

Matériaux de construction et développement durable

Primaire et collège

Résumé

Avec quoi construisons-nous ? Au-delà des choix individuels, la réponse à cette question est éminemment variée selon la région ou l'époque à laquelle on s'intéresse. Elle varie également selon que l'on s'attache à l'habitat, aux lieux de travail, à la construction industrielle ou aux grands ouvrages. Si les matériaux artificiels dominent actuellement les techniques constructives en Europe, il n'en a pas toujours été ainsi et il n'en est toujours pas ainsi dans bien des régions du monde.

matériaux de construction et développement durable

Henri Van Damme

L'auteur souhaite remercier Romain Anger, Laetitia Fontaine, Hugo Houben qui furent partie prenante de la rédaction de ce chapitre. Avec quoi construisons-nous ? Au-delà des choix individuels, la réponse à cette question est éminemment variée selon la région ou l'époque à laquelle on s'intéresse. Elle varie également selon que l'on s'attache à l'habitat, aux lieux de travail, à la construction industrielle ou aux grands ouvrages. Si les matériaux artificiels dominent actuellement les techniques constructives en Europe, il n'en a pas toujours été ainsi, et il n'en est toujours pas ainsi dans bien des régions du monde.

Les matériaux de construction

Malgré l'avidité avec laquelle nous consommons des voyages, peu d'entre nous réalisent que les deux matériaux qui dominent encore l'habitat individuel dans le monde ne sont pas ceux qui nous sont relativement les plus familiers, en tout cas comme matériaux de construction. Il s'agit du bois et de la terre crue. Pendant longtemps, le bois est resté majoritaire dans l'habitat individuel un peu partout sur la planète. Il est marginal chez nous

aujourd'hui mais en Amérique du Nord et en Sibérie, en Europe du Nord et dans de vastes régions intertropicales, c'est le matériau roi. Ressource renouvelable, recyclable, légère, facile à travailler, relativement bon isolant, le bois n'a qu'un inconvénient notoire : c'est d'être combustible. Cette faiblesse peut être vaincue, mais au prix d'un traitement chimique assez lourd.

L'universalité de l'usage de la terre crue (c'est-à-dire non cuite) est plus surprenante. Qui sait, dans nos pays dits « développés », qu'un tiers de l'humanité environ (deux milliards d'individus) trouve abri dans des constructions de terre séchée ? Qui sait qu'un cinquième des édifices inscrits sur la liste du patrimoine architectural de l'humanité est en terre crue ? L'Afrique, le Moyen-Orient, l'Asie centrale, l'Himalaya, la Chine, l'Amérique du Sud et l'Amérique centrale regorgent de merveilles dont les architectes sont les peuples eux-mêmes et dont la matière est puisée sur le lieu même de la construction. Qui sait qu'en France aussi, plus d'un million de maisons, principalement en Bretagne, dans le Nord, le Centre, le Sud-Ouest et la région Rhône-Alpes, sont en terre crue ? Même leurs habitants ignorent parfois de quoi sont faits leurs murs, recouverts qu'ils sont d'enduits ou de lambris. La

raison de cette universalité de la terre crue est simple : point n'est besoin d'une terre fertile pour construire. Presque toutes les compositions de terre que l'on trouve sur notre planète se prêtent à la préparation de briques de boue séchée – des adobes – ou à la compaction dans des coffrages – des banches. La terre séchée ou compactée n'est pas particulièrement résistante ni isolante, mais elle l'est largement assez pour construire en toute sécurité des édifices de plusieurs étages, pourvu que les murs soient suffisamment épais (disons une trentaine de centimètres). Dès lors, grâce à l'épaisseur, on obtient une bonne isolation et, en prime,

une très forte inertie thermique qui permet d'amortir les fluctuations extrêmes de température (la sensation de confort dépend autant de la température des parois que de la température de l'air).

Bien plus familière que la terre crue à nos yeux d'Européens est la pierre naturelle, car le patrimoine architectural qui draine vers la France et plus généralement vers l'Europe des millions de touristes est essentiellement un patrimoine en pierre naturelle. Le calcaire et le grès, deux roches plutôt tendres, le granit et le basalte, deux roches plutôt dures, se partagent la plupart des édifices. Le calcaire – qui devient



À gauche, deux exemples d'architecture de terre. En haut : mosquée de Bobo Dioulasso, Burkina Faso. © Thierry Joffroy.

En bas : citadelle d'Arg-e-Bam, Iran, avant le tremblement de terre de 2003. © CRATerre-ENSAG.

À droite : maisons traditionnelles ou neuves en terre crue. En haut : ancien moulin du Dauphiné. © Patrice Doat

En bas : maison Carducci. Conception, maîtrise d'œuvre et réalisation : Nicolas Meunier. © Vincent Rigassi.

marbre lorsqu'on peut le polir – domine aussi l'Antiquité classique et le Moyen-Orient, tandis que le grès, roche siliceuse et poreuse, est la matière des villes-temples d'Asie du Sud-Est.

Les pierres artificielles : la brique cuite et le ciment

Fabriquer une pierre artificielle, aussi solide qu'une pierre naturelle mais susceptible d'être moulée plutôt que taillée, représenta un progrès important. Les Mésopotamiens réalisèrent les premiers que cuire des briques de boue séchée permettait d'en augmenter la dureté et la résistance. Dès lors, la brique cuite devint un peu partout dans le monde, sur tous les continents, un matériau de construction commode, et elle l'est restée. Mais contrairement à la pierre qui, correctement taillée, peut s'ajuster « à sec », la maçonnerie de briques demande un liant. Les Mésopotamiens utilisaient du bitume, qu'il suffit de chauffer pour le faire fondre et qui se resolidifie à froid ; les Égyptiens un plâtre grossier, obtenu par cuisson de gypse impur. Le gypse – sulfate de calcium – est une roche calcaire très tendre. Lors de la cuisson, il perd une partie de l'eau qu'il contient. En mélangeant le produit obtenu après broyage (le plâtre) à de l'eau, le minéral récupère l'eau qui lui manque. Les cristaux de gypse se reforment alors à nouveau, formant un enchevêtrement d'aiguilles. À mesure que les cristaux croissent, le matériau perd son caractère pâteux et devient solide : il « prend ».

La chaux est un autre liant simple à fabriquer. On l'obtient par calcination de roches calcaires contenant cette fois du carbonate de calcium. Pendant la calcination, la roche perd son gaz carbonique et donne de la chaux vive. Mélangée à de l'eau,

celle-ci donne la chaux en pâte, ou chaux aérienne, qui, petit à petit, réabsorbe le gaz carbonique de l'air en durcissant. La chaux résiste mieux à l'eau que le plâtre, mais sa fabrication demande de chauffer la matière première à plus haute température.

L'usage de la chaux était familier à la plupart des peuples de l'Antiquité, y compris aux Chinois, mais ce furent les Grecs puis surtout les Romains qui en développèrent fortement l'usage. Les Romains améliorèrent notablement le procédé en incorporant à la chaux des cendres volcaniques, la pouzzolane, ou de la brique pilée. Cette addition confère à la chaux une propriété entièrement nouvelle qui la rapproche de nos CEMENTS, celle de pouvoir faire « prise » avec l'eau et même *sous* l'eau. La réaction chimique en cause n'est plus une simple réhydratation ni une recarbonatation, mais une réaction plus complexe de la pouzzolane ou de la brique avec la chaux et avec l'eau.

