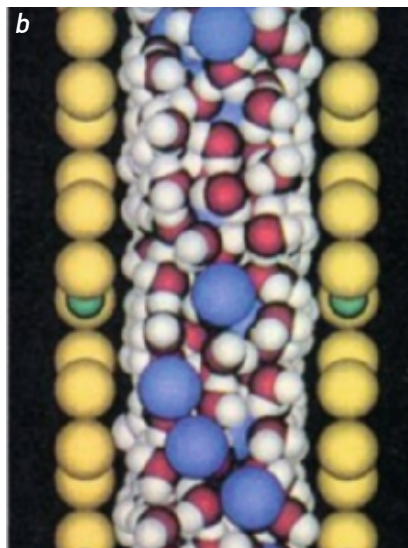
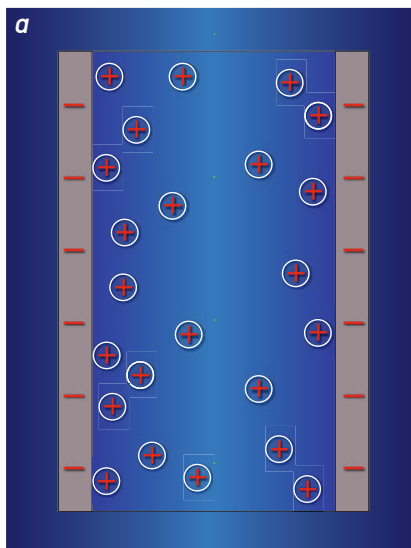




**5. LA STRUCTURE IONIQUE D'UN CIMENT D'ARGILE** est un mille-feuille électrique, où alternent couches positives et couches négatives (a, schéma simplifié). Tandis que les feuillets minéraux (b, en jaune) portent des charges négatives, des ions positifs (en bleu) sont présents parmi les molécules d'eau (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,  $\text{Na}^+$ , au calcium,  $\text{Ca}^{2+}$  – 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.

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. Obtenue par calcination d'un mélange de calcaire et d'argile à 1450 °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,  $\text{OH}^-$ , 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 figée, 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 ! ■



# LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélie Luneau

14h-15h / chaque jeudi



franceculture.fr

en partenariat avec  
**POUR LA SCIENCE**