1. CETTE CASE OBUS bâtie par les Musgum, ethnie du Nord du Cameroun, est faite de terre, un remarquable matériau de construction qui traverse les siècles.

La terre, un béton d'argile

Henri Van Damme

Pourquoi la terre constitue-t-elle un matériau de construction si universel et si robuste ? L'explication réside dans les forces capillaires qui font tenir les châteaux de sable et les forces électrostatiques s'exerçant au sein de l'argile.

Le centre de Lyon est en partie bâti en terre ; plus d'un million d'habitations le sont en France, comme des centaines de millions dans le monde. La terre crue a toujours été l'un des tout premiers matériaux de construction de l'humanité. Elle le reste pour près de deux milliards d'êtres humains sur tous les continents, et elle ne sert pas qu'à construire de rudimentaires abris individuels : un bâtiment sur cinq du patrimoine de l'humanité inscrit à l'UNESCO est construit en terre.

Comment un matériau qui devient poussière s'il est trop sec, qui devient boue s'il est trop humide, peut-il servir à construire des édifices qui, comme les immeubles yéménites, dépassent dix étages, et qui, comme les murs d'enceinte de l'Alhambra ou de certaines portions de la Grande Muraille de Chine, traversent les siècles et les millénaires ? La réponse est à l'image du matériau lui-même : multiple. À mi-chemin, sur le plan constructif, entre les châteaux de sable et les gratte-ciel, l'architecture de terre l'est aussi sur le plan scientifique. On sait désormais que la terre doit sa cohésion à des forces attractives qui relèvent soit de la physique des tas de sable, soit de celle du ciment. Nous verrons qu'elles sont tantôt capillaires, tantôt électrostatiques, mais requièrent dans tous les cas la présence d'argile et d'eau.

La terre est la matière du sol. Immobilisée ou au contraire mobilisable par les vents et les flots, cette précieuse couche résulte de l'altération des roches sous l'action des éléments et de la vie. Ce processus peut se limiter à une simple fragmentation de la roche-mère (arénisation), sans modification de la nature des minéraux, ou prendre la forme d'une transformation chimique impliquant, au sein d'un flux allant de la surface vers les profondeurs, la dissolution partielle des minéraux initiaux et la formation de minéraux secondaires. La roche initiale se transforme ainsi petit à petit en une structure stratifiée faite de la superposition de différents « horizons ».

Brune, verte, grise, ocre, rouge ou blanche, la terre de chaque horizon révèle par sa couleur les grands traits de sa composition, tout particulièrement sa richesse en matières organiques et en oxydes de fer plus ou moins réduits. Grossière ou fine, la granulométrie – qui va des fractions les plus grossières, les cailloux (plus de deux centimètres), aux plus fines, les argiles (moins de deux micromètres), en passant par le gravier, le sable et le limon – révèle aussi son degré de transformation. Les fractions les plus grossières ne sont généralement que des fragments de roche-mère, tandis que les fractions les plus fines, les argiles, sont toujours des minéraux de transformation ayant incorporé à leur structure cristalline des fragments de molécules d'eau : des groupes hydroxyles, OH^-.

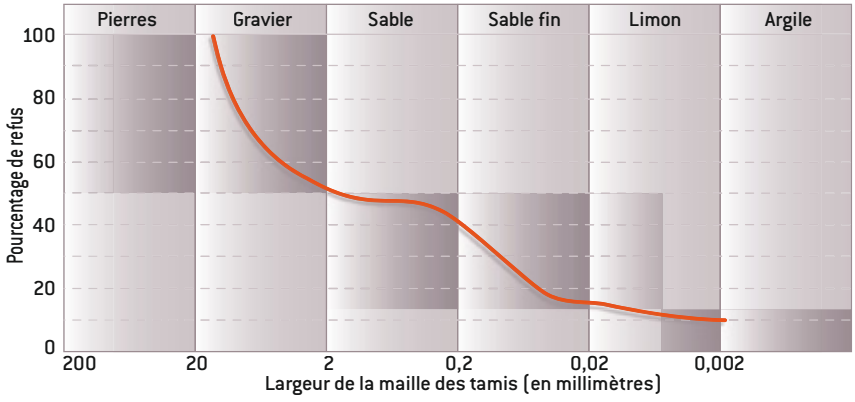
Or ces argiles jouent un rôle capital. Sans elles, la terre ne serait pas adaptée à la construction. Ce sont elles qui, en enrobant totalement ou partiellement les autres grains, assurent leur liaison. Mais les proportions d'argiles, comme celles des autres populations de grains, varient fortement d'une terre à l'autre. Les populations humaines ont adapté la technique de construction – torchis, bauge, pisé, etc. – à la nature de la terre locale, sans jamais utiliser la couche la plus superficielle riche en matières organiques, bien trop utile à l'agriculture pour la consacrer à d'autres usages. C'est donc un peu plus en profondeur que le bâtisseur va chercher sa matière première. Le pisé (terre crue à coffrer), terre apte à être damée, contient une proportion importante de cailloux et de graviers. Les terres moins grossières, plus limoneuses,

L'ESSENTIEL

- **La terre reste l'un des matériaux les plus utilisés pour construire des habitations.**
- **Les effets de capillarité, conjugués à la présence d'argile, lui confèrent une stabilité et une solidité considérables.**
- **Certaines argiles, électriquement chargées, jouent un rôle en tous points comparable à celui du ciment dans le béton.**

© Anthony Asael/Art in All of Us/Corbis

© CRAterre-ENSAG



2. LA GRANULOMÉTRIE ET L'ASPECT DES TERRES sont très variables, comme l'indiquent ces exemples de gravier, sable, limon et argile. La première de ces propriétés peut être résumée par la courbe granulométrique, qui est le tracé du pourcentage de refus (pourcentage de matériau retenu par le tamis) en fonction de la largeur de maille du tamis. Cette largeur de maille indique la taille maximale des grains pouvant passer à travers le tamis. Par définition, les pierres ont un diamètre supérieur à 20 millimètres (deux centimètres), tandis que les grains d'argile ont au plus un diamètre de 0,002 millimètre (deux micromètres).

sont plus collantes et davantage adaptées à la bauge (terre crue à empiler), au torchis (terre crue à remplir) ou à la fabrication d'adobes (briques de terre crue).

Formée de grains de tailles différentes dont une partie assure la cohésion globale, la terre, surtout sous forme de pisé, fait penser à un béton. En effet, qu'est-ce qu'un béton sinon un mélange de cailloux – de « granulats », en termes techniques – et d'une colle assurant la cohésion de l'ensemble ? Le béton ordinaire – le béton, que nous désignons ainsi sans même y réfléchir – est sans conteste le plus connu. Sa colle n'est autre que le ciment inventé au XIXe siècle, que l'on dit « de Portland », car sa couleur rappelle celle des falaises de Portland en Grande-Bretagne. Toutefois, la terre aussi peut recevoir le label de « béton » : il faudrait juste préciser que l'on parle de « béton d'argile » plutôt que de « béton de ciment ».

Argiles : des mille-feuilles de silicates

On pourrait penser qu'à l'image de la variété de roches dont elle est issue, la fraction argileuse des sols n'est qu'un kaléidoscope : il n'en est rien. Les conditions dans lesquelles les argiles se forment – par altération à température modérée en présence d'eau – produisent une famille de minéraux ayant deux caractéristiques communes : ce sont des silicates (sels dérivant de la silice, SiO_2) ayant une structure cristalline en couches. En examinant les argiles au microscope, on peut trouver des formes variées (pétales de fleurs, plaquettes empilées, fibres enchevêtrées), mais qui ont toutes la caractéristique d'être plus larges et longues qu'épaisses *(voir la figure 4)*.

Si l'on examine la structure de ces pétales, plaquettes ou fibres, on retrouve toujours une structure en couches formée de feuillets superposés. C'est pourquoi, dans la très vaste famille des silicates, les argiles sont classées dans la sous-famille des phyllosilicates (*phyllo* signifie feuille en grec). Cependant, tous les phyllosilicates ne sont pas des argiles. Certains, tels le talc ou les micas, sont de granulométrie souvent supérieure au seuil des deux micromètres qui définit les argiles.

Un grain d'argile est donc un mille-feuille, mais ce dernier est plus ou moins épais, avec des liaisons plus ou moins fortes entre feuillets. La brique élémentaire de

© Pour la Science - n° 423 - Janvier 2013

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.

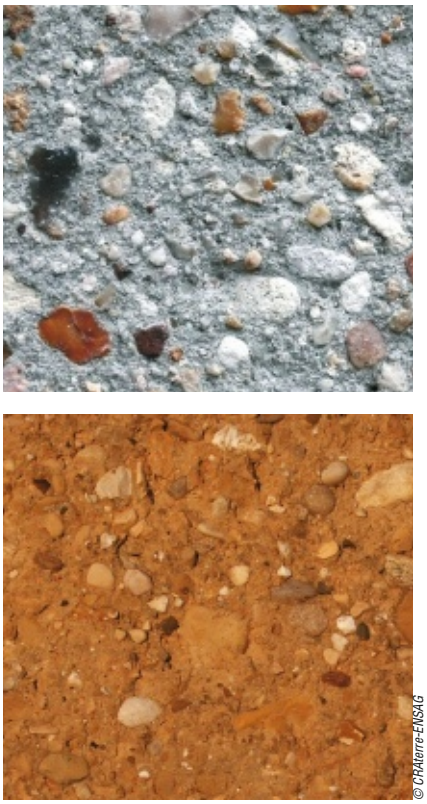
Une troisième famille d'argiles, les illites, ressemble à celle des smectites, mais a deux caractéristiques particulières : d'une part, le déficit de charges positives y est très élevé et, d'autre part, il est systématiquement compensé par des cations de potassium, K^{+}.

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 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.



© CRAterre-ENSAG

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.

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.

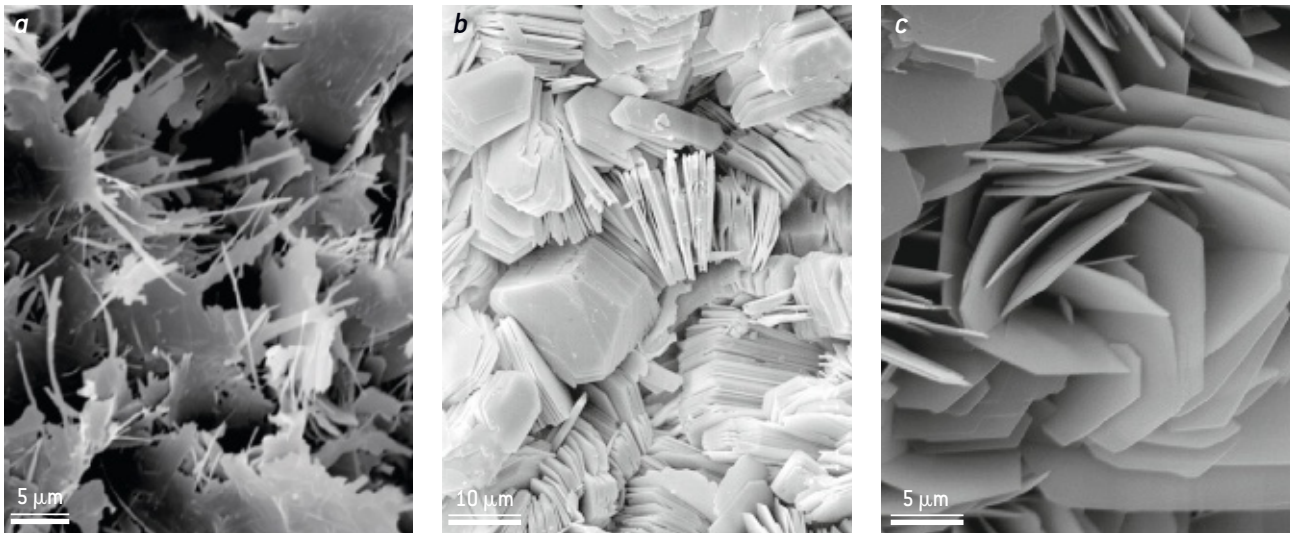
Mais cette tendance est contrecarrée par la cohésion de l'eau elle-même, liée à l'attraction mutuelle des molécules d'eau. Tout se passe comme si la surface de la goutte d'eau était une membrane élastique, qui empêche la goutte de s'étirer : c'est la tension superficielle, responsable des phénomènes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

© Pour la Science - n° 423 - Janvier 2013

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

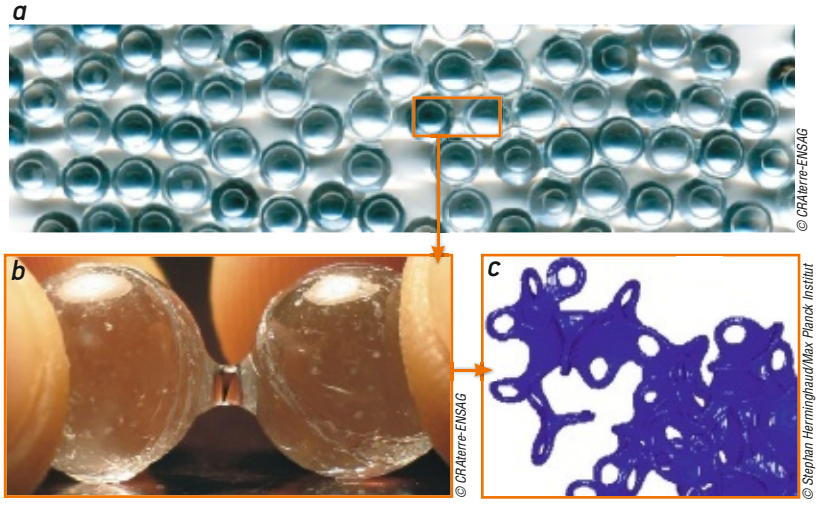
Ainsi, on comprend pourquoi la construction d'un château de sable humide est un jeu d'enfants. Mais qu'en est-il de la Grande Mosquée de Djenné (Mali), dont le matériau est rendu sec par le climat sahélien ? En réalité, aucun matériau sous forme de poudre ou sous forme de bloc poreux (même très peu poreux) 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.

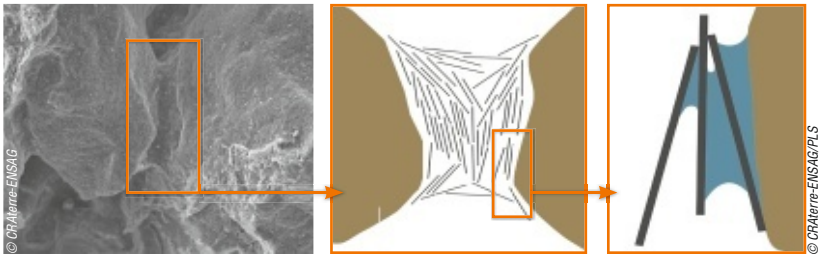
Ces ordres de grandeur sont certes petits, mais de tels micro-espaces foisonnent au sein des argiles. Point n'est donc besoin d'ajouter de l'eau liquide pour former des ponts capillaires dans une terre argileuse. Il suffit qu'il y ait de l'humidité dans l'air. Or c'est toujours le cas, même dans les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

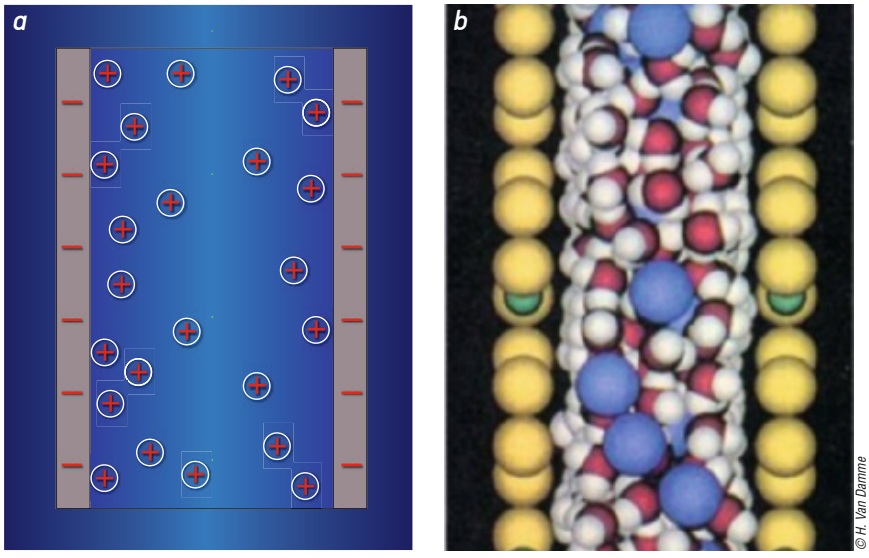
L'EAU, LIANT DE LA TERRE

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.

© Pour la Science - n° 423 - Janvier 2013

la solidité des mottes de terre et éviter que les pluies battantes n'entraînent le sol par ruissellement. En tout cas, le calcul montre que la cohésion d'une smectite calcique peut être dix fois supérieure à sa cohésion par capillarité. Ce qui autorise d'audacieux projets architecturaux !

La terre est donc un béton à ciment d'argile, mais l'analogie entre argile et ciment ne s'arrête pas au fait qu'ils jouent tous deux un rôle de colle. Elle touche aussi leur genèse, leur structure, et le mécanisme par lequel ils collent. Obtenu par calcination d'un mélange de calcaire et d'argile à 1 450 °C, le ciment peut en quelque sorte être considéré comme une roche volcanique artificielle. Il est très majoritairement constitué de silicates de calcium. Lors de son gâchage (son mélange avec l'eau), il se produit une série de réactions étonnamment proches de celles qui, à partir d'une roche-mère, conduisent aux argiles. Au contact de l'eau, les minéraux du ciment commencent à se dissoudre.

La concentration en ions silicate et ions calcium augmentant, la concentration en ions atteint bientôt un niveau suffisant pour que de nouveaux minéraux se forment et se déposent (« précipitent ») sur ce qui reste des minéraux initiaux. Ces nouveaux minéraux, formés de grains extrêmement petits, de taille nanométrique, sont nommés hydrates, car, comme les argiles, ils ont incorporé des éléments de molécules d'eau – des groupes hydroxyles, OH^-, dans leur structure. Ce sont eux, les objets minéraux les plus microscopiques du béton, qui en assurent la cohésion.

Le ciment, une superargile

L'analogie avec les argiles va encore plus loin. Comme les argiles, les hydrates de silicate de calcium ont une structure en lamelles et les forces qui assurent leur cohésion sont, comme dans les argiles portant une charge électrique, des forces électrostatiques, mais d'une vigueur centuple. Cette extraordinaire démultiplication, qui permet de concevoir des gratte-ciel hauts de plusieurs centaines de mètres, le ciment la doit à la charge électrique très élevée portée par les hydrates et au fait que les ions calcium ont perdu leur mobilité, ce qui élimine toute répulsion entre (nano) grains. La danse des ions calcium dans une couche d'eau est remplacée par une scène figé, comme s'il s'agissait d'une mince couche de verre.

Avec sept milliards d'individus, l'humanité a plus que jamais besoin de logements. Pour nos travaux d'aménagement – routes, remblais, ponts, tunnels, digues, ports et aéroports –, nous déplaçons désormais plus de terre que l'érosion naturelle n'en transporte. Nous sommes devenus les principaux sculpteurs de notre planète. Comprendre les mécanismes de cohésion qui sont à l'œuvre dans le matériau terre peut nous aider à résoudre le problème du logement à l'échelle globale, à conserver l'énorme patrimoine architectural que nous ont laissé des générations de bâtisseurs, à mieux utiliser les sols en place pour nos aménagements et, enfin, à nous protéger des aléas naturels. C'est une recherche d'avenir ! ■