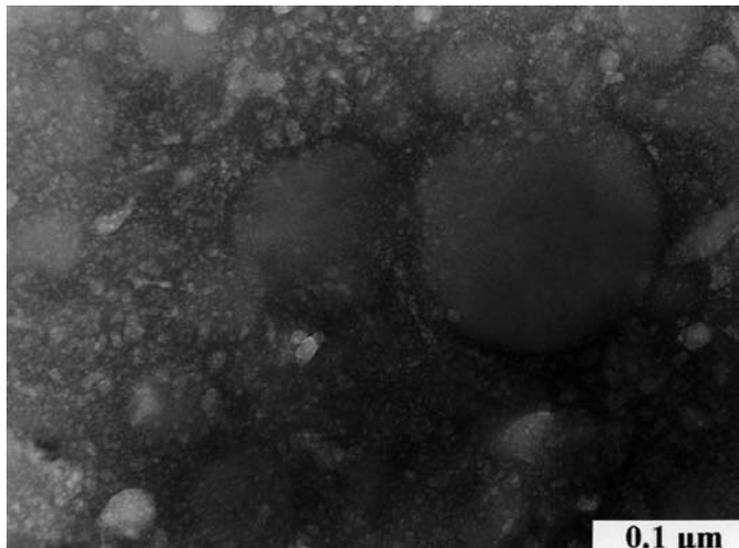
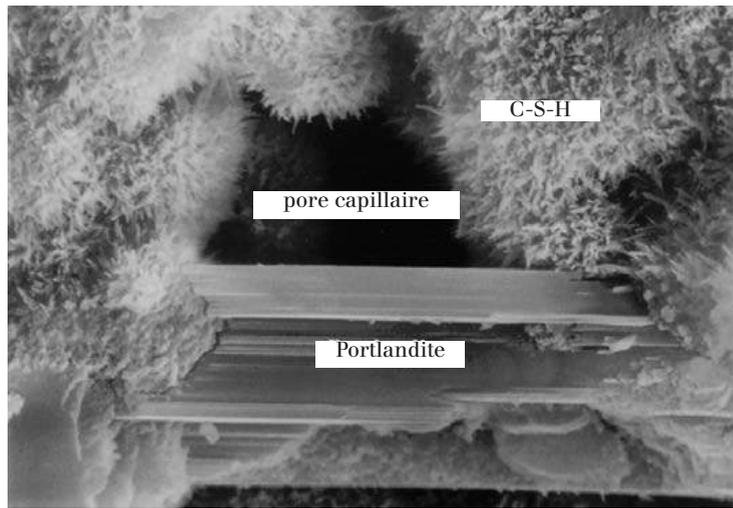
Aucun progrès ne fut accompli par rapport au ciment romain pendant le Moyen Âge, la Renaissance ou l'époque classique. Le savoir-faire fut même en grande partie perdu et il fallut attendre les travaux empiriques de l'Anglais John Smeaton, au milieu du XVIII^e siècle, puis surtout du Français Louis Vicat, au début du XIX^e, pour qu'il soit clairement établi que c'est la silice contenue dans la pouzzolane ou la brique pilée qui est l'élément actif. Dès lors, il devenait évident que, plutôt que de cuire de la terre pour en faire une brique puis de réduire cette brique en poudre et de la mélanger à de la chaux, elle-même obtenue par calcination d'un calcaire, il était plus judicieux et plus simple de calciner en une seule opération une roche calcaire et une source de silice. Une terre argileuse fait l'affaire. La cuisson du mélange conduit à une roche artificielle qui a perdu

toute l'eau qui entrait dans la composition de l'argile (on dit qu'elle est « ANHYDRE ») et tout le CO_2 qui était contenu dans le calcaire. Réduite en poudre et mélangée à de l'eau – c'est le GÂCHAGE –, cette roche forme une pâte moulable qui durcit pour former une roche grise, plus dure que les liants connus jusqu'alors. Finalement, c'est l'Anglais Joseph Aspdin qui, en 1824, déposa le brevet décrivant la fabrication du ciment Portland, qui doit son nom à sa similitude avec les falaises calcaires de Portland, en Angleterre.

Tous les mystères de la réaction chimique sous-jacente à la prise n'étaient pas éclairés pour autant. Il fallut attendre la thèse d'Henry Le Chatelier, publiée en 1887, pour que l'on comprenne enfin ce qui se passait entre l'eau, le calcaire et la silice. Ce que Le Chatelier montra – et qui reste vrai – est que, lorsque le ciment est mélangé à l'eau, les minéraux des grains de ciment commencent par se dissoudre. Cette dissolution est peu visible parce que la pâte est généralement très concentrée et que les substances dissoutes – silice et chaux – reforment très rapidement de nouveaux

cristaux microscopiques qui s'agglomèrent et forment la véritable colle du ciment durci. Ces nouveaux cristaux ont la particularité d'avoir incorporé de l'eau à leur structure cristalline – c'est la raison pour laquelle on les appelle des « HYDRATES ». Contrairement à une opinion répandue, la prise et le durcissement du ciment ne sont donc pas dus à un phénomène de séchage, comme c'est le cas pour une brique de terre crue. C'est même tout le contraire !

Utilisé initialement comme liant en maçonnerie, le ciment a également donné naissance au BÉTON. Mélange de gros



En haut : cliché au microscope électronique à balayage d'un ciment après sa réaction avec l'eau de gâchage. On distingue les deux hydrates les plus importants du ciment durci : au premier plan, un « gros » cristal de Portlandite ou hydroxyde de calcium, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, et au second plan, du silicate de calcium hydraté qui a cristallisé en forme d'oursin. On distingue aussi les vides ou « pores capillaires » que l'excès d'eau a laissés après la prise. © Micheline Moranville, CERILH. En bas : cliché au microscope électronique d'une mince tranche dans un béton à très hautes performances. On ne distingue plus aucune porosité. Tous les vides ont été comblés par ajout de particules sphériques de silice, de tailles très variées. © Sylvie Bonnamy, CRMD.

fragments rocheux – les granulats –, de sable et d'une colle – le ciment –, le béton est une roche artificielle remarquable. C'est devenu le matériau clé de toutes les grandes infrastructures de notre civilisation. Nous en consommons en moyenne une tonne par an et par habitant. Sa mise en œuvre est d'une facilité étonnante et il est robuste, en ce sens qu'il tolère de petits écarts par rapport à la composition visée. Sur le plan mécanique, il n'a qu'un défaut notoire : c'est un matériau fragile (pour en savoir plus sur les notions de fragilité, rigidité, ductilité, viscosité... Il est résistant, mais rompt sans trop prévenir. L'origine de cette fragilité tient à sa porosité. Le mélange de grains et d'eau qui constitue le béton frais n'aboutit généralement pas, après l'arrêt des réactions d'hydratation, à un assemblage parfaitement compact d'hydrates et de grains anhydres. Les imperfections de l'empilement initial ou les cavités laissées par l'évaporation de l'excès d'eau sont autant de points d'amorce d'une rupture (photos page précédente).

