

l'argile est le feuillet. Il s'agit d'un édifice de moins de un nanomètre d'épaisseur, composé de trois ou quatre plans d'anions (ions négatifs) tels que O^{2-} ou OH^- , entre lesquels s'insèrent de petits cations (ions positifs) principalement de silicium, d'aluminium et de magnésium. La charge nette du feuillet dépend des proportions d'anions et de cations.

Dans une importante famille d'argiles, les kaolinites, dont le feuillet est formé de trois plans négatifs, l'équilibre des anions et des cations est strictement respecté et le feuillet est donc électriquement neutre.

Les smectites, qui constituent une famille d'argiles à feuillet de quatre plans négatifs, présentent un déficit de charges positives; leur feuillet porte donc une charge nette négative, compensée par des cations supplémentaires, dits compensateurs, situés à la surface des feuillets et entourés de molécules d'eau.

Une troisième famille d'argiles, les illites, ressemble à celle des smectites, mais a deux caractéristiques particulières: d'une part, le déficit de charges positives y est très élevé et, d'autre part, il est systématiquement compensé par des cations de potassium, K^+ .

Les chlorites constituent une quatrième grande famille d'argiles, assez particulière, car leur structure de base est formée de deux feuillets alternés. Le premier est négatif comme dans les smectites. Le second est positif, de charge juste suffisante pour compenser la charge négative du premier, ce qui conduit à un assemblage neutre.

Le sable humide, un modèle

Kaolinites, smectites, illites et chlorites constituent l'essentiel des argiles que l'on trouve dans les sols. Ce sont elles dont il faut comprendre comment, avec de minuscules quantités d'eau, elles assurent la cohésion de ce béton d'argile qu'est la terre. Deux grandes situations se présentent: celle des argiles à structure élémentaire neutre (kaolinites, chlorites) et celle dont la structure de base porte une charge électrique (smectites, illites). Examinons ces deux situations, mais après avoir fait un bref retour en enfance...

Enfants, nous avons tous été de grands bâtisseurs en sable. Sans formation professionnelle aucune, nous avons facilement réussi à doser correctement le mélange de



3. LA TERRE EST UN BÉTON D'ARGILE, comme le suggère le rapprochement de ces deux images. Ainsi, dans le béton de ciment en usage aujourd'hui (*en haut*), graviers et petites pierres sont liés par une matrice de ciment, tandis que dans le béton d'argile utilisé autrefois (*en bas*), ils le sont par une matrice d'argile.

sable et d'eau et à assurer à ce mélange une cohésion optimale. En réalité, nous n'avons guère de mérite. Il résulte de la physique du sable humide que, sauf dans les états extrêmes de déshydratation ou d'hydratation, la cohésion d'un tel matériau est pratiquement indépendante de sa teneur en eau.

D'où vient cette cohésion, c'est-à-dire la force qui lie les grains humides les uns contre les autres? L'eau n'a pas la réputation d'être une colle particulièrement efficace, mais elle a une propriété que nous connaissons bien: elle mouille, autrement dit tend à s'étaler sur les surfaces. Ce liquide mouille bien le sable (ainsi que d'autres minéraux) grâce aux liaisons faibles que les molécules d'eau établissent avec la surface des grains de sable. Lorsqu'une goutte d'eau est posée entre deux grains de sable, elle tend donc à s'étaler sur les deux grains à la fois.

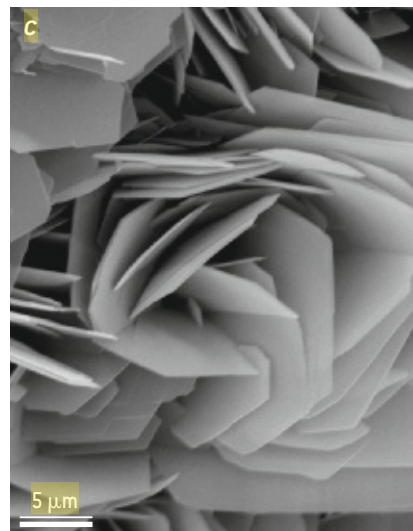
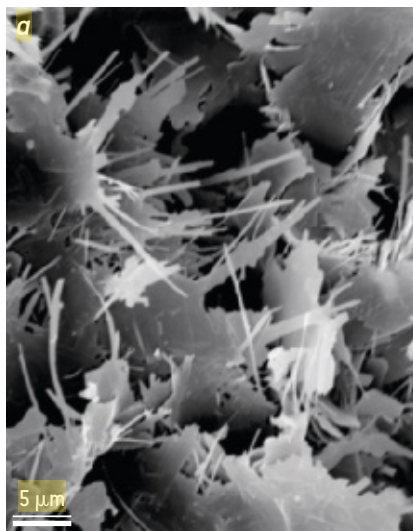
Mais cette tendance est contrecarrée par la cohésion de l'eau elle-même, liée à l'attraction mutuelle des molécules d'eau. Tout se passe comme si la surface de la goutte d'eau était une membrane élastique, qui empêche la goutte de s'étirer: c'est la tension superficielle, responsable des phénomènes de capillarité.

