

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.

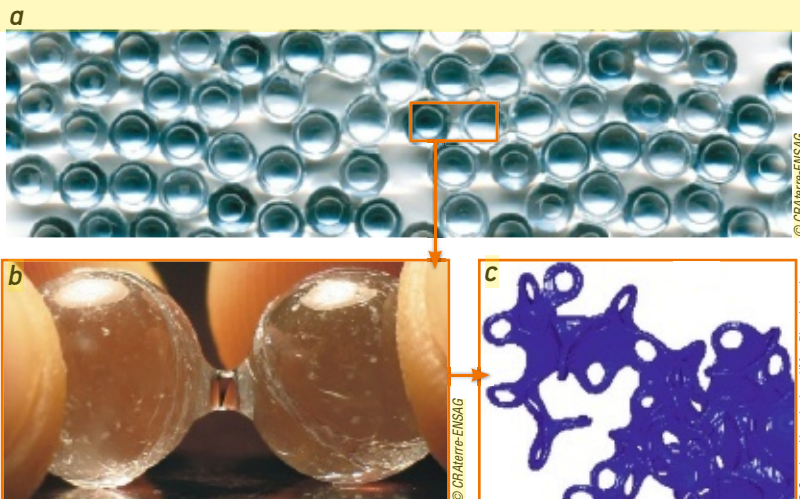
Lord Kelvin (1824-1907) a, le premier, montré que la condensation est d'autant plus précoce que l'espace est petit et que la courbure du ménisque qui se forme est grande. Pour une humidité relative de 90 pour cent (90 pour cent de la pression partielle maximale de vapeur d'eau dans l'air), l'eau se condense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

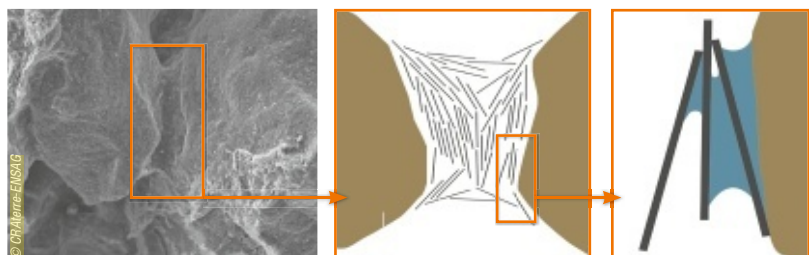
Ces ordres de grandeur sont certes petits, mais de tels micro-espaces foisonnent au sein des argiles. Point n'est donc besoin d'ajouter de l'eau liquide pour former des ponts capillaires dans une terre argileuse. Il suffit qu'il y ait de l'humidité dans l'air. Or c'est toujours le cas, même dans les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

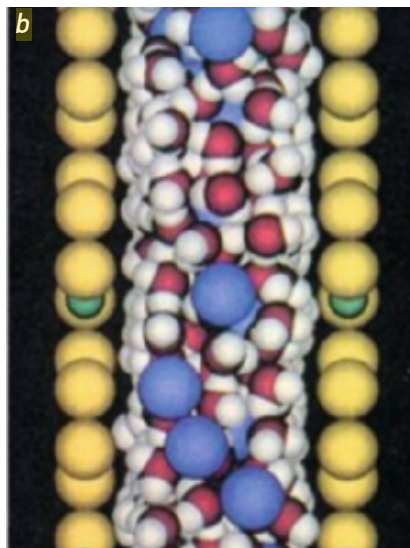
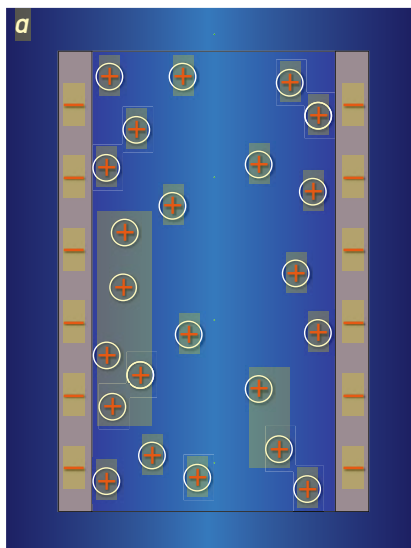
L'EAU, LIANT DE LA TERRE

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).





© H. Van Damme

5. LA STRUCTURE IONIQUE D'UN CIMENT D'ARGILE est un mille-feuille électrique, où alternent couches positives et couches négatives (*a*, schéma simplifié). Tandis que les feuillets minéraux (*b*, en jaune) portent des charges négatives, des ions positifs (en bleu) sont présents parmi les molécules d'eau (en rouge et blanc) qui séparent les feuillets. Les forces électrostatiques résultant de cette répartition confèrent à l'ensemble une cohésion d'autant plus forte que la charge des feuillets et des ions est élevée et que la mobilité des ions positifs est faible.

mètre cube de terre ! C'est très peu, mais assez pour construire un mur vertical de quelques mètres de hauteur, chose impossible avec du sable.

Une terre mêlée de kaolinite n'est cependant pas un matériau de construction extraordinaire. Elle ne suffirait pas, par exemple, aux maîtres bâtisseurs du Yémen, du Maroc ou du Mali, ni aux architectes qui font revivre la construction en terre crue dans nos régions. Des forces plus intenses que les forces capillaires peuvent donc être mobilisées dans d'autres terres. Lesquelles ?

Les forces dites de van der Waals sont les premières auxquelles on songe. Liées à la polarisation des nuages électroniques entourant les noyaux atomiques, ces forces sont universelles. Toujours présentes, elles agissent quasiment de manière égale entre tous les objets, et deviennent intenses si les objets considérés sont en contact direct. Mais le calcul montre que, dans une boue séchée, compte tenu du désordre des particules, elles sont d'intensité bien inférieure à celle des forces capillaires...

Il existe cependant d'autres argiles que la kaolinite, notamment les smectites, et les illites, dont les feuillets portent des charges électriques négatives. Ces charges provoquent une accumulation d'ions positifs dans l'eau de pontage située entre les grains d'argile. Compte tenu des signes opposés

de la charge des feuillets et de celle des ions, ces derniers sont attirés vers la surface des grains. Ils ne s'y collent pas pour autant car, tout comme les molécules d'eau qui les entourent, ils sont animés de mouvements erratiques dus à l'agitation thermique. Le résultat est un profil de concentration en cations qui est minimal au centre de l'espace entre les grains et qui augmente à mesure que l'on s'approche de la surface de ces derniers (voir la figure 5).

Cette situation conduit à un bilan de forces soit répulsif, soit attractif. Cela dépend de la compétition entre deux contributions. La première est celle des interactions électrostatiques de toutes les charges portées par les grains et les ions. On l'obtient en sommant toutes les interactions : ion-ion (répulsive, car les charges sont de même signe), ion-grain (attractive) et grain-grain (répulsive). Le résultat est toujours attractif, comme l'est le bilan des interactions entre ions dans un cristal.

La seconde contribution, répulsive, est liée au fait que les ions sont mobiles et se comportent comme un gaz. Elle crée une pression qualifiée d'osmotique, proportionnelle à la concentration moyenne des objets mobiles (les cations, en l'occurrence) au milieu de l'espace entre grains.

Des cations plus attirants

Le bilan des deux contributions dépend fortement de la charge des ions. Doubler la charge des cations – par exemple passer du sodium, Na^+ , au calcium, Ca^{2+} – réduit de moitié le nombre d'ions nécessaires pour assurer la neutralité, mais, ce faisant, on réduit aussi de moitié le nombre d'objets mobiles et on réduit d'autant la pression répulsive. Dans le même temps, l'attraction électrostatique devient plus forte, principalement grâce aux fluctuations de la position des ions. Grâce à l'agitation thermique, ceux-ci peuvent en effet s'accumuler temporairement d'un côté ou de l'autre de l'espace qui sépare les deux grains d'argile. Ces configurations qui s'écartent de la moyenne sont particulièrement attractives et elles le sont d'autant plus que les charges des ions positifs et des grains d'argile sont élevées.

Comme souvent, la pratique ou le savoir-faire traditionnel a précédé la théorie. Les agriculteurs savent depuis des lustres qu'il faut chauler un champ (c'est-à-dire lui apporter des ions calcium) pour renforcer

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Gelard et al., *Le rôle de l'eau dans la cohésion et l'adhésion du matériau terre*, Terra 2008, [sous la dir. de L. Rainer et al.], The Getty Conservation Institute, Los Angeles, pp. 266-270, 2011.

L. Fontaine et R. Anger, *Bâtir en terre*, Belin, 2010.

H. Van Damme, *Matériaux de construction et développement durable*, dans 29 notions clés pour savourer et faire savourer la science [coord. D. Wilgenbus et D. Pol], Le Pommier, 2009.

R. Pellenq et H. Van Damme, *Why does concrete set ?*, *Materials Research Society Bulletin*, vol. 29, pp. 319-323, 2004.