Plusieurs remèdes peuvent être mis en œuvre pour pallier ce défaut. Le plus simple est de renforcer le béton avec des barres de fer : c'est le béton armé. Même si la matrice cimentaire se fissure, le ferrailage évitera une rupture brutale. La grande chance du génie civil est que le ciment est une substance très basique, comme la chaux, et qu'à ces pH, contrairement à ce qui se passe dans les milieux acides, le fer ne subit aucune réaction de corrosion. Le traditionnel fer à béton peut même être avantageusement remplacé par des FIBRES courtes en acier ou en POLYMÈRE (du plastique) pas plus grosses qu'une aiguille à coudre et de 1 cm de long environ : c'est le béton fibré. Une autre piste, complémentaire à la première, consiste à diminuer au maximum la porosité, soit en

ajoutant des particules minérales de petite taille – des fines – susceptibles de venir se loger dans les pores, soit en ajoutant des molécules lubrifiantes qui permettront au béton de s'écouler facilement sans avoir à ajouter exagérément d'eau, car c'est surtout l'excès d'eau qui engendre la porosité. La mise en œuvre simultanée de ces trois techniques permet d'obtenir des bétons qui rivalisent de légèreté et d'élégance avec les matériaux métalliques.

Les bâtiments sont généralement conçus pour faire travailler les matériaux de construction en compression plutôt qu'en traction. C'est donc naturellement la résistance en compression que l'on cherche à améliorer en priorité. Une brique de terre séchée a une résistance en compression (ces résistances sont des CONTRAINTES de l'ordre de quelques mégapascals, ou MPa, soit de quelques dizaines de kilogrammes par centimètre carré. Un béton ordinaire, utilisé pour construire un immeuble d'habitation de quelques étages est vingt fois plus résistant. Le béton du viaduc de Millau a une résistance de 80 MPa. Le superbéton de la passerelle Arc-en-Ciel de Séoul atteint 200 MPa. Il peut donc supporter 2 t/cm². Et des résistances encore quatre fois supérieures ont pu être obtenues en laboratoire, quasiment identiques à celles de l'acier ordinaire.

Pourquoi ça tient ?

Ce qui précède nous dit peu de chose sur la raison pour laquelle les aiguilles de gypse du plâtre, les hydrates du ciment ou encore les nombreux minéraux que l'on trouve dans la terre crue adhèrent aussi bien les uns aux autres et permettent de construire des édifices de plusieurs centaines de mètres de hauteur dans certains cas. Pour tenter d'y

voir clair, commençons par notre propre expérience de bâtisseur qui, pour la plupart d'entre nous, remonte à notre enfance.

L'art de construire des châteaux de sable

Tout compte fait, pourquoi n'habitons-nous pas tous dans des châteaux de sable ? La matière première est abondante et peu chère, la technique de construction est simple et nous en avons tous une longue pratique (un peu lointaine peut-être). La plasticité de la matière – du sable humide – est remarquable et autorise toutes les formes esthétiques. Tous les éléments semblent donc réunis pour que le sable humide soit le matériau de construction favori des ingénieurs, des architectes et des artistes. Et pourtant, il n'y a guère que les figurines des panoplies de jeu de nos enfants qui acceptent de trouver abri dans ces édifices fugaces. Pourquoi ? La réponse est simple : nous sommes trop grands !

Construire une paroi verticale de sable humide d'une dizaine de centimètres de haut est chose facile, mais élever une paroi de 1 m est déjà une prouesse et en édifier une de plusieurs mètres relève de l'exploit impossible. Des villes de sable sont donc envisageables, mais elles ne pourraient être que lilliputiennes... et devraient être dotées d'un dispositif d'humectation bien réglé !

Quelle est donc la raison de cette difficulté à affronter la verticalité ? Dans le langage de la matière en grains, c'est d'un manque de cohésion dont souffre le sable humide. En d'autres termes, les grains ne collent pas suffisamment les uns aux autres. En l'absence d'humidité, dans du sable sec, ils ne collent même plus du tout et se contentent simplement de rouler et de glisser les uns sur les autres. Dans ces conditions, même la plus petite paroi

verticale est une gageure. Toute tentative pour faire un pâté se solde par un échec. Dès le retrait du moule, des avalanches se déclenchent dans toutes les directions et ce qui aurait pu être un beau pâté se transforme en un talus conique, avec un angle bien déterminé, caractéristique du sable utilisé. Ajouter du sable sur le sommet du cône – avec un gobelet en plastique percé d'un trou par exemple – ne sert à rien. Dès que l'angle du talus dépasse un angle critique, supérieur de quelques degrés à l'angle de repos, une nouvelle avalanche affectant une mince couche de surface se déclenche, qui ramène l'angle à sa valeur précédente.

Les choses changent du tout au tout si on verse le sable dans une assiette contenant un fond d'eau. À mesure que le sable s'entasse, l'eau remonte par CAPILLARITÉ et une jolie stalagmite se forme avec des sections verticales et même, de temps en temps, de petits surplombs. Mais très vite les limites sont atteintes et la stalagmite s'effondre sous son propre poids dès que sa hauteur dépasse quelques centimètres. La cohésion introduite par l'eau est très limitée...

Quelle est la force qui détermine les valeurs de l'angle critique et de l'angle de repos ? En l'absence de toute cohésion (rien ne colle les grains les uns aux autres), comme dans du sable sec, c'est tout simplement le frottement des couches de grains les unes sur les autres. Les premières recherches sur les lois du frottement sont très anciennes. Elles remontent à Léonard de Vinci. Ce dernier, grand constructeur de machines, avait remarqué que l'angle au-delà duquel un objet posé sur une surface se met à glisser ne dépendait pas de la manière dont l'objet était posé. En d'autres termes, pour faire glisser un livre sur une table, peu importe qu'il soit posé à plat ou sur la tranche, bien que l'aire



Un tas de sable sec forme spontanément un tas conique avec un angle de talus qui lui est propre et qu'il est impossible de dépasser; quelle que soit la quantité de sable.

apparente de contact soit très différente. Cette observation tomba dans l'oubli et ce furent Guillaume Amontons, à la fin du XVII^e siècle, qui la redécouvrit, puis Charles Augustin de Coulomb, au XVIII^e, qui fit le lien avec l'angle limite qu'un talus est capable de prendre sans s'ébouler. La loi principale du frottement est désormais liée au nom de ce dernier.

La LOI DE COULOMB s'applique de la même manière à une couche de grains qui glisse le long d'un talus. À mesure que l'angle de talus se redresse, la composante du poids de la couche superficielle le long de la pente – la composante tangentielle – augmente tandis que la composante perpendiculaire à la pente diminue. Lorsque l'avalanche se déclenche dans un tas de sable sec, la tangente de l'angle de talus est exactement égale au coefficient de frottement des grains. Si les grains collent les uns aux autres, le talus pourra prendre un angle plus raide avant que l'avalanche ne se déclenche. En pratique, c'est de cette manière que l'on définit et que l'on mesure la cohésion d'un matériau granulaire : c'est l'excès de composante tangentielle – excès par rapport au tas sec – qu'un tas peut supporter sans qu'une avalanche se déclenche.



Si l'on construit le tas sur un fond d'eau, les remontées capillaires, en introduisant un peu de cohésion, permettent de dépasser cet angle. © Romain Anger et Laetitia Fontaine.

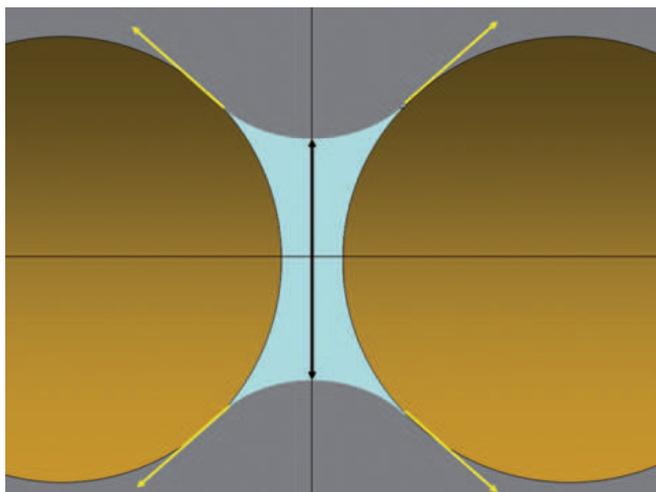
L'eau est-elle une colle ?

Comment une petite quantité d'eau confère-t-elle au sable la cohésion nécessaire pour faire de petites parois verticales ? Peut-on considérer l'eau comme une colle ? À première vue, c'est un peu fort de café ! Et d'abord, qu'est-ce qu'une colle ? Deux minutes de réflexion permettent d'aboutir à la conclusion que deux conditions doivent être respectées pour qu'une substance puisse être considérée comme une bonne colle. La première, triviale, est que la substance en question doit être capable d'établir des liaisons avec les deux surfaces à coller. Si elle n'arrive pas à s'accrocher aux surfaces qu'elle est censée coller, comment une colle pourrait-elle être efficace ? La seconde condition, moins évidente, est qu'une bonne colle doit consommer beaucoup d'énergie lorsqu'on essaie de la déformer. L'énergie que l'on dépense pour séparer deux surfaces collées, tant que la colle s'accroche, n'est pas déterminée par la force des liaisons colle-surface. C'est plutôt la VISCOSITÉ de la colle elle-même qui compte, car c'est elle qui détermine la force à appliquer pour étirer la couche de colle. Et cette viscosité dépend surtout de la taille des molécules dont la colle est constituée. Les très longues molécules

frottent plus les unes contre les autres et sont plus difficiles à désenchevêtrer que les très petites.

Des deux points de vue qui précèdent, on peut conclure que l'eau est une colle relativement médiocre. Certes, elle établit des liaisons avec les grains de sable, mais ce sont des liaisons relativement faibles (des liaisons hydrogène et des liaisons de Van der Waals, pour les spécialistes). Par ailleurs, les molécules d'eau sont petites et quasi sphériques et l'eau n'est pas très visqueuse. Étirer la goutte d'eau qui pontait deux grains de sable ne coûte pas beaucoup d'énergie. Étirer une goutte de miel en coûterait bien plus (faites l'expérience entre votre pouce et votre index). La conclusion à en tirer – mais, chut, ne le dites à personne – est que pour faire un beau château de sable, il vaut mieux prendre de l'eau dans laquelle on aura dissous une substance qui la rend plus visqueuse, comme une bonne dose de sucre par exemple ou, mieux encore, des polysaccharides, tels que ceux vendus pour les coureurs de marathon.

Si l'eau est une colle médiocre, comment arrive-t-elle à assurer la cohésion des châteaux de sable ? Elle s'en tire grâce à sa propriété la plus connue : elle mouille ! Plus



exactement, elle mouille bien le sable (et d'autres minéraux aussi) grâce aux liaisons – faibles mais bien réelles – qu'elle peut établir avec la silice du 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. Les liaisons des molécules d'eau entre elles sont plus fortes encore que celles que ces molécules peuvent établir avec le sable. Il en résulte un état d'équilibre avec une goutte pontante ayant une forme caractéristique de diabolo (voir la figure ci-dessous). La goutte adopte une courbure étirée vers les deux grains et les liaisons entre molécules d'eau sont en tension. En d'autres termes, la goutte est en dépression par rapport à l'air environnant. C'est Pierre Simon de Laplace qui, le premier, a relié la dépression dans le pont liquide à la courbure du MÉNISQUE (la frontière entre l'eau et l'air). Le résultat est très simple : plus le ménisque est creusé, plus la dépression est forte, et donc plus la cohésion est grande.

Comment régler la quantité optimale d'eau ?

La dépression qui existe au sein du pont liquide tend bien entendu à rapprocher les deux grains de sable. La force de cohésion qui tire les deux grains l'un contre l'autre se calcule en multipliant

Deux grains sphériques reliés par un pont liquide mouillant (de l'eau par exemple). Les flèches jaunes indiquent les forces d'étalement de l'eau sur la surface des grains. Ces forces mettent les molécules du pont liquide en tension et génèrent une dépression dans le pont, tout en provoquant la courbure de la frontière entre l'eau et l'air (le « ménisque »). La force de cohésion qui tire les deux grains l'un contre l'autre se calcule en multipliant la dépression par la section médiane du pont liquide, dans le plan perpendiculaire à la figure (la flèche noire).

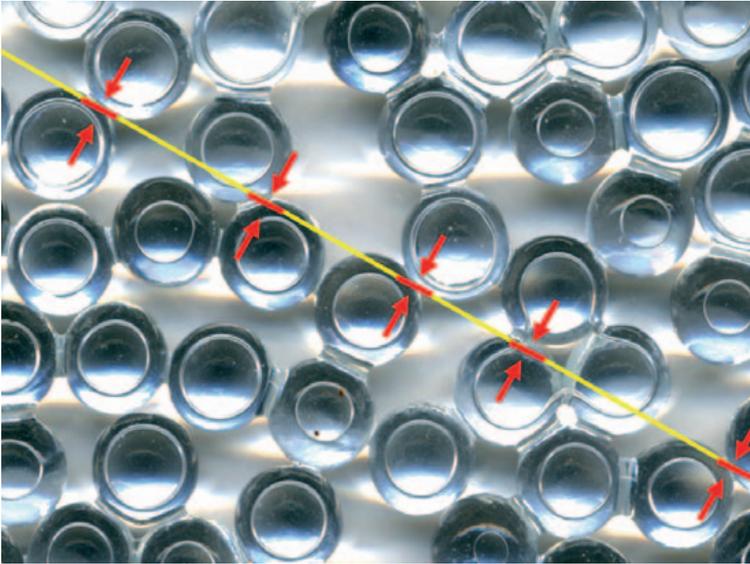
la dépression par la section médiane du pont liquide. Pour construire un château de sable le plus solide possible, on a évidemment intérêt à maximiser cette force en ajustant la quantité d'eau. Le problème est que, en modifiant la quantité d'eau, on fait varier les facteurs qui comptent – d'une part la section, d'autre part la courbure et la dépression – en sens inverse ! Si l'on diminue la quantité d'eau, on creusera davantage le ménisque et on augmentera la courbure et, donc, la dépression. Mais ce faisant, on diminuera également la section du ménisque. Inversement, on peut augmenter la section du pont en mettant plus d'eau mais on obtiendra un ménisque plus évasé et une dépression moins forte. Le calcul montre que ces deux effets qui agissent en sens opposé sur la force se compensent de façon quasi parfaite, ce qui a amené les physiciens à conclure pendant très longtemps que la cohésion ne devait pas dépendre de la quantité d'eau, du moins dans certaines limites. Du côté des très grandes quantités d'eau, il y a en effet une limite évidente, qui est atteinte lorsque la quantité d'eau est telle que les grains sont totalement noyés. À ce stade, il n'y a plus de ménisque et toute cohésion est perdue.