Pour notre goutte qui cherche à s'étaler mais qui en est empêchée, il en résulte un état d'équilibre, avec une forme caractéristique de diabol: la goutte s'étire vers les deux grains de sorte que les liaisons entre molécules d'eau sont en tension (*voir l'encadré page 55*). En conséquence, la goutte se retrouve en dépression par rapport à l'air environnant.

C'est le physicien Pierre Simon de Laplace (1749-1827) qui, le premier, a pu établir la relation entre la dépression dans le pont liquide et la courbure du ménisque (la frontière entre l'eau et l'air). Son résultat est très simple: la dépression, dite de Laplace, est proportionnelle à la tension superficielle du liquide et à la courbure du ménisque.

Cette propriété disparaît cependant lorsqu'il y a soit beaucoup d'eau, soit très peu d'eau. Du côté très humide, il existe une limite évidente, atteinte lorsque l'eau est si abondante que les grains sont totalement noyés: à stade, il n'y a plus de ménisque ni aucune frontière air-eau accrochée aux grains, de sorte que la cohésion est perdue.

Du côté très sec, la limite est plus subtile. Elle est liée à la rugosité des grains



© A. Meunier, Univ. de Poitiers, A. Baronnet, C. Ollagnon, INSA de Lyon

4. LES ARGILES SONT DES PHYLLOSILICATES, c'est-à-dire des minéraux dont les grains sont formés par empilement de feuillets composés de plusieurs couches d'oxydes tétraédriques et octaédriques. Selon l'argile, chaque feuillet est composé de trois ou quatre plans d'ions négatifs (oxygène, O^{2-} , ou hydroxyle, OH^-), entre lesquels s'insèrent de petits ions positifs (principalement de silicium, d'aluminium et de magnésium). La charge nette de ces feuillets de moins d'un nanomètre d'épaisseur dépend de l'équilibre entre ions positifs et négatifs. Dans les illites (a), caracté-

sées par des feuillets en cheveux, le déficit de charges positives est élevé, mais compensé par le fait que des ions potassium (K^+) sont en contact étroit avec la surface des feuillets entre lesquels ils sont insérés. En revanche, dans les kaolinites (b), l'équilibre des charges est parfait et les grains de ces argiles sont des empilements de quelques centaines de feuillets solidement soudés par des forces de van der Waals et des liaisons hydrogène. Quant aux chlorites (c), ce sont des assemblages alternés de feuillets positifs et négatifs ; ils sont électriquement neutres.

qui perturbe la formation des très petits ménisques. Presque simultanément, des équipes américaines et françaises ont montré à la fin des années 1990 que lorsque la taille des ménisques est comparable à la taille des aspérités des grains, la cohésion devient proportionnelle à la quantité d'eau. Elle tend donc vers zéro pour des grains secs.

Du sable très fin pour les châteaux

Il reste une dernière subtilité à maîtriser pour être un parfait bâtisseur de châteaux de sable : le choix du sable lui-même. Qu'est-ce qu'un « bon » sable ? Nous avons vu qu'une première condition à respecter est qu'il ait une surface sur laquelle l'eau s'étale facilement. Il faut donc un sable propre. Un sable poisseux, imprégné d'huile par exemple, ferait un très mauvais matériau de construction.

Il existe une seconde condition, liée à la notion même de cohésion. Pour éviter qu'une couche de grains ne glisse en avalanche, c'est toute la couche qui doit adhérer au reste du tas. Ce qui compte n'est donc pas la force attractive entre deux grains seulement, mais la force totale de cohésion de la couche avec le reste du tas, que l'on peut exprimer par mètre carré de plan de

glissement par exemple. Plus le nombre de ponts liquides par mètre carré est important, plus la cohésion est forte. Comme les ponts sont d'autant plus nombreux que les grains sont petits, le choix d'un bon sable est simple : le plus fin possible !

Que se passe-t-il lorsque, la quantité d'eau augmentant et les ponts capillaires s'élargissant, ces derniers en viennent à fusionner ? Heureusement pas grand-chose dans un premier temps. Il y a trois ans, Stephan Herminghaus et ses collègues, de l'Institut Max Planck de Göttingen, placèrent du sable dans un tomographe à rayons X (un « scanner ») et suivirent l'évolution des ponts capillaires à mesure que la quantité d'eau augmentait, jusqu'à plus de 20 pour cent en masse. Ils observèrent que, loin de former des masses compactes, l'eau formait pendant très longtemps un réseau très ouvert de ponts capillaires – une sorte de dentelle désordonnée – sans que la cohésion de l'ensemble en soit affectée (voir l'image c dans l'encadré page ci-contre). La physique est décidément du côté des enfants !

Construire un château de sable est donc un jeu d'enfants, mais construire une mosquée, un immeuble de dix étages ou une citadelle fortifiée en terre crue n'en est plus un. Comment expliquer que de la terre compactée ou séchée permettent de telles réalisations

L'AUTEUR



Henri VAN DAMME, physicien, est professeur à l'ESPCI-ParisTech et directeur scientifique de l'IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux).