysages volcaniques et le ballet des couleurs dues aux éruptions sont illustrés intelligemment. Le texte est agréable et les quelques paragraphes techniques sont illustrés par des schémas clairs. Ce livre est dans la lignée «classique» de Haroun Tazieff, de Katia et Maurice Krafft. Il ne renouvelle pas le genre, mais se distingue par la grande qualité artistique de ses photographies.

Toutefois, il présente les volcans tels qu'un explorateur isolé peut les voir. Cette vision limitée ne correspond plus à la volcanologie telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui. Les volcanologues actuels sont plus intéressés par les dépôts d'éruptions anciennes qu'à courir aux quatre coins du monde chaque fois qu'un volcan se réveille : le nombre de dépôts disponibles est bien plus grand que celui des éruptions qu'ils peuvent espérer observer de leur vivant.

Les recherches volcanologiques nécessitent des moyens importants et mettent en jeu les parties cachées du système volcanique : la plomberie interne, qui canalise le magma jusqu'à la surface ; le réservoir qui est comme une usine chimique où le magma cristallise ; la source profonde de magma qui alimente le réservoir plus ou moins régulièrement. La volcanologie, c'est aussi l'analyse des principes physiques qui régissent les différents régimes éruptifs et la quantification des phénomènes.

La fascination naturelle que nous éprouvons pour les volcans n'interdit pas de montrer qu'ils obéissent à des lois simples et en nombre limité. Observer et décrire les phénomènes ne suffit

plus ; il faut illustrer les principes physiques à l'œuvre et montrer comment les volcans fonctionnent. Une éruption, qui est le résultat ponctuel d'une longue série de processus, ne se comprend que si on la replace dans l'histoire du volcan, c'est-à-dire si l'on détermine à quel stade de son évolution elle se déclenche. Un volcan naît et finit par mourir, et l'on ne peut le comprendre que si on l'imagine en train de changer. On doit le représenter à la bonne échelle, aussi bien dans le temps que dans l'espace. L'enregistrement «objectif» que constitue une photographie restitue une image partielle et instantanée. Il reste ensuite à interpréter l'image, à gommer les aspects accessoires et à faire ressortir les traits significatifs. Pour voir le volcan dans son ensemble, on doit se placer à la bonne distance et dans la perspective adéquate. Je me limiterai à deux exemples.

Sur l'île d'Hawaii, au beau milieu de l'océan Pacifique, le volcan Kilauea est alimenté en magma par un conduit plus ou moins vertical, situé au droit de la caldeira qui marque son sommet. Le magma peut sortir directement par le sommet, mais aussi par des fissures s'ouvrant sur les flancs du volcan à plusieurs dizaines de kilomètres. Le magma suit donc parfois un cheminement souterrain quasi horizontal qui se révèle à la surface par de multiples lézardes «en échelon». Seule une photographie prise d'avion dans l'axe du «rift» peut illustrer ce fantastique réseau de conduites internes.

Un autre exemple est celui des éruptions pliniennes, comme celle qu'a connues le Vésuve en 79 de notre ère. Ces éruptions se développent dans l'atmosphère en un jet, puis en un panache convectif, jusqu'à des altitudes de plus de 30 kilomètres. À de telles altitudes, les cendres et les aérosols volcaniques sont pris par les vents stratosphériques et sont transportés sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Montrer un tel panache n'est possible que grâce à un satellite en orbite.

Quel serait le livre «idéal» que voudrait feuilleter un volcanologue ? Ce dernier rêve de voir l'île d'Hawaii sortir du Pacifique et s'élever jusqu'à plus de 4 000 mètres d'altitude, de suivre les étapes principales de ses quelques centaines de milliers d'années d'histoire. Examiner les gigantesques cicatrices qui parcourent ses flancs, sous la mer, et témoignent de monstrueux glissements de terrain. Voir ses fissures et ses cratères se multiplier à la surface. Assister aux grandes catastrophes qui ont laissé les grandes caldeiras du sommet. Suivre le magma, de sa source, à des profondeurs de plusieurs dizaines de kilomètres, jusqu'au réservoir, puis jusqu'à la surface. Voir,

sous la surface, le magma hésiter entre la verticale et un long cheminement horizontal. Observer les métamorphoses successives du magma lors de son ascension, l'apparition de bulles de gaz lorsque le seuil de solubilité des composés volatils est atteint, la formation d'une mousse volcanique, enfin la fragmentation qui pulvérise le magma et libère la phase gazeuse. Tout cela est possible, mais pas sur un seul volcan ni pendant une éruption. C'est un puzzle que l'on peine à reconstituer à partir de pièces que l'on recueille en différents endroits du Globe, où l'érosion et le hasard géologique les ont préservées, d'abord, puis mises au jour. La volcanologie apprend à lire les roches et à rassembler ces informations éparpillées. Ce travail mériterait un livre d'un nouveau genre. Des structures volcaniques fossiles, figées depuis des millions d'années, peuvent se révéler tout aussi spectaculaires qu'une fontaine de lave incandescente, quand on en comprend la signification.

Claude JAUPART

Physique

Granites et fumées

Étienne Guyon et Jean-Pierre Hulin. Éditions Odile Jacob, 1997.

S'il est aisé de définir un milieu pur, tels l'eau, l'huile ou un cristal de quartz, de mica, il est beaucoup plus complexe de décrire précisément une émulsion ou un granite, dont l'homogénéité varie selon la taille de l'échantillon observé. En effet, la mayonnaise est un produit, apparemment homogène, dont le goût et la consistance diffèrent de ceux des éléments constitutifs que sont l'œuf ou l'huile. Le mélange de ces deux derniers ingrédients n'est qu'apparent : au microscope, on observe d'immenses gouttes d'huile séparées par de minces interfaces. La composition hétérogène de la mayonnaise réapparaît, à l'œil nu, quand on chauffe : c'est la preuve que des phénomènes de ségrégation et de mélange sont régis par les mêmes lois, notamment pour ces objets fragiles, décrits avec passion par Pierre-Gilles de Gennes.

Étienne Guyon et Jean-Pierre Hulin nous montrent, dans leur livre *Granites et fumées*, sous-titré «Un peu d'ordre dans le mélange», que le mélange est omniprésent et que sa maîtrise est particulièrement recherchée, pour sa propriété

magique de faire naître de nouveaux produits (au sens large du terme).

Les auteurs commencent leur étude du mélange par des notions philosophiques, en ouvrant le débat aux sciences humaines. Si le mélange a été longtemps opposé à la pureté, et continue de l'être dans de nombreuses cultures, la notion de mélange a permis de remplacer la dualité entre le pur et l'impur par la notion de pluralité, avec une variation continue d'états de mélange. Mêlant les descriptions scientifiques et sociologiques, les auteurs décrivent les phénomènes d'instabilité et de turbulence comme une succession de choix au hasard, de bifurcations qui écartent ou rapprochent irrémédiablement deux particules ou deux individus au cours de leurs rencontres tout aussi riches en réactions et créations de nouveaux ensembles (familles, entreprises...).

De toute évidence, É. Guyon et J.-P. Hulin ont une réflexion qui dépasse le cadre scientifique et qui devrait intéresser sociologues, philosophes (parfois en quête d'analogies scientifiques) et simples curieux... Ces qualités pédagogiques se retrouvent dans les titres suggestifs des dix chapitres : Les nombreuses facettes du mélange, La longue histoire du mélange, Mélange et marche au hasard, Le mélange figé, Mélanger sans fatiguer, Convection et mélange, Turbulence et mélange, Le mélange non miscible, Grains et mélange, Réaction chimique et combustion.

Le premier chapitre nous emmène dans un tourbillon de situations industrielles, culinaires ou de laboratoire qui nous guide dans le labyrinthe des chapitres suivants. Le tourbillon peut, en effet, tour à tour, promouvoir le mélange, comme dans la turbulence, ou, au contraire, séparer un écoulement intérieur au tourbillon du reste du liquide. Le labyrinthe est l'image même d'un écoulement dans un milieu poreux ou d'une marche au hasard, qui peuvent, selon le cas, produire le mélange le plus efficace ou l'inhiber.

Ce livre nous conte aussi des histoires, telles celles des mélangeurs industriels, qui démontrent l'importance de la réflexion, de la ruse de l'ingénieur face à ce problème apparemment simple. Ainsi, de la «diffusion moléculaire qui mélange tout», mais dans un temps infini, aux mélangeurs statiques composés de «nombreuses lames qui découpent et dévient» l'écoulement comme dans un milieu poreux, en passant par le «mélangeur Kénics», formé d'une suite de lames en hélices décalées, qui étirent et replient l'écoulement et, en terminant par le mélangeur chaotique, «composé de tubes tournés de 90 degrés d'une section à l'autre» (voir la figure), le lecteur

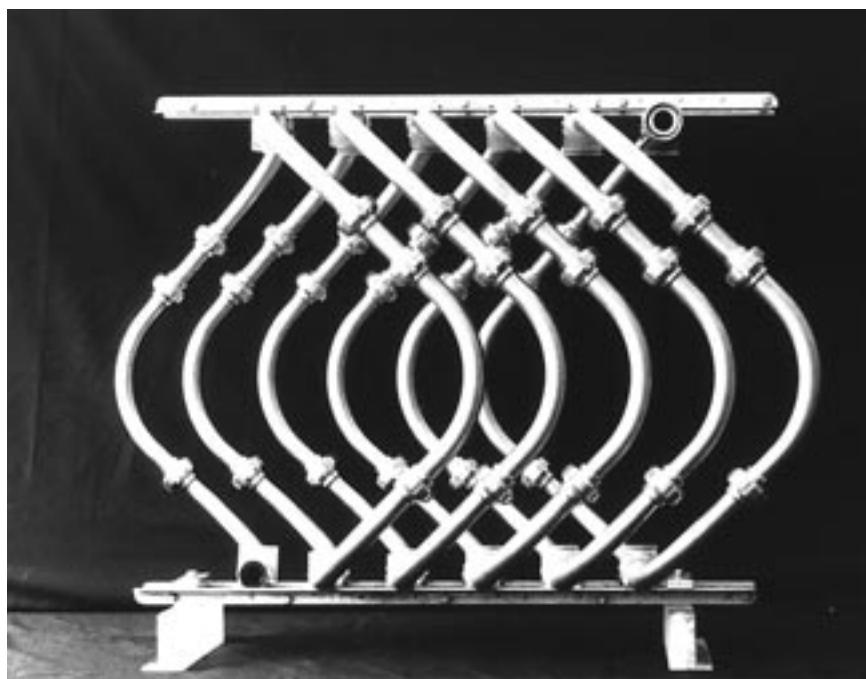
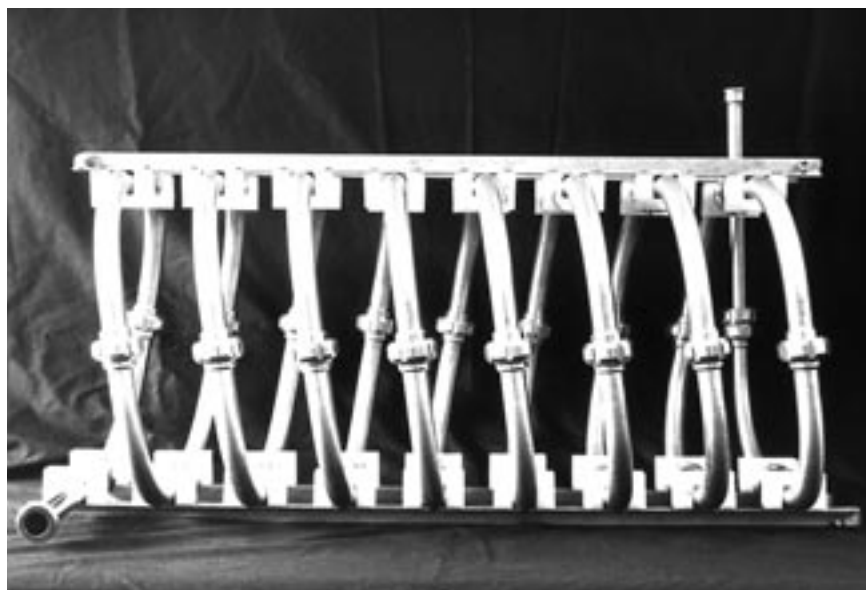
comprend le progrès apporté par les études fondamentales sur le chaos à des applications dont les résultats ne sont pas toujours intuitifs. L'efficacité de la configuration alternée des coudes du mélangeur chaotique peut, en effet, être remarquable pour des fluides très visqueux et fragiles. La multitude d'exemples donnés par les auteurs, aux résultats parfois antagonistes, engendre une vision novatrice dans de nombreux domaines où le mélange et la ségrégation sont deux aspects d'un même ensemble de phénomènes.

Grâce à un effort d'illustration important et à une volonté de dépouiller l'ar-

gumentation de formule mathématique, les auteurs permettent à un large public d'accéder aux recherches actuelles dans des domaines aussi variés que la diffusion moléculaire, la physique statistique, le chaos, la turbulence, le mélange de fluides non miscibles ou celui de grains solides et la chimie. Les outils mathématiques sont ainsi introduits à partir de la *physique* des phénomènes.

Ce livre constitue ainsi une lumineuse relecture de nombreux domaines de la physique moderne et une introduction efficace à ces domaines.

Hassan PEERHOSSAINI
et Pascal DUPONT



Deux systèmes mélangeurs : hélicoïdal (en haut) et chaotique (en bas). Après seulement dix coudes, deux liquides sont bien mélangés par le mélangeur chaotique, pas par le mélangeur hélicoïdal classique.

Illustrations de Hassan Peerhossaini