La conclusion qui précède, à savoir que la quantité d'eau importe peu tant que l'on n'a pas noyé les grains, est un bel exemple de perte de bon sens de la part des physiciens. N'importe quel gamin sait qu'il y a une humidité optimale pour construire un bon château de sable. Du côté des physiciens, il a fallu attendre la fin des années 1990 pour que l'on comprenne comment évoluait la cohésion dans le régime des faibles humidités. Comme dans le cas du frottement (loi de Coulomb), la clé se situe dans la prise en compte des aspérités.

Aucun grain de sable n'est parfaitement lisse. Lorsque, partant de deux grains parfaitement secs, on ajoute une toute petite quantité d'eau, le ménisque n'a pas la forme dessinée dans la figure qui nous a guidés jusqu'à présent. C'est un micro- ou un nanoménisque qui se forme entre les deux aspérités les plus proches. Le bon modèle à considérer est donc plutôt celui de deux cônes qui se font face ou d'un cône faisant face à une surface plane. Le calcul montre que la force de cohésion croît bien cette fois avec la quantité d'eau. À mesure que celle-ci augmente, le pont liquide s'élargit et couvre de plus en plus d'aspérités, selon une hiérarchie de tailles qui ressemble à celle que l'on rencontre en se baladant en montagne : le sommet que l'on aperçoit en cache toujours un autre, plus loin et plus haut, jusqu'à ce que l'on ait exploré tout le massif. Pour se rendre compte que la Terre est ronde (que les grains sont sphériques en moyenne), il faut encore pousser plus loin la balade. Ce n'est qu'à ce stade que la physique du modèle classique retrouve ses droits, jusqu'à la noyade finale lorsque l'eau submerge tous les grains.

L'art de bien choisir son matériau

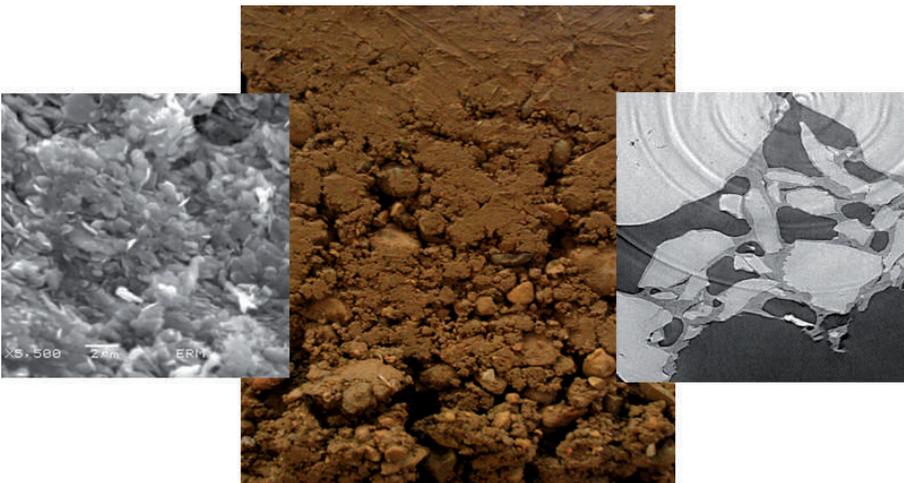
Il reste une dernière subtilité à maîtriser pour être un parfait bâtisseur de châteaux de sable, c'est le choix du sable lui-même. Qu'est-ce qu'un « bon » sable ? Nous avons vu qu'une première condition à respecter est qu'il possède une surface sur laquelle l'eau s'étale facilement. Un sable propre est donc nécessaire. Un sable poisseux, imprégné de pétrole par exemple, ferait un très mauvais matériau. Il existe également une seconde condition, qui vient de la notion même de cohésion. Pour éviter qu'une couche de grains ne glisse en avalanche, c'est toute la



La cohésion d'un milieu granulaire est la résultante de toutes les forces attractives entre grains à travers un plan de glissement potentiel. Chaque pont liquide apporte sa contribution mais la cohésion totale dépend en outre du nombre de ponts par unité de surface © Romain Anger et Laetitia Fontaine.



Fin ou grossier, il n'y a pas à hésiter ! Un pâtre de sable fin est bien plus solide qu'un pâtre de sable à gros grains. © Romain Anger et Laetitia Fontaine.



La terre, mélange de cailloux, de sable, de limon et d'argile est un béton naturel. La partie la plus fine (à gauche, des plaquettes de kaolinite, une argile commune) enrobe les grains plus grossiers (à droite, une coupe où l'on voit l'argile en gris foncé entourant les grains de quartz, en gris clair ; le gris le plus foncé représente les vides).

© centre : Romain Anger et Laetitia Fontaine ; à gauche et à droite : David Gelard, LTHE/INPG/IRD/ UJF

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 le nombre de ponts est d'autant plus grand que les grains sont petits, le choix d'un bon sable est facile : il doit être le plus fin possible ! (figures page précédente)

Construire en terre

Construire un château de sable est un jeu d'enfant, mais construire une mosquée de cinq cents places, un habitat collectif pour deux cents familles, un immeuble de treize étages ou une citadelle fortifiée en terre crue n'en est plus un ! Comment expliquer que de la terre compactée ou séchée permette de telles réalisations architecturales, sans qu'il soit besoin d'y ajouter ces liants artificiels – plâtre, chaux ou ciment – dont nous avons désormais beaucoup de mal à nous passer ? En réalité, la logique précédente suffit. La terre, mélange de cailloux, de sable, de limon et d'argile, est en quelque sorte un béton naturel. L'argile en est le « ciment ». Avec la très petite taille de ses grains – moins de 2 µm (MICRONS), soit au moins vingt-cinq fois moins que le sable le plus fin –, l'argile capte facilement dans l'air humide la petite quantité d'eau nécessaire à sa cohésion. Qui plus est, les grains de certaines argiles possèdent une charge électrique due à des défauts de composition. Cette charge électrique, négative, est compensée par des ions de signe opposé, des cations donc, que l'on trouve dans l'eau de pontage des particules. Il en résulte une force attractive qui, lorsque ces cations sont des ions

calcium ou aluminium, peut être encore bien plus forte que la cohésion due aux forces capillaires. Le même phénomène est à l'œuvre dans les hydrates de ciment. L'analogie argile-ciment n'est donc pas usurpée.

La terre présente cependant une différence notable avec le ciment : elle se délite dans un excès d'eau. En réalité, le problème n'est pas très grave. Il suffit de faire un toit légèrement débordant – ce que les architectes contemporains ne font plus guère – et de prévoir des fondations et un soubassement en pierre ou en tout autre matériau non poreux, de manière à éviter les remontées capillaires. Moyennant le respect de ces deux règles, construire en terre est une solution durable.

Matériaux de construction et développement durable

Les lignes qui précèdent n'avaient pas pour objectif de convaincre que la terre, comme matériau de construction, était la solution à tous les défis qui se posent et se poseront à nous si nous voulons léguer à nos descendants un monde durable mais d'illustrer deux choses essentielles. La première est que, face à ces défis, nous devons nous montrer imaginatifs et ne pas hésiter à considérer des solutions qui, peut-être, de prime abord, nous semblent totalement hors du schéma de pensée dominant. La seconde est que nous devons faire preuve d'humilité : avant d'aller chercher des solutions coûteuses dans les dernières innovations technologiques, il nous faut redécouvrir, en les adaptant, des pratiques ancestrales empreintes d'une intelligence toute naturelle. La réflexion scientifique vaut largement, de ce point de vue, toutes les logiques de marché.

Les défis

Mais quels sont les défis majeurs qui se posent à nous si nous voulons faire face à l'enjeu du développement durable, c'est-à-dire construire un monde qui, selon le rapport de Mme Brundtland pour les Nations unies en 1987, « réponde aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » ?

Le plus souvent cité est le défi posé par le caractère fini de nos ressources, en particulier de nos ressources énergétiques. Au rythme de la consommation actuelle, à quel horizon aurons-nous épuisé nos réserves de combustibles fossiles ? Moins d'un siècle pour le pétrole et le gaz. Quelques centaines d'années pour le charbon. C'est même plus court encore pour certaines réserves minérales si nous n'améliorons pas le recyclage : quelques dizaines d'années pour le plomb, le cuivre, le zinc ou le nickel par exemple. L'eau douce, la grande oubliée tellement elle est (encore) banale dans nos régions, pourrait bien, elle aussi, devenir une denrée rare à l'échelle de la planète.

Le second défi, qui pourrait être le premier d'ailleurs, est celui posé par la démographie. La Terre comptera sans doute un peu plus de neuf milliards d'habitants en 2050. Heureusement, la tendance à l'augmentation devrait fortement ralentir vers la fin du siècle. Si l'on se limite à la projection 2050, la population devrait surtout progresser en Amérique du Nord (+ 40 %), en Asie (+ 46 %), en Amérique latine (+ 53 %) et, surtout, en Afrique (+ 146 %). Comme cette progression démographique est parallèle au développement économique d'une partie de cette population, selon nos modes de vie actuels, la demande en énergie et en matières premières augmentera encore plus vite. Les pays industrialisés ne représentent

aujourd'hui que 25 % de la population mondiale, mais ils consomment 75 % de l'énergie utilisée sur terre. La consommation énergétique d'un habitant des pays du Sud est en moyenne dix fois plus faible que celle d'un habitant des pays industrialisés. Comme tous les individus peuvent légitimement prétendre à des conditions de vie décentes et égales, on imagine aisément l'explosion de la demande en énergie, en matières premières et en matériaux de base à laquelle peut conduire la croissance démographique couplée au développement.

L'augmentation brute de la population mondiale cache une autre évolution, tout aussi importante : c'est son urbanisation. En 2000, 26 % de la population des pays du Sud vivait en zone urbaine. En 2025, ce chiffre devrait passer à 37 % en Asie, à 42 % en Afrique et à 75 % en Amérique latine. Un cinquième de la population urbaine vivra alors dans de très grandes villes, des mégalopoles de plus de quatre millions d'habitants. La pression sur l'environnement de telles concentrations humaines est énorme en termes de consommation d'eau et d'énergie, d'alimentation, d'évacuation des déchets... Les schémas de développement urbain sont donc une clé de notre avenir.

Malheureusement, l'urbanisation va aussi de pair avec l'extension des bidonvilles. La Terre compte à ce jour près d'un milliard d'êtres humains entassés dans des bidonvilles, soit près d'un urbain sur trois. Selon le Programme des Nations unies pour les établissements humains (Onu-Habitat), cette situation ne devrait pas s'améliorer. On estime pour 2020 à 1,4 milliard le nombre d'individus qui vivront dans des bidonvilles, c'est-à-dire autant que la population de toute la Chine. L'étonnant est que la croissance économique ne mène pas automatiquement

à la disparition des bidonvilles. Une politique volontariste est nécessaire. Dans les pays où le gouvernement tente de freiner l'urbanisation, le résultat est en général un échec car c'est en ville que les emplois se trouvent et aller à la ville est souvent le premier pas pour sortir de la pauvreté. C'est donc au politique d'améliorer les conditions de vie urbaines.

Le troisième grand défi est celui posé par ce qu'il est convenu d'appeler le « changement climatique ». Tout le monde s'accorde à constater une évolution significative du climat depuis, disons, un siècle. La température moyenne augmente et, en parallèle, le niveau des mers. Ce qui nous met en cause dans cette évolution, c'est l'augmentation parallèle de la teneur en CO₂. Le CO₂ est un de ces gaz qui ralentissent l'évacuation du rayonnement calorifique de la Terre vers l'espace (voir le chapitre de Jean-Louis Dufresne dans ce volume). C'est ce qu'on appelle l'« effet de serre ». Or, nos rejets de CO₂ se chiffrent en dizaines de milliards de tonnes. Les trois quarts de ces émissions sont dus à la combustion d'énergies fossiles. Et c'est ce qui a conduit un grand nombre de pays à signer en 1992 la convention de Rio et en 1997 les accords de Kyoto sur la modération de ces émissions. Quoi qu'il en soit, la température moyenne de la surface du globe devrait encore augmenter de 1,4 à 5,8 °C d'ici la fin du siècle. Ce réchauffement sera inégalement réparti. Selon les climatologues, il devrait être plus intense dans les régions de hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Tout autant que le réchauffement moyen et ce qui va avec – fonte des glaciers et élévation du niveau de la mer –, c'est la multiplication des événements extrêmes – ouragans, fortes précipitations ou, au contraire, sécheresses prolongées – qui est à craindre et qui se manifeste déjà.

Avec l'augmentation du niveau de la mer, c'est une partie notable des terres côtières, très peuplées, qui disparaîtra.

Impact sur les techniques constructives

Les trois défis qui viennent d'être évoqués ont des conséquences directes sur nos pratiques constructives. Le bâtiment est responsable d'environ la moitié de notre consommation d'énergie totale et de 25 % de notre production de CO₂ (l'autre poste majeur est représenté par les transports). Ceci concerne la construction, qui est assez brève et, surtout, la *vie* du bâtiment (consommation d'énergie pour le chauffage, l'éclairage, l'eau chaude...), qui est beaucoup plus longue. La fabrication du ciment représente à elle seule de 6 à 10 % de notre production de CO₂. Comme le béton de ciment est – et de loin – le matériau de construction au développement le plus rapide, son emploi généralisé demande pour le moins quelque réflexion. Le graphique ci-dessous, qui illustre la production et la consommation de ciment dans le monde, le montre bien. L'énormité de la consommation chinoise par rapport aux autres pays n'en est pourtant qu'à ses débuts car, par habitant, un Chinois ne consomme que le tiers de ce que consomme un Européen. Il est facile d'imaginer ce que ce graphique pourrait devenir lorsque la Chine aura vraiment atteint le stade de pays développé si nous ne changeons rien à nos pratiques constructives... Et d'autres pays suivent ! La mise au point de ciments dont la fabrication dégage moins de CO₂ est donc impérative.

Les schémas de développement urbain, qui intègrent habitat et mobilité, sont également en première ligne des améliorations possibles. Les villes étalées, dont

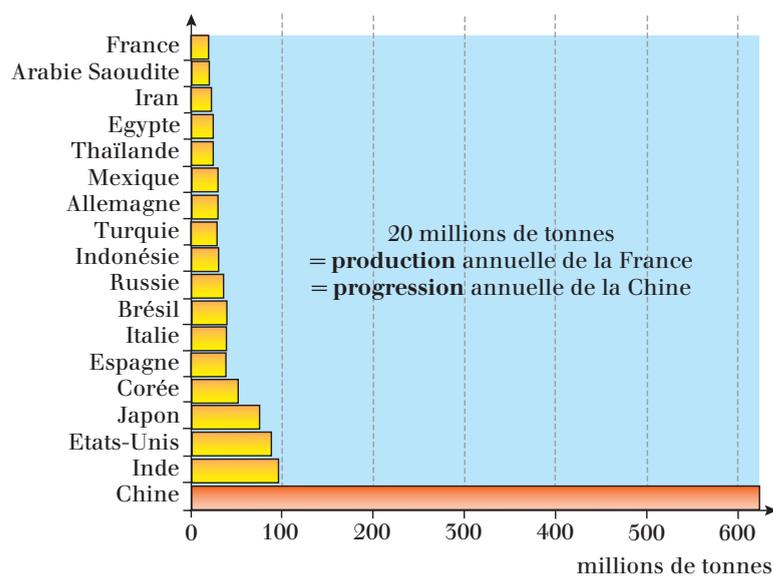
Los Angeles est l'archétype, cumulent les inconvénients du point de vue du développement durable, avec un habitat individuel généralisé qui va de pair avec un mode de transport encore très largement individuel lui aussi. Habitat et transport individuels sont tous deux très consommateurs d'énergie.

Incontestablement, c'est pourtant la maison individuelle qui a un peu partout la préférence. On la veut entourée d'un minimum d'espace, mais pas isolée pour autant. Pour se faire pardonner en quelque sorte cet égoïsme, l'habitat individuel se doit de réduire ses exigences en matériaux et en énergie. Le stade ultime de cette évolution est la « maison passive » ou, mieux encore, la « maison à énergie positive ». Le concept de maison passive, qui minimise ses besoins énergétiques pour le chauffage, a été élaboré à la fin des années 1980 par Wolfgang Feist de l'Institut Habitat et Environnement de Darmstadt, en Allemagne. À l'époque, les faibles performances des vitrages en isolation avaient conduit à construire des maisons qui ressemblaient parfois à des « bunkers » et qui n'ont pas connu un grand

succès. Cette situation s'est grandement améliorée aujourd'hui grâce, en particulier, aux progrès des doubles ou même des triples vitrages. Malgré tout, la super-isolation a des limites, car il faut bien renouveler l'air intérieur... Mourir asphyxié mais au chaud n'est pas forcément une perspective engageante !

Le concept d'habitat à énergie positive va bien au-delà de la simple idée de réduction de la consommation. Il s'agit cette fois de considérer l'habitat comme un système intégré capable de générer ses propres ressources en énergie et même, le cas échéant, de fournir de l'énergie au réseau. L'enveloppe du bâtiment fait appel à des super-isolants comme les aérogels de silice et à des vitrages sélectifs. Moyennant une bonne exposition, les besoins de chauffage se réduisent presque à néant. Du côté des équipements, on peut faire appel à des panneaux solaires pour l'eau chaude, à des cellules photovoltaïques pour la production d'électricité et à des pompes à chaleur pour récupérer les calories du sous-sol. On peut même intégrer des micro-éoliennes en façade ou sur la toiture. On peut aussi faire appel à un éclairage par

diodes semi-conductrices, très économes en énergie, et à une ventilation optimisée pour éviter d'ouvrir les fenêtres. L'informatique et la robotique peuvent apporter leur contribution avec une gestion



Ce diagramme montre la production de ciment en 2001 dans quelques pays, production quasiment égale à la consommation, car le ciment est trop peu cher pour le transporter sur de longues distances. Il illustre l'extraordinaire soif de matériaux de construction qu'un pays en développement explosif peut présenter. En 2007, le caractère « extraterrestre » de la Chine est encore plus flagrant.

quasi automatique de tous ces équipements. Même les besoins en eau peuvent en grande partie être satisfaits par la récupération et le stockage des eaux de pluie.

Le concept d'habitat à énergie positive ne s'applique pas qu'à la maison individuelle et isolée. On peut le mettre en œuvre dans des ensembles plus compacts qui permettent de rompre l'isolement et il peut alors devenir une « cellule » de l'écosystème local, urbain ou naturel. Le concept de bâtiment à énergie positive peut même être appliqué à des tours, comme dans le projet de l'architecte Jacques Ferrier à Issy-les-Moulineaux. Construite en béton à ultra-hautes performances, sa tour Hypergreen est conçue pour ne pas consommer plus d'énergie qu'elle ne peut en produire.

Cette débauche de technologies et de matériaux sophistiqués conduit à l'inversion des rapports relatifs des coûts énergétiques, environnementaux et financiers : cette fois, ce n'est plus l'usage du bâtiment sur sa durée de vie qui l'emporte, c'est sa construction qui devient le poste principal. La dérive serait d'aboutir à un habitat tellement truffé de technologies et de matériaux sophistiqués qu'il serait financièrement hors de portée du plus grand nombre. L'« écobilan » lui-même peut réserver des surprises lorsque *toutes* les étapes de la vie des matériaux, depuis, éventuellement, la prospection géologique jusqu'au recyclage, sont considérées.

