

fond de l'œuvre monumentale (plus de 14 mètres carrés !) et que Pollock abandonnait entre deux jours et six mois avant d'ajouter les peintures colorées. On superpose une grille de carrés et l'on compte ceux traversés par le motif peint, puis on répète la même opération avec des grilles où la taille des carrés varie, ici de quelques décimètres (de l'ordre de grandeur du tableau) à quelques millimètres (la taille du plus petit détail). La diminution de la taille des carrés est équivalente à l'étude d'un agrandissement du tableau.

L'analyse mathématique révèle que le logarithme du nombre $N(L)$ de carrés occupés par le motif est proportionnel à celui de la taille L du carré élémentaire de la grille. On retrouve la loi décrite précédemment : la dimension est égale à ce rapport de proportionnalité (à un signe près), soit environ 1,66.

La couche de peinture noire, majoritaire (elle occupe 35 pour cent de la toile, alors que les trois autres couches occupent ensemble 13 pour cent), donne la structure générale de l'œuvre. Les couches supplémentaires, dont l'analyse révèle qu'elles sont aussi fractales, affinent l'en-

semble et modifient peu l'autosimilarité de l'œuvre. Ainsi, la dimension fractale de *Autumn rhythm* entier est de 1,67.

La nature fractale des tableaux de Pollock est confirmée par leur élaboration. Des films montrent qu'il procédait selon une méthode systématique : il peignait d'abord quelques îlots, c'est-à-dire que les jets de peinture sont regroupés en quelques endroits. Puis, dans une seconde phase, il reliait ces îlots par de grandes coulures de peinture, plus amples, qui peu à peu les submergeaient dans un dense réseau fractal. De la même façon, de nombreux objets naturels fractals, tels les flocons de neige, naissent de centres de nucléation simples qui s'étendent ensuite.

L'étude de l'ensemble des œuvres de Pollock répondant à cette facture met en évidence un accroissement régulier de la dimension fractale de ses œuvres au fil des années. Pour les premières, d est peu supérieur à 1,1, tandis que pour les dernières, elle atteint 1,7. Parallèlement, les tableaux sont de plus en plus chargés et obligent les spectateurs à plus de concentration pour pénétrer le réseau d'intrications. Curieusement, l'artiste a détruit une œuvre, analysée grâce à des

enregistrements vidéo, où d est égal à 1,9. Peut-être la trouvait-il trop dense.

La fractalité n'est pas une conséquence de la technique de Pollock. La plupart des motifs obtenus par des jets de peinture sur un support ne sont pas autosimilaires. Aussi, les experts peuvent-ils compter sur l'analyse du caractère fractal des œuvres pour identifier un Pollock. Qui plus est, ils peuvent même en estimer la date d'exécution.

Enfin, pendant les 50 dernières années, les œuvres de Pollock ont été au centre d'une polémique : dessinait-il des éléments figuratifs, tel un visage humain, sur sa toile avant d'en estomper jusqu'à la disparition les traits avec plusieurs couches de peinture apparemment désordonnées ? La découverte du caractère fractal infirme cette hypothèse, car des motifs fractals ne peuvent contenir de tels éléments. Aussi, Pollock avait raison quand il affirmait que « les rythmes de la nature sont ma seule préoccupation ».

Richard TAYLOR est professeur de physique à l'Université de l'Oregon.





«Mais, Monsieur, dit Cosinus, c'est mon coefficient de frottement qui s'est trouvé trop faible pour détruire ma composante tangentielle...! – J'en connais pas tous ces gens-là, dit le contrôleur. C'est 12fr. 50 que vous m'deviez. Maintenant vous pouvez les réclamer à vot'tante Gentille, comme vous dites!»

Blocages parfaits

JEAN-MICHEL COURTY • ÉDOUARD KIERLIK

La chaussure d'escalade sur la paroi ou la vis ne glissent pas grâce aux frottements solides.

Accroché au granit, un varappeur est en proie au doute : certes, son pied ne dérape pas là où il l'a posé sur la roche, mais peut-il s'y appuyer de tout son poids ? Quelques minutes plus tard, son compagnon d'escalade boulonne une plaquette d'attache à un piton scellé dans la paroi et ressent une inquiétude similaire. S'il venait à « dévisser », la plaquette resterait-elle vissée ? La réponse est deux fois oui, car les lois du frottement solide le garantissent. Analysons comment ces blocages parfaits résultent des frottements solides.

DE L'EMPIRISME AUX LOIS DE COULOMB

Quiconque a déjà poussé une caisse reposant sur le sol sait qu'il faut exercer une poussée minimale pour y parvenir. Quelle est cette force qui, tant que la poussée est faible, la compense exactement ? C'est la « force de frottement solide », qui se manifeste quand on tente de faire glisser l'une sur l'autre les faces non lubrifiées de deux solides. Contrairement aux frottements fluides, qui n'apparaissent qu'au cours d'un mouvement (résistance de l'air, ...), le frottement solide s'exerce aussi sur un objet au repos. Le seuil de frottement dépassé, l'objet s'ébranle et la force de frottement solide ne fait plus que le ralentir.

Un déménageur connaît les étranges propriétés de la force de frottement solide : qu'il pose deux caisses identiques l'une sur l'autre ou l'une derrière l'autre, il doit appliquer la même force pour les faire glisser ! Cela n'est-il pas étonnant ? Quand les caisses sont l'une sur l'autre, l'empilement est deux fois moins en contact avec le sol que quand elles sont l'une derrière l'autre ! Au début du XVI^e siècle, le grand Léonard de Vinci s'in-

téresse déjà au phénomène. Toutefois, Guillaume Amontons (1663-1705) est le premier physicien qui formule la loi du frottement solide : la force tangentielle nécessaire pour mettre en mouvement relatifs deux solides en contact l'un avec l'autre est proportionnelle à la force qui presse les solides l'un contre l'autre et elle ne dépend pas de l'étendue de la surface de contact.

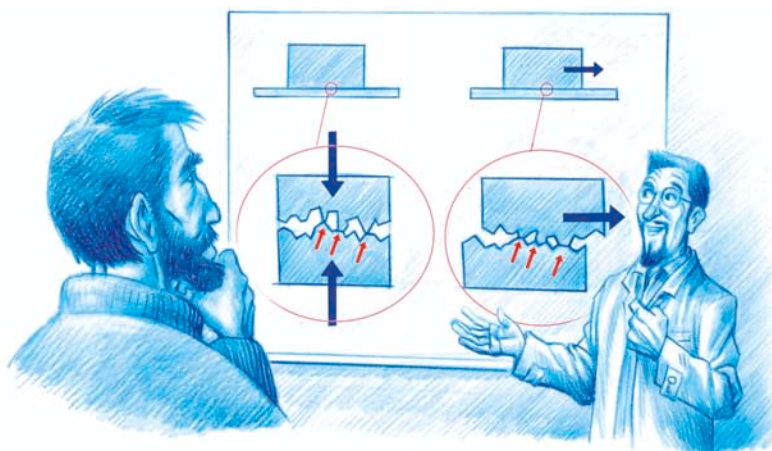
En 1785, Charles Coulomb (1736-1806) précise cette loi qui porte aujourd'hui son nom : il montre que le coefficient de proportionnalité entre la force de frottement et la force de pression dépend du matériau. Ce coefficient reste de l'ordre de 1, passant de 0,4 pour du papier sur papier à 0,5 pour du bois sur bois et atteignant 1 pour une semelle en caoutchouc sur la roche.

L'indépendance de la valeur de seuil de la force de frottement vis-à-vis de l'étendue de la surface de contact resta longtemps un mystère. Les physiciens britanniques Frank Philip Bowden et David Tabor n'en découvrirent la cause que dans les années 1940. Étudiant le contact solide à l'échelle mésoscopique (intermédiaire entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique), ils comprirent que deux solides qui se touchent... ne se touchent presque pas. Car même la surface la mieux polie comporte des aspérités minuscules d'une taille typique d'un dixième de micromètre. Ces rugosités sont les premières zones en contact lorsqu'on approche les deux solides, et elles le restent ! Ainsi, l'aire de contact réel entre les deux solides est très faible, comme celle d'un fakir sur sa planche à clous, comme celle d'une brosse posée sur ses poils.

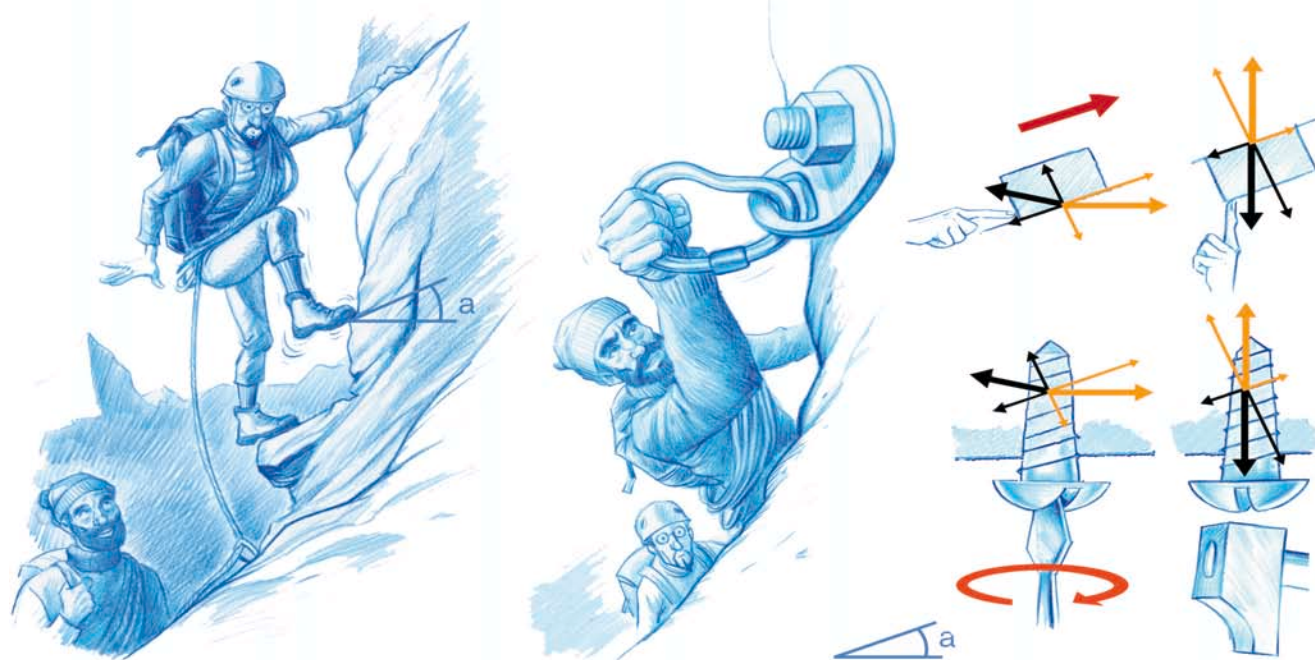
CONTACT APPARENT ET CONTACT RÉEL

La pression sur les aspérités est égale à la force pressante divisée par l'aire de contact réelle. Cette pression est si forte qu'elle excède largement la résistance de tout matériau. Aussi les aspérités sont écrasées, l'aire de contact augmente et la pression diminue jusqu'à une valeur limite – nommée dureté. À l'équilibre, la surface réelle de contact est égale au rapport entre la force pressante et la dureté et donc ne dépend en rien de la surface apparente de contact ! Ainsi pour un cube de cuivre de 22 centimètres de côté et de masse 90 kilogrammes reposant sur une surface plane constituée du même métal, la surface de contact entre le cube et le support est d'environ un millimètre carré ! Cette surface de contact réelle est donc environ 50 000 fois plus faible que la surface de contact apparente.

Cherchons maintenant à faire glisser les deux solides l'un sur l'autre. À l'échelle des rugosités, le glissement est impossible, car les aspérités sont imbriquées. Le mouvement n'est possible qu'une fois les aspérités déformées au point que le contact se rompt. Le glissement d'un solide sur un autre est comparable à celui d'une brosse de fer sur une surface métallique. Particulièrement raides, les poils d'une telle brosse ne glissent



Toute surface solide est rugueuse à une échelle assez petite. Deux surfaces en contact entremêlent leurs rugosités. Celles-ci résisteront au glissement tant qu'elles ne se seront pas assez déformées pour cela.



Une chaussure glisse d'autant plus facilement sur un plan que celui-ci est incliné (angle a), car la composante du poids parallèle à la surface, qui tend à la faire glisser devient grande par rapport à la composante perpendiculaire, qui l'applique sur la roche. La chaussure glisse quand le rapport de ces forces excède le coefficient de frottement.

Lorsque les corps sont en accélération, les réactions en noir ne sont pas opposées aux forces motrices en couleur orangée. Les frottements solides sécurisent le grimpeur même pour une vis verticale à laquelle il se suspendra de tout son poids ; le coup de marteau assure l'imbrication des surfaces.

pas, mais plie un moment avant de se redéployer brusquement pour aller se bloquer un peu plus loin. La force nécessaire pour faire aller et venir une telle brosse est proportionnelle au nombre de poils coincés dans la surface, nombre qui augmente quand nous appuyons. De même, la force motrice nécessaire pour déplacer un solide au contact d'un autre est proportionnelle à l'aire représentée par les aspérités imbriquées, c'est-à-dire à la surface réelle de contact, et par là, à la force pressante. Le point de vue microscopique résout le paradoxe de l'indépendance apparente entre frottement et surface de contact : la surface de contact n'est pas celle que l'on croit. Le paradoxe des caisses est résolu : une surface double ou une pression deux fois plus forte donnent la même surface de contact !

BLOCAGES IRRÉVERSIBLES

Nous pouvons maintenant rassurer le varappeur qui pose la pointe de sa chaussure sur un minuscule plan incliné de granit. Peut-il y appuyer tout son poids ? Nous saurons s'il « dévissera » en divisant la force tendant à le faire glisser (la composante de son poids parallèle au plan incliné) par la force pressante (la composante du poids perpendiculaire au plan incliné). Le grimpeur teste ce quotient en appuyant légèrement du pied sur son plan d'appui. S'il adhère, c'est que ce rapport est inférieur au coefficient de frottement de la surface de sa chaussure sur la roche. Le quotient en question, égal à la tangente de l'angle a entre le plan incliné et l'horizontale, ne dépend donc en rien du poids du grimpeur ! Il peut donc confier sans crainte tout son poids au minuscule plan incliné, puis ayant ainsi libéré ses mains, s'assurer. Le coefficient de frottement du caoutchouc synthétique sur la roche sèche est environ 1 et le grimpeur ne glisse pas tant que l'inclinaison de l'écaïlle de granit sur laquelle s'appuie son orteil n'excède pas 45 degrés. Une pente considérable !

Le second varappeur aussi peut être tranquille. Si l'écrou qui retient sa plaquette d'attache ne se dévisse pas lorsqu'il tire faiblement dessus, il ne se dévissera pas plus sous l'effet d'une force supérieure. Dans le cas de la vis, l'équivalent de la pente est l'angle a du filetage par rapport au plan perpendiculaire à l'axe du boulon. Lorsque l'on visse, tout se passe comme si on faisait progresser un objet sur un plan incliné en

lui appliquant une force horizontale. Cette propulsion est facile si la pente est assez faible pour que la force propulsive soit quasi parallèle au plan de glissement ; de même, le vissage est facile quand l'angle a est petit. Quand la vis ou le boulon est entièrement vissée, on la coince par un coup de marteau (ou mieux un dernier quart de tour) destiné à accroître l'imbrication des rugosités de son filetage avec celle du boulon ou de la roche. Ce blocage achevé, toute traction ou poussée exercées dans la direction de l'axe de la vis ou du boulon se traduit par une redistribution de forces plus petites sur chacun des éléments de filetage. Tant que l'inclinaison du filetage est assez faible, les composantes de ces forces parallèles au filet sont minimales comparées à leurs composantes qui lui sont perpendiculaires. Leur rapport sera donc inférieur au coefficient de frottement du métal sur la roche (vis) ou sur lui-même (boulon). Ainsi, il existe un angle de filetage limite en deçà duquel un boulon ne peut se dévisser quelle que soit la traction qu'il subit.

Cet « angle de glissement » est d'environ 12 degrés en cas de contact métal sur métal et de quelque 20 degrés en cas de contact de métal sur le bois, ce qui explique que les boulons aient un filetage moins incliné que les vis à bois. Le caractère irréversible (parfait) des blocages « à vis » s'observe facilement sur les tabourets qui équipent les photomaton. Un enfant peut en modifier la hauteur en les faisant tourner sur leur vis, ce qui n'empêche pas qu'un adulte pesant son quintal s'y cale, même s'il lève les pieds !

Nommé arc-boutement, ce phénomène est exploité au sein de nombreux mécanismes, tels les vérins mécaniques ou encore les coins de bûcheron. Dans tous les cas, il s'agit d'obtenir une poussée intense dans une certaine direction à l'aide d'une petite force motrice dans une autre, et d'éviter de perdre les résultats obtenus si la force motrice s'annule. Plutôt que de s'inquiéter de son boulon, notre second varappeur doit plutôt vérifier la qualité de la roche où il a planté son piton !

Jacques DURAN, *Sables, poudres et grains : introduction à la physique des milieux granulaires*, Eyrolles Sciences, 1997.

J. L. MERIAM et L.G. KRAIGE, *Mécanique de l'ingénieur : Statique*, Vuibert, 1995.