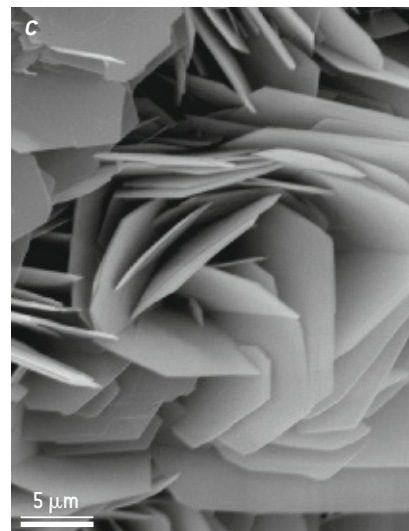
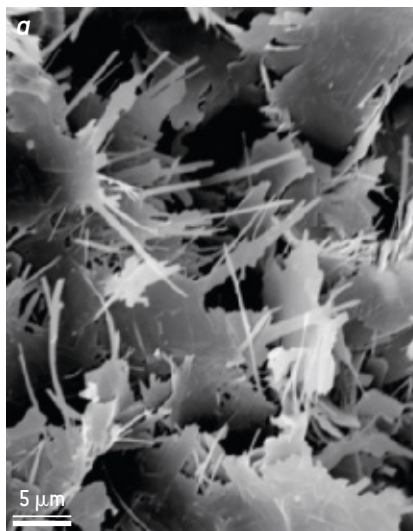




© A. Meunier, Univ. de Poitiers, A. Barroet, C. Oignon, INSA de Lyon

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 – 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).

architecturales, sans qu'il soit besoin d'y ajouter les liants (plâtre, chaux ou ciment) dont nous avons désormais beaucoup de mal à nous passer ? En réalité, la physique du château de sable suffit dans de nombreux cas à expliquer de telles constructions, pourvu qu'on l'étende aux fractions fines de la terre que sont le limon et surtout les argiles.

Avec ses très petits grains (moins de deux micromètres, soit une taille plus de 50 fois inférieure à celle du sable le plus fin), l'argile est capable de démultiplier le nombre de ponts capillaires et d'engendrer des forces capillaires très intenses.

Avec David Gelard et des collègues du Laboratoire CRATerre de l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, nous l'avons vérifié en préparant une brique de terre « modèle » à partir d'un mélange de sable et de boue de kaolinite (l'une des argiles décrites plus haut) que nous avons fait sécher dans un moule (sans cuire). Grâce au mélange, la boue enrobe les grains de sable. En séchant, se développent des forces capillaires qui rapprochent les plaquettes d'argile les unes des autres et les rapprochent des grains de sable.

Le procédé conduit ainsi à un matériau où les plaquettes d'argile forment non seulement une couche relativement compacte autour des grains de sable, mais aussi des ponts entre ces grains, comme dans les terres naturelles. Nous avons ensuite mesuré la cohésion de cette brique et l'avons comparée à ce que livre un calcul des forces capillaires par modélisation de cette terre. Étant donné la forme simple de ses grains et leur neutralité électrique, la kaolinite se prête bien à un tel calcul. Le résultat obtenu indique que l'essentiel de la cohésion de cette terre réside bien dans les effets capillaires.

De la capillarité même en climat aride

Ainsi, on comprend pourquoi la construction d'un château de sable humide est un jeu d'enfants. Mais qu'en est-il de la Grande Mosquée de Djenné (Mali), dont le matériau est rendu sec par le climat sahélien ? En réalité, aucun matériau sous forme de poudre ou sous forme de bloc poreux (même très peu poreux) n'est jamais totalement sec s'il est laissé à l'air. La capillarité en est, encore une fois, responsable. Les petits espaces qui séparent les grains sont en effet des lieux privilégiés de condensation de la vapeur d'eau sous forme de ponts

capillaires, grâce aux forces qui attirent les molécules d'eau sur la surface.

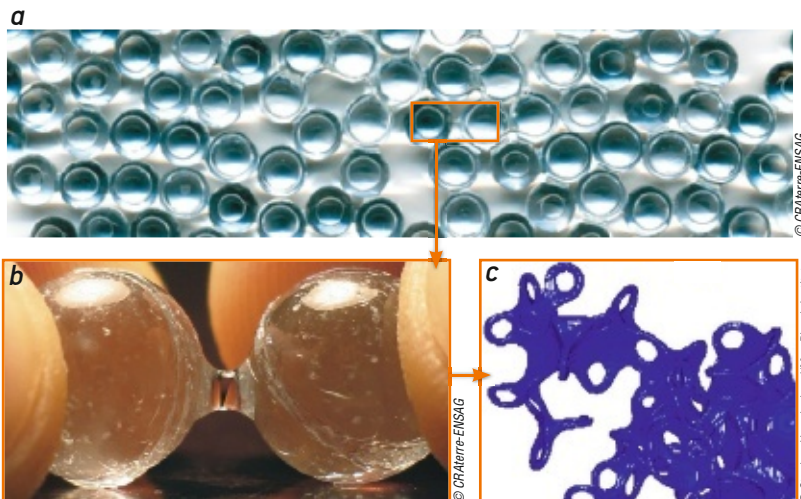
Lord Kelvin (1824-1907) a, le premier, montré que la condensation est d'autant plus précoce que l'espace est petit et que la courbure du ménisque qui se forme est grande. Pour une humidité relative de 90 pour cent (90 pour cent de la pression partielle maximale de vapeur d'eau dans l'air), l'eau se condense dans des espaces de quatre nanomètres ; elle se condense dans des espaces de deux nanomètres à 50 pour

cent d'humidité et dans des espaces de un nanomètre à 10 pour cent d'humidité.

Ces ordres de grandeur sont certes petits, mais de tels micro-espaces foisonnent au sein des argiles. Point n'est donc besoin d'ajouter de l'eau liquide pour former des ponts capillaires dans une terre argileuse. Il suffit qu'il y ait de l'humidité dans l'air. Or c'est toujours le cas, même dans les climats les plus secs. Combien représente l'eau de condensation capillaire dans notre terre modèle ? Guère plus d'une cannette par

L'EAU, LIANT DE LA TERRE

Les châteaux de sable tiennent parce qu'ils contiennent de l'eau et de l'air. Lorsque la quantité d'eau est faible, elle se concentre aux points de contact entre grains en formant des ponts capillaires (a). La surface des grains étant hydrophile, l'eau tend à s'y étaler, ce qui donne à la frontière air-eau une forme concave (b) et met l'eau en tension. Cette tension se traduit par une dépression au sein du liquide, qui est à l'origine de l'attraction entre grains et de la cohésion du système. On pourrait croire qu'une quantité bien précise d'eau soit nécessaire pour obtenir cette cohésion, car trop d'eau pourrait rapidement noyer les grains et faire disparaître l'interface eau-air. En réalité, la cohésion reste constante sur une très grande plage de teneurs en eau. L'élargissement des ponts aqueux conduit, selon une loi géométrique simple (si les grains sont sphériques et tous de la même taille), à des formes plus complexes entre trois, quatre ou cinq grains, puis à des amas de « nids liquides » qui envahissent le système tout en maintenant constante la section, par grain, sur laquelle agit la dépression (c).



Dans la terre, cet effet est renforcé par l'argile, qui vient glisser partout des intercalaires feuilletés. Ces derniers multiplient les espaces étroits où se forment, même à très faible humidité, des ponts capillaires qui contribuent d'autant plus à la cohésion de l'ensemble qu'ils couvrent de grandes surfaces (voir ci-dessous). La présence éventuelle de charges électriques sur les feuillets d'argile et d'ions dans les ponts capillaires rend ces assemblages encore plus cohésifs (voir la figure 5).