L'impact des nanotechnologies

Le développement des nanotechnologies, que l'on pourrait croire réservées aux sciences de l'information et de la communication, à la biologie et au domaine médical, aura vraisemblablement un impact important sur le monde de la construction, notamment dans le domaine des surfaces – vitrages et

façades. Cela a commencé avec les vitrages anti-reflets, puis ont suivi les vitrages anti-solaires (plus précisément anti-infrarouges) et les vitrages électrochromes, dont la transparence ou la couleur peuvent être modifiées *via* un signal électrique. Tout récemment sont apparus sur le marché des produits étonnants : des vitrages sur lesquels les gouttes de pluies roulent comme des perles et s'évaporent sans laisser de traces, des vitrages autonettoyants, des bétons autonettoyants et même des bétons dépolluants, capables de purifier l'atmosphère urbaine de polluants tels que les oxydes d'azote ou l'ozone. Le plus étonnant, c'est que la source d'inspiration pour la mise au point de ces produits n'est autre que la nature.

Une source d'inspiration particulièrement riche est la photosynthèse. La photosynthèse est un ensemble de réactions chimiques par lequel les plantes arrivent à fabriquer leur propre substance à partir d'eau, de dioxyde de carbone puisé dans l'air et de lumière solaire. La molécule qui capte l'énergie lumineuse et permet sa transformation finale en énergie chimique est la chlorophylle. En absorbant l'énergie de la lumière, celle-ci propulse un de ses électrons d'un niveau énergétique très bas vers un niveau très élevé. On parle d'électron « excité ». Dans ce niveau excité, l'électron est capable d'amorcer la réaction chimique qui va transformer le CO₂ en sucre. À l'autre extrémité de l'échelle des énergies, l'électron qui manque dans le niveau d'énergie bas – on parle de « trou » d'électron – est récupéré à partir d'une molécule d'eau qui, en donnant son électron, se casse et libère de l'oxygène.

L'idée que de nombreux chimistes ont poursuivie est d'utiliser le même principe pour faire d'autres réactions chimiques. Malheureusement, la chlorophylle est une

molécule très fragile qui se décompose facilement en dehors de la plante et il est exclu de l'utiliser. En revanche, on connaît des substances beaucoup plus robustes qui peuvent elles aussi produire un électron excité et un « trou » d'électron. Le dioxyde de titane est particulièrement robuste. C'est un pigment qui absorbe la lumière solaire à la frontière de l'ultraviolet. Le plus intéressant avec lui, ce n'est pas l'électron excité, mais le trou. Ce dernier est capable d'amorcer la décomposition d'un tas de substances organiques, comme des dépôts de graisse. En déposant une couche ultrafine de dioxyde de titane sur une vitre, on obtient donc une vitre capable de décomposer les salissures qui s'y déposent. Le résultat est là aussi spectaculaire.

Outre qu'il est capable de décomposer les saletés qui se déposent sur la surface, le dioxyde de titane peut aussi décomposer les polluants atmosphériques comme l'ozone et les oxydes d'azote. Ce sont les cimentiers qui ont pensé à incorporer des nanoparticules de dioxyde de titane au ciment pour en faire des mortiers non seulement autonettoyants mais aussi dépolluants. Le bâtiment devient ainsi un acteur actif de sa propre propreté et de celle de l'atmosphère urbaine. Deux bâtiments mettent déjà ce principe en œuvre. Le premier est la Cité de la Musique de Chambéry, le second l'église Dives in Misericordia, à Rome. Dans ces deux exemples, c'est surtout la propriété autonettoyante qui a été recherchée, mais d'autres réalisations sont en cours où c'est l'action dépolluante qui est prioritaire. Les routes et les trottoirs peuvent également être traités.

Retour à plus de simplicité

Cette incursion de la haute technologie dans la conception des bâtiments ou dans celle des matériaux est très excitante, mais c'est une

incursion de riches. Pour une part importante de l'humanité, qui n'ira pas forcément en décroissant, ces solutions sont hors de portée. Certes, le résultat peut être remarquable sur le plan de la performance énergétique, du confort, mais au prix de quels investissements et de quelle sophistication ! Dans certains cas, la limite entre « équipement » et « gadget » n'est plus très claire. Le passé et des recherches récentes nous montrent que d'autres pratiques constructives sont possibles, misant plus sur l'intelligence de la matière et de la conception que sur la sophistication technologique. Les traditions constructives en terre sont à cet égard exemplaires.

Bibliographie

Jacques DURAN, *Sables émouvants*, Belin-Pour la science, 2003.

Étienne GUYON, « La physique du tas de sable », in *Graines de Sciences 5*, Le Pommier, 2003, p. 159-181.

Graines de sciences 8, sous la direction de David WILGENBUS et Didier POL, « La matière qui s'écoule » (chapitre de Étienne GUYON), Le Pommier, 2007.

Hugo HOUBEN et Hubert GUILLAU, *Traité de construction en terre*, CRATerre-Paranthèses, 2006.

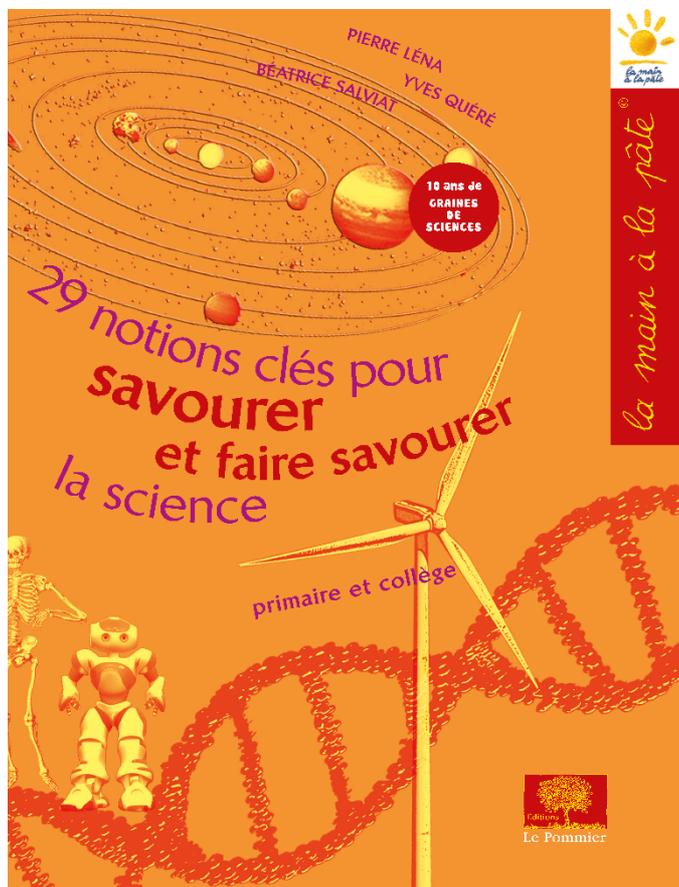
Yves MALIER, « La stabilité des constructions », in *Graines de Sciences 7*, Le Pommier, 2005, p. 119-155.

Sur la Toile

Le site <http://www.ga-media.org> (chercher « grains de bâtisseur ») : dix films sur des expériences utilisant la matière en grains, de la géologie à l'architecture.

Le site <http://terre.grenoble.archi.fr> : une profusion d'images sur l'architecture de terre et des liens avec les meilleurs sites sur ce sujet.

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE