



**HAL**  
open science

# Grains de bâtisseurs : la matière en grains, de la géologie à l'architecture

Romain Anger

► **To cite this version:**

Romain Anger. Grains de bâtisseurs : la matière en grains, de la géologie à l'architecture. Architecture, aménagement de l'espace. 2005. dumas-02904034

**HAL Id: dumas-02904034**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02904034>**

Submitted on 21 Jul 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

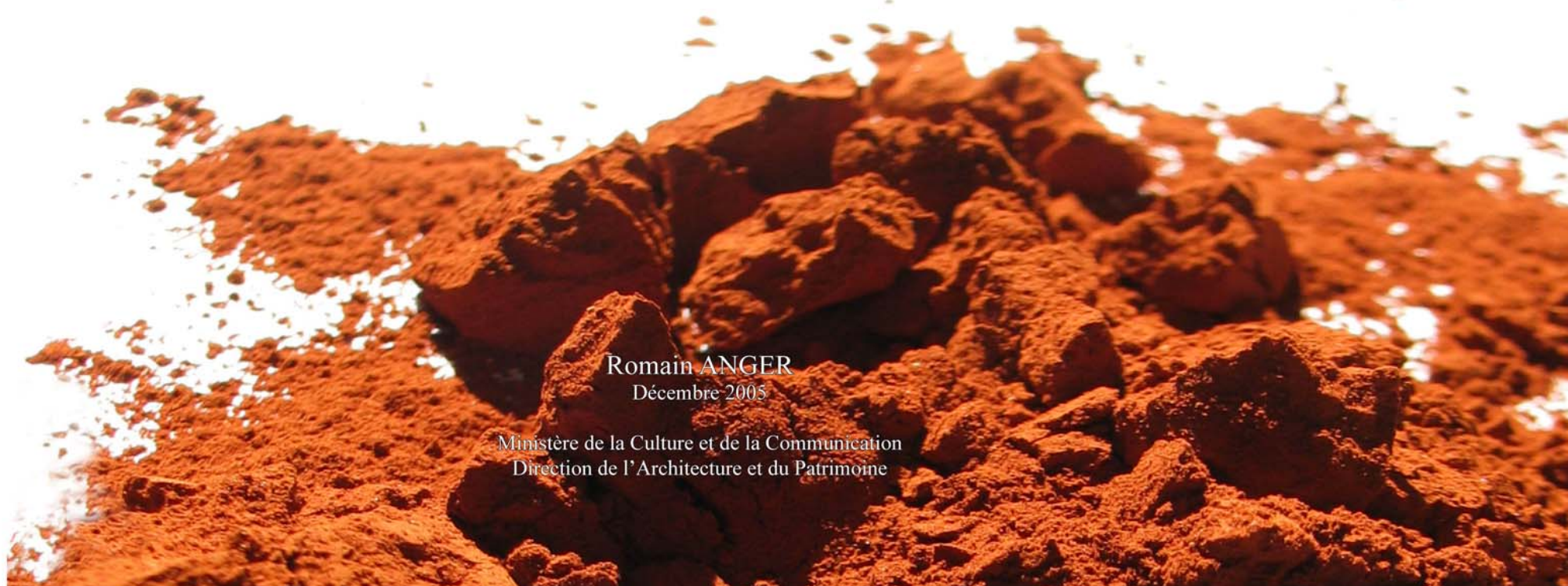
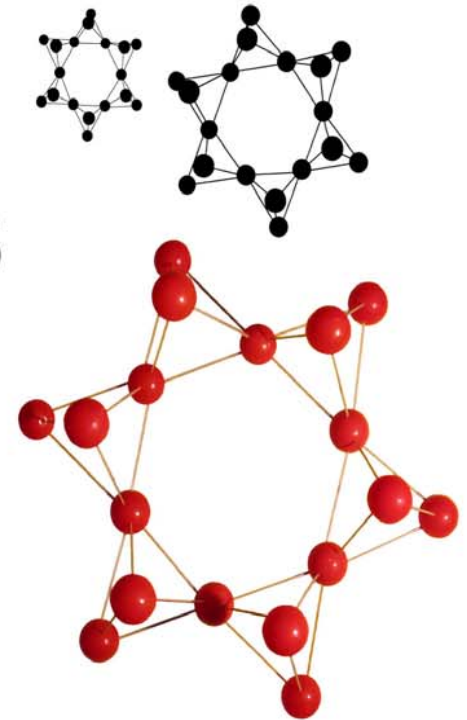
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE

Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement  
DSA – Architecture de Terre

# GRAINS DE BÂTISSEURS

LA MATIÈRE EN GRAINS, DE LA GÉOLOGIE À L'ARCHITECTURE



Romain ANGER  
Décembre 2005

Ministère de la Culture et de la Communication  
Direction de l'Architecture et du Patrimoine



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE  
BP 2636 – 60, Avenue de Constantine – 38036 GRENOBLE Cedex 2

Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement  
DSA – Architecture de Terre

# GRAINS DE BÂTISSEURS

LA MATIERE EN GRAINS, DE LA GEOLOGIE A L'ARCHITECTURE

Romain ANGER, Ingénieur INSA

## **Directeur d'études**

Hugo HOUBEN, ingénieur – chercheur, Laboratoire CRATerre, ENSAG

## **Jury**

### **Personnalités extérieures invitées**

Lydéric BOCQUET, Professeur, LPMCN, LYON 1, UMR 5586/CNRS

Pablo JENSEN, Chargé de Recherche, LPMCN, LYON 1, UMR 5586/CNRS

Christian OLAGNON, Maître de Conférences, GEMPPM, INSA Lyon, UMR 5510/CNRS

Henri VAN DAMME, Professeur, PCSM, ESPCI, UMR 7615/CNRS

Gérard VIVIER, Secrétaire Général, SDU/CNRS

### **Equipe pédagogique du DSA-Terre**

Patrice DOAT, Professeur, Laboratoire CRATerre, ENSAG

Les Grands Ateliers, Villefontaine, 8 décembre 2005

Ministère de la Culture et de la Communication  
Direction de l'Architecture et du Patrimoine



# Résumé

## De la géologie à l'architecture

90% de la surface de la terre est couverte de grains. Le sable est présent en d'énormes quantités dans les déserts qui couvrent plus de 10% de la surface émergée de la planète. Les plages et les fonds marins constituent d'énormes réservoirs naturels de sable. Les sols sont constitués d'un ensemble de grains de tailles diverses (cailloux, graviers, sables, limons et argiles) provenant de la désagrégation et de l'altération des roches. C'est donc en toute logique que l'Homme, qui se sert des matériaux locaux à sa disposition, utilise des grains pour construire. On estime qu'au minimum 30% de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17% des constructions inscrites sur la liste du 'patrimoine culturel mondial' de l'UNESCO sont des oeuvres architecturales en terre. Ce matériau si commun mais pourtant si étrange est constitué de grains, d'eau et d'air qui forment un sol avec une histoire géologique. A partir de ces trois éléments, on obtient un matériau solide qui permet de construire un mur, une structure, un édifice. C'est ainsi que l'on passe du grain à l'architecture. Tous ces grains tiennent ensemble comme par magie. Pour comprendre pourquoi, il faut réapprendre ce qu'est un sable ou une poudre, réapprendre ce qu'est un liquide et un gaz. Porter un regard neuf sur la matière. Et en particulier sur toutes ces choses communes que l'on croyait connaître. Dans de nombreux cas, à des centaines de kilomètres à la ronde, l'Homme ne dispose pas d'autres matériaux que la terre pour construire. Parfois, il n'en dispose même pas. Ainsi, des pans entiers de la grande muraille de Chine sont faits de sable. Dans les pays développés, le matériau le plus utilisé est un autre matériau granulaire : le béton de ciment. Ce dernier est constitué d'un ensemble de grains qui ne sont pas liés entre eux par des liaisons chimiques mais exclusivement physiques. C'est un matériau divisé ! Pourtant, on est capable d'agencer tous ces grains dans des configurations spatiales qui permettent d'approcher la résistance de l'acier.

## Le projet

Le projet « Grains de Bâtisseurs - La matière en grains, de la géologie à l'architecture », financé par la région Rhône-Alpes dans le cadre du contrat de plan Etat-Région : « Culture Scientifique, Technique et Industrielle » (CSTI), est axé sur la sensibilisation d'un public jeune (collégiens, lycéens, étudiants et grand public) à la matière constituée de grains, en liaison directe avec les notions de territoire et de patrimoine architectural. Il se présente sous la forme d'un atelier pédagogique composé d'une centaine d'expériences agencées selon un cheminement qui, tout en faisant découvrir le fonctionnement de base de la matière en grains, invite à passer successivement de la géologie à la construction et à établir des liens entre les paysages, la matière et l'architecture. Dans cette sorte de circuit initiatique, beaucoup plus que la découverte de lois qui gouvernent la matière, c'est une transformation des conceptions du monde qui est en jeu. Le public est tour à tour invité à changer d'échelle, à la fois au niveau spatial (de l'infiniment petit à l'infiniment grand) et temporel (temps humain et temps géologique) et à porter un regard attentif sur la nature. Certaines expériences reproduisent des phénomènes naturels (rides de sable) et suscitent l'émerveillement devant des choses qu'on a toujours vu sans regarder. Elles peuvent inspirer un attachement à la nature et à la terre et susciter le goût de l'observation du monde environnant. Le lien entre la géologie et l'architecture de terre est fondamental. Il met en valeur l'idée forte que l'on construit avec ce que l'on a sous les pieds. Chaque grain a une histoire géologique, qui nous permet de mieux comprendre sa nature. Avec la terre, on fait un béton naturel, c'est-à-dire une roche reconstituée. Il existe des cycles de vie de la terre ou des sédiments, qui proviennent d'une roche et qui vont reconstituer une roche. En construisant en terre, on reproduit ce mécanisme géologique qui se produit sur des millions d'années. La vision d'une histoire humaine qui s'inscrit dans une histoire géologique invite à reconsidérer notre place dans l'univers.

## Universalité de la matière en grains – essor de la recherche

De l'atome jusqu'aux plus lointaines galaxies, les grains sont à la base de notre monde. Ils sont omniprésents dans notre univers quotidien sous toutes les formes : sable, graviers, cailloux, roches, oranges, noix, pommes, riz, blé, maïs, poivre, sel, farines, fumées, poudres pharmaceutique, etc. La matière en grains est le deuxième produit traité, utilisé, consommé par l'homme juste après l'eau. 10% de l'énergie domestiquée sur notre planète est utilisée pour le traitement de grains de diverses tailles et origines. 70% des objets que nous utilisons sont passés, à un stade ou l'autre de leur fabrication, sous forme de poudres ou de grains. Le traitement industriel des poudres et grains représente quelques dizaines de milliards de tonnes par an. Les grains, sous toutes leurs formes, constituent un intérêt économique et humain gigantesque. Pourtant, bien

qu'universellement répandus dans la nature et dans de nombreux domaines de l'activité humaine, la méconnaissance du comportement des milieux granulaires a persisté jusqu'à une époque récente. Au cours des quinze dernières années, la physique des matériaux granulaires a bénéficié d'un effort de recherche significatif au plan mondial, qui a apporté une moisson d'observations expérimentales, de résultats de simulations numériques, de concepts nouveaux et de modèles théoriques. Des équipes de chercheurs d'origines thématiques variées se sont rapidement mobilisées face au véritable défi scientifique que pose la compréhension du comportement de la matière en grains.

## L'aspect pédagogique et l'expérience contre-intuitive

La matière en grains est universellement répandue. Pourtant, bien qu'extrêmement commune, elle recèle un grand nombre de phénomènes physiques surprenants et inconnus du grand public. En ce sens, elle est un thème de vulgarisation scientifique et d'enseignement particulièrement adéquat. Les expériences présentées dans le projet sont des « expériences contre-intuitives » : les résultats qu'elles produisent vont à l'encontre de ce que le public prévoit. La multiplication de telles expériences permet, tout en aiguisant le désir de savoir, de transformer les conceptions des apprenants. Au-delà de la simple évocation des phénomènes physiques qui se déroulent au sein de la matière, c'est bien cette transformation qui est recherchée, en vue de faire émerger une nouvelle façon de concevoir la matière en grains (et plus particulièrement la terre) et ses rapports avec l'eau. Le cheminement proposé par le projet permet de faire le lien entre géologie, architecture et paysage, le tout par l'entremise d'une grille de lecture physique des phénomènes observés, cherchant ainsi à transformer les conceptions de l'apprenant afin qu'il porte un autre regard sur la science, sur la matière et sur le monde.

## Le contenu du projet

Le projet se présente sous la forme d'une série d'expériences qui mettent en valeur des phénomènes variés que l'on rencontre dans la matière en grains. L'itinéraire de découverte proposé passe en revue les principes de base du fonctionnement de la matière en grains qui jouent un rôle d'une part dans la mise en œuvre du béton ou de la terre et d'autre part dans les mécanismes de cohésion du château de sable et du matériau terre. Les manipulations sont classées par thèmes. Dans un premier temps, on décrit les constituants de la terre ('entrée en matière') et leur origine au travers d'une « histoire » géologique des grains ('histoire de grains voyageurs'). Puis de tables en tables, on découvre les différentes spécificités de la matière en grains à travers les expériences qui sont commentées par un animateur.

La première partie concerne les milieux granulaires secs. La matière en grains ne peut être classée dans les traditionnelles catégories solide-liquide puisqu'elle adopte alternativement le comportement de l'un ou de l'autre. C'est ce qui fait tout l'intérêt des matériaux granulaires pour la construction comme le béton, véritable « pierre qui coule » ou le pisé, qui prend la forme du coffrage comme un liquide et devient solide par simple compression. Un milieu granulaire distribue les efforts selon un réseau de chaînes de forces, ce qui crée parfois ce que l'on appelle des effets de voûtes et qui explique par exemple pourquoi les coffrages des bétons et du pisé doivent être très résistants pour contrer les poussées horizontales. L'étude des empilements permet de présenter succinctement la manière dont s'organisent les atomes dans la matière cristalline et de se familiariser avec la notion de compacité qui joue un rôle fondamental dans la résistance des matériaux granulaires tels que la terre ou le béton. Dans cette perspective, le squelette granulaire des super-bétons a été optimisé en cherchant à se rapprocher au maximum d'empilements géométriques idéaux appelés l'empilement apollonien ou l'empilement espacé. Des ensembles de grains secs de tailles différentes se séparent spontanément lorsqu'ils sont mis en mouvements : c'est ce qu'on appelle la ségrégation. Le tas de sable présente une pente régulière, appelé l'angle de repos. Cet angle est l'expression des forces de frottement qui jouent un rôle non négligeable dans la tenue d'un mur en terre. Il structure de nombreux paysages dans la nature.

La deuxième partie concerne les milieux granulaires humides. Pour comprendre les mécanismes de cohésion d'un mur en terre, il faut commencer par redécouvrir les liquides et en particulier les forces capillaires qui jouent un rôle prépondérant dans la cohésion. Ce sont ces forces qui font tenir les châteaux de sable. A mesure que la taille des grains diminue, ces forces grandissent. La série d'expériences suivante montre en un ensemble les autres rapports particuliers que la matière en grains entretient avec les liquides.

La troisième partie concerne les argiles. Dans le cadre de ce projet, la description des argiles est délicate, puisque ces particules microscopiques sont à la limite de la physique des grains et d'un autre champ d'étude : la physique des colloïdes. On montre dans un premier temps comment l'eau « colle » les particules argileuses entre elles et aux autres grains. Ceci est particulièrement vrai pour les argiles électriquement neutres (la kaolinite par exemple) : dans ce cas, le concept de grain est tout à fait valable et les mécanismes de cohésion sont les mêmes que ceux d'un château de sable. Dans le cas des argiles gonflantes, on entre davantage dans le champ de la matière colloïdale. On aborde ce thème à travers l'étude des boues, des gels et du phénomène de gonflement.

## Réflexions autour de nouveaux horizons pour le matériau terre

Jusqu'à aujourd'hui, on identifiait 3 champs d'études scientifiques et techniques principaux du matériau terre. Le premier concerne l'ensemble des recherches axées sur la caractérisation thermophysique du matériau. Les deux autres concernent les disciplines parallèles liées à l'étude des sols, avec d'une part la géologie (la sédimentologie, la pédologie et la minéralogie des argiles) et d'autre part la mécanique des sols.

A ces domaines de savoirs « classiques » du matériau terre, s'ajoutent aujourd'hui de nouvelles disciplines susceptibles de favoriser l'émergence d'une approche fondamentale du matériau dans la lignée de ce qui existe actuellement pour les autres matériaux. Le matériau terre a toujours été considéré à l'échelle macroscopique (mur, brique ou échantillon dont on essaie de connaître les caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques). On s'est rarement intéressé à la relation entre les propriétés mécaniques et physiques des matériaux de structure et leur microstructure définie à différents niveaux d'échelle (méso, micro et nanométrique), ce qui constitue pourtant une démarche classique au niveau de la recherche sur les matériaux. L'essor de la recherche au niveau mondial dans le champ de la physique des grains et la physique des colloïdes justifie une telle démarche pour le matériau terre puisque grâce à elles, les conditions favorables à une recherche fondamentale axée sur une compréhension physique du matériau terre sont réunies. Par ailleurs, les vastes secteurs industriels concernés par la matière en grains et la matière colloïdale placent l'étude du matériau terre dans un champ pleinement interdisciplinaire. Parmi ces secteurs industriels, le béton est certainement le plus proche de tous. On savait depuis longtemps que la terre avait de nombreux points communs avec le béton de ciment, dans la mesure où le terme béton définit un matériau constitué d'un squelette granulaire associé à un liant. Mais l'analogie ne s'arrête pas là, puisque les plus récentes recherches montrent que les hydrates de ciment (la « colle » du béton) présente des analogies étonnantes avec les argiles (la « colle » de la terre).

## Bilan et perspectives

« Grains de Bâisseurs » est actuellement un atelier pédagogique à l'attention des collèves et des lycées. Cependant, le contenu scientifique qu'il met en scène, par son aspect fortement pluridisciplinaire, permet d'envisager d'adapter le projet afin de cibler d'autres publics, d'autres lieux et d'autres supports de médiation : conférence, DVD, exposition itinérante, valise, cours d'enseignement supérieur, formation pour professionnels du BTP.

« Grains de Bâisseurs » constitue l'embryon d'un grand projet : l'exploratorium de la matière. Face à l'originalité et aux potentialités d'une telle démarche, on peut imaginer un lieu exclusivement consacré à l'exploration de la matière s'inspirant et approfondissant le modèle du projet « Grains de Bâisseurs ».





## Remerciements

Le projet « Grains de Bâisseurs » présenté dans ces pages est le fruit d'un travail collectif auquel ont participé les personnes suivantes :

Hugo Houben, en tant que responsable de projet  
Patrice Doat, en tant que conseiller scientifique  
Henri Van Damme, en tant que conseiller scientifique  
Jean-Marie Delarue, en tant que collaborateur  
Et surtout Laetitia Fontaine qui, avec moi-même, a élaboré le travail de fond

Merci,

à Laetitia Fontaine, pour notre complémentarité  
à Hugo Houben, pour sa passion  
à Patrice Doat, pour tout ce qu'il sait faire partager  
à Henri Van Damme, pour sa clarté de pensée toujours bienvenue  
à Jean-Marie Delarue, pour sa généreuse contribution  
à Jean-Marie Le Tiec, pour ses conseils de mise en page



*« Qui peut donc calculer le trajet d'une molécule ? Que savons-nous si des créations de mondes ne sont point déterminées par des chutes de grains de sable ? Qui donc connaît les flux et les reflux réciproques de l'infiniment grand et de l'infiniment petit, le retentissement des causes dans les précipices de l'être et les avalanches de la création ? »*

**Victor Hugo**



<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>	La terre, le béton et le château de sable.....	28
		Les diverses classifications des constituants de la terre .....	29
		L'analyse granulométrique .....	29
		La terre n'est pas de l'argile .....	30
		L'argile et les autres grains.....	30
		Un ensemble de grains.....	35
		Une grande diversité de sols.....	35
<b>I – UNIVERSALITE DE LA MATIERE EN GRAINS</b>	<b>6</b>	<b>2 – Histoire de grains voyageurs</b>	<b>36</b>
<b>1 - Omniprésence des grains dans notre environnement</b>	<b>7</b>	L'usure du temps.....	37
<b>2 - Le grain et l'infini</b>	<b>7</b>	L'altération physique .....	37
<b>3 - Les grains, la recherche et l'industrie</b>	<b>9</b>	L'altération biologique .....	38
<b>4 - Les grains et la géophysique</b>	<b>10</b>	L'altération chimique.....	38
<b>5 - Les grains de bâtisseurs</b>	<b>11</b>	Le cycle des grains .....	39
		Le transport.....	40
		Le dépôt .....	41
		La diagenèse .....	44
		La formation des paysages .....	46
		Origine de la terre à pisé du Bas-Dauphiné.....	48
<b>II – OBJECTIFS PEDAGOGIQUES</b>	<b>12</b>	<b>3 – Une matière fluide et solide à la fois</b>	<b>50</b>
<b>1 - Les nouvelles manières d'apprendre</b>	<b>14</b>	Comme un solide, comme un liquide, comme un gaz.....	52
Le contexte actuel .....	14	Les grains en mouvement.....	55
Apprendre : les trois modèles traditionnels .....	14	Les grains au repos : transition fluide-solide.....	56
Vers une nouvelle approche : le modèle allostérique .....	16		
<b>2 - Les conceptions</b>	<b>16</b>	<b>4 – Empilements de grains</b>	<b>60</b>
<b>3 - Le désir d'apprendre</b>	<b>17</b>	Des sphères sur un plan.....	62
<b>4 - Des expériences contre-intuitives pour un matériau contre-intuitif</b>	<b>18</b>	Ordre et désordre .....	62
Définition .....	18	Compacité, porosité, coordinence.....	65
Exemples.....	19	Les défauts.....	66
Conditions à respecter .....	20	Hétérogénéité.....	68
De la vulgarisation à l'enseignement .....	21	Cas de billes de deux tailles différentes (bi-dispersées).....	68
<b>5 - Des grains pédagogiques</b>	<b>21</b>	Vers la compacité ultime.....	71
Un autre regard sur la science .....	22		
Un autre regard sur la matière .....	22	<b>5 – Sur le tas</b>	<b>74</b>
Un autre regard sur le monde .....	23	La pente d'équilibre.....	76
<b>III – GRAINS DE BATISSEURS</b>	<b>24</b>	Coulomb, le frottement et l'angle de repos .....	79
<b>1 – Entrée en matière</b>	<b>26</b>	Reynolds, l'angle de repos et l'angle d'avalanche .....	80
La terre .....	27	L'avalanche et la théorie de la criticalité auto-organisée .....	81
		L'angle de repos et les paysages naturels.....	81
		L'effet volcan .....	81
		Les paysages naturels en terrains meubles.....	84
		L'architecture et les surfaces d'égale pente.....	87

<b>6 – La ségrégation</b>	<b>90</b>
Ségrégation dans un tas.....	92
Ségrégation dans une bétonnière .....	93
La noix du brésil .....	95
Ségrégation par vibration.....	95
La benne de camion .....	97
<b>7 – Les chaînes de force</b>	<b>100</b>
Arcs, voûtes et coupoles dans la matière en grain .....	102
Arcs naturels.....	102
Arcs et systèmes constructifs .....	103
Des grains et des arcs .....	104
Les phénomènes de blocages.....	107
La balance magique.....	107
Bâton-béton .....	108
Les chaînes de forces .....	109
La photoélasticimétrie .....	109
Le ballast des chemins de fer .....	110
Le tas de sable .....	111
<b>8 – De l’eau pour construire</b>	<b>112</b>
<b>9 – L’état liquide</b>	<b>118</b>
L’eau.....	120
La molécule d’eau, une molécule polaire.....	121
Les trois états de l'eau.....	122
Un solvant quasi universel .....	123
La tension superficielle .....	124
Le mouillage .....	128
Saut de pression .....	130
Ménisques .....	131
Montées capillaires .....	131
<b>10 – La cohésion capillaire</b>	<b>132</b>
Lien entre l’angle de repos et la cohésion.....	134
Lien entre tension superficielle et cohésion.....	134
Pont capillaire .....	136
L’eau est une colle .....	138
Taille des grains, taille des ménisques, cohésion.....	141
Intérêt de la polydispersion pour la cohésion capillaire.....	141
La cohésion et le caractère hydrophile du sable.....	143
L’optimum de teneur en eau .....	145
<b>11 – L’eau et les grains</b>	<b>148</b>
Mouvements de l’eau et paysages.....	150

Des micro-rivières dans un bac de sable - Marques de ruissellement	150
Relief d’érosion .....	150
Rides de sable en bord de plage .....	151
L’eau dans l’espace interstitiel .....	152
Le bruit de la terre .....	152
Le sable « réservoir » .....	152
Porosité interconnectée .....	154
Remontées capillaires.....	154
La dilatance .....	156

<b>12 – Les argiles</b>	<b>158</b>
Des microparticules à faciès lamellaire .....	161
La cohésion capillaire.....	161
La plasticité .....	164
La cohésion des poudres et l’humidité de l’air .....	165
L’eau pour comprimer la matière .....	167
Le gonflement.....	169
La pression osmotique .....	171
Le retrait .....	172
Les boues et les gels d’argiles.....	174
Les dispersions colloïdales.....	174
Les sols et les boues .....	175
Les liquides à seuil.....	176
Les fluides rhéofluidifiant .....	177
Les gels .....	178

## **IV – REFLEXIONS AUTOUR DE NOUVEAUX HORIZONS POUR LE MATERIAU TERRE**

<b>1 – L’approche classique</b>	<b>184</b>
Caractérisation thermophysique du matériau terre .....	186
1er facteur de dispersion : les terres .....	187
2 <sup>ème</sup> facteur de dispersion : la stabilisation .....	187
3 <sup>ème</sup> facteur de stabilisation : les ajouts organiques .....	188
4 <sup>ème</sup> facteur de dispersion : les techniques de mise en oeuvre .....	188
5 <sup>ème</sup> facteur de dispersion : les essais.....	188
5 <sup>ème</sup> facteur de dispersion : la teneur en eau .....	189
6 <sup>ème</sup> facteur de dispersion : la masse volumique.....	189
La géologie .....	191
La pédologie.....	192
Minéralogie des argiles .....	196
Mécanique des sols .....	203
Essais d’identification et classification des sols .....	204
Essais in situ .....	206

Essais mécaniques classiques .....	207	Architecture et construction : les hommes utilisent ces grains pour construire .....	229
<b>2 – Vers de nouvelles sources de connaissance</b>	<b>210</b>	De la matière en grains à la matière colloïdale.....	230
Les progrès technologiques d'observation de la matière.....	212	<b>2 - Les prochaines étapes du projet « Grains de Bâisseurs »</b>	<b>231</b>
La diffraction par rayon X .....	212	Le DVD.....	231
Le microscope électronique à balayage (MEB) et à transmission (MET) .....	212	La valise (miniaturisation pour un enseignement sur terrain) .....	231
Le microscope environnemental .....	213	L'exposition itinérante .....	232
Le microscope à force atomique .....	213	La conférence itinérante .....	232
Les argiles dans l'industrie.....	214	L'enseignement supérieur .....	233
Physique des milieux granulaires .....	216	Séminaires pour professionnels du BTP .....	233
Physique des colloïdes .....	217	<b>3 – Genèse d'un grand projet</b>	<b>234</b>
Analogies et différences entre béton de terre et béton de ciment .....	219	Brève histoire de la muséologie scientifique.....	234
Qu'est ce qu'un béton ? .....	219	Un musée vivant d'exploration de la matière.....	236
Le squelette granulaire.....	219	Lever le voile sur la matière .....	236
Le liant.....	220	Vulgarisation, enseignement, recherche et application.....	237
Poursuite de l'analogie.....	221		
<b>V – BILAN ET PERSPECTIVES</b>	<b>228</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>241</b>
<b>1. Approfondir et élargir le contenu</b>	<b>229</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>243</b>
Mieux faire apparaître le lien entre la géologie et l'architecture.....	229		
Géologie et paysages : histoire des grains .....	229		





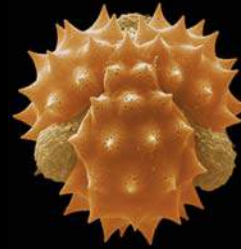
# Introduction

**90% de la surface de la terre est constituée de grains. Les déserts de sable, les plages, les débris rocheux et les sols, constitués d'un ensemble de grains de tailles diverses provenant de la désagrégation et de l'altération des roches, recouvrent d'immenses étendues. C'est donc en toute logique que l'Homme, qui se sert des matériaux locaux à sa disposition, utilise ces grains pour construire. On estime qu'au minimum 30% de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17% des constructions inscrites sur la liste du « patrimoine culturel mondial » de l'UNESCO sont des oeuvres architecturales en terre. Ce matériau si commun mais pourtant si étrange est constitué de grains, d'eau et d'air qui forment un sol avec une histoire géologique. A partir de ces trois éléments, on obtient un matériau solide qui permet de construire un mur, une structure, un édifice. C'est ainsi que l'on passe du grain à l'architecture.**

**Tous ces grains tiennent ensemble comme par magie. Pour comprendre pourquoi, il faut réapprendre ce qu'est un sable ou une poudre, réapprendre ce qu'est un liquide et un gaz. Porter un regard neuf sur la matière. Et en particulier sur toutes ces choses communes que l'on croyait connaître. L'atelier pédagogique « Grains de Bâisseurs » contient une centaine d'expériences étonnantes disposées selon un sentier de découverte au cours duquel se dessinent des problématiques communes entre la terre, le béton et le château de sable. A travers une grille de lecture physique des phénomènes, il s'agit d'offrir au futur bâtisseur la vision d'un cycle humain de la construction inscrit dans un cycle géologique plus vaste et de l'amener à porter un autre regard sur le monde.**

**Ce mémoire se présente en cinq parties. Dans la première est décrite l'omniprésence de la matière en grains dans notre environnement quotidien et dans la nature ainsi que l'essor de la recherche dans ce domaine. Dans la deuxième sont présentés les objectifs pédagogiques du projet. La troisième partie décrit le contenu de l'atelier pédagogique « Grains de Bâisseurs ». La quatrième partie met en parallèle les domaines de savoirs classiques et le contexte actuel d'émergence de nouvelles connaissances liées entre autres à la physique des grains et des colloïdes. Nous terminons en présentant les prochaines étapes du projet.**

## I – UNIVERSALITE DE LA MATIERE EN GRAINS

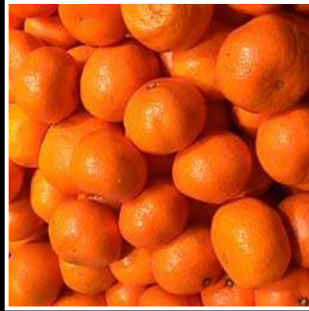


*« Auguries of innocence »*

*To see a World in a grain of sand  
And a Heaven in a wild flower,  
Hold Infinity in the palm of your hand  
And Eternity in an hour.*

*(Voir un Monde dans un grain de sable  
Et un Paradis dans une fleur sauvage,  
Tenir l'Infini dans la paume de sa main  
Et l'Eternité dans une heure.)*

**William Blake**

*Olives**Clémentines**Noix et noisettes**Graviers**Riz**Poudre d'argile*

## 1 - Omniprésence des grains dans notre environnement

La matière en grain est le deuxième produit traité, utilisé, consommé par l'homme juste après l'eau (Duran 2001 [36], 1997 [35]). De l'atome jusqu'aux plus lointaines galaxies, les grains sont à la base de notre monde. Ils sont omniprésents dans notre univers quotidien et jouent un rôle fondamental dans nos civilisations. Ils sont partout dans notre environnement sous toutes les formes et toutes les tailles. Ce sont aussi bien le sable de nos rivières ou de nos plages, la terre sur laquelle nous marchons, les fruits (oranges, noix, pommes...), les céréales (riz, blé, maïs...), les épices (sels, poivres...), les granulats utilisés pour la construction de nos infrastructures et de nos habitations (graviers, ballast de chemins de fer, béton, pierres, terre...), les poudres de toutes sortes (farines, ciment, poudres pharmaceutiques...), les fumées (fumées de cheminées, cendres volcaniques, fumées de silice...), etc. La nature recèle de nombreux granulats dont la taille excède très largement le millimètre. C'est le cas des rochers, des éboulis naturels dont les grains peuvent atteindre plusieurs mètres, des pierres et minéraux de toute sorte, des icebergs, etc. Pourtant, bien qu'universellement répandus dans la nature et dans de nombreux domaines de l'activité humaine, la méconnaissance du comportement des milieux granulaires a persisté jusqu'à une époque récente.

## 2 - Le grain et l'infini

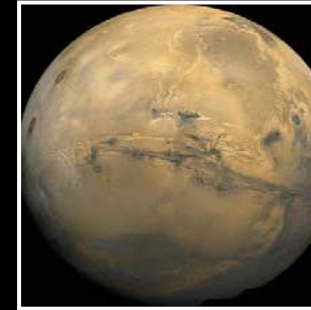
Qu'est-ce qu'un grain ? Un grain peut sans doute être défini comme un objet fini au milieu d'une multitude d'objets semblables. Le concept de grain peut ainsi être appliqué à des objets moins classiques que le sable comme les atomes, les individus d'une foule ou la lumière. En 1905, Albert Einstein soutient que l'énergie de la lumière est "granuleuse". Ce "grain d'énergie", particule immatérielle et sans masse, sera appelé photon. Les individus d'une foule, un troupeau d'animaux, ne sont pas habituellement considérés comme un ensemble de grains. Pourtant, le comportement de ces ensembles d'êtres vivants peut parfois présenter des analogies étonnantes avec celui de poudres ou de grains secs. Une assemblée de gens pris de panique essayant de sortir d'une salle par les issues de secours peut se retrouver bloquée par des effets de voûtes, comme les grains d'un silo qui refusent de sortir par le goulot d'étranglement.

Sur les autoroutes, un ralentissement conduit à une accumulation de véhicules. Le bouchon se déplace à une vitesse qui n'est pas celle des voitures, et en particulier peut se déplacer vers l'arrière. Le phénomène est analogue à l'écoulement d'une poudre sur un plan incliné qui forme des vaguelettes (photo ci-dessous). Il se crée des ondes de densités alimentées par le haut par des grains plus rapides qui les rejoignent et qui perdent de la vitesse par frottement, tandis que, dans leur partie inférieure, elles libèrent d'autres grains qui prennent de la vitesse (Guyon et Troadec (1994) [39]).

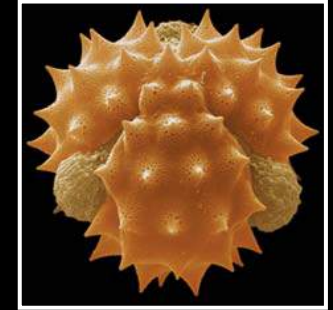


*Une poudre s'écoulant sur un plan incliné forme des ondes de densité, comme dans un ralentissement sur les autoroutes au cours duquel le bouchon se déplace à une vitesse qui n'est pas celle des voitures.*

La notion de grain pose le problème des dimensions au-delà desquelles on ne parle plus de grain. On considère généralement qu'un objet planétaire isolé ne constitue plus un grain. La limite est subtile. L'anneau principal de Saturne est constitué de myriades de petits grains de quelques centimètres. Notre planète a été formée par agglomération de météorites suivie d'une différenciation chimique : des grains, provenant peut-être de l'explosion préalable d'une supernova, se sont collés entre eux et séparés, le fer se rassemblant dans le noyau et des silicates formant le manteau. L'ensemble de notre système planétaire résulterait de l'agrégation des débris d'une supernova. Notre galaxie, les amas galactiques eux-mêmes, peuvent être décrits en terme de supergrains de matière dispersés de façon hétérogène (Allègre 1985 [225]). On voit donc que le champ d'exploration est extrêmement vaste. Il devient infini si on accepte de donner à « grain » un sens assez large incluant les atomes, les molécules et leurs constituants : toute matière devient alors association de grains.



*Planète*



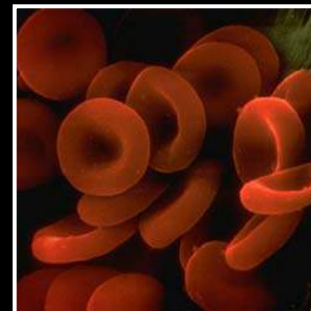
*Pollen*



*Troupeau*



*Etoiles*



*Globules rouges*



*Foule de gens*



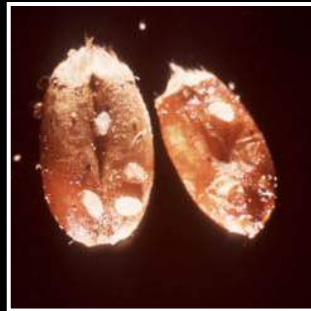
Café



Riz



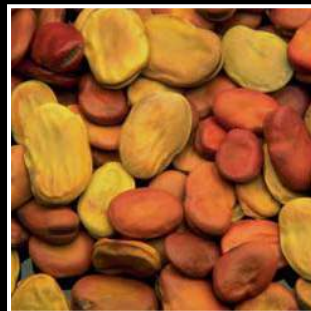
Comprimés



Blé



Féculents



Fèves

### 3 - Les grains, la recherche et l'industrie

Duran 2001 [36]

Les activités industrielles courantes impliquent la fabrication, le stockage, le tri, le mélange, le conditionnement, etc. de matériaux granulaires. 10% de l'énergie domestiquée sur notre planète est utilisée pour le traitement de grains de diverses tailles et origines. 70% des objets que nous utilisons sont passés, à un stade ou l'autre de leur fabrication, sous forme de poudres ou de grains. Le traitement industriel des poudres et grains représente quelques dizaines de milliards de tonnes par an. Autant dire que les grains, sous toutes leurs formes, constituent un intérêt économique et humain gigantesque. Une bonne connaissance de leurs comportements, des lois qui les régissent, est donc d'une grande importance économique.

Pourtant, malgré les efforts de plusieurs grands savants des siècles passés (Faraday<sup>1</sup>, Coulomb<sup>2</sup>, Reynolds<sup>3</sup>, Savart<sup>4</sup>, etc.), et les progrès actuels qui sont considérables, nos connaissances sur le comportement de la matière en grain (comment elle s'écoule, ses états d'équilibre, comment s'établissent les forces, etc.) en sont encore à leur adolescence. Certaines questions tout à fait primaires n'ont pas encore reçu de réponses claires. Or ces questions sont importantes, dans des domaines professionnels très variés ; depuis la coopérative agricole qui stocke son blé dans les silos, jusqu'à l'explorateur spatial qui veut sonder le sol martien.

La matière en grain a longtemps été considérée comme un matériau "low-tech", c'est-à-dire à faible valeur ajoutée. En conséquence, et jusqu'à ces dernières années, les efforts de la recherche fondamentale et appliquée sont restés très limités dans ce domaine. La sophistication croissante de l'ensemble des processus industriels, la complexité des matériaux composites nécessaires à l'industrie (tels que, par exemple, les aimants de moteurs de TGV, les produits pharmaceutiques pulvérulents, les bétons polymères, les plastiques, les mélanges de propulsion des fusées, etc.) a conduit les industries « high-tech », à forte valeur ajoutée, à jeter un regard nouveau sur la matière granulaire. De ce point de vue, la dernière décennie a apportée une véritable révolution. La physique des matériaux granulaires a bénéficié d'un effort de recherche significatif au plan mondial, qui a apporté une moisson d'observations expérimentales, de résultats de simulations numériques, de concepts nouveaux et de modèles théoriques. Des équipes de chercheurs d'origines thématiques variées se sont rapidement mobilisées face au véritable défi scientifique que pose la compréhension du comportement statique et dynamique de la matière en grain.

Dans les domaines plus spécifiques et plus sophistiqués du traitement de la matière en grains à haute valeur ajoutée, on trouve les industries cosmétiques, pharmaceutiques, la chimie fine et l'alimentation qui devient de plus en plus exigeante en matière de performance de traitement.

<sup>1</sup> Physicien et chimiste anglais (1791 - 1867)

<sup>2</sup> Physicien français (1736 - 1806)

<sup>3</sup> Ingénieur et physicien irlandais (1842 - 1912)

<sup>4</sup> Médecin et physicien français (1791 - 1841)

## 4 - Les grains et la géophysique

90% de la surface de la terre est couverte de grains (Duran 1997 [35] - Ayer, Bonifazi, Lapaire 2003 [25], Boulvain 2004 [227]). Le sable est présent en d'énormes quantités dans les déserts qui couvrent plus de 10% de la surface émergée de la planète (Duran 1997 [35]). Les marges océaniques et lacustres, les fonds marins, constituent d'énormes réservoirs naturels de sable. Les sols sont constitués d'un ensemble de grains de tailles diverses (de 10 cm à quelques microns) provenant de la désagrégation et de l'altération des roches. Tous ces grains sont, en quelque sorte, des « voyageurs » et suivent un cycle à une échelle géologique qui nous dépasse. « Nous marchons sur toute une histoire et un ensemble de transformations du monde minéral et animal passé. Nous retournons sans le savoir des documents d'archives de la surface de la terre » (Guyon et Troadec (1994) [39]). Un simple grain de sable peut déjà avoir été recyclé. A partir d'une roche originale fragmentée et soumise à une abrasion par l'air, l'eau ou la glace, ce grain aura peut-être sédimenté une première fois et aura été intégré dans un bloc de gré (« pierre de sable » en anglais). C'est de cette roche sédimentaire qu'il se sera de nouveau exclu après une deuxième naissance.

De nombreux phénomènes naturels relèvent entièrement ou en partie de la physique des grains. Il existe une certaine parenté entre le phénomène de ségrégation granulaire qui sera évoqué plus loin et celui du dépôt en strates dans les cours d'eau charriant des roches et des sables. L'érosion par frottement direct des roches entraînées par le vent ou dévalant des pentes abruptes constitue un facteur fondamental d'évolution de notre environnement. Il serait utile de connaître et de prévoir le comportement de l'ensemble de ces phénomènes. Du sable fin étalé sur une plaque vibrante forme de magnifiques paysages en miniature. Il se réorganise selon son angle de repos de la même manière que certains de nos paysages en terrains meubles sont modelés par l'angle de talus. Au niveau de la problématique de l'activité sismique, le problème de la mobilisation et de la rupture des forces de frottement établit un lien profond entre les préoccupations des géophysiciens et de ceux qui s'intéressent à la physique de base des milieux granulaires. Enfin, l'étude des déserts et de la désertification est une discipline dont on conçoit aisément les retombées sur le plan humain.



*Cendres volcaniques*



*Rides de sable*



*Dunes de sable*



*Avalanche de neige*



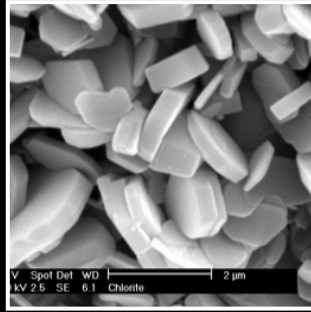
*Tempête de sable*



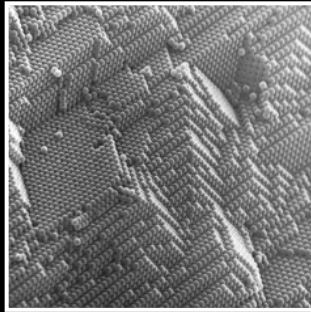
*Transport de sédiments*



Voûtes en blocs de pierre



Plaquettes d'argile



Billes d'opale



Terre à pisé



Cailloux



Tas de sable

## 5 - Les grains de bâtisseurs

L'itinéraire de découverte proposé par « Grains de Bâtisseurs » passe en revue les principes de base du fonctionnement de la matière en grain qui jouent un rôle d'une part dans la mise en œuvre du béton ou de la terre et d'autre part dans les mécanismes de cohésion du château de sable et du matériau terre. La matière en grain ne peut être classée dans les traditionnelles catégories solide-liquide puisqu'elle adopte alternativement le comportement de l'un ou de l'autre. C'est ce qui fait tout l'intérêt des matériaux granulaires pour la construction comme le béton, véritable « pierre qui coule » - Jensen 2001 [233] - ou le pisé, qui prend la forme du coffrage comme un liquide et devient solide par simple compression. Un milieu granulaire distribue les efforts selon un réseau de chaînes de forces, ce qui crée parfois ce que l'on appelle des effets de voûtes et qui explique par exemple pourquoi les coffrages des bétons et du pisé doivent être très résistants pour contrer les poussées horizontales. L'étude des empilements permet de présenter succinctement la manière dont s'organisent les atomes dans la matière cristalline et de se familiariser avec la notion de compacité qui joue un rôle fondamental dans la résistance des matériaux granulaires tels que la terre ou le béton. Dans cette perspective, le squelette granulaire des super-bétons a été optimisé en cherchant à se rapprocher au maximum d'un empilement géométrique idéal appelé l'empilement apollonien ou l'empilement espacé. Des ensembles de grains secs de tailles différentes se séparent spontanément lorsqu'ils sont mis en mouvements : c'est ce qu'on appelle la ségrégation. Le tas de sable présente une pente régulière, appelé l'angle de repos. Cet angle est l'expression des forces de frottement qui jouent un rôle non négligeable dans la tenue d'un mur en terre. Il structure de nombreux paysages dans la nature. Pour comprendre les mécanismes de cohésion d'un mur en terre, il faut commencer par redécouvrir les liquides et en particulier les forces capillaires qui jouent un rôle prépondérant dans la cohésion. Ce sont ces forces qui font tenir les châteaux de sable. A mesure que la taille des grains diminue, ces forces grandissent. D'où l'intérêt des particules colloïdales (particules de l'ordre du micron) et en particulier des argiles qui ont l'intérêt, en plus de leur taille microscopique, d'adopter des formes de feuillets qui leur permettent d'avoir des masses insignifiantes par rapport à leurs surfaces. Etant donné la grande diversité des argiles, d'autres forces sont en œuvre et participent à la cohésion de la terre dans certains cas. Au vu de l'objectif de vulgarisation du projet, ces phénomènes sont trop complexes pour être décrit simplement. Ils sont juste évoqués en fin de parcours au travers des phénomènes de gonflements et de retraites qui diffèrent en fonction des argiles utilisées.



## II – OBJECTIFS PEDAGOGIQUES



**La matière en grain est universellement répandue. Pourtant, bien qu'extrêmement commune, elle recèle un grand nombre de phénomènes physiques surprenants et inconnus du grand public. En ce sens, elle est un thème de vulgarisation scientifique et d'enseignement particulièrement adéquat. Les expériences présentées dans le projet sont des « expériences contre-intuitives » : les résultats qu'elles produisent vont à l'encontre de ce que le public prévoit. La multiplication de telles expériences permet, tout en aiguisant le désir de savoir, de transformer les conceptions des apprenants (Eastes 2002 [172], 2004 [173]). Au-delà de la simple évocation des phénomènes physiques qui se déroulent au sein de la matière, c'est bien cette transformation qui est recherchée, en vue de faire émerger une nouvelle façon de concevoir la matière en grain (et plus particulièrement la terre) et ses rapports avec l'eau. Le cheminement proposé par le projet permet de faire le lien entre géologie, architecture et paysage, le tout par l'entremise d'une grille de lecture physique des phénomènes observés, cherchant ainsi à transformer les conceptions de l'apprenant afin qu'il porte un autre regard sur la science, un autre regard sur la matière et un autre regard sur le monde.**

# 1 - Les nouvelles manières d'apprendre

## Le contexte actuel

Express 2004 [165]

Pendant des générations, l'enseignement était sur des rails : l'école ne doutait pas du désir d'apprendre de ses élèves. Le collège unique a tout transformé, en ouvrant ses portes à un flot d'élèves qui autrefois en étaient exclus. Pendant que la remise en question de l'autorité, la tyrannie du plaisir immédiat et l'explosion des sources d'accès à la connaissance contribuaient à dévisser le savoir académique de sa chaire. A 11 ans, selon l'Education nationale, 30% des élèves ont des difficultés de compréhension d'un texte, 39% ne maîtrisent pas les outils de la langue, 38% ont du mal à écrire. En 2002, 158 000 élèves ont décroché du système sans diplôme ni qualification. Plus largement, selon une enquête du Snes en 2001, 85% des jeunes professeurs disent être régulièrement confrontés au manque d'intérêt de leurs élèves. Et 44% des enseignants déclarent que le goût d'apprendre s'est détérioré en dix ans. Dans un tel contexte, avec des élèves aux profils très contrastés, on ne peut plus enseigner comme hier. Aujourd'hui, avec des classes hétérogènes et des élèves à la motivation en baisse, des chercheurs, des enseignants tracent de nouvelles voies pour stimuler l'envie de savoir. Depuis les années 1970, les professionnels de l'éducation ont ouvert des brèches avec les pédagogies alternatives, actives, différenciées, de groupes, etc. Pourtant le budget de la recherche en ce domaine reste extrêmement limité : beaucoup de ministres de l'Education se demandent quels contenus enseigner ; peu s'intéressent à « comment enseigner ».

## Apprendre : les trois modèles traditionnels

En matière d'idées sur l'« apprendre », on repère trois grandes traditions.  
(Giordan<sup>1</sup> 1999 [175], Express 2004 [165])

- *Le cours magistral*

La première décrit la capacité d'apprendre comme une simple mécanique d'enregistrement. Effectuée par un cerveau supposé « vierge » et toujours disponible, l'acquisition d'un savoir est alors le résultat direct d'une transmission. Voilà quelques années, un ministre de l'Education illustra cette conception au moyen d'une carafe - «Voilà le savoir» - et d'un verre - «Et ceci est l'élève!» - avant de déverser l'eau dans le récipient. Cette pédagogie, que l'on nomme « magistrale » ou « frontale », suppose une relation linéaire et directe entre un émetteur détenteur d'un savoir (enseignant, journaliste, muséologue...), et un récepteur qui mémorise successivement des messages (élève ou grand public). Dans l'enseignement, cette vision s'applique dans la présentation routinière de données, illustrées ou non, par l'enseignant. Au musée, elle correspond à l'exposition d'objets ou de documents divers (panneaux, cartes, audiovisuels...), accompagnés des traditionnels cartels explicatifs.

---

<sup>1</sup> Directeur du Laboratoire de didactique et épistémologie des sciences (LDES, <http://www.ldes.unige.ch/>) de l'Université de Genève.

- L'approche behavioriste

La deuxième tradition, plus récente, repose sur un conditionnement. Elle a eu un grand succès dans la période de l'après-guerre, sous le terme d'approche « behavioriste ». On y conçoit l'apprentissage comme une série de situations réclamant des réponses immédiates. L'apprentissage est favorisé par des récompenses (renforcements positifs) ou des punitions (renforcements négatifs). A travers un tel entraînement répétitif, l'individu finit par adopter le comportement adéquat, celui qui lui évite les renforcements négatifs.

Pour l'enseignement, nombre d'exercices autoprogrammés — où l'élève répond seul à une série de questions — ont été produits dans ce cadre. Les pédagogies assistées par ordinateurs (PAO) se sont également appuyées sur ce modèle. Transposée dans le cadre muséal, cette approche se traduit par des situations « presse-bouton » comme dans les anciennes salles d'optique et de mécanique du Palais de la Découverte à Paris ou au Lawrence Hall of Science de Berkeley.

- Le modèle constructiviste

La troisième tradition est une pédagogie dite « de la construction ». Bien qu'elle ait plus de cent ans d'âge, elle est actuellement en plein essor. Elle part des besoins spontanés et des intérêts « naturels » de chaque individu. Elle prône leur libre expression, leur créativité et leur savoir-être. Elle met en avant la découverte autonome ou encore l'importance des tâtonnements dans l'acte d'apprendre. L'apprenant ne se contente plus de recevoir des données brutes, il les sélectionne et les assimile. La construction du savoir s'effectue principalement au travers d'une action sur les objets et par l'expression. Ces méthodes sont dites « actives » : elles reposent sur la découverte, la maîtrise, le projet... Elles sont reprises dans le cadre scolaire, mais aussi dans un certain nombre de lieux d'investigation, tels que le Children Museum de Boston, l'Exploratorium de San Francisco et la cité des enfants de la Cité des Sciences et de l'Industrie de Paris.

Le constructivisme a aussi ses limites. Il faut bien structurer l'enfant, lui donner un stock de savoirs « fondamentaux ». Et donc en passer, aussi, par du solfège, comme le « par cœur ». Dans les années 1960, on pensait qu'il suffisait de comprendre pour apprendre. On s'abstenait par exemple de seriner les grandes dates en histoire : on en est revenu. En matière de mémoire, il faut jouer sur les deux registres, « par cœur » et compréhension. Pour savoir lire, par exemple, il est nécessaire de posséder un capital de connaissances.

## Vers une nouvelle approche : le modèle allostérique<sup>1</sup>

Giordan 1988 [179], 1989 [180]

Selon le modèle allostérique, s'approprier un nouveau savoir, c'est tout autant évacuer des savoirs peu adéquats, qu'en élaborer d'autres. Ce processus relève à la fois d'une réorganisation des informations préexistantes et d'une régulation, en interaction avec des données nouvelles. Apprendre est le résultat d'un processus de transformations — de transformations de questions, d'idées initiales, de façons de raisonner habituelles — où l'apprenant ne retient que ce qui le touche ou l'accroche. Des étudiants, des chercheurs qui ont accès au formalisme logico-mathématique le plus poussé peuvent raisonner à l'égal d'enfants de 6-7 ans sur des contenus inhabituels (Express 2004 [165]). Plus les situations sont éloignées des savoirs maîtrisés, plus les individus utilisent des stratégies de raisonnement primitives. L'individu apprend au travers d'une « conception » de la situation : sur le monde qui l'entoure, face à un événement, un phénomène, chaque individu mobilise des idées et met en œuvre des démarches (il se fait une « idée » de la situation). C'est à travers une telle grille d'analyse qu'il interprète les situations auxquelles il est confronté ou qu'il recherche et décode les différentes informations. L'enseignant doit donc toujours envisager une déconstruction de ces conceptions de l'apprenant comme une étape préalable. Celui-ci ne se laisse pas facilement déposséder de ses opinions et de ses croyances, même par une argumentation bien construite. Il se rattache à son idée initiale pour toutes sortes de raisons.

## 2 - Les conceptions

Giordan, de Vecchi 1987 [178], Giordan, Girault, Clément 1994 [176]

Face à quelqu'un qui ne comprend pas, on devrait s'atteler à comprendre où sont les verrous qu'il s'est lui-même scellé. Parfois, les difficultés d'apprentissage sont plus liées à la situation dans laquelle se trouve l'apprenant et à « l'idée » qu'il se fait de cette situation qu'au savoir proprement dit. A titre d'exemple, une équipe de recherche a soumis un test à des enfants, en le présentant tantôt comme de la géométrie, tantôt comme du dessin. Résultat : dans le premier cas, les bons élèves réussissent et les plus faibles échouent. Dans le second cas, tout le monde réussit (Express 2004 [165]). Cette situation est extrêmement banale dans l'enseignement. Face à un nouveau savoir, l'expérience, le vécu de l'individu et l'idée préalable qu'il se fait de la science ou du savoir concernés peuvent le prédisposer à l'échec. Selon Giordan, ces présupposés, préjugés, sont les « conceptions » qui, inscrites au fond de l'inconscient, relèvent moins du savoir que de l'idée qu'on se fait du savoir (métacognitif). Apprendre, c'est d'abord chasser les conceptions erronées. Pour construire du savoir, il faut d'abord en déconstruire.

---

<sup>1</sup> Le vocable de « apprentissage allostérique », provient d'une métaphore biochimique formulée par le LDES. Elle concerne la structure et le fonctionnement de certaines protéines dites « allostériques ». Ces molécules enzymatiques, fondamentales pour la vie, changent de forme, et donc de fonction, suivant les conditions de l'environnement dans lequel elles se trouvent.

Quel que soit le sujet d'étude, les élèves savent déjà ou croient savoir beaucoup de choses. Le cerveau de l'enfant n'est jamais un terrain vierge : les petits (comme les grands !) ont des idées préconçues sur tout, plus ou moins erronées, plus ou moins floues. Ils ont chacun leur propre grille de lecture, la tête encombrée de conceptions spontanées, de stéréotypes hérités de leur famille ou de la culture ambiante. Cette perception du monde s'exprime à travers des attitudes, des gestes, des démarches, des a priori, des croyances, que les chercheurs nomment « conceptions ». Ces conceptions constituent non seulement les images mentales, mais les modes de raisonnement qui les accompagnent. Ensemble, ils permettent à l'individu de donner du sens au monde qui l'entoure. La conception n'est pas le produit de la pensée, elle est le processus même de l'activité mentale.

Ce savoir-là est têtue. Il faut donc « inhiber » cette fougue naturelle qu'a le cerveau à aller au plus rapide, à l'erreur, à construire des représentations à partir de presque rien. Il faut perturber ces conceptions. En d'autres termes, l'acquisition d'un savoir ne peut se faire que si l'enfant modifie son architecture mentale. Dans cette perspective, un enfant et un adulte peuvent être mis sur un même point d'égalité : entre celui qui ne sait pas et celui qui croit savoir mais qui contient des erreurs dans ses fondamentaux, il n'est pas inutile de tout reprendre à la base afin de déceler les « faux-savoir ».

L'importance de la prise en compte des connaissances antérieures dans l'apprentissage n'est pas nouvelle. Ce qui est original par contre, c'est l'idée que les conceptions préalables interviennent non seulement comme élément intégrateur mais aussi comme facteur de résistance à l'encontre des connaissances nouvelles avec lesquelles elles entrent en contradiction. Cependant, un savoir neuf ne détruit pas le modèle préexistant mais, le plus souvent, l'oblige à s'adapter afin que cette nouvelle structure puisse intégrer la connaissance nouvelle. Il n'y a donc pas destruction mais transformation.

### **3 - Le désir d'apprendre**

Le fonctionnement du cerveau humain est parfois curieux : les émotions peuvent devenir des clés, des outils de compréhension. Dans cette chose à priori si rationnelle qu'est la compréhension, il y a une grande part d'émotivité, de sensibilité. Celui qui ne comprend pas, c'est celui qui ne ressent pas, ne se sent pas concerné. Il ne peut pas com-prendre (« prendre avec »). D'ailleurs, quand un processus de compréhension s'établit, on ressent une jouissance : Euréka! Le processus de compréhension semble irrémédiablement lié à la notion de plaisir : le plaisir ouvre des portes, fait tomber des cloisons mentales, ouvre l'esprit, permet de faire les liens entre des choses arbitrairement séparées par le cerveau.

L'humour, le spectaculaire, le beau, l'imaginaire ou le lien avec le quotidien sont autant d'outils qui permettent de délivrer du « sens » pour donner l'envie de savoir. Notre aptitude cognitive est fortement liée à nos émotions. On ne mémorise que ce qu'on aime retenir. Ce processus est d'ailleurs permis par la libération dans le cerveau de certaines substances chimiques, les neuromédiateurs : l'un d'eux, la dopamine, provoque le désir, l'appétence pour le savoir (Express 2004 [165]). D'autres créent du stress. Leur action doit donc être bien dosée. Trop d'angoisse perturbe, une légère anxiété stimule.

Il ne faut évidemment pas faire miroiter aux élèves qu'on apprend sans effort. Simplement, il faut les stimuler, leur faire découvrir la notion de plaisir d'apprendre. On n'apprend bien que si l'on a envie d'apprendre. Dans ce cadre, l'enseignant se trouve affublé du rôle décisif de catalyseur, de vecteur de désir. Il doit réveiller la motivation intrinsèque, celle qui fait qu'on apprend pour le plaisir de la tâche elle-même, pas par contrainte (motivation extrinsèque).

Apprendre est donc un jeu subtil, qui table sur trois niveaux, selon Giordan. L'« intention » : l'élève n'apprend bien que s'il y a un plus derrière, un plaisir, un besoin, un projet. Le « cognitif » : l'élève doit comprendre, stocker et surtout savoir réutiliser son savoir (le présenter à d'autres, le hiérarchiser...). Et le « métacognitif » : l'élève doit s'interroger sur l'idée qu'il se fait de lui-même et du savoir, sur la meilleure façon, pour lui, d'apprendre.

## 4 - Des expériences contre-intuitives pour un matériau contre-intuitif

### Définition

Eastes 2002 [172], 2004 [173]

Une « expérience contre-intuitive » est une expérience qui produit un résultat inverse ou très différent de celui auquel on s'attend intuitivement ou dont l'interprétation va à l'encontre de l'évidence ou du sens commun. Ce type d'expérience fait partie des expériences amusantes ou spectaculaires qui sont largement employées dans les musées scientifiques et les animations culturelles. Certaines sont présentées pour leur caractère esthétique, d'autres pour leur côté effrayant ou impressionnant, d'autres encore pour leur degré de technicité ou d'inventivité, à moins qu'elles ne soient parfaitement démonstratives d'un phénomène ou d'un savoir que l'on souhaite présenter. Leurs objectifs sont multiples : distraire le public ou l'auditoire, l'émerveiller pour le mettre en "appétit de science", dramatiser la présentation d'une conférence pour la rendre plus attractive, susciter l'esprit critique ou le questionnement et, plus généralement, perturber les conceptions des membres de l'assistance.

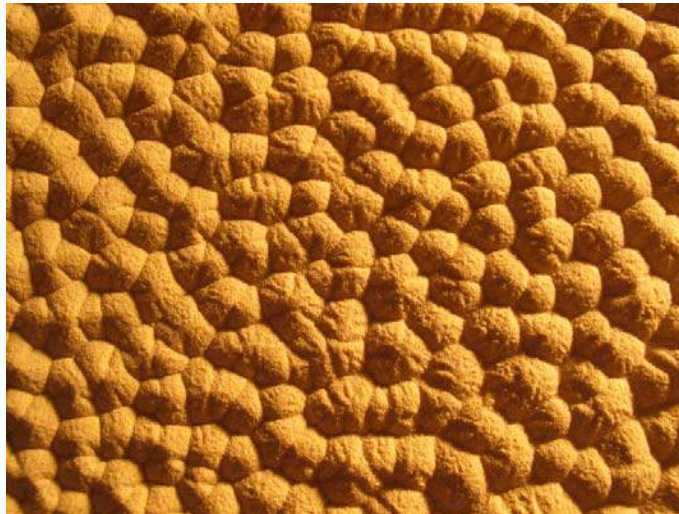
Les expériences contre-intuitives sont particulièrement efficaces pour atteindre quasiment tous ces objectifs en une seule fois. Elles permettent à la fois d'**émerviller**, de **perturber les conceptions** de l'apprenant et de le **motiver à en savoir davantage**. Si l'animateur sait maintenir le suspense en ne donnant pas d'emblée l'explication du phénomène et s'il parvient à motiver l'auditoire pour qu'il s'exprime, l'expérience contre-intuitive pourra largement **susciter le questionnement** et faire **appel à l'esprit critique**, présentant par là un intérêt didactique évident.



*Des expériences contre-intuitives pour émerveiller, perturber les conceptions et motiver à en savoir davantage.*



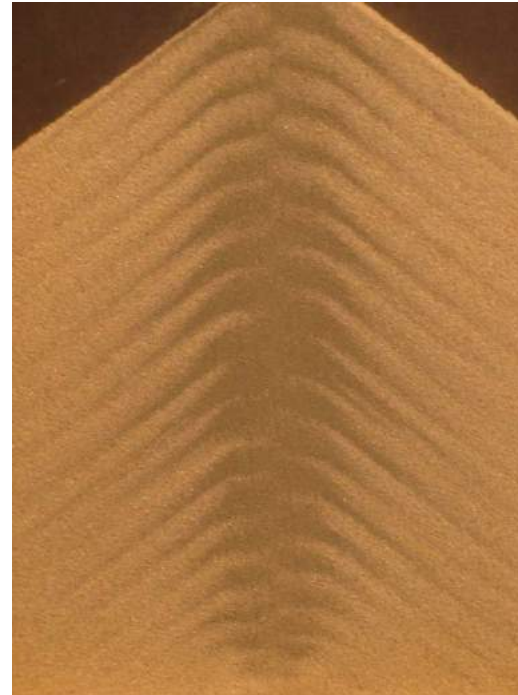
**MANIPULATION 42 :** Du sable sec s'écoulant dans une nappe d'eau forme une petite colonne semblable à une stalagmite, au lieu de se disperser.



**MANIPULATION 24 :** Les vibrations d'une plaque, au lieu d'augmenter le désordre du système, réorganise et structure les grains selon leur angle de repos.

## Exemples

Les expériences de « Grains de Bâtisseurs » sont quasiment toutes contre-intuitives. Dans la manipulation 42, du sable s'écoule d'un entonnoir pour former un tas de sable sec. La même expérience est reproduite en faisant couler le sable dans une flaque d'eau. Le public interrogé pense que le sable va se disperser et s'étaler dans l'eau. Pourtant au contraire, le sable forme une petite colonne. Dans la manipulation 24 ou la manipulation 26, la mise en mouvement de sable ou de poudre, dont on s'attend à ce qu'elle augmente le désordre du système, réorganise les grains : en mélangeant des sables différents, ils se séparent ; sur la plaque vibrante le sable se structure pour former de véritables paysages. Le principe est repris pour la plupart des expériences : le sable s'écoule au travers d'une salière, alors que l'eau, pourtant si fluide, ne s'écoule pas, le sable hydrophobe reste toujours sec et permet de faire des pâtes sous l'eau, etc.



**MANIPULATION 26 :** Un mélange de sable blanc et de poudre noire, en s'écoulant d'un entonnoir, se sépare en deux catégories distinctes : la poudre noire se place au centre en formant des strates étonnamment régulières, alors qu'on s'attend à ce que la mise en mouvement du mélange augmente le désordre du système.



## Conditions à respecter

Une expérience est rarement contre-intuitive « par nature ». Pour qu'elle le devienne, plusieurs conditions doivent être remplies (Eastes 2002 [172]).

### Un niveau de connaissance adéquat

Pour aller à l'encontre de l'intuition, l'expérience doit avant tout faire appel au vécu du public auquel elle est proposée, ou plus exactement être adaptée à son cadre de référence et nécessite donc de sa part un niveau de connaissances adéquat. Il convient d'offrir à l'apprenant la possibilité d'anticiper son résultat, de se positionner par rapport à elle, de questionner ses propres conceptions en donnant à l'expérience un contexte qui favorise ce questionnement. En l'absence de questionnement préalable, le résultat est facilement accepté, sans susciter ni intérêt, ni interrogations particulières. Ce contexte, qui va également donner un sens au savoir abordé, peut très bien être introduit par la réalisation d'une expérience préliminaire. Celle-ci sera destinée à offrir au public la possibilité de prendre conscience du phénomène « normal », conforme à son intuition, de manière à ce que l'expérience suivante devienne alors très contre-intuitive. Une autre méthode consiste à offrir au public la possibilité de faire émerger ses conceptions pour mieux les remettre en question. L'expérience contre-intuitive est tout à fait favorable à l'expression des conceptions, avant la manipulation comme après. En suscitant ainsi le questionnement, l'enseignant (ou animateur) favorise le développement de l'esprit critique et force chaque apprenant à adopter une attitude active face à l'élaboration de son propre savoir.

### Eviter les « boîtes noires »

Le matériel mis en jeu doit pouvoir être facilement identifié et permettre une mobilisation rapide des connaissances antérieures.

### Présence d'un accompagnateur

Enfin, il convient d'insister sur l'importance que revêt l'accompagnement proposé par l'enseignant ou le vulgarisateur. Qu'il s'agisse de la manière dont il contextualise l'expérience, du questionnement qu'il parvient à susciter, des diverses confrontations qu'il propose, de la mobilisation des savoirs antérieurs qu'il suggère, de l'appel à l'imaginaire et à la créativité qu'il initie, l'accompagnateur est indispensable pour que l'expérience contre-intuitive prenne tout son sens. Sans un accompagnement adapté à la perturbation qu'elle induit, une expérience contre-intuitive peut se révéler totalement inutile, voire néfaste pour l'apprenant.

### Multiplier les expériences

Les difficultés que l'apprenant peut avoir à modifier ses conceptions initiales ont déjà été évoquées précédemment : une conception ne se transforme pas facilement et une seule expérience n'apporte souvent pas les effets souhaités. Ce n'est qu'après de multiples confrontations et la prise de connaissance de plusieurs phénomènes du même type, après la répétition et la multiplication des expériences, qu'il acceptera d'en tenir compte et de revoir sa logique explicative. D'où aussi l'idée du cheminement : pour faire comprendre beaucoup de choses à partir de peu de chose, il faut tracer une voie qui part de ce que la personne sait déjà et petit à petit lui permettre d'établir des liens.



*La présence d'un accompagnateur est indispensable pour que l'expérience contre-intuitive prenne tout son sens.*



*Ce n'est qu'après de multiples confrontations et la prise de connaissance de plusieurs phénomènes du même type, après la répétition et la multiplication des expériences, que l'apprenant acceptera d'en tenir compte et de revoir sa logique explicative.*

## De la vulgarisation à l'enseignement

Jusqu'à présent, ces expériences contre-intuitives ont été surtout utilisées à des fins de vulgarisation scientifique : ses utilisateurs l'exploitent principalement pour montrer ce que la science peut avoir de fascinant et en donner une image quelque peu « magique ». Depuis peu, certains chercheurs en didactique évoquent la possibilité d'étendre l'utilisation de l'expérience contre-intuitive dans le cadre de l'enseignement, à l'intention non seulement des collégiens et lycéens mais aussi à des niveaux plus élevés de l'enseignement supérieur. Bien plus que de permettre l'émerveillement de l'assistance, il apparaît que l'expérience contre-intuitive constitue à elle seule un puissant outil pédagogique dont l'utilisation peut réellement faciliter l'acte d'apprendre. Cependant, on leur octroie peut-être trop facilement la faculté d'être « auto-formatrices », en supposant que leurs résultats inattendus sont suffisants pour permettre à l'apprenant de découvrir les subtilités des phénomènes qui se cachent derrière elles. En matière d'enseignement ou de médiation, l'expérience contre-intuitive ne saurait fonder un enseignement ; elle ne pourra jamais remplacer les démonstrations traditionnelles et ne peut venir qu'en appui de ces dernières, voire en amont, pour interpeller, motiver, concerner sur un phénomène. Mais dans la mesure où l'un des éléments les plus difficiles à mettre en place au sein de l'environnement didactique relève du « sens » que l'apprenant peut trouver au savoir abordé, l'expérience contre-intuitive reste tout à fait pertinente. Face à un phénomène qui va à l'encontre de son sens commun, ce dernier a besoin d'une explication : il est en état d'alerte. Ainsi, le public est plus motivé pour écouter l'explication d'un phénomène physico-chimique complexe après la présentation d'une expérience contre-intuitive. L'intérêt de l'expérience contre intuitive réside précisément dans sa faculté à capter les esprits pour les rendre réceptifs à une explication de type magistrale des plus classiques qu'il soit. Il est fréquent de nos jours de chercher à casser l'attitude expectative des étudiants. Pourtant le spectateur a aussi des bons côtés : il sait contempler, il sait ouvrir grand ses yeux et ses oreilles. Il faut savoir en profiter.

## 5 - Des grains pédagogiques

La matière en grain est un sujet d'étude particulièrement adaptée aux objectifs précités. Elle est extrêmement commune et pourtant elle recèle de nombreux phénomènes inconnus du grand public : elle est contre-intuitive par excellence. La construction en terre en particulier est un exemple typique de thème autour duquel les gens fabriquent des conceptions erronées. « Grains de Bâtisseurs » fournit un cadre idéal pour perturber ces *a priori*. Cependant l'universalité des grains nous font entrevoir des objectifs beaucoup plus larges. A partir du grain, on refait le monde, on touche à tout, et en plus du savoir important et multidisciplinaire que le concept de grain englobe, on étudie le revers de la médaille du savoir : la transmission de savoir et la pédagogie, le fonctionnement du cerveau humain, les mécanismes de conception du monde. Le concept de grain nous transporte ainsi entre le savoir et des clés de compréhension du monde à différents niveaux. Il fait le lien entre les deux faces d'une même pièce et semble particulièrement bien adapté à une refondation de nos outils de compréhension de la matière, qui peut elle-même se prolonger dans d'autres disciplines transversales ou contiguës, à des échelles supérieures ou plus spécialisées, plus grandes ou plus petites. On peut presque tracer un parallèle entre nos grains minéraux et des grains de compréhension, des briques, des pensées de différentes tailles qui se lient et se structurent en concepts (matériaux) qui nous permettent de construire une architecture mentale.

## Un autre regard sur la science

Qu'est-ce que la science ? Qu'est-ce qu'un scientifique ? Qu'est-ce que la physique ? L'analyse des conceptions du grand public laisserait certainement apparaître de nombreux préjugés liés à l'environnement socioéconomique, culturel et médiatique qui ont un impact sur la difficulté de compréhension des sciences. L'image d'un monde abstrait, ésotérique, rempli d'équations indéchiffrables, d'instruments de mesures complexes, de laboratoires exigus, peuple l'imaginaire du plus grand nombre. La physique ou la chimie passent pour des disciplines dont l'objet est éloigné de nos préoccupations quotidiennes et de nos vies en général. Pourtant, pour reprendre la formule d'Einstein, « *la science est juste un raffinement de la pensée de tous les jours* » (Caro 1996 [167]).

La physique des grains présente l'intérêt majeur de placer l'univers des physiciens à la portée du plus grand nombre. Quoi de plus commun qu'un grain de sable ? Ils ont été tellement vus, tellement pratiqués, qu'on pense ne pouvoir en tirer aucune découverte. Pourtant un objet d'apparence banale peut receler bien des mystères et des interrogations pour le scientifique. Nous sommes face à une jeune science qui en est encore à son adolescence. Le public peut découvrir ses premiers pas. Elle est encore essentiellement descriptive. Les phénomènes qu'elle met au grand jour ne sont pas encore quantifiés par des équations complexes et hermétiques. Le dialogue est donc possible entre le chercheur et le néophyte, qui peut comprendre le questionnement de la science, sa manière d'aborder les problèmes et d'observer les phénomènes. Ce questionnement scientifique commence par le sens et le goût de l'observation de la nature qui nous entoure.

## Un autre regard sur la matière

Dans le projet « Grains de Bâisseurs », l'accent est mis avant tout sur la matière. Dans ce cadre, le contact avec la matière est fondamental et le matériel utilisé pour mettre en œuvre les expériences doit briller par son absence. Il faut pouvoir regarder, toucher<sup>1</sup>, sentir le sable, l'argile et la terre. Apprendre par l'action, mettre « la main à la pâte »<sup>2</sup>. Le Prix Nobel Georges Charpak a popularisé cette méthode destinée à sensibiliser les enfants aux sciences expérimentales. En terme de matériel, c'est le choix de la simplicité qui prime avant tout. Il faut montrer à partir de presque rien : moins il y en a, plus c'est spectaculaire. Et évidemment, chercher à éliminer les « boîtes noires » de la chaîne de mesures et d'observations : un appareillage trop sophistiqué peut annuler le caractère contre-intuitif et surprenant d'une expérience, l'apprenant identifiant cet appareil compliqué qu'il connaît mal comme seule origine du phénomène qui va à l'encontre de ses conceptions.

Nous sommes habitués à utiliser des matériaux transformés dont nous ne soupçonnons pas l'origine. Il semble important d'établir un lien entre le matériau et ce qui l'a précédé. Le béton de ciment provient de la terre. Pour le fabriquer, les grains de la terre ont été séparés, décomposés, lavés. La fraction la plus fine (l'argile) a été éliminée et remplacée par le ciment. Le ciment provient d'un mélange d'argile et de calcaire (qui proviennent de la terre), qui a été transformé (chauffé à haute température). Ainsi, l'origine du béton de ciment, c'est la terre.

Il s'agit ensuite de faire connaître la nature intrinsèque de la matière, de la faire comprendre et connaître « de l'intérieur ». De quoi est-elle composée ? Quelles sont les forces qui sont en jeu en son sein et qui assurent sa cohésion ? Pourquoi la matière se trouve dans l'état où elle est ? Pourquoi change-t-elle d'état ? Pour comprendre ces forces, il est intéressant de commencer par observer les différentes morphologies de la matière qui sont l'expression des forces qui gouvernent sa structure à différents niveaux d'échelle.

<sup>1</sup> Certains chercheurs soulignent l'importance du toucher dans l'apprentissage. A ce sujet lire Buonarroti 2005 [166] (Le Monde 02/04/05 : <http://ottawa.blog.lemonde.fr/ottawa/2005/04/>).

<sup>2</sup> L'opération *La main à la pâte* (<http://www.lamap.fr/>) a été lancée en 1996, à l'initiative du professeur Georges Charpak, prix Nobel de physique 1992, et de l'Académie des sciences. Elle vise à promouvoir au sein de l'école primaire une démarche d'investigation scientifique.

## Un autre regard sur le monde

« Grains de Bâisseurs » est construit comme un cheminement qui, tout en faisant découvrir le fonctionnement de base de la matière en grains, invite à passer successivement de la géologie à la construction et à établir des liens entre les paysages, la matière et l'architecture. Dans cette sorte de circuit initiatique, beaucoup plus que la découverte de phénomènes qui gouvernent la matière, c'est une transformation des conceptions du monde qui est en jeu. Le public est tour à tour invité à changer d'échelle, à la fois au niveau spatial (de l'infiniment petit à l'infiniment grand) et temporel (temps humain et temps géologique), à porter un regard attentif sur la nature et à reconsidérer sa place dans l'univers.

Certaines expériences reproduisent des phénomènes naturels (rides de sable par exemple) et suscitent l'émerveillement devant des choses qu'on a toujours vu sans regarder. Elles peuvent inspirer un attachement à la nature et à la terre et susciter le goût de l'observation du monde environnant.

Le lien entre la géologie et la construction en terre est fondamental. Il met en valeur l'idée forte que l'on construit avec ce que l'on a sous les pieds. Chaque grain a une histoire géologique, qui nous permet de mieux comprendre sa nature. Elle met en œuvre des mécanismes et des processus physico-chimiques dont on peut tirer des informations pour construire. Avec la terre, on fait un béton, c'est-à-dire une pierre reconstituée. Il existe des cycles de vie de la terre ou des sédiments, qui proviennent d'une roche et qui vont reconstituer une roche. En construisant avec la terre, on reproduit ce mécanisme géologique qui se produit sur des millions d'années. Le parallèle entre le cycle géologique du sable et des roches et le cycle humain de la construction en terre est intéressant. La vision d'une histoire humaine qui s'inscrit dans une histoire géologique invite à reconsidérer notre place dans l'univers. Nous faisons partie d'un vaste équilibre. Ceci participe sans doute à la vision d'un monde en perpétuel mouvement et à l'émergence d'une pensée écologiste<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Du grec oikos «maison» et logos «discours», le mot écologie fut introduit en 1866 par le biologiste allemand Ernst Haeckel. L'écologie est donc la science de l'habitat, c'est-à-dire l'étude des conditions d'existence des êtres vivants et de leurs relations avec le milieu.

### III – GRAINS DE BATISSEURS





*Le projet se présente sous la forme d'une série d'expériences classées par thèmes. De tables en tables, on découvre les différentes spécificités de la matière en grains.*

Le projet se présente sous la forme d'une série d'expériences qui mettent en valeur des phénomènes variés que l'on rencontre dans la matière en grain. Les manipulations sont classées par thèmes. Dans un premier temps, on décrit les constituants de la terre (« *entrée en matière* ») et leur origine au travers d'une « *histoire* » géologique des grains (« *histoire de grains voyageurs* »). Puis de tables en tables, on découvre les différentes spécificités de la matière en grain à travers les expériences qui sont commentées par un animateur.

La première partie concerne les milieux granulaires secs. On montre au travers d'une première série d'expérience le comportement à la fois fluide et solide de la matière en grain. La deuxième série concerne les empilements de grains. Puis on fait découvrir ce qu'on appelle l'angle de repos et l'angle d'avalanche. La quatrième série d'expériences concerne les phénomènes de ségrégation granulaire. Et on termine, pour les milieux granulaires secs, avec la distribution des forces dans la matière.

La deuxième partie concerne les milieux granulaires humides. On commence avec l'eau, afin de rappeler ce que sont les forces capillaires. Puis on observe la cohésion capillaire qui permet à l'eau de faire tenir les grains entre eux dans un château de sable. La série d'expériences suivante montre en un ensemble les autres rapports particuliers que la matière en grain entretient avec les liquides.

La troisième partie concerne les argiles. Dans le cadre de ce projet, la description des argiles est délicate, puisque ces particules microscopiques sont à la limite de la physique des grains et d'un autre champ d'étude : la physique des colloïdes. On montre dans un premier temps comment l'eau « colle » les particules argileuses entre elles et aux autres grains. Ceci est particulièrement vrai pour les argiles électriquement neutres (la kaolinite par exemple) : dans ce cas, le concept de grain est tout à fait valable et les mécanismes de cohésion sont les mêmes que ceux d'un château de sable. Dans le cas des argiles gonflantes, on entre davantage dans le champ de la matière colloïdale. On aborde ce thème à travers l'étude des boues, des gels et du phénomène de gonflement.

## 1 – *Entrée en matière*



## La terre

Un sol est un édifice complexe et hétérogène. Un milieu fortement hiérarchisé, dont les échelles structurales varient du nanomètre au décimètre.

Il est constitué d'un empilement de grains dont la taille varie du décimètre au micron, ce qui correspond à 5 ordres de grandeur. Les plus gros grains sont 100 000 fois plus grands que les plus petits. Pour se représenter cette énorme différence de taille, imaginons qu'une feuille de format A4 constitue une plaquette d'argile. Un galet aurait alors un diamètre comparable à celui de l'agglomération grenobloise. Si on considère l'épaisseur d'un feuillet d'argile, les échelles de grandeur deviennent ridiculement petites. Pour un feuillet de kaolinite, constitué de 3 plans d'atomes (l'atome est l'élément constitutif de base de toute matière), cette épaisseur mesure 0,426 nanomètre<sup>1</sup> ! La construction en terre ferait-elle partie des nanotechnologies ?

Une manière complémentaire d'aborder la complexité de cet édifice granulaire consiste à examiner le milieu poreux. Si l'on se rapproche pour observer l'intérieur de notre matériau, on découvre un dédale de galeries millimétriques à nanométriques. Là encore, entre un macropore d'un millimètre et une porosité inter foliaire d'un nanomètre, il y a un monde ! Pour se le représenter, imaginons pouvoir se faufiler dans les plus petites anfractuosités à la manière d'un spéléologue. Première surprise, nous pourrions visiter tous les recoins car il s'agit d'un monumental réseau de galeries interconnectées. Mais surtout, les cavités traversées auraient des dimensions et des formes extrêmement variées, allant du mètre au kilomètre jusqu'aux cavités géantes dont le diamètre des plus grandes serait comparable... aux dimensions de la France ! Ceci laisse envisager l'extrême quantité de surface disponible pour des échanges hydriques entre l'intérieur et l'extérieur du mur (la capacité de régulation hygrométrique d'un mur en terre est une de ses qualités premières).

Cet espace poreux peut être rempli soit par un liquide (en général de l'eau), soit par un gaz (l'air), soit par les deux. Lorsqu'il est rempli d'eau, la terre se transforme en boue. On dit alors que le milieu est saturé. Lorsque l'air et l'eau liquide sont présents simultanément dans les pores, la terre est un milieu granulaire insaturé. En l'absence d'eau, la terre ne peut se présenter sous la forme d'un solide : c'est un milieu granulaire sec. En réalité, un mur en terre, contrairement à ce que nos sens peuvent nous faire croire, n'est jamais complètement sec. A l'équilibre hydrique, la terre contient environ 2% d'humidité. Ce qui équivaut à une bouteille d'un litre par m<sup>2</sup> pour un mur en pisé de 40 cm d'épaisseur. Sans cette eau, il serait impossible de construire un mur en terre : c'est en grande partie à cette eau que le mur doit sa cohésion.

Ainsi un bloc de terre, bien que nous le percevions comme un solide cohérent à notre échelle d'observation, est un milieu « triphasique ». A l'échelle de sa microstructure, ce matériau est composé d'une phase solide (les grains), d'une phase liquide (l'eau) et d'une phase gazeuse (l'air).

---

<sup>1</sup> 1 mètre = 1000 millimètres , 1 millimètres = 1000 micromètres, 1 micromètres = 1000 nanomètres



## La terre, le béton et le château de sable

Van Damme, Pellenq, Delville 1998 [21], Pellenq, Van Damme 2004 [18]

Le béton est différent du matériau terre. A partir d'un mélange d'eau, de granulats et de ciment se forme un matériau bien plus résistant. La différence provient principalement de la prise du ciment : le ciment réagit chimiquement avec l'eau pour former de nouveaux composants. Qu'est ce qui fait tenir le béton ? Quelle est la nature de sa cohésion ? Jusqu'à une époque très récente, une hypothèse courante était qu'il se formait des liaisons iono-covalentes très fortes et à très courte portée, comme dans un cristal. Pour un non spécialiste, c'est cette conception qui prédomine : le béton devient solide, c'est-à-dire chimiquement lié. En fait, il n'en est rien. En observant la microstructure à l'échelle micro- et nanoscopique, on découvre que la continuité de la phase solide est interrompue presque partout par des molécules d'eau ou des films d'eau liquide. Ainsi le béton mis en œuvre ressemble beaucoup plus au matériau terre qu'on peut intuitivement le croire. Il est, lui aussi, un matériau granulaire divisé. A fortiori, dans le béton, comme dans la terre, l'eau (ou plus précisément la solution aqueuse) joue un rôle prépondérant, et s'il était possible de retirer toute l'eau contenue dans un mur en béton, il serait réduit à l'état de poudre. Plus surprenant : si l'on broie une pâte de ciment durcie et que l'on compacte ensuite la poudre obtenue, on reforme un solide cohérent qui, à porosité égale, possède la même résistance que la pâte initiale<sup>1</sup> (ce qui serait impossible s'il s'agissait de liaisons iono-covalentes).

L'étude des milieux granulaires humides est encore plus récente que celle des milieux granulaires secs. En 1997, une équipe de recherche publiait un article très sérieux intitulé : « What keeps sandcastles standing » ([Hornbaker, Albert, Albert, Barabási, Schiffer, 1997 [74]). Le château de sable doit sa cohésion à de petits ponts liquides qui se forment entre les grains. On voit donc qu'entre le château de sable, un mur en béton et un mur en pisé se dessinent des problématiques communes.

---

<sup>1</sup> Sereda P.J., Feldman, Ramachandran V.S., 7<sup>e</sup> Congrès International de Chimie du Ciment, Vol 1, Rapports principaux, Paris, 1980

## Les diverses classifications des constituants de la terre

### L'analyse granulométrique

C'est la diversité de taille des grains qui constituent la terre qui permet à l'analyse granulométrique de les classer en catégories distinctes. A chaque type de grain correspond une fourchette de dimensions. Ainsi on a :

- Les cailloux, dont la taille varie de 2 cm à 20 cm
- Les graviers, de 2 mm à 2 cm
- Le sable, de 60 microns à 2 mm
- Les silts (ou limons), de 2 microns à 60 microns
- Les argiles, inférieures à 2 microns



*Les constituants de la terre : cailloux (de 2 à 20 cm) - graviers (de 2 mm à 2 cm) - sable (de 60 microns à 2 mm) - silts (de 2 microns à 60 microns) - argiles (inférieur à 2microns)*



**MANIPULATION 1 :** Il est possible de séparer les constituants de la terre à l'aide de tamis. On peut alors classer les grains par catégories de taille.

## La terre n'est pas de l'argile



Le squelette granulaire de la terre à pisé représente environ 85% de sa masse pondérale.

Le non spécialiste adopte une classification plus minimaliste puisqu'il va jusqu'à effacer le squelette granulaire de la terre (qui représente pourtant environ 85% de la masse pondérale du tout dans le cas de la terre à pisé) et confond généralement la terre avec l'argile, conception erronée qui vient sans doute d'un amalgame entre la poterie et la construction en terre. On aurait préféré une autre conception erronée visant à assimiler la terre à du « sable dont la distribution de taille de grains est très étalée ».

## L'argile et les autres grains

Une autre manière de classer ces grains consiste à les séparer en deux catégories : les 4 premiers types de grains (du caillou au silt) constituent le premier ensemble et les argiles constituent le deuxième ensemble. Pour le spécialiste en minéralogie, les premiers sont les minéraux inaltérés et les autres, les minéraux altérés. Pour le physicien, les premiers constituent le squelette granulaire et les autres, la matrice argileuse. Cette autre manière de classer les grains est intéressante à plusieurs niveaux. Les cailloux, les graviers, les sables et les silts ne diffèrent que par leurs tailles. Les argiles, au-delà de leur taille microscopique, révèlent un ensemble de spécificités qui les différencient des autres grains.

### Différence d'aspect et de couleur

Tous ces grains peuvent être séparés selon leur taille à l'aide de tamis. Pour correctement effectuer cette séparation, il faut réaliser un tamisage par voie humide (manipulation 2). Une fois que les grains ont été suffisamment nettoyés pour les libérer de leur gangue d'argile, on observe une différence nette de couleur entre les minéraux altérés et les argiles.



*Les graviers de la terre à pisé révèlent une grande diversité de couleurs.*



**MANIPULATION 2 :** Le tamisage par voie humide permet d'observer les couleurs des grains. Des cailloux aux sables fins, les couleurs sont très diverses. Le pot d'argile ressemble à une pâte marron foncée

Le contraste entre l'homogénéité marron de la terre brute et ces grains nettoyés est saisissant. Les cailloux de la terre à pisé révèle une grande diversité de couleurs : noir, blanc, rouge, vert, bruns, violet, etc. On retrouve toutes ces couleurs en observant les graviers mais aussi le sable et le silt. Du silt aux cailloux, seules les dimensions changent. Cet ensemble de grains est essentiellement composé de fragments de roches arrondis qui ne se différencient que par leurs tailles.

Le récipient d'argile est sensiblement différent. Il ressemble à une pâte de couleur homogène marron foncée. Les particules minérales qui en résultent sont si fines qu'elles se présentent sous la forme d'une pâte, d'une « sorte de colle » que l'on nomme argile. On a donné le nom de colloïde (du grec *kolla*, colle, et *eidos*, sorte de) aux substances qui, comme l'argile, ont cet aspect collant et d'autres propriétés colloïdales.

### Différence minéralogique

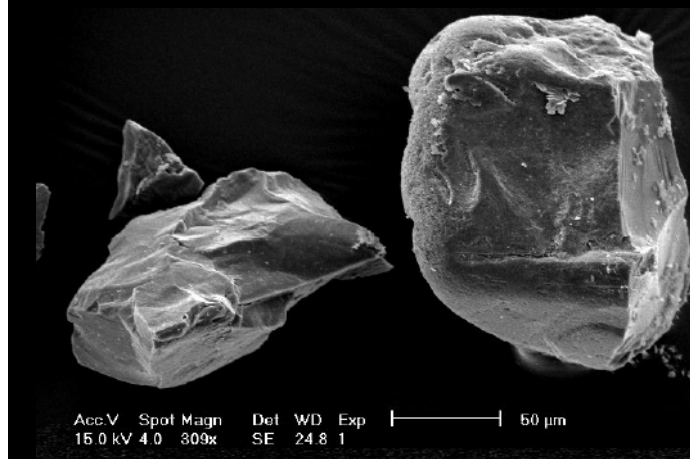
Tous ces grains proviennent de l'altération (destruction par des agents tels que l'eau, l'air, le vent, le gel, etc.) physique et chimique des roches. Les silts, les sables et les graviers proviennent de la désagrégation physique de la roche : ils n'ont pas subi d'altération chimique. Ce qui signifie que ces minéraux se trouvaient dans la « roche-mère », et qu'ils en ont été exclus mécaniquement. On les classe donc dans la catégorie des minéraux inaltérés. Ils sont majoritairement constitués de quartz, minéral qui résiste bien à l'altération chimique ou mécanique (voir schéma page de droite).

Les argiles, par contre, proviennent de minéraux de la roche qui ont été altérés (modifiés) chimiquement. Elles ne se trouvaient pas « en état » au sein de la roche-mère. Par exemple, l'altération du feldspath du granite peut produire de la kaolinite (argile du potier). Par ailleurs, ce que l'analyse granulométrique classe dans la fraction argile représente une grande diversité d'espèces minéralogiques. Il existe plusieurs sortes d'argiles et plusieurs types d'argile sont en général présents dans une même terre. Elles sont souvent mélangées à des débris de quartz très fins (1 à 2 microns), de la silice plus ou moins hydratée, des oxydes de fer et d'alumine colloïdaux, des cristaux de calcaire très fins (moins de 2 microns). Tout cet ensemble constitue les colloïdes minéraux.

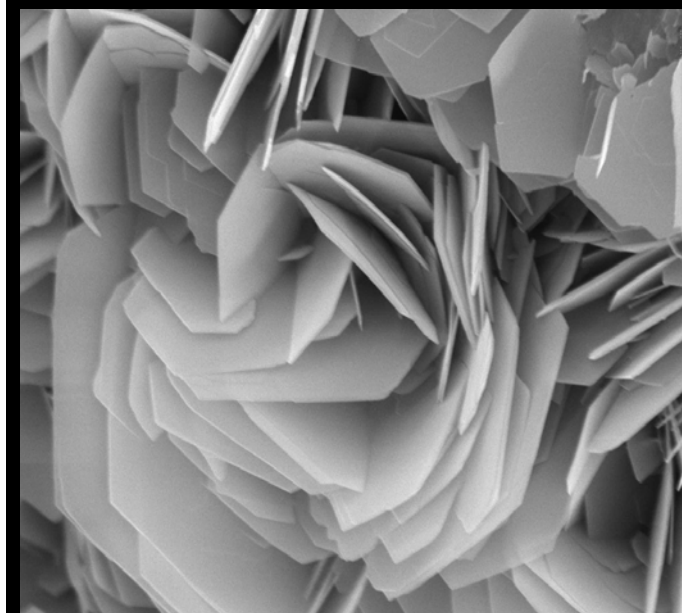
### Différence de forme

Les cailloux, les graviers, le sable et le silt sont des grains à morphologie sphéroïdale, plus ou moins anguleux selon leur « histoire ».

Les argiles sont des particules à faciès lamellaire. Cette spécificité de forme, allée à leur taille microscopique, les conduit à exhiber une surface très grande par rapport à leur masse. La « surface spécifique » d'une particule désigne ce rapport surface/masse. Cette notion est fondamentale, puisqu'à mesure qu'une particule diminue, ce sont ses propriétés de surface qui prennent le dessus. La manipulation 3 illustre bien cette idée. Une boule de polystyrène dans un flux d'air créé par un sèche-cheveux reste en « lévitation » à une certaine hauteur (la boule est emprisonnée par le flux d'air car dès qu'elle se déplace sur un côté, l'air s'écoule plus vite de l'autre créant une dépression qui ramène la balle au centre du flux). Cette hauteur de lévitation dépend de la taille de la boule. Les boules sont toutes en polystyrène et ont la même masse volumique. L'équilibre des forces est dû d'une part à la gravité, qui dépend de la masse de la boule, et d'autre part à une pression qui s'exerce en surface. Si les petites boules restent en lévitation plus haut que les grosses, c'est parce que leur surface spécifique est plus grande.



*Les sables et les silts sont de forme plus ou moins sphérique.*  
© CRATerre

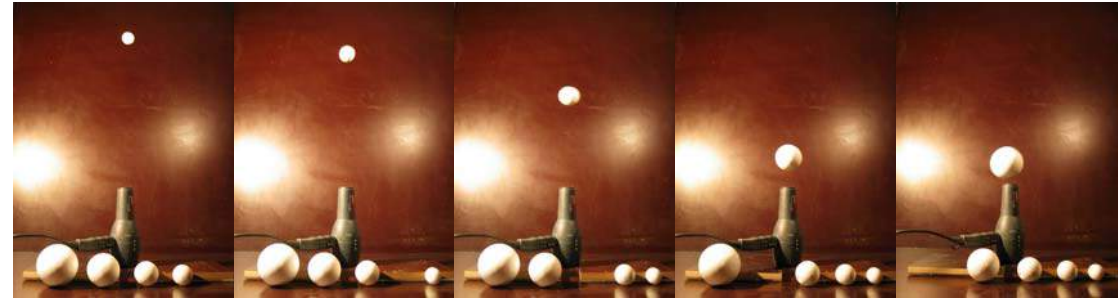


*Les argiles sont des particules à faciès lamellaire.*  
© Hydrasa UMR CNRS 6532

diamant	10
corindon	9
topaze	8
quartz	7
orthose	6
apatite	5
fluorine	4
calcite	3
gypse	2
talc	1

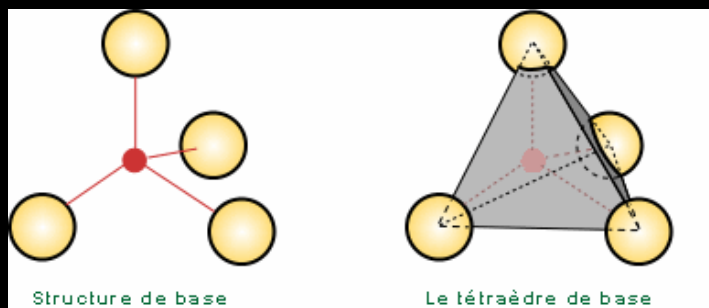
↑ augmentation de la dureté

*Dureté relative de différents minéraux (échelle de Mohs). Le quartz, par son abondance dans les roches et sa grande dureté, est un des principaux constituants du sable (Ayer, Bonifazi, Lapaire, 2002 [25]).*



**MANIPULATION 3 :** Emprisonnée dans un flux d'air, une boule de polystyrène « lévite » à une certaine hauteur. Cette hauteur dépend de la surface spécifique (rapport surface/masse) de la boule. A mesure que la taille de la boule diminue, sa surface spécifique augmente, et les interactions de surfaces l'emportent sur la gravité.

L'enveloppe d'un grain est le siège de toutes les interactions se produisant avec le milieu environnant (interactions avec l'eau, l'air ou les autres grains). Une seule force dépend de la masse de la particule : la gravité. Or construire, c'est s'opposer à la gravité. Cette idée est récurrente lorsqu'on s'attache à comprendre les mécanismes de cohésion des matériaux granulaires (du château de sable au béton en passant par le mur en terre). Au sein de la matière divisée, plus les particules sont fines, plus les interactions de surface ont des chances d'avoir le dessus sur la gravité. Le mot « colloïde », qui fait référence à la fois aux dimensions microscopiques des particules et au pouvoir collant de la matière, prend tout son sens. Ainsi, paradoxalement, dans la matière en grain, « la division fait la force » (Lassagne S&V 2004 [161]).



*Ce tétraèdre composé de 4 atomes d'oxygène et d'un petit atome de silicium en son centre est la brique élémentaire de tous les silicates (argiles et sables compris). © Bourque*

### Différence de composition chimique

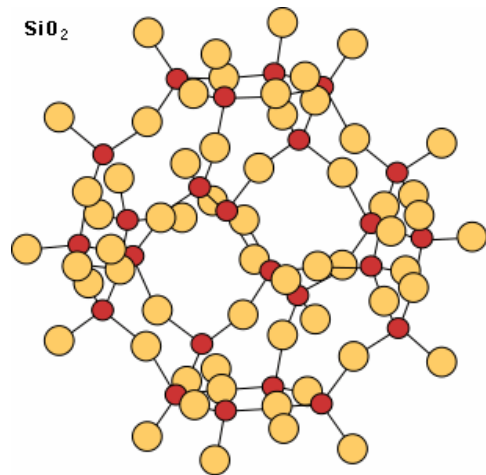
Bourque 1997 [228]

Deux éléments chimiques seulement, le silicium Si et l'oxygène O, comptent pour près des trois quarts (pourcentage massique : 74,3%<sup>1</sup>) de l'ensemble des matériaux de la croûte terrestre. Il n'est donc pas surprenant qu'un groupe de minéraux composés fondamentalement de Si et O avec un certain nombre d'autres ions, et nommés silicates, compose à lui seul 95%<sup>2</sup> du volume de la croûte terrestre. Lors de la formation de la terre, les éléments légers, comme l'oxygène et le silicium ont migré vers l'extérieur, alors que les éléments plus lourds, comme le fer, se sont concentrés au centre. Les graviers, le sable et le silt, la plupart du temps, sont des silicates (le quartz est un silicate). Les argiles font partie de la famille des phyllosilicates (du grec *phullon* « qui a l'aspect de feuille »). Tous les silicates possèdent une structure de base composée des ions Si<sup>4+</sup> et O<sup>2-</sup> (schéma de gauche).

<sup>1</sup> source : <http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/princ.mineraux.html>

<sup>2</sup> source : <http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/princ.mineraux.html>

Si on relie les centres des oxygènes, on obtient un volume qui forme un tétraèdre, le tétraèdre de base (schéma de droite). Le silicium occupe le centre du tétraèdre. Le calcul des charges électriques montre qu'un tétraèdre est chargé négativement. Ce tétraèdre est la brique élémentaire de la structure atomique de nos grains et de nos argiles.



Dans le cas du quartz, tous les coins des tétraèdres sont liés entre eux par leurs oxygènes pour former un réseau tridimensionnel. Cette structure comprend un ion silicium Si<sup>4+</sup> pour deux ions O<sup>2-</sup> : SiO<sub>2</sub>. Elle est électriquement neutre.

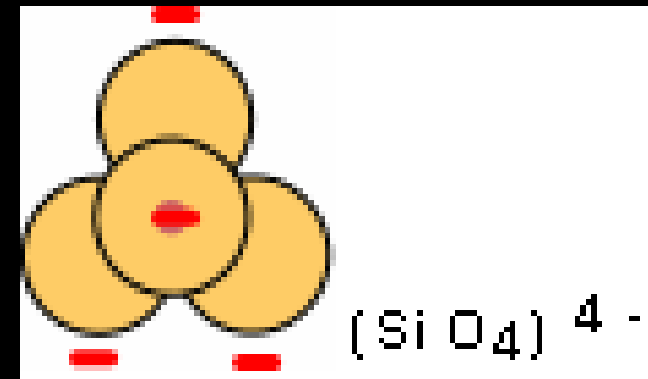
Structure du quartz (SiO<sub>2</sub>) © Bourque

Pour les argiles, la situation est beaucoup plus complexe et les structures sont multiples et variées. Les éléments, au lieu de se répartir selon des structures en trois dimensions, se structurent selon des plans. Nos tétraèdres s'assemblent pour former une « couche tétraédrique » associée à d'autres structures planes (« couche octaédrique ») qui viennent « s'empiler » par-dessus. Souvent les structures lamellaires obtenues ne sont pas électriquement neutres : les surfaces sont généralement chargées.

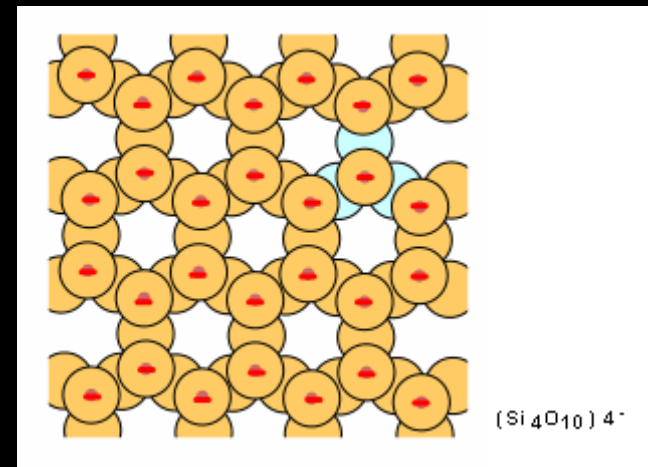
#### Différence de comportements physiques et mécaniques

L'argile présente des caractéristiques physiques et mécaniques très différentes des autres grains minéraux. Elle passe d'un comportement plastique (ou élasto-plastique) à un comportement (quasi-) fragile lorsque sa teneur en eau diminue. Le silt, le sable et les graviers sont constitués de matériaux rigides avec un comportement élastique linéaire (le module élastique d'un grain de quartz est compris entre 50 et 80 GPa) – Fontaine 2005 [3].

Tout se passe comme s'il y avait deux systèmes de référence : d'une part, l'empilement granulaire (quasi-)rigide, qui se désature nécessairement si on réduit le potentiel chimique de l'eau et, d'autre part, le gel colloïdal infiniment déformable qui ne fait que se contracter en expulsant de l'eau libre (Van Damme 2001 [11]).



Ce tétraèdre est chargé négativement. © Bourque



Couche tétraédrique des feuillettes d'argile vue de dessus. © Bourque



*Terres de la régions : terre à pisé marron, terre rouge du Royan, limons noirs de bords d'Isère, terre blanche utilisée pour la commercialisation de sables et de graviers de différentes granularités.*



*Ensemble de terres dont les grains ont été classés par catégories de tailles.*

## Un ensemble de grains

L'argile, à l'échelle macroscopique, apparaît comme une boue, une pâte ou un matériau solide au fur et à mesure que sa teneur en eau diminue. Si on regarde cette matière de plus près, on s'aperçoit qu'elle est constituée d'un ensemble de particules solides dispersés dans l'eau. Même à l'état solide, les particules sont reliées entre elles par de petits ponts liquides (les ponts capillaires). Il s'agit donc d'une « dispersion colloïdale ». La peinture est un autre exemple de dispersion colloïdale, dans laquelle un ensemble de particules solides (les pigments) est dispersé dans une phase liquide (comme une boue argileuse, la peinture peut passer de l'état liquide à l'état solide en séchant). Ainsi, la matrice argileuse peut apparaître comme un ensemble de grains microscopiques mélangés à l'eau. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de la kaolinite, constitués de particules faiblement chargées, suffisamment épaisses pour être assimilées à des « grains plats » (le rapport entre leur épaisseur et leurs dimensions latérales est semblable à celui d'une pièce de monnaie). En l'absence de charges de surface, un tel matériau doit sa cohésion essentiellement aux forces capillaires de l'eau, comme un château de sable. Dans le cas des argiles dites « gonflantes », la question est plus complexe, tant le concept de milieu granulaire est éloigné de la vision des mélanges argile-eau qui sert de support aux raisonnements dans ce domaine (Van Damme 2001 [11]).

## Une grande diversité de sols

D'une terre à l'autre, la proportion des différentes classes de grains varient. Ces variations de proportion impliquent des propriétés physiques et mécaniques différentes ainsi que des usages diversifiés. Dans la terre à pisé, toute la gamme de grains est représentée de manière relativement équilibrée. Mise en œuvre à l'état humide, elle permet d'obtenir un matériau résistant grâce à la grande hétérogénéité de taille de grain à laquelle elle doit la compacité et la rigidité de son squelette granulaire. La terre rouge du Royans est très sableuse et sans graviers. C'est une terre particulièrement adaptée pour les enduits intérieurs, facile à mettre en œuvre et qui ne fissure pas. La terre noire des bords d'Isère est essentiellement silteuse (limons déposés le long du fleuve). Elle n'est pas utilisée pour la construction, puisqu'elle manque à la fois d'un squelette rigide et de cohésion.

Pour comprendre cette diversité de sols, il faut se pencher sur l'histoire de ces grains, la manière dont ils ont été formés et sur leurs origines physiques et géographiques.



## ***2 – Histoire de grains voyageurs***



Ayer, Bonifazi, Lapaire, 2003 [25], Boulvain 2004 [227]

## L'usure du temps

Contrairement à ce que laisse penser l'expression « solide comme un roc », les roches qui se trouvent à la surface de la terre ne sont pas inaltérables. Chaque jour, elles subissent l'usure du temps, la nature mettant en œuvre de multiples processus destinés à les ronger, les casser, les dissoudre et les mettre en miettes. Ce sont de ces miettes que proviennent nos grains. Ces mécanismes, qui se placent sur une échelle de temps trop vaste pour être perceptible par l'homme, sont appelés « processus d'altération des roches ». A l'air libre (ou presque), une roche se trouve dans un environnement hostile : elle doit faire face à un ensemble d'agressions chimiques, mécaniques et biologiques, auxquelles participent l'eau, l'air, le vent, la pluie, la glace, les plantes, les animaux, et plus récemment les hommes.

## L'altération physique

On distingue plusieurs processus d'altération physique.

Les alternances de gel-dégel, en climat humide, fragmentent les roches. L'eau, qui s'infiltre dans les fissures, augmente de volume en gelant. Elle agit comme un coin et fait éclater les roches.

Dans les zones désertiques, un phénomène analogue se produit mais cette fois lié aux fortes variations de températures entre le jour et la nuit (dans le Sahara, les écarts de températures journaliers sont de l'ordre de 40 à 50°C). Au sein de la roche, certains minéraux se dilatent beaucoup plus que d'autres, d'où l'apparition de fractures.

Une roche enfouie dans les entrailles de la terre peut un jour se retrouver proche de la surface, en particulier lorsque les formations qui la recouvraient se trouvent emportées par l'érosion. En profondeur, cette roche subissait une pression importante. A mesure qu'elle se rapproche de la surface, cette pression disparaît. Par un phénomène de décompression, la roche se fracture. Des joints de décompressions se développent progressivement dans des plans parallèles à la surface.

Enfin, la glace, l'air et l'eau lorsqu'ils sont en mouvement, érodent les roches. En montagne, les mouvements lents et immuables des glaciers agissent comme un gigantesque rabot qui réduit les roches en poudre. Les torrents, les rivières et les fleuves, spécialement en période de crues, déploient une grande énergie qui peut arracher d'importantes quantités de particules minérales. En bord de mer, l'action répétée des vagues fait reculer les falaises. Sous l'action du vent, les particules en suspension dans l'air agissent comme un véritable souffle abrasif (le sable est ainsi à la fois agent et produit d'érosion).



*L'action du gel fragmente les roches*

## L'altération biologique

Les plantes et les animaux contribuent aussi à la destruction des roches. On distingue l'altération chimique de composés produits par des organismes (plantes, microbes, etc.) de l'action purement mécanique de plantes ou d'animaux (par exemple, les plantes enfoncent leurs racines dans les moindres fissures et les élargissent jusqu'à fragmenter la roche). L'ingestion de matériaux par des animaux vivants dans les sols est un processus faisant intervenir en même temps les deux types de mécanismes.

## L'altération chimique

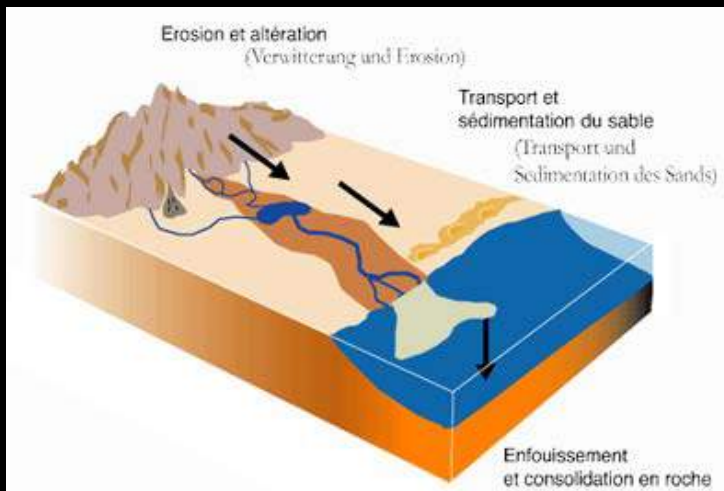
L'eau et l'air sont les vecteurs des réactions impliquées dans l'altération chimique. Ce processus conduit d'une part à dissoudre partiellement les roches, et d'autre part à transformer certains minéraux en de nouvelles espèces minérales (les argiles en particulier). Le granite, par exemple, est une roche composée de cristaux de quartz, de mica et surtout de feldspath. En contact avec l'eau, les feldspaths sont en partie dissous pour former de la silice en solution et de nouveaux minéraux argileux, comme la kaolinite. Cette transformation fragilise le granite et favorise son érosion. Les quartz, au contraire, sont des cristaux stables qui résistent très bien à l'altération chimique (le quartz est un constituant majeur des sables et des silts). L'eau, en particulier s'il s'agit d'une solution acide, dissout très facilement les roches calcaires. Ainsi, l'altération de composés calcaires ne conduira pas à la création de sédiments détritiques, mais plutôt à la mise en solution d'ions calcaires dans l'eau. Les principales réactions mises en jeu par l'altération chimique sont :

- La mise en solution : les minéraux sont complètement dissous et mis en solution sous forme d'ions.
- L'hydratation : un minéral et de l'eau forme une nouvelle espèce hydratée. La déshydratation est le processus inverse : un minéral forme une nouvelle espèce plus de l'eau.
- L'hydrolyse : une solution acide détruit le minéral. Dans ce cas, soit la mise en solution est complète, soit une nouvelle espèce minérale est formée.
- L'oxydation-réduction : le processus d'oxydation le plus connu est la transformation de  $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$ .
- Les réactions impliquant la matière organique : par exemple, l'oxydation de la matière organique produit de l'eau et du  $\text{CO}_2$ , solution acide qui est impliquée dans les réactions de mises en solutions.

Notons pour finir que les activités humaines et leur développement incessant jouent un rôle de plus en plus marqué dans les phénomènes d'altération. Les pluies acides engendrées par la pollution favorisent la dégradation chimique dont les effets néfastes sont visibles sur les monuments historiques. La déforestation accélère l'érosion des sols et expose plus vite la roche aux intempéries. Enfin, l'action la plus directe est l'extraction des pierres pour la construction des routes et des bâtiments.

Sédiments meubles	Sédiments indurés
Gravier	Conglomérat, brèche
Sable	Grès
Silt	Siltite
Argile	Argilite

Correspondance entre sédiments meubles et indurés.  
Boulvain 2004 [227]



Le cycle des grains de la roche à la roche sédimentaire en 4 étapes : altération, transport, dépôt, diagenèse. © Ayer, Bonifazi, Lapaire, 2003 [25]

## Le cycle des grains

Ainsi, le sable, les limons, les argiles proviennent des roches. Cette vision des choses est toutefois insuffisante. Les roches ne sont pas seulement l'origine des grains. Elles sont aussi leur destinée : les grains, après un long voyage, reforment une roche. Par exemple, les grains de sables, en s'agglomérant, peuvent former du grès. De même, les argiles peuvent former une roche appelée l'argilite, les silts peuvent former la siltite et les graviers peuvent former des conglomérats. On appelle diagenèse l'ensemble des phénomènes par lequel ces grains (sédiments) reforment une roche (roches sédimentaires).

Ainsi, sable et autres grains sont éphémères, ils ne constituent qu'un état transitoire de la matière minérale. Ils font partie d'un grand cycle de transformation qui se répète inlassablement.

Ce cycle comprend 4 grandes étapes :

- L'altération
- Le transport
- Le dépôt
- La diagenèse

L'altération, comme indiqué précédemment, est la destruction des roches par désagrégation physique et décomposition chimique, voire biologique. Elle donne naissance à une grande variété de produits : sols, débris rocheux, ions en solution. Le transport est le déplacement de ces produits vers les zones de dépôts. Dans ces zones, les sédiments, en s'enfonçant plus profondément dans la terre à mesure que de nouvelles couches de sédiments les recouvrent, reforment des roches par un ensemble de processus appelé la diagenèse.

## Le transport

Une fois libérés de leur matrice rocheuse, certains grains débutent un long voyage. Les cours d'eau, le vent et les glaciers sont les principaux agents de transport des particules. Il existe d'autres modes de déplacements, dus à la gravité : c'est le cas des glissements de terrain, des éboulements dans les zones montagneuses ou des avalanches sous-marines. Ces processus peuvent déplacer des masses considérables de sols et débris rocheux sur des distances courtes (de l'ordre du kilomètre). En 1881, dans le village de Elm en Suisse, environ un million de m<sup>3</sup> de roches s'est détaché d'une paroi, formant après une chute de 450 mètres un manteau de débris de 10 à 20 mètres d'épaisseur sur 3km<sup>2</sup>. (Boulvain 2004 [227][226]). Au-delà de l'énorme quantité de matière mise en jeu, l'impact sédimentaire de ce type de processus est important, car il met les matériaux mobilisés à la disposition du système fluvial.

Le mode et la durée de transport jouent un rôle important dans la typologie des dépôts. En premier lieu, ils modifient la forme et la taille des grains. Plus le voyage sera long et plus les grains auront une forme arrondie. En second lieu, les différents modes de transport trient plus ou moins les grains par catégories de tailles.

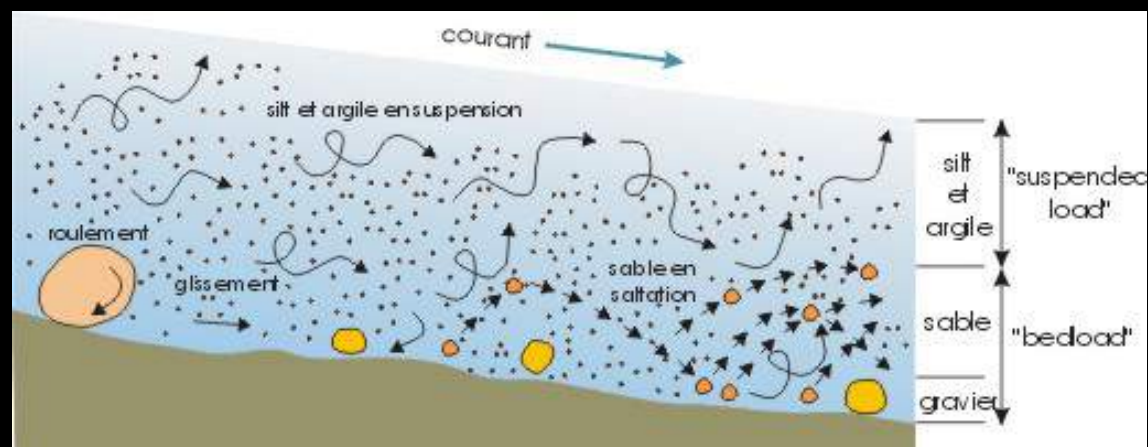
Le transport par les glaciers est caractérisé par un déplacement des particules lent et peu sélectif. Les sédiments ainsi formés, appelés moraines, présentent des tailles très diverses, allant de la particule argileuse au bloc de plusieurs mètres, en passant par des sables d'une grande diversité granulométrique. On dit de ce type de dépôt hétérogène qu'il est mal trié, ou encore fortement polydispersé.

Les cours d'eau entraînent différents types de transport selon le régime d'écoulement. En régime torrentiel ou lors de fortes crues, l'écoulement est dit turbulent. Les particules sont fortement chahutées et s'entrechoquent. Lorsque le régime est plus calme, il est dit laminaire. Les grains adoptent plusieurs types de déplacement en fonction de leurs tailles. Les particules les plus fines (silt et argiles) sont transportées en suspension dans l'eau. Les grains de sable se déplacent en rebondissant sur le fond de la rivière (saltation). Et les plus gros grains (graviers, galets) roulent sur le fond. Le transport des particules va dépendre de l'énergie du courant. Cette énergie dépend du débit et de la vitesse. Une partie de l'énergie est utilisée pour éroder, une partie est consommée par les frottements internes entre les filets d'eau (surtout en régime turbulent) et le surplus est disponible pour éroder. Si l'énergie totale est insuffisante pour le transport et les frottements, le cours d'eau non seulement ne peut pas éroder, mais il dépose une partie de sa charge.

Les vagues agissent aussi comme agent de transport. A faible profondeur, elles remuent, trient et déplacent les grains de sable au gré des courants.



Vue d'avion du fleuve Betsiboka (Madagascar) : transport de particules jusqu'au delta © NASA  
[http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/Images/ISS008-E-19233\\_lrg.jpg](http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/Images/ISS008-E-19233_lrg.jpg)



Les différents modes de transport dans un cours d'eau : suspension (silt-argile), saltation (sable), roulement et glissement (cailloux, graviers). © Boulvain 2004 [227]

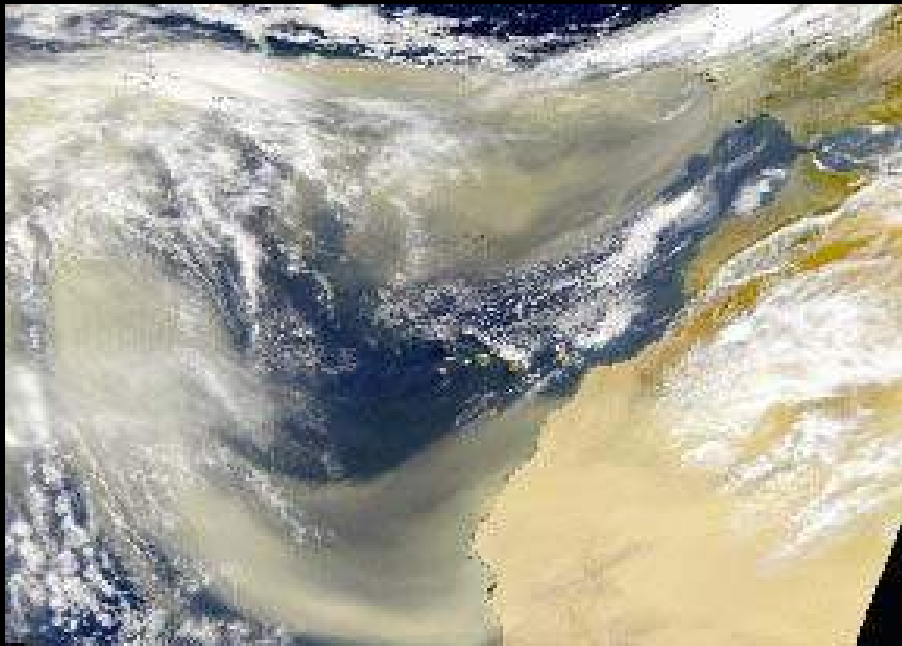


Image satellite d'un nuage de sable du Sahara au-dessus de l'Atlantique (Nord-Ouest du Maroc). © NASA <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>



Dépôt en strates dans un gré. © Bay 13  
<http://www.bay13.net/pics/desktop/morepictures/>

Le vent est un mode de transport très sélectif. Il ne transporte que les particules les plus fines. Il peut cependant les emmener très haut, très loin et en de grandes quantités (photo ci-contre) : le vent transporte annuellement près de 250 millions de tonnes de sables du Sahara à l'océan Atlantique (Ayer, Bonifazi, Lapaire, 2003 [25]). Lors de fortes tempêtes de sable, les particules fines s'élèvent dans l'atmosphère et peuvent se déplacer sur plusieurs milliers de kilomètres (jusqu'en Europe, où elles retombent au sol après les précipitations). Les grains, en suspension dans l'air, s'entrechoquent violemment : ils perdent leur éclat et leurs angles s'émoussent.

Le vent et l'eau ont en général un effet très sélectif sur la taille des grains. L'énergie du courant ou la vitesse du vent détermine si les particules se déposent ou poursuivent leur chemin.

### **Le dépôt**

Après un voyage plus ou moins long dans l'espace et dans le temps, les grains finissent par se déposer. Le dépôt des sédiments a lieu lorsque la vitesse de l'agent de transport diminue ou lorsqu'il disparaît (fonte de la glace). Dans certains cas, ce n'est qu'un repos provisoire avant un nouveau transport, mais dans d'autres cas, la mise en place est définitive et les apports successifs de sédiments vont s'empiler progressivement. La plupart du temps, le transport des grains ne se fait pas de manière continue mais de manière cyclique, au rythme des saisons, des crues, des tempêtes ou de phénomènes exceptionnels (avalanches, glissement de terrain, etc.). Les dépôts se font de manière intermittente. Les sédiments forment alors des couches appelées strates. Les zones de dépôts les plus courantes peuvent se classer en fonction du mode de transport qui les a précédé.

#### **Les dépôts d'origine gravitaire**

Le transport par gravité engendre des dépôts très hétérogènes où le tri est quasi inexistant. Dans les montagnes, les cônes d'éboulis représentent des accumulations parfois importantes de sédiments détritiques. Ces formations sont liées à l'instabilité des terrains en pente.

#### **Les dépôts d'origine éolienne**

Les formations les plus importantes déposées par le vent sont les loess et les déserts. Dans ce type de dépôt, les grains sont fins et très bien triés.

#### **Les loess**

Les loess sont des sédiments sableux très fins qui recouvrent certaines régions sur plusieurs centaines de kilomètres carrés. On estime que les loess occupent près de 10% de la surface terrestre ! Dans le nord-ouest de la Chine notamment, certains dépôts atteignent plus de 300 m d'épaisseur (Ayer, Bonifazi, Lapaire, 2003 [25]). Les loess sont présents également dans certaines régions d'Amérique du Nord et en Hongrie. Les scientifiques attribuent une origine éolienne à ces accumulations. Au Quaternaire, durant les périodes glaciaires et interglaciaires, lorsque d'immenses étendues rocheuses dénudées et de vastes moraines étaient exposées à l'action des vents, des poussières auraient été dispersées sur de grandes surfaces créant ces dépôts. Les loess forment aujourd'hui des terres légères et très fertiles. Par contre, leur grande friabilité les rend très vulnérables à l'érosion.

### Les déserts de sable

Les déserts représentent les plus grandes accumulations de sable sur les continents. Les exemples les plus prestigieux sont le désert du Sahara, le désert de Gobi, du Kalahari ou encore du Namib. A l'échelle de la planète, la plupart des déserts chauds se situent dans les hémisphères nord et sud (entre 30° et 50° de latitude) où soufflent des vents dominants chauds et secs. Leur déficit en humidité est lié soit à la présence trop lointaine de l'océan, soit à l'effet barrage d'une chaîne de montagnes voisine. On trouve également des déserts près des pôles, mais ces derniers sont exclusivement pierreux. L'aridité de ces milieux favorise le vent comme agent de transport et d'érosion. Celui-ci va donc créer deux types de paysages selon qu'il enlève ou dépose le sable fin. Le vent soufflant sur une surface désertique balaie les particules les plus fines. Cette « déflation éolienne » élimine la fraction la plus fine laissant sur place un désert pavé de pierre. A l'inverse, aux endroits où le vent dépose le sable, les accumulations prennent la forme de dunes et forment les déserts de sable. Le sable des déserts est donc particulièrement fin et bien trié, presque exclusivement formé de grains de quartz, un des seuls minéraux à résister à l'usure du vent. La couleur dominante souvent brun-rouge des sables désertiques est liée à la présence d'oxydes, en très faible quantité, comme l'hématite et la limonite, formés par la lente altération des minéraux ferreux.

### Les dépôts d'origine glaciaire

#### Les moraines

Dans les régions d'altitude, les principaux milieux sableux sont représentés par les moraines des glaciers. Ces grains souvent mal triés ont une répartition actuelle relativement faible. Leur importance a été beaucoup plus grande dans le passé lorsque, durant les différentes périodes glaciaires du Quaternaire, une bonne partie de l'hémisphère nord était emprisonnée sous les glaces. De grandes quantités de grains de toutes tailles (de la particule argileuse au bloc de plusieurs mètres) et d'autres matériaux détritiques d'origine glaciaire ont été déposées durant ces périodes froides sur de vastes superficies en Europe et en Amérique du Nord. Ces moraines fossiles et les dépôts fluvio-glaciaires associés recouvrent aujourd'hui la quasi totalité du Plateau suisse, le pied du Jura et le bassin du Bas Dauphiné, avec localement des épaisseurs pouvant atteindre 10 m. Ces témoins du passé récent de notre région sont du reste exploités comme matériau de construction.

### Les dépôts d'origine fluviale

Au sein d'un réseau fluvial, on distingue plusieurs zones de dépôts.

#### Les berges

Selon l'importance du cours d'eau et des conditions climatiques et géologiques, les rivières et les fleuves peuvent héberger localement de grandes quantités de grains fins et bien triés. Sur les berges se déposent généralement les particules en suspension dans l'eau qui sont le plus proche de la surface, ce qui explique ce tri.

Les lacs

Les lacs peuvent constituer des bassins de sédimentation. Les dépôts qui s'y forment ont des origines très diverses et sont liés à de nombreux facteurs (climat, dimension du plan d'eau, contexte géologique et topographique, réseau hydrographique). Les lacs suisses par exemple ont pour la plupart une origine glaciaire et leur situation géographique favorise la sédimentation sableuse.

Les deltas

Les deltas se forment à l'embouchure des grands fleuves. Ceux du Mississipi et du Nil s'étalent sur des milliers de kilomètres carrés. Ces éventails gigantesques sont en croissance continue tant que le fleuve apporte des quantités importantes d'alluvions. Le delta gagne alors du terrain sur l'océan et son avancée peut atteindre dans certains cas plus de 100 mètres par an. Quand les apports sont insuffisants et que les courants marins sont vigoureux, c'est la mer qui prend le dessus et le delta se transforme en estuaire.

Les dépôts d'origine marine et océaniqueLes plages

Les sables de plage sont généralement bien triés par l'action des vagues qui concentrent les grains selon leur densité. Ils proviennent de deux sources principales : l'apport continental des cours d'eau et les débris d'origine organique rejetés par les courants marins. On observe parfois, dans les zones internes des plages, des dunes côtières qui se forment par l'accumulation de sable soufflé par le vent. Certaines d'entre elles atteignent plus de cent mètres de haut comme la dune du Pila en France située sur le littoral Atlantique.

Les fonds marins

En milieu marin, les apports sont souvent importants et surtout relativement constants sur une longue durée. Le bassin sédimentaire est le lieu dans lequel s'organisent ces dépôts. Le taux d'accumulation des sédiments dans ces zones est très important. Ses dimensions se chiffrent par plusieurs dizaines de kilomètres carrés. L'empilement progressif des différentes couches entraîne une surcharge sur le fond marin qui s'enfoncé progressivement. Ce réajustement de la croûte terrestre, appelé subsidence, retarde le remplissage définitif du bassin et permet ainsi de plus grandes accumulations.

La topographie des fonds marins est parfois aussi accidentée que celle des continents, avec la présence de larges canyons sous-marins qui entaillent le plancher océanique ainsi que des talus abrupts (photo ci-contre).

Dans ces cas, les sédiments amenés par les grands fleuves s'accumulent aux abords de ces dépressions et, à partir d'un certain seuil, ils se mettent subitement en mouvement. Ils forment alors de gigantesques avalanches de sable et de boue qui dévalent vers la plaine abyssale.

Ces zones de subsidence sont les lieux privilégiés de la métamorphose des sédiments en roche.



La topographie des fonds marins est parfois aussi accidentée que celle des continents, avec la présence de larges canyons sous-marins qui entaillent le plancher océanique ainsi que des talus abrupts. © NASA [http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect17/bahamas\\_etm.jpg](http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect17/bahamas_etm.jpg)



## **La diagenèse**

Les grains, à mesure qu'ils sont recouverts par de nouveaux dépôts, vont s'enfoncer toujours plus profondément dans la croûte terrestre. Là, la pression et la chaleur sont telles qu'ils vont être transformés en roche. C'est une fin de cycle, qui pourra recommencer un jour si la roche dure ainsi formée se retrouve à nouveau exposée à l'altération et l'érosion. Dans ce processus de reformation d'une roche à partir de sédiments il faut bien différencier la diagenèse du métamorphisme. La diagenèse conduit à la formation d'une roche sédimentaire (comme le grès) à partir de sédiments qui sont agglomérés. Les grains sont alors soudés par des mécanismes tels que la compaction (qui s'accompagne d'une expulsion d'eau) ou la cimentation. Si la roche continue sa descente dans la croûte terrestre, l'augmentation de la pression et de la chaleur va métamorphoser profondément la nature intrinsèque de la roche : la matière recristallise et les grains « disparaissent ». C'est ce qu'on appelle le métamorphisme qui conduit à la formation des roches métamorphiques (comme le granite).

### **La compaction**

Le dépôt successif de sédiments entraîne une surcharge progressive. L'augmentation de la pression est responsable d'une forte compaction du sédiment, qui consiste en une réduction, par voie physique ou chimique, de leur épaisseur originelle. La compaction mécanique correspond à une perte de porosité associée à l'expulsion de fluides par réarrangement des grains sédimentaires tandis que la compaction chimique correspond à des processus de dissolution par pression (« pression-solution »). Tous les sédiments ne réagissent pas de la même façon lors de la compaction : en d'autres termes, la réduction d'épaisseur est fonction de la composition originelle du sédiment (boue détritique, calcaire, sable, etc.), voire de l'existence d'un ciment précoce (un calcaire à ciment marin se compacte très peu, au contraire d'un sable calcaire non cimenté).

### **La cimentation**

Après une période d'accumulation de plusieurs millions d'années, les premiers sédiments déposés se retrouvent à des profondeurs importantes pouvant atteindre plusieurs kilomètres. Pour chaque kilomètre parcouru vers le bas, la température s'élève en moyenne de 30°C et la pression de plus de 200 atmosphères. A quatre kilomètres de profondeur règne déjà une température d'environ 120°C et la pression est considérable. Ces conditions extrêmes entraînent des réactions chimiques entre les grains des sédiments et l'eau contenue dans les pores. Des cristaux se forment dans les vides et cimentent les grains entre eux. La cimentation a pour conséquence la disparition progressive de la porosité.

**Exemples de diagenèse de roches sédimentaires**

Boulvain 2004 [227]

**Compaction et diagenèse d'une boue argileuse**

Une boue argileuse est constituée, lors de son dépôt, de 70 à 90% d'eau. Les parties minérales sont souvent des minéraux argileux (kaolinite, illite, smectite), de la chlorite, un peu de feldspath, de la calcite et du quartz. Son évolution comprend les étapes suivantes :

- transformation progressive de la vase argileuse en argile plastique par expulsion de l'eau interstitielle (compaction). La porosité du sédiment passe d'environ 70% à 35% à 500 m de profondeur. Des concrétions de  $\text{CaCO}_3$  et des sulfures tels  $\text{FeS}_2$  peuvent apparaître
- transformation de l'argile plastique en argile compacte : la pression et la température augmentent avec la profondeur. Vers 2000 m, l'argilite n'a plus qu'une porosité de 13% (argile compacte). Sur le plan minéralogique, il y a disparition progressive de la kaolinite au profit de l'illite et de la smectite au profit de la chlorite et de l'illite.

**Diagenèse d'un sable**

La compaction étant beaucoup moins importante dans un sable que dans une boue argileuse, son action seule est insuffisante pour transformer un sable en roche plus ou moins cohérente. La cimentation est donc le processus majeur de la formation des grès.

La silice est un ciment fréquent des grès. Suivant l'âge des grès, ce ciment peut être constitué d'opale (forme peu stable de la silice), de calcédoine ou de quartz (forme très stable). Les eaux marines sont toutefois sous-saturées en silice et ne fournissent que peu de matière à la cimentation. Restent la silice issue de la dissolution des organismes (radiolaires, diatomées, éponges) et la silice provenant de la transformation diagénétique des minéraux argileux. Ce sont deux sources majeures de silice, mais rarement associées géographiquement à des corps sableux importants (argiles, radiolaires, éponges sont plutôt associés à des faciès profonds). Il faut donc imaginer une circulation diagénétique intense pour expliquer l'existence des ciments siliceux.

Les carbonates sont également un ciment majeur des grès. Ils nécessitent quand même des flux importants d'eau diagénétique, puisque le calcul (à partir des concentrations en  $\text{CaCO}_3$  dans l'eau de mer) montre que, pour cimenter un pore, il faut faire circuler 2700 fois son volume en eau.

Un autre ciment important des grès est l'oxyde de fer. Le fer provient de l'altération des biotites, amphiboles, chlorites, etc. Comme la dissolution de ces minéraux se fait souvent dans des conditions réductrices, le fer est transporté à l'état  $\text{Fe}^{2+}$ , soluble. Il précipite à l'état d'oxyde et devient insoluble dès que le milieu devient suffisamment oxygéné. Une fois sous forme d'oxyde, le fer est très peu affecté par la diagenèse.

## La formation des paysages

Ainsi sur terre, tout se transforme, tout se déplace. Les grains se transforment en roches, les roches se transforment en grains et parfois en d'autres roches plus résistantes. Ce qui est aujourd'hui au-dessus se retrouvera un jour au-dessous, ce qui est au-dessous se trouvera au-dessus. Ce mouvement perpétuel engendre deux mécanismes majeurs de transformation. Vers le bas (l'intérieur de la croûte terrestre), la pression et la chaleur forment les roches. Vers le haut (la surface), le climat, le vent, l'eau, l'air, la pluie, la glace, les plantes et les animaux produisent des grains et les déplacent. Les paysages sont le fruit de l'ensemble de ces processus géologiques. Voici quelques exemples de formations.

### Les bad lands

En terrain argileux ou schisteux, après une forte pluie, les eaux empruntent les fissures du sol, les élargissent progressivement en chenaux parallèles qui fusionnent par écroulement des crêtes qui les séparent. En même temps, les têtes des chenaux reculent vers l'amont. Ce processus est responsable de la formation des "bad lands".

Photo ci-contre

© <http://pangea.stanford.edu/~zpzhang/photos/200410010903-Badlands.jpg>

### Les cheminées de fées

Dans des dépôts très hétérogènes (*moraines*), la présence de blocs très lourds rend l'argile sur laquelle ils reposent plus compacte et la protège du ruissellement : c'est de cette façon que naissent les *cheminées de fées*. Le lien avec le pisé, où la terre est compactée, et le mur protégé, suivant l'adage, par « un bon chapeau », est marquant.

### Les chaos granitiques

Les *chaos granitiques* sont dus à la mobilisation de l'*arène* (sable issu de la désagrégation du granite), ce qui dégage les boules de granite non altéré, empilées en désordre.

Photo ci-contre © <http://docarmor.free.fr/valarmor/armimage/tregas11.jpg>



*Bad Lands*



*Cheminées de fées*



*Chaos granitique*



*Paysage ruiniforme*

#### *Paysages ruiniformes*

Les *paysages ruiniformes* se développent dans des formations hétérogènes qui présentent des différences de solubilité (dolomie-calcaire) ou de dureté (sable-grès).

Photo ci-contre

© [www.leglod.free.fr](http://www.leglod.free.fr)



*Cône de déjection*

#### *Les cônes de déjection*

Les torrents forment la partie amont des systèmes fluviaux, localisés dans des régions fortement déclives. Un torrent comprend trois parties : le bassin de réception, sorte de cirque où se rassemblent les eaux de ruissellement et où dominent les processus d'érosion ; le chenal d'écoulement, souvent étroit et à pente forte ; le cône de déjection où sont déposés les matériaux mobilisés.



*Vallée*

#### *Les gorges et les vallées*

En s'enfonçant par érosion, les cours d'eau creusent des vallées qui possèdent un profil caractéristique en "V". En terrain massif et dur (granite), la tendance est à l'enfoncement vertical (gorges).

Photo ci-contre

© [http://www.lcc.ctc.edu/departments/natural\\_sciences/pictures/pics/YELLcyn/P8040450.jpg](http://www.lcc.ctc.edu/departments/natural_sciences/pictures/pics/YELLcyn/P8040450.jpg)

### Les méandres

L'érosion fluviale est responsable de la formation des méandres. Ces méandres ont tendance à se déplacer vers l'extérieur et vers l'aval du cours d'eau par érosion sur la rive concave et dépôt sur la rive convexe.

## **Origine de la terre à pisé du Bas-Dauphiné**

Dayre 2004 [230], Ayer, Bonifazi, Lapaire, 2003 [25]

### La formation de la molasse

Il y a environ 30 millions d'années, alors que la surrection des Alpes atteignait son paroxysme, de grandes quantités de sédiments détritiques ont été formées par l'érosion de la toute jeune chaîne de montagnes. Des graviers, des sables et des argiles se sont déposés sur la bordure nord des Alpes dans une cuvette occupée temporairement par une mer peu profonde. Lorsque le bras de mer se retirait, les dépôts formaient de larges cônes deltaïques et les fleuves distribuaient les sédiments sur de grandes superficies. Ces dépôts liés à l'érosion d'une chaîne de montagne juvénile sont regroupés sous le terme de molasse. A l'origine, ce mot était utilisé en Suisse romande pour désigner des grès dans lesquels on façonnait des meules. Sur le Plateau suisse, la molasse atteint des épaisseurs de plus de 6 km. L'importance de ces sédiments diminue vers le nord au fur et mesure que l'on s'éloigne des Alpes, leur source principale. Comprise entre le Massif Central, à l'ouest, et les Préalpes, Chartreuse et Vercors, à l'Est, la région est formée par ce que les géologues appellent la «dépression molassique du Bas-Dauphiné». La dépression du Bas-Dauphiné a ainsi reçu plusieurs centaines de mètres d'alluvions. La molasse est formée principalement de grès et de conglomérats, roches constituées de galets soudés les uns aux autres. Le grès molassique est une roche qui a été largement utilisée aux siècles précédents pour la construction d'édifices religieux comme la plupart des cathédrales de Suisse romande.

### Les moraines

Depuis lors, la mer s'étant retirée de la zone et selon les alternances du climat, l'érosion des Alpes s'est poursuivie par les glaciers aux époques de refroidissement apportant de nouveaux dépôts appelés moraines. Les transports par les glaciers sont peu sélectifs. Les moraines sont donc constituées de grains de tailles très diverses.

### Le déplacement du lit de l'Isère

Aux périodes interglaciaires, le réseau fluvial participe aussi à l'érosion des Alpes et à de nouveaux apports. Dans la région du Bas-Dauphiné, l'importance des dépôts est en particulier liée au déplacement de l'Isère et de son glacier qui creuse son lit dans les molasses. Ce lit s'est déplacé du Nord vers le Sud, rejoignant le Rhône d'abord entre Vienne et Lyon, puis vers St Rambert d'Albon et aujourd'hui à Pont-de-l'Isère. Une grande quantité de matériaux alluvionnaires a ainsi été déposée sur une surface relativement étendue.



*Méandres de rivières*

### La terre à pisé

La terre à pisé est donc le fruit de l'altération de tous ces dépôts alluvionnaires : molasses du jurassique, moraines des périodes glaciaires, alluvions fluviales. Le tout « brassé » par le déplacement du lit de l'Isère sur une grande partie de la région du Bas-Dauphiné. Les sols obtenus contiennent un ensemble de grains de tailles et de types variés : argiles, silts, sables, graviers, cailloux. De tels mélanges sont très souvent propices à la confection d'excellents pisés. Comme nous le verrons par la suite, une grande hétérogénéité de taille permet d'obtenir des matériaux compacts, donc résistants. De même, la forme arrondie des grains permet, elle aussi, d'atteindre une meilleure compacité. Les grains « à facettes » favorisent les « effets de voûtes » et emprisonnent plus facilement de l'air alors que des grains ronds se laissent plus facilement réorganiser dans des configurations plus denses. Enfin, ces grains sont majoritairement constitués de quartz, minéral très dur et très résistant. Le squelette granulaire apporte ainsi une grande rigidité à l'ensemble.

### ***3 – Une matière fluide et solide à la fois***



Richter 1998 [43] – Cardon 2000 [29] – Bourdet 2005 [27]

A la fois poudre, tas, pâte, boue, brique ou mur, la terre porte en elle le germe d'une interrogation profonde sur les différents états de la matière (solide, liquide, gaz) et le passage de l'un à l'autre. Dans le cas de la terre, ces transitions ne sont pas brusques mais continues : il y a des échelons dans chaque état (solide mais plus ou moins résistant en fonction de sa teneur en eau ou en air, plus ou moins plastique, plus ou moins humide, plus ou moins sec) et l'absence de frontières objectives entre un état et un autre nous amène à remettre en question la notion d'état, pour un concept plus proche de « nature changeante ». Construire avec quelque chose qui peut se changer si facilement en boue pose problème. Pourtant la simple évocation d'une matière si étonnante qu'elle puisse à la fois être sèche, humide, plastique, liquide, rigide et donc versée, modelée, moulée, coffrée, coulée, lissée, sculptée, grattée, imprimée, décorée, etc. laisse envisager la multiplicité d'usages, de styles et de formes que peut revêtir cette matière. Dans ses propres limites, la terre décline toutes ses potentialités.

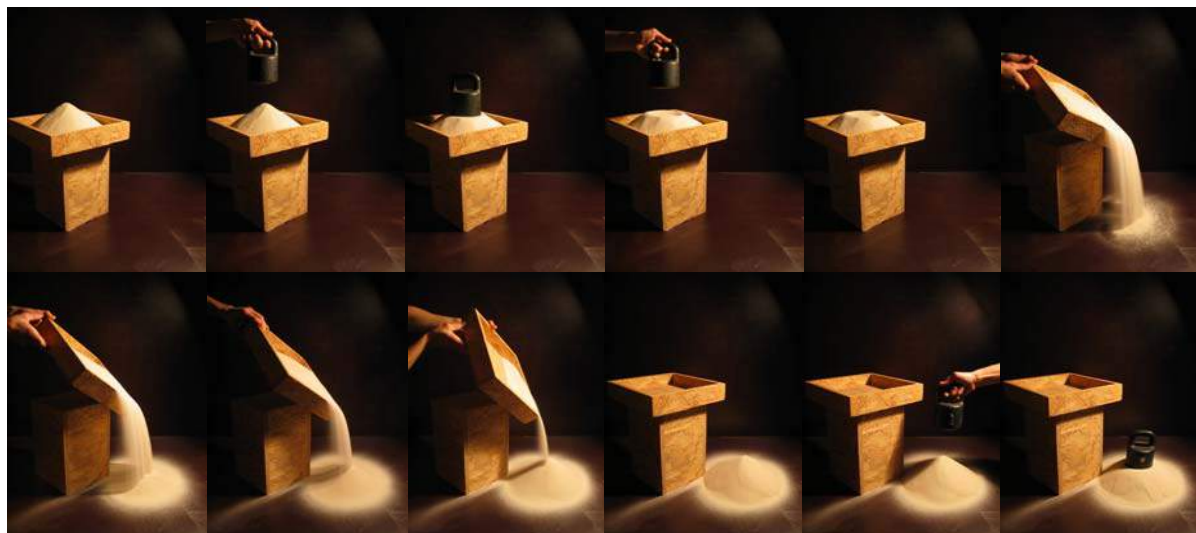
Cette propriété de pouvoir se présenter à la fois sous forme liquide ou solide n'est pas exclusive au matériau terre. On la retrouve dans toute matière constituée de grains. Un facteur essentiel du succès du béton comme matériau de construction réside dans l'aptitude du ciment à passer de l'état de poudre fine à celui d'un solide rigide de n'importe quelle forme par simple adjonction d'eau à température ambiante. Cependant, la prise du ciment implique une réaction chimique avec l'eau, au cours de laquelle de nouveaux constituants sont créés (entre autres les hydrates de ciment). Concernant la terre, les transitions entre les différents états sont plus étonnantes puisqu'il n'y a pas de réactions chimiques. Une brique en adobe est fabriquée par simple adjonction d'eau. Pour le pisé, entre le tas de terre humide et le mur qui vient d'être décoffré, la teneur en eau est invariante. Pourtant, comme un liquide, la terre a pu être versée dans des seaux et transvasée dans un coffrage dont elle a adopté la forme. Puis, par simple compression, elle est devenue solide.

Ici, nous ne nous intéressons pas encore au rôle de l'eau. Nous observons d'abord ces changements d'états au sein de matières en grains sèches comme les poudres et le sable.

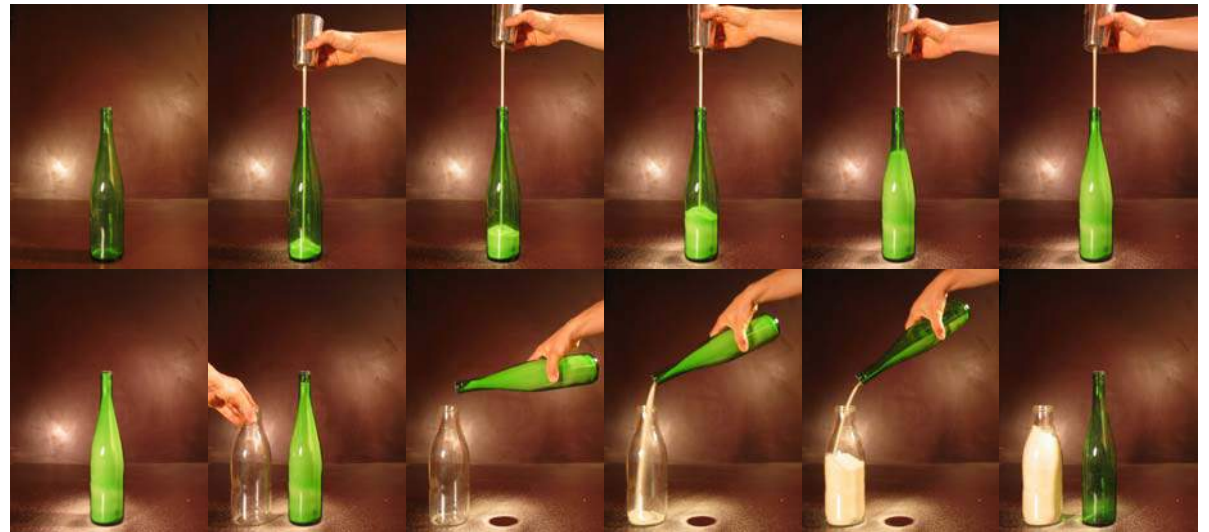


## Comme un solide, comme un liquide, comme un gaz

Lorsque les physiciens ont commencés à s'intéresser au sable, ils se sont trouvés incapables de classer cette matière dans les traditionnelles catégories « solide » ou « liquide ». Le sable prend la forme de son contenant, s'écoule comme un liquide mais peut aussi supporter des charges importantes (manipulation 4 et 5).



**MANIPULATION 4 :** Lorsque les physiciens se sont intéressés pour la première fois au sable, ils se sont trouvés incapables de classer cette matière dans la catégorie solide ou liquide. Au repos, le sable se présente sous la forme d'un tas. Un liquide ne peut adopter cette forme. Comme un solide, le tas de sable peut supporter de fortes charges. Pourtant si l'on incline le support, le sable s'écoule comme un liquide. Et il forme à nouveau un tas capable de supporter un poids.



**MANIPULATION 5 :** Comme un liquide, le sable peut adopter la forme de son contenant. On peut le verser dans une bouteille dont il remplit le contenu de manière homogène. On peut le transvaser dans une bouteille de forme différente. Le sable s'adapte parfaitement à son nouvel espace.

On retrouve cette ambivalence chez les poudres. Par frottement différentiel, une poudre sur un support incliné forme des vaguelettes dont la forme rappelle l'écoulement de l'eau sur une vitre (manipulation 6).



**MANIPULATION 6 :** Les poudres présentent aussi des analogies étonnantes avec les liquides. Cette poudre silteuse s'écoule sur un support incliné et forme des gouttes similaires à l'écoulement d'un liquide sur une vitre.

Pour comprendre ces différences de comportement, il faut bien avoir à l'esprit qu'un ensemble de grain n'est jamais complètement plein. Il est aussi fait de « vides ». L'espace qui se trouve entre les grains est appelé « porosité ». Cet espace est généralement rempli par un ou plusieurs fluides (l'air et l'eau dans le cas de la terre). Un mur en béton ou en terre « sec » (en réalité il n'est jamais tout à fait sec) contient toujours de l'air : c'est un matériau poreux. La quantité d'air contenue dans un sable sec peut être relativement importante (manipulation 7).



**MANIPULATION 7 :** La matière en grains n'est jamais constituée uniquement de grains. Elle contient toujours de l'air. Le tube en plexiglas ci-dessus a été rempli de silt. Placé à la verticale, des bulles d'air s'échappent et forment de petits geysers de poudre à sa surface. La quantité de gaz contenue dans les grains est impressionnante. Il faut taper plusieurs fois le tube contre le sol avant que le phénomène ne s'estompe. L'air en s'évacuant trace des arborescences similaires à des lits de rivières.

Cette proportion d'air est variable et ces variations changent le comportement de la matière.

Dans certains cas, un ensemble de grains peut aussi adopter le comportement d'un gaz. Dans la manipulation 7bis, la poudre se comprime et se détend comme un gaz : l'air contenu dans la poudre est compressible et lui confère son élasticité.





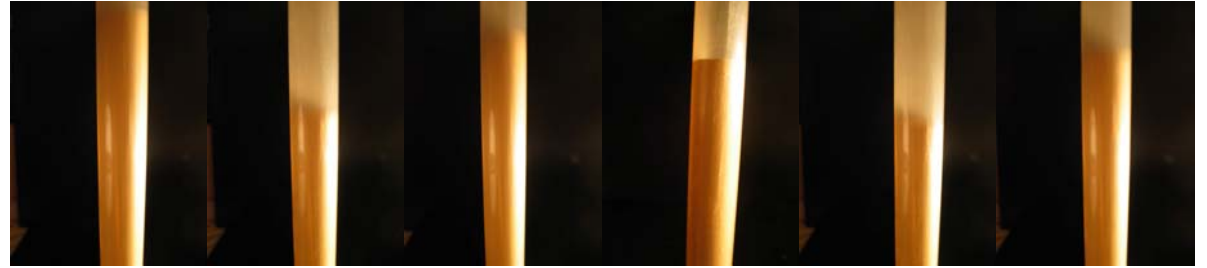
*Lors des tempêtes de sable, le mouvement individuel des particules est contrôlé par leurs collisions et évoque les mouvements moléculaires d'un gaz.*

© <http://xpda.com/junkmail/junk154/theb1365.jpeg>



*Grains de cendres lors d'une éruption volcanique.*

© Futura-Sciences



**MANIPULATION 7BIS :** La même expérience est reproduite en utilisant une poudre plus riche en argile. Elle est un peu plus imperméable à l'air qui a plus de mal à s'évacuer. Il s'échappe sous forme de fissures horizontales qui remontent lentement le long de la paroi du tube. Le plus spectaculaire a lieu lorsqu'on frappe le tube sur le sol à la verticale : la poudre rebondit. L'air emprisonné dans les grains est compressible. Il donne son élasticité à la poudre qui se comprime et se détend comme un ressort.

## Les grains en mouvement

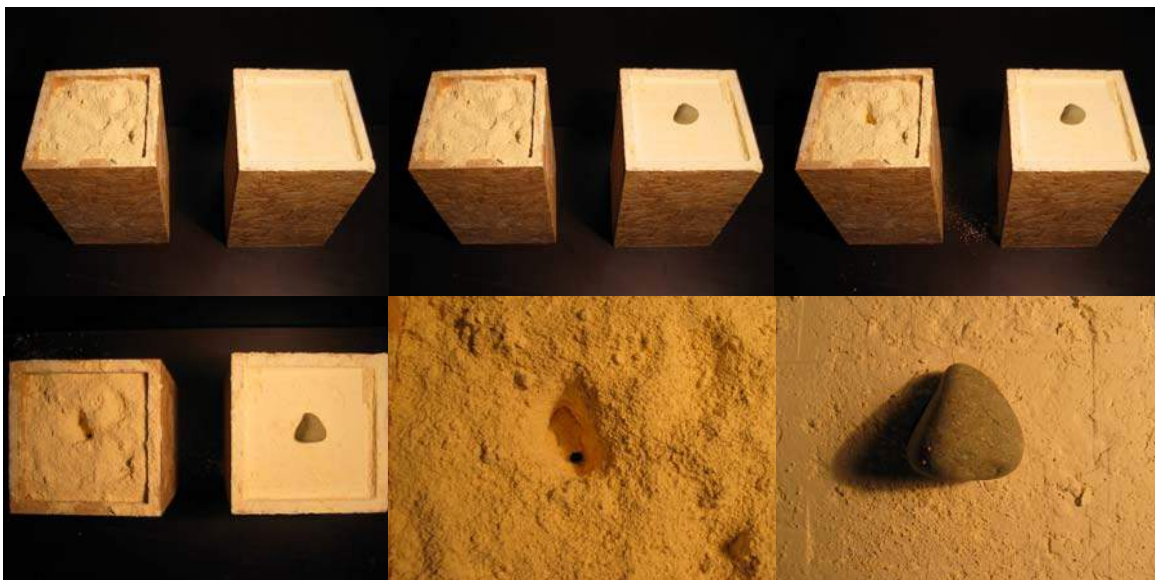
Guyon, Troadec 1994 [39]

Lorsque les grains sont en mouvement, on peut schématiquement distinguer plusieurs familles de comportement. Si les grains sont assez concentrés, l'écoulement est dû à des mouvements collectifs et est contrôlé par la friction entre les grains. On se rapproche plus de la situation des liquides (le sable s'écoulant sur un plan incliné par exemple). Si les grains sont assez dilués, le transport induit par les mouvements individuels est contrôlé par leurs collisions et évoque les mouvements moléculaires d'un gaz. Dans les nuages formés lors des tempêtes de sable dans les déserts par exemple (photo ci-dessus à gauche), les grains s'entrechoquent violemment et bougent de manière aléatoire. Un autre exemple est fourni par les fumées de cendre lors des éruptions volcaniques, qui peuvent s'élever très haut dans l'atmosphère. Cependant, l'écoulement des grains ne se réduit jamais totalement à celui d'un liquide ou celui d'un gaz. Un troisième type de comportement concerne le cas où le fluide présent entre les grains joue un rôle dominant. Ce peut être le cas de l'air si les grains sont assez petits, à l'instar des geysers de poudre qui se forment dans le tube de la manipulation 4. Les fluides jouent en particulier un rôle important dans tous les phénomènes de transport des particules. Le sable du Sahara peut être ainsi être transporté à des milliers de kilomètres par des courants d'air. L'eau des cours d'eau entraîne des particules de plus grande taille comme les limons, les sables et les graviers. Lors de crues particulièrement torrentielles, la charge transportée par les rivières et les fleuves augmente la densité de l'eau à tel point qu'elle peut charrier des graviers, des cailloux et parfois même des blocs de pierre. Enfin, à une échelle supérieure, le frottement visqueux de la lave peut entraîner des grains bien plus gros, comme les roches.

## Les grains au repos : transition fluide-solide

Pour la construction, nous sommes peu concernés par le transport des particules par un fluide visqueux. Il est davantage judicieux de comprendre comment se fait la transition fluide-solide à l'état sec.

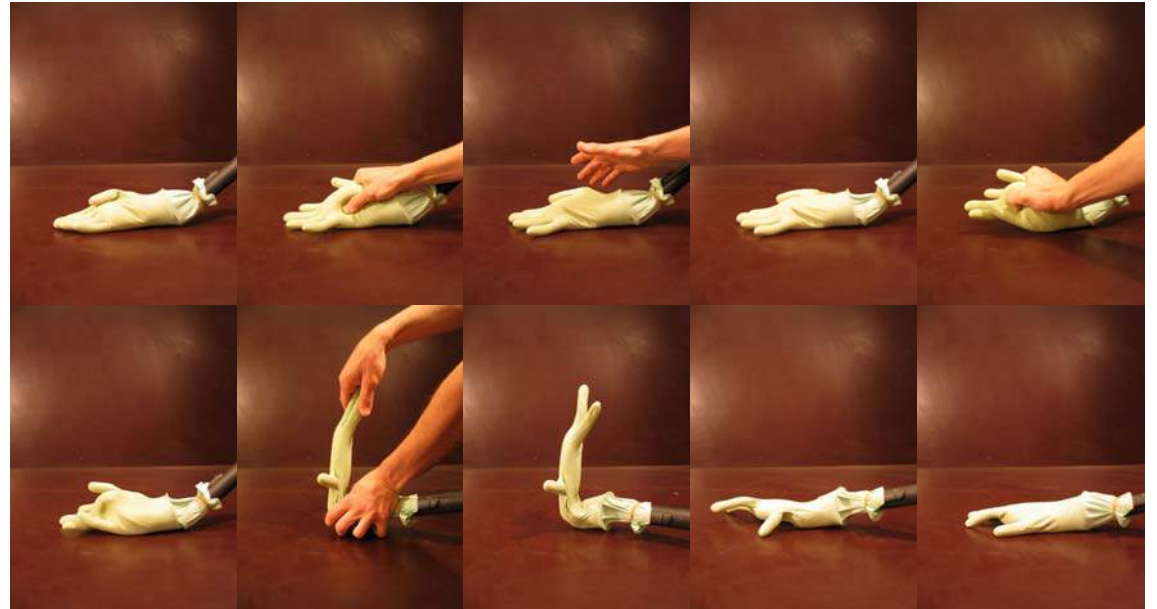
Pour deux échantillons d'une même poudre d'argile (manipulation 8), les comportements sont sensiblement différents selon la proportion d'air contenue dans les grains : un caillou lâché au-dessus d'une poudre chargée d'air coule comme dans un fluide alors qu'il rebondit à la surface de la même poudre légèrement comprimée.



**MANIPULATION 8 :** Le récipient de gauche contient de la poudre de kaolinite « aérée ». Dans celui de droite, la même poudre a été tassée. Un caillou lâché d'une trentaine de centimètre au-dessus de la poudre tassée rebondit et reste à sa surface. Dans le récipient de gauche, le caillou coule comme dans un fluide.

Si on aspire l'air d'un milieu granulaire sec contenu dans un sachet ou un gant en caoutchouc, l'ensemble se rigidifie (manipulations 9 et 9bis). Dans la vie courante, on peut se rendre compte de ce phénomène avec un paquet de café conditionné sous vide : il se ramollit et perd sa forme après ouverture. Cette expérience illustre l'idée que moins il y a d'air entre les grains et plus on se rapproche d'un comportement solide. Il semble toutefois opportun d'ouvrir une parenthèse pour ajouter que l'explication de ce phénomène est plus complexe. Il a été décrit en 1885 par Reynolds qui avait textuellement noté (Guyon, Troadec 1994 [39]) :

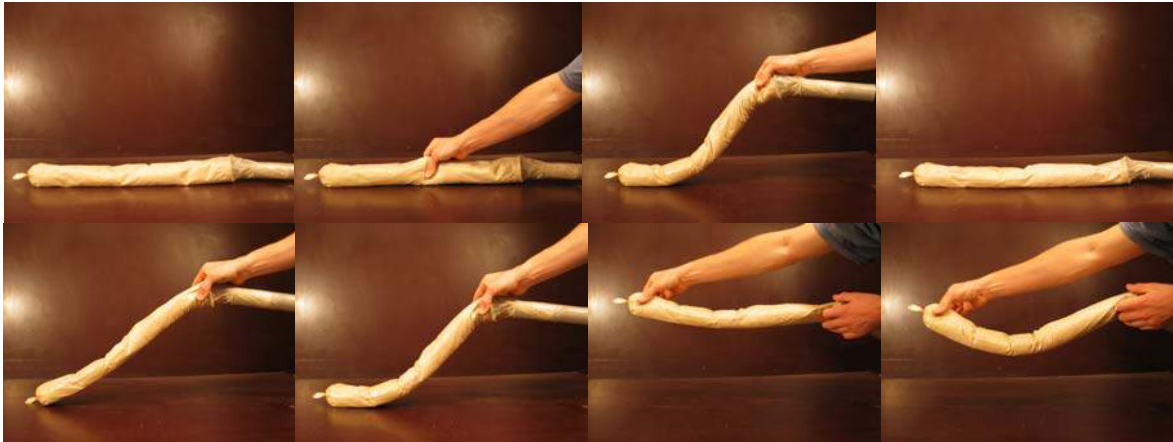
« un matériau granulaire, fortement compacté et placé dans une enveloppe flexible, voit invariablement son volume augmenter lorsque cette enveloppe est déformée. Si cette enveloppe est inextensible mais déformable, aucune déformation n'est possible jusqu'à ce que les forces appliquées brisent l'enveloppe, ou fractionnent le matériau granulaire ». Dit plus simplement, cela signifie que si un matériau granulaire est bien tassé, il doit nécessairement se dilater pour pouvoir se déformer. Les grains sont bloqués par leur propre empilement. Ce mécanisme se retrouve dans d'autres phénomènes dont nous parlerons par la suite comme l'angle de repos et l'angle d'avalanche du tas de sable ou la dilatance.



**MANIPULATION 9 :** Un gant en caoutchouc est rempli de sable et relié à un aspirateur. A l'arrêt, le gant est mou. Dès que l'aspirateur est en marche, le gant se rigidifie et conserve sa forme lorsqu'on appuie dessus. On peut modeler le sable contenu dans le gant comme une pâte. Dès que l'aspirateur est éteint, le gant se ramollit et reprend sa forme initiale.

Inversement, si on ajoute de l'air entre les grains, la matière devient totalement fluide. On peut faire l'expérience avec un bac rempli de sable relié à une arrivée d'air. Dès qu'on ajoute de l'air, le sable se comporte comme un fluide, la sensation éprouvée lorsqu'on plonge sa main dans les grains est surprenante : la matière n'oppose aucune résistance, on peut enfoncer son bras comme dans de l'eau. Une pierre posée à la surface coule dès qu'on rajoute de l'air.

En résumé, plus la proportion d'air augmente, plus le milieu granulaire adopte le comportement d'un fluide. Plus elle diminue, plus le milieu adopte un comportement solide. Dans le cas du pisé, entre le tas de terre humide prêt à l'emploi et le mur décoffré, seule la proportion d'air change. A mesure que la quantité d'air diminue, le nombre de contact entre les grains augmente. Or, c'est par l'intermédiaire de ces contacts que les forces de cohésion se mettent en oeuvre. Le contact rend le matériau solide. L'absence de contact rend le matériau fluide. De manière générale, quelque soit le matériau considéré, un vide constitue toujours une zone de faiblesse. Les matériaux de construction granulaires n'échappent pas à cette règle et sont d'autant plus résistants que leur porosité est faible. Pour la terre et le béton, moins le matériau est poreux, plus le nombre de contact entre grains est important, plus les résistances mécaniques sont élevées.

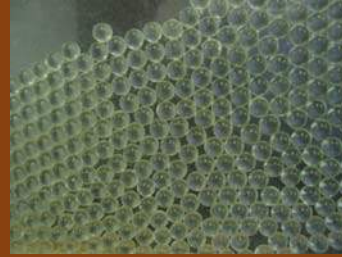


**MANIPULATION 9BIS :** L'expérience précédente est reproduite avec un sac en plastique en forme de boudin. Sans aspiration, le boudin est mou. Après avoir retiré l'air, il se rigidifie comme un bâton mais perd sa raideur dès qu'on coupe l'aspiration.





## ***4 – Empilements de grains***



La porosité constituant une zone de faiblesse, il est intéressant d'observer les empilements de grains qui permettent de remplir le maximum d'espace afin d'obtenir le matériau le plus dense possible. Pour le béton, au cours des vingt dernières années, la recherche de meilleures qualités mécaniques a été essentiellement axée sur la diminution de la porosité. Dans un béton conventionnel, une grande partie de l'eau utilisée lors du mélange ne participe pas aux réactions d'hydratation du ciment. Cet excès d'eau se traduit au séchage par un excès de porosité. L'emploi de superplastifiants a permis de réduire la proportion d'eau du mélange tout en conservant une bonne maniabilité de la pâte, ce qui s'est traduit par une baisse de la porosité et une augmentation des résistances mécaniques (Flatt, Martys Bergström, 2004 [15]).

Mais les super bétons doivent avant tout leurs performances à une meilleure connaissance des empilements de grains qui ont permis de grands progrès dans la formulation des bétons (Vernet 2004 [22]). Il est possible par exemple de prévoir les proportions de chaque constituant d'un mélange qui permettent d'obtenir la compacité optimale (Larrard, Sedran, [14]). L'étude des empilements les plus simples, constitués de sphères parfaites dans les structures ordonnées et désordonnées, permettent d'introduire quelques notions de bases avant de présenter les modèles les plus récents dont se servent aujourd'hui les chercheurs pour concevoir des bétons capable d'atteindre la résistance en compression de l'acier. Nous pouvons en particulier comprendre comment quelque chose d'aussi simple que la fumée de silice, constituée de grains hétérogènes de très petites tailles, a constitué une véritable révolution dans ce domaine (Holland 2005 [16]).

Ces considérations sur les empilements sont aussi valables pour la terre, étant donné qu'il ne s'agit pas ici d'augmenter les forces de cohésion entre particules mais de jouer sur l'optimisation du squelette granulaire. Tout comme un édifice, un sol est construit, il possède une structure, dont la forme et la solidité dépendent en partie du pourcentage des éléments qui le constituent.

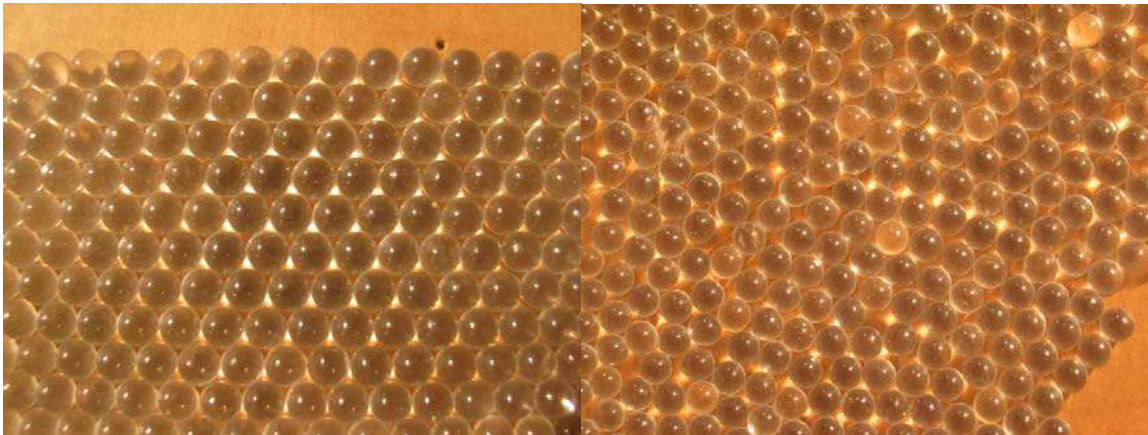
## Des sphères sur un plan

Guyon, Troadec 1994 [39], Auroux [24]

La complexité d'un empilement provient à la fois de la multiplicité des arrangements possibles et des allers et retours entre les petites et les grandes échelles. Des objets de tailles très différentes peuvent s'organiser de manière analogue. Si l'on revient, provisoirement, à un modèle idéal, l'exemple le plus simple d'empilement est celui d'un tas de billes qui ont toutes la même taille (mono-dispersées). Et pour simplifier encore, celui d'un ensemble de billes sur un plan. Un simple cadre partiellement rempli de billes de verre nous permet de mettre en valeur quelques principes élémentaires qui illustrent les différentes manières dont la matière s'organise au niveau atomique. A partir de là, nous pouvons établir des liens avec les empilements d'objets de tailles supérieures.

### Ordre et désordre

Une simple manipulation du cadre permet d'observer deux types différents d'organisation : l'empilement ordonné en nid d'abeille (structure hexagonale ou triangulaire) et l'empilement désordonné. En retournant brutalement le cadre, on retrouve systématiquement l'empilement désordonné. Il faut vibrer, remuer, tapoter pour obtenir l'empilement ordonné (manipulation 10).



**MANIPULATION 10 :** Un cadre transparent est rempli de billes de verre. Sa manipulation permet d'observer la manière dont les billes s'empilent, en particulier l'empilement ordonné, le plus compact, et l'empilement désordonné.



Exemples de solides cristallins :  
 1. un galet  
 2. le métal  
 3. le sel  
 4. la glace  
 5. les argiles

A notre échelle, le tas d'orange d'un étal de marché est un bon exemple d'empilement ordonné. Il reproduit la structure hexagonale compacte de nos billes de verre, « en nid d'abeille ». A une échelle intermédiaire entre l'atome et l'échelle macroscopique, des billes d'opale, avec un rayon de l'ordre du millier d'Å, reproduisent un empilement ordonné.

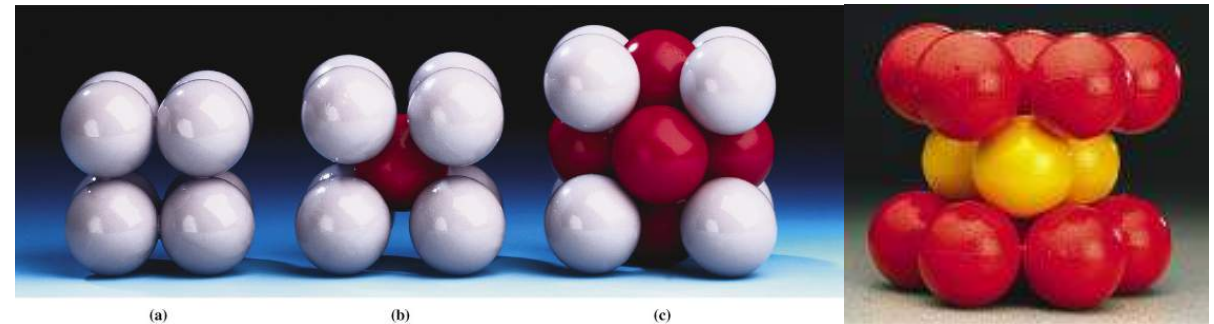
Toute matière, autour de nous, peut être classée en fonction de son type d'organisation atomique selon que celle-ci est ordonnée ou désordonnée.

### Les empilements ordonnés

#### Le cristal

Parfois les atomes s'organisent selon des empilements ordonnés dans des structures régulières. Une telle structure atomique est appelée cristal. L'étude de ces empilements est d'une grande importance dans notre compréhension de la matière puisqu'elle est à l'origine de la cristallographie et, partant, de la physique de l'état solide. Les métaux, les céramiques, les roches et minéraux, les sels, la glace et certains produits organiques comme le sucre cristallisé font partie de la matière cristalline.

Le cristallographe étudie l'ordre de ces structures et identifie principalement 4 types différents d'empilements atomiques appelés le cubique simple, le cubique centré, le cubique à faces centrées et l'hexagonal compact. Dans ce cas, la notion de réseau et d'ordre à grande distance est importante puisqu'elle lui permet de définir des mailles élémentaires qui représentent la plus petite structure d'atome permettant, par répétition dans l'espace, de décrire l'ensemble de l'empilement.



Les quatre réseaux atomiques les plus courants de la matière cristalline sont (de gauche à droite) : le cubique simple, le cubique centré, le cubique à faces centrées, l'hexagonal compact

#### Aux échelles supérieures

A notre échelle, le tas d'orange d'un étal de marché est un bon exemple d'empilement ordonné : c'est notre empilement hexagonal en trois dimensions. A une échelle intermédiaire entre le tas d'orange et les structures atomiques ordonnées, il existe par exemple l'empilement ordonné de billes d'opales de quelques milliers d'Å de diamètre.

## Les milieux désordonnés

Les structures désordonnées sont beaucoup plus fréquentes dans la nature et dans notre environnement quotidien.

### A l'échelle atomique

Dans les gaz et les liquides, les atomes adoptent des empilements désordonnés. L'ordre est (quasiment) une spécificité de la matière solide. Toutefois, au sein de la matière solide, l'existence de structures atomiques désordonnées est fréquente. C'est le cas du verre, du bois, du plastique qui font partie de la catégorie des solides amorphes.

### Aux échelles supérieures

A notre échelle, les empilements ordonnés sont encore plus rares. Dans l'exemple du tas d'orange, il est important de noter que pour obtenir un empilement ordonné, il faut manipuler les oranges une par une. Versées en vrac, elles adoptent une structure désordonnée. Les empilements de grains au repos ou en écoulement ne possèdent, le plus souvent, aucun ordre géométrique, aucune structure simple et régulière. Ceci est dû en partie aux irrégularités de forme et de taille des grains qui rendent impossible la présence d'empilements ordonnés. Il suffirait de placer dans le cadre quelques disques de rayon légèrement supérieur à celui des billes de verre pour s'en rendre compte. Le tas de sable est donc un objet complexe et particulièrement difficile à décrire.

## La science, le désordre et le sable

Dans leur ouvrage, Etienne Guyon et Jean-Paul Troadec (Guyon, Troadec 1994 [39]) donnent l'image d'une science qui passe « du sac de bille au tas de sable ». Elle a d'abord décrit ce qui était le plus simple à quantifier, c'est-à-dire ce qui est prévisible, régulier ou ordonné, alors même que la plupart des objets qui nous entourent ne font pas partie de cette catégorie. Aujourd'hui, la physique commence à construire les outils mathématiques et numériques nécessaires à l'appréhension du désordre, donc du commun et du naturel. Ceci explique l'intérêt actuel des scientifiques pour la matière en grains et les récents progrès dans ce domaine, où l'évolution des connaissances n'a été rendue possible que grâce à un nouveau regard sur la matière. Désormais, la recherche se développe entre le niveau microscopique de la matière désordonnée (les liquides par exemple, qui restent encore très mal compris), qui a été qualifiée de « matière mal condensée » par opposition au « solide cristallin », et l'échelle supérieure, ou mésoscopique, des milieux de grains. Entre les deux, des passerelles existent. Les observations faites sur des objets de taille macroscopique et les simulations numériques développées depuis les années soixante ont permis de décrire l'organisation et les mouvements désordonnés des particules microscopiques en agitation. Les études de structures à partir de rayons X et de neutrons ont donné accès au désordre microscopique de liquides et de solides vitreux. Ce sont les mêmes modèles qui sont utilisés aujourd'hui pour comprendre les gros grains de matière.



*Les solides amorphes (bois, plastique, verre) ont des structures atomiques désordonnées comme les liquides et les gaz*



*Versés en vrac, les agrumes adoptent un empilement désordonné*

## Compacité, porosité, coordinence

### Définitions

Compacité, porosité et coordinence sont trois notions essentielles pour comprendre les propriétés des matériaux granulaires. On définit la compacité de l'empilement comme la fraction de volume occupée par les sphères (ou grains) en contact. La porosité représente la fraction de volume des interstices situés entre les sphères. La coordinence représente le nombre de contact qu'une sphère établie avec les autres sphères.

### Compacité des empilements ordonnés

Ces trois notions peuvent être examinées par l'étude des empilements cristallins cités précédemment. Pour le réseau cubique simple, la compacité est de 52% et la coordinence de 6 (chaque sphère est en contact avec 6 autres sphères). Pour le réseau cubique centré, une sphère se place au centre du cube élémentaire. Il est donc un peu plus compact (compacité 68%, coordinence 8). Les réseaux cubiques à faces centrées et hexagonal compact ont tous deux une compacité de 74%, une porosité de 26% et une coordinence de 12. Une faible augmentation de la compacité implique une forte augmentation de la coordinence. Entre le réseau cubique centré et le cubique à faces centrées, la compacité augmente de 6% alors que la coordinence est multipliée par 1,5. Or, nous avons vu au chapitre précédent l'importance du nombre de contacts entre grains dans un matériau granulaire. Une augmentation de la densité contribue donc grandement à augmenter la résistance mécanique. D'autre part, les réseaux cubiques à faces centrées et hexagonal compact sont des réseaux de compacité optimum (ils sont tous deux constitués de couches hexagonales empilées les unes sur les autres). Avec des grains de même taille, il est impossible d'obtenir une compacité supérieure à 74%.

### Compacité des empilements désordonnés

Guyon, Troadec 1994 [39], Auroux [24]

La compacité d'un empilement désordonné est plus difficile à décrire puisqu'elle est variable. Elle dépend beaucoup de la manière dont l'empilement a été préparé (de sa mise en œuvre en quelque sorte). Si on laisse tomber les billes l'une après l'autre, et qu'elles ne bougent pas juste après leur chute, ce que l'on peut obtenir en faisant l'opération à l'intérieur d'un liquide, la compacité est de l'ordre de 60%. La valeur obtenue est un peu plus faible, 58 à 60%, mais peu reproductible, en versant en vrac sans précaution, des billes dans un récipient rigide. Le remplissage peut être amélioré en secouant et en vibrant le récipient pendant son remplissage, il est possible dans ce cas d'atteindre une compacité de 64%. Cette valeur est reconnue, de façon unanime, comme la compacité maximale d'un empilement désordonné de sphères dures identiques. Il n'existe pas de théorie pour justifier cette valeur de 64%. Il est impossible de se rapprocher des 74% d'un arrangement idéal. Ceci est dû à l'apparition de poches et de vides, de tailles parfois importantes, maintenus en place par des voûtes qui sont le résultat d'équilibres collectifs dans lesquels peuvent être impliqués plusieurs dizaines de billes. Ces voûtes, qui seront plus amplement évoquées par la suite, ne sont pas stables dans le cas de sphères très lisses pouvant rouler et glisser facilement les unes sur les autres. Dans ce cas, un empilement de sphères peut être compacité par légère agitation ou vibration. C'est particulièrement vrai si cette vibration se fait pendant le remplissage. Dans le cas de matériaux granulaires comme la terre et le béton, il est préférable d'utiliser des grains arrondis plutôt que des grains anguleux dont les facettes favorisent les effets de voûtes, empêchant ainsi la réorganisation de l'empilement dans sa configuration la plus compacte.

## Les défauts

La matière n'est jamais parfaite. En l'observant à l'échelle atomique, il existe toujours des défauts. Or, ces défauts ont une importance capitale puisqu'ils influencent énormément les propriétés des matériaux à l'échelle macroscopique. C'est particulièrement vrai dans le cas des solides cristallins. Par exemple, il existe dans les cristaux un type de défauts appelés « dislocations » dont le déplacement dans la matière va permettre de casser les liaisons entre atomes les unes après les autres, un peu à la manière d'une fermeture-éclair. Ainsi, les métaux sont beaucoup plus malléables qu'ils ne devraient l'être s'ils étaient obtenus sans défauts. Alors que l'existence de ces défauts était très mal connue, les théoriciens prévoyaient une résistance très élevée pour la résistance d'un cristal à la déformation. Ces défauts jouent aussi une grande importance dans le comportement des argiles gonflantes, qui doivent leur excès de charges surfaciques à des défauts qui consistent en des substitutions dans le réseau cristallin de certains cations par des cations de valence plus faible. Les empilements de billes de verre sur un plan reproduisent parfois certains défauts qui existent à l'échelle atomique comme les lacunes et les joints de grain.

### Les lacunes

Une lacune est l'absence d'un atome dans un réseau. Ce type de défaut est facile à observer dans le cadre de billes.

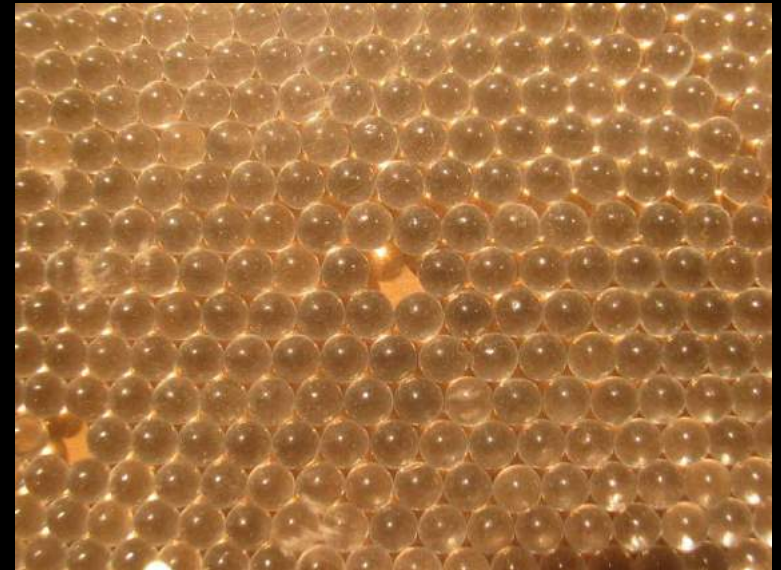
### Les joints de grain

Les billes de verre présentent différentes orientations d'empilements (horizontal, en biais et vertical). Dans certaines situations, deux orientations distinctes sont présentes simultanément. Une frontière s'établit alors entre les deux ensembles, qui apparaît comme une sorte de fissure. Dans les structures cristallines, ce type de défaut est appelé un joint de grain.



**MANIPULATION 10 (SUITE) :** Différentes orientations d'empilement. Parfois, deux orientations sont présentes simultanément. Il s'établit une frontière entre les deux qui rappelle les joints de grains entre cristaux dans la matière polycristalline.

Dans la plupart des cas, la matière cristalline est composée de plusieurs cristaux qui, comme les billes, présentent des orientations différentes. Il existe quelques exemples notoires de monocristaux, comme par exemple certains cristaux géologiques, dont les gemmes et pierres précieuses, et des réalisations technologiques comme par exemple les aubes de turbine pour les moteurs d'avions de chasse, les semi-conducteurs pour l'électronique (germanium) ou les monocristaux d'étude, utilisés en recherche métallurgique ou pour caractériser de nouvelles molécules pharmaceutiques. Mais, dans le cas général, la matière est composée de plusieurs cristaux accolés, qui ont une orientation différente : elle est « polycristalline ». L'interface entre deux cristaux est un joint de grain. Il s'agit d'un défaut plan qui joue un rôle considérable dans les propriétés du matériau à l'échelle macroscopique.



*Une lacune (absence d'un atome dans un réseau) est un défaut courant dans les cristaux*



*Sur la photo ci-dessus, qui présente un morceau de glace, il est possible de discerner les joints de grain*

### La notion d'échelle

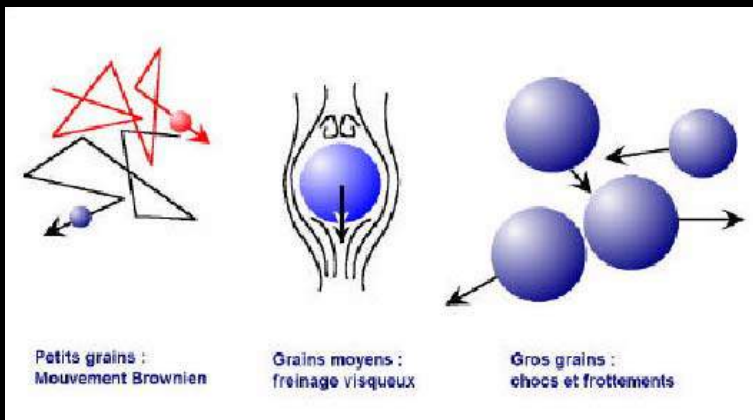
Ainsi, nos billes de verre reproduisent certains modèles d'empilement atomique jusque dans leurs spécificités. Ceci est particulièrement étonnant. Il n'y a pas de communes mesures entre un atome et une bille de verre. Le premier est environ cent millions de fois plus petit que le second. Au niveau de l'atome, les objets sont soumis aux lois de la mécanique quantique et aux effets de la dualité onde-corpuscule. Ces lois n'ont rien à voir avec les lois physiques qui régissent l'univers à notre échelle, comme la gravité.

Dans sa description du réel, la science présente des lois qui s'appliquent à une certaine échelle de grandeur mais ne s'appliquent pas aux échelles inférieures ou supérieures. La terre est donc un système hiérarchisé particulièrement difficile à décrire. Elle est constituée de grains dont la taille varie continûment du micromètre au centimètre. Les particules colloïdales sont quasiment soumises au mouvement brownien. Les grains de silt sont très sensibles à l'écoulement visqueux d'un simple courant d'air, ce qui n'est pas le cas des grains de sable ou des graviers. Le comportement des plus gros grains est essentiellement régi par des interactions de contact (chocs et frottement) - Duran 2001 [36].

De plus, dans le cas des argiles, la description des interactions de surface entre particules nécessite de s'intéresser à la structure atomique de ces microcristaux et des espèces ioniques qui les accompagnent. En somme, dans la terre, l'échelle, donc la modélisation scientifique, varie de manière continue. Comment mettre en regard la discontinuité des modèles scientifiques et la continuité des objets réels ?

Cette problématique peut être élargie à l'échelle d'un bâtiment. Des grains élémentaires composent le noyau d'un atome ; ces atomes assemblés régulièrement réalisent un cristal ; les grains cristallins de quartz et les microcristaux d'argiles forment une brique de terre ; un édifice est construit de briques agencées les unes aux autres pour réaliser des murs, des voûtes et des coupes. A chaque niveau d'observation est associé un mode de description. Le physicien nucléaire étudiera le noyau atomique ; le cristallographe, le cristal ; le pédologue et le géologue, le sol ; l'ingénieur calculera la stabilité et la résistance de la structure. Chacun fera référence à son niveau de description mais il sera vain de rechercher une description unique pour tous ces problèmes.

Pourtant, la physique des grains constitue une discipline nouvelle permettant d'établir des passerelles entre toutes ces spécialités. Le modèle universel des empilements observé pour des niveaux variés illustre bien cette idée. Dans leur livre (Guyon, Troadec 1994 [39]), Guyon et Troadec prennent l'exemple de la physique nucléaire et du broyage pour illustrer cette idée: « *Un noyau atomique projeté à grande vitesse frappe un autre noyau. A partir de la distribution des masses des fragments produits, il est possible de comprendre comment sont assemblés dans les noyaux les protons et les neutrons – les grains plus élémentaires qui les composent. Regardons maintenant le problème du broyage : pour séparer un minerai contenu de façon dispersée dans une roche, les grains sont divisés en faisant tomber sur eux des sphères métalliques dans un broyeur à boulets. Des noyaux de la première expérience aux gros objets du broyage, il y a un monde ! Et pourtant, il y a aussi suffisamment de points communs pour justifier aujourd'hui un dialogue entre le physicien nucléaire et l'ingénieur cimentier* ».



Des grains de tailles très diverses sont soumis à des lois de comportement différents. © Duran 2001 [36]



## Hétérogénéité

La matière en grain est hétérogène, à l'image de notre cadre de billes, dans lequel l'état ordonné contigu à l'état désordonné peut être observé.

Dans la terre, cette hétérogénéité s'exprime de multiples façons. C'est une matière constituée d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. Les grains qui constituent la phase solide sont de tailles très diverses. Les argiles et les autres grains sont différents à plusieurs niveaux (formes, composition chimique...). Les comportements physiques et mécaniques de la matrice argileuse et du squelette granulaire sont différents. A l'échelle atomique, la structure désordonnée des molécules d'eau coexiste avec les structures régulières des cristaux de quartz ou des microcristaux d'argile. A l'échelle du mur en pisé, celle-ci change de propriétés d'un endroit à l'autre. Par exemple, la mise en œuvre par couches induit des variations locales de densité. Lors de la compression des couches, le bas de la couche est moins comprimé que le haut. Il en résulte un gradient de densité et des propriétés locales différentes : résistance, sensibilité à l'érosion, conductivité thermique, etc.

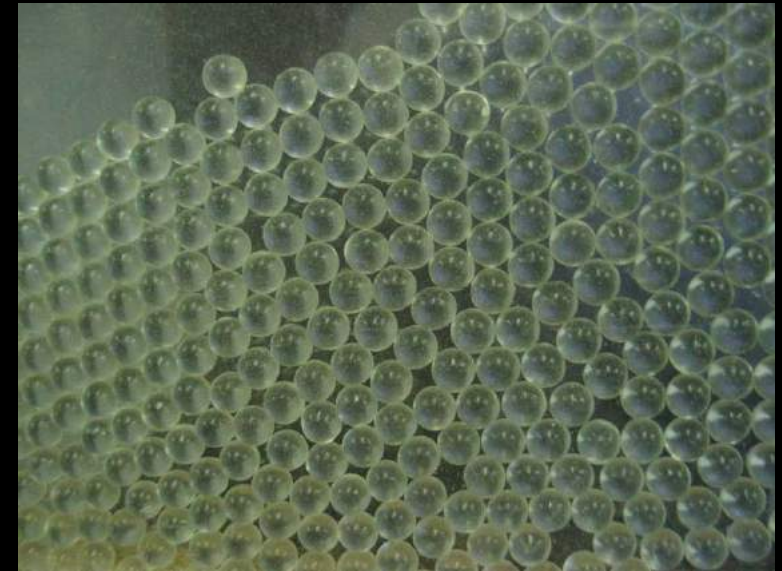
### Cas de billes de deux tailles différentes (bi-dispersées)

Il existe une limite à la compacité d'un empilement de sphères de mêmes tailles. Qu'elles soient de la dimension d'un atome ou d'un ballon de football, elles ne pourront jamais remplir plus de 74% de l'espace. Il reste entre ces sphères empilées des vides de diamètre égal à 0,225 fois le diamètre des billes. Dans le cas d'un empilement désordonné, la compacité optimale est encore plus faible puisqu'elle ne peut dépasser 64%. Il reste alors 36% de porosité. Pour dépasser cette frontière, la solution consiste à mélanger à nos billes d'autres billes de diamètre inférieur. Dans la manipulation 11, le simple fait de mélanger deux ensembles de billes de diamètres différents leur permet d'occuper un volume plus réduit. Les grains les plus fins se placent dans les pores localisés entre les grosses billes.



**MANIPULATION 11 :** Des billes de verre de 2mm de diamètre sont déposées dans un récipient. Un volume identique de billes de 10mm est déposé au-dessus des premières. L'ensemble est mélangé et versé à nouveau dans le récipient. Le volume du mélange est inférieur au volume des deux ensembles de billes séparés.

Ce principe peut être appliqué à d'autres objets que des sphères parfaites, comme des grains minéraux irréguliers. La manipulation 12 reproduit l'expérience avec un ensemble de graviers bien triés (mono-dispersés) et de sable fin également mono-dispersé. Le résultat est identique à celui obtenu avec les billes de verre. Dans la matière en grain, un plus un n'est pas égal à deux ! Si les grains ont des tailles différentes, leur mélange occupera forcément un volume inférieur à la somme des deux volumes séparés.

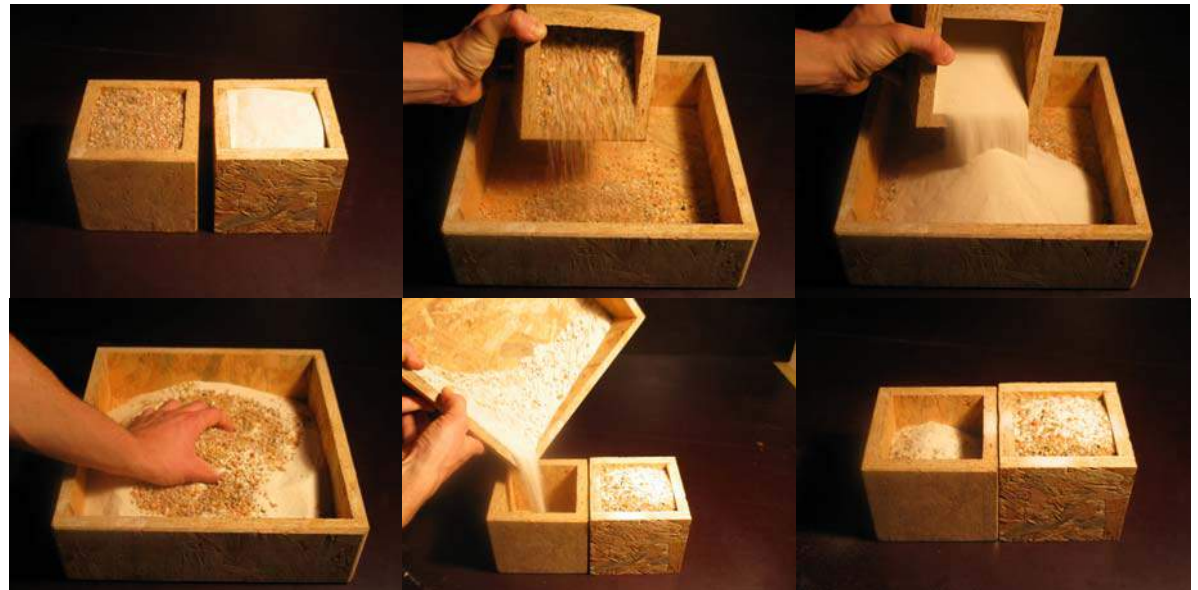


*Les empilements compact et désordonné sont présents simultanément : la matière en grain est hétérogène*



*Effet de l'érosion différentielle, qui s'attaque de préférence aux zones du mur les moins compactées.*

*© Middleton, Schneider 1987 [207]*



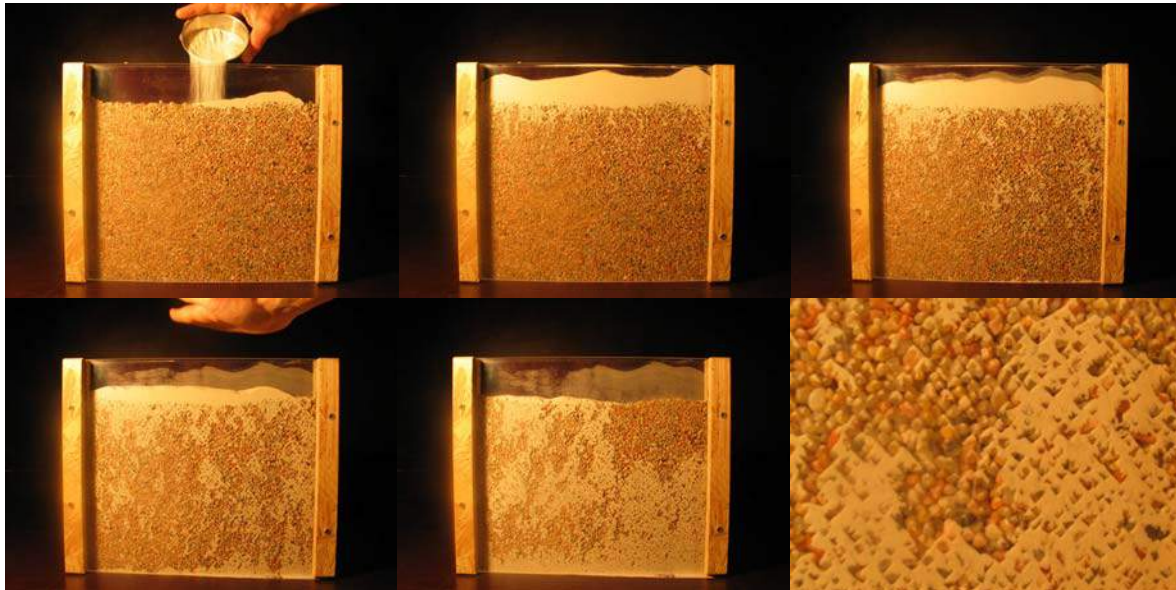
**MANIPULATION 12 :** La même expérience est reproduite avec des graviers et du sable. Encore une fois, un mélange de grains différents conduit à un ensemble plus compact dont le volume est inférieur à celui des grains pris séparément.

Les pores d'un milieu granulaire peuvent donc être remplis avec d'autres grains de plus petite taille. En versant du sable fin sur du gravier et en vibrant, les petits grains disparaissent entre les gros grains.



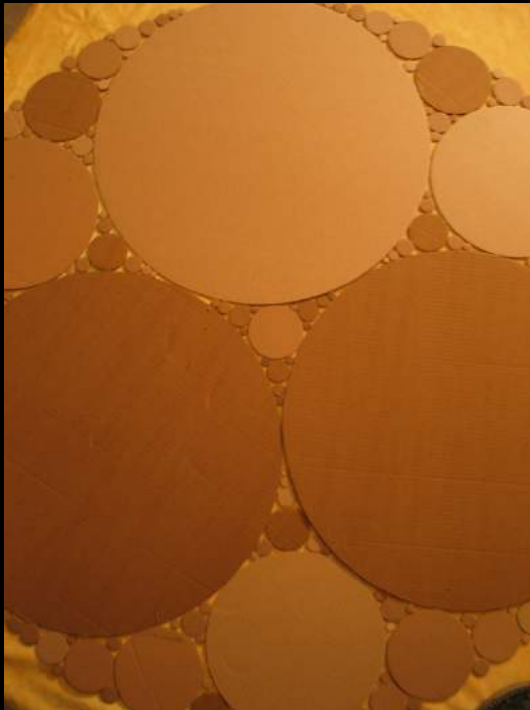
**MANIPULATION 13 :** Du sable versé sur un lit de graviers disparaît entre les grains

A l'aide d'un cadre transparent, il est possible de visualiser le phénomène en coupe et d'observer le sable fin s'écouler entre les gros grains en remplissant peu à peu l'espace poreux.



**MANIPULATION 14 :** Dans un cadre transparent, il est possible de visualiser le phénomène et de voir couler le sable fin entre les gros grains. Il remplit peu à peu les pores, ce qui explique pourquoi un mélange de grain est plus compact que les mêmes grains pris séparément.

Dans les deux manipulations précédentes, nous n'avons pas attaché d'importance aux proportions de chaque type de grains : le mélange choisi était 50% de petits grains et 50% de gros. Or, pour n'importe quel mélange bi-dispersé, il existe une proportion optimale de chaque constituant pour laquelle le mélange le plus compact peut être obtenu. Avec la manipulation 15, nous avons cherché cette proportion idéale en mesurant la masse de différents mélanges sable-gravier. Le maximum de compacité est obtenu avec environ 30% de sable fin et 70% de gravier.



*L'empilement apollonien*



*Chou-fleur Romanesco à structure fractale*



**MANIPULATION 15 :** Dans un mélange de deux ensembles de grains de tailles différentes, il existe une proportion optimale de chaque type de grains qui permet d'obtenir le matériau le plus compact. Avec notre sable fin et nos graviers, la proportion idéale est d'environ 30% de sable et 70% de gravier.

En résumé, pour augmenter la compacité (donc la résistance) d'un matériau granulaire, la solution consiste d'une part à mélanger des espèces de grains de différentes tailles et d'autre part à trouver la proportion idéale de chaque espèce.

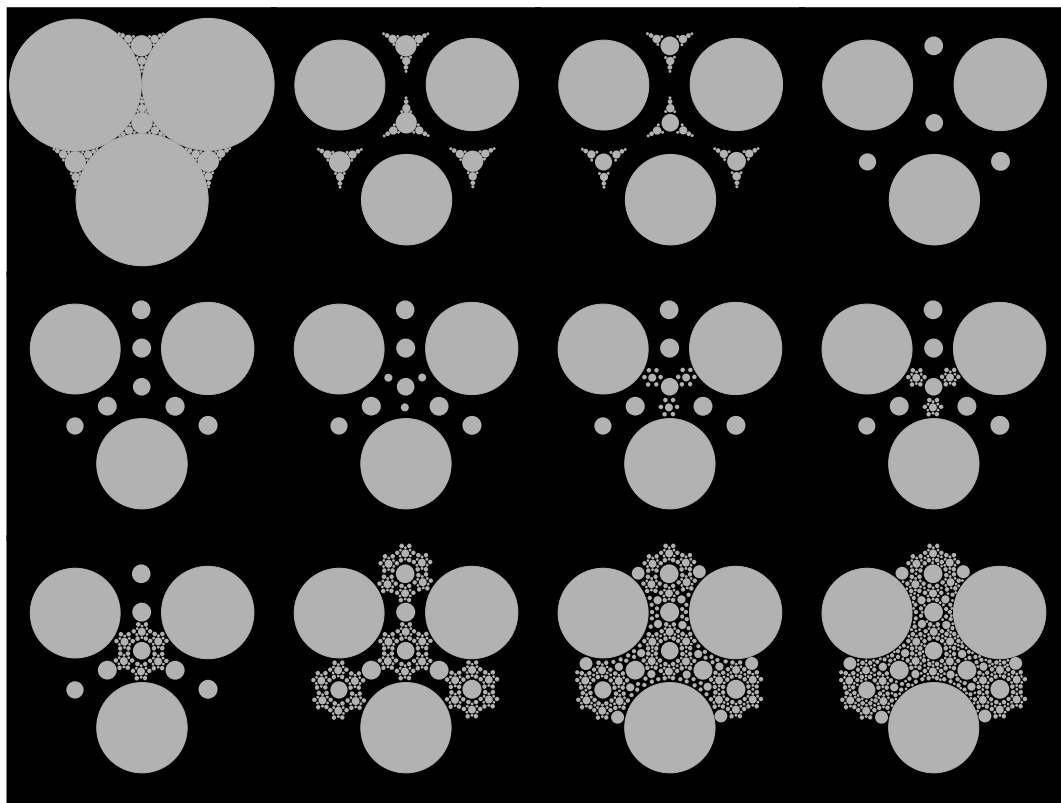
## Vers la compacité ultime

Après avoir obtenu le mélange optimum pour deux types de grains différents, une nouvelle limite de compacité apparaît. Il est possible alors d'ajouter aux deux types de grains précédents un troisième ensemble constitué de grains encore plus fins afin de remplir la porosité restante. En répétant l'opération, l'augmentation de la compacité est possible si ces vides sont remplis avec des grains de diamètres de plus en plus petits, jusqu'à des grains infiniment petits.

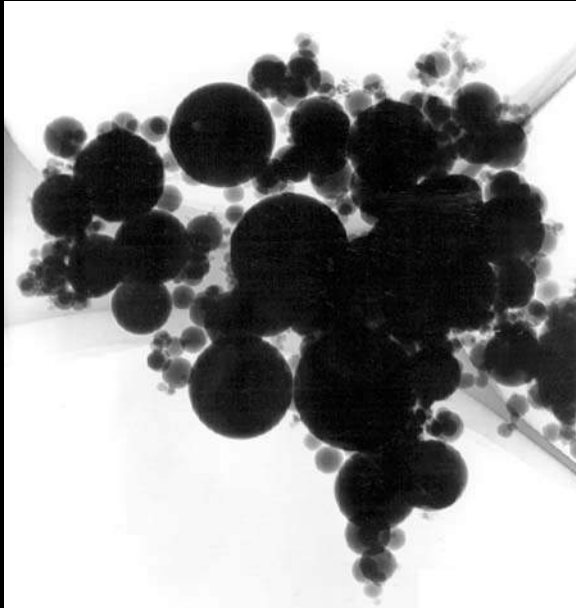
D'un point de vue géométrique, le problème peut s'énumérer ainsi : comment remplir au maximum un espace uniquement avec des boules ? Ce problème, soulevé par Apollonios de Perga<sup>1</sup> trois siècles avant notre ère, a une réelle importance pratique puisque la porosité du milieu peut ainsi être réduite, et, dans le cas des bétons, il est possible d'augmenter leurs propriétés mécaniques (jusqu'à un facteur 10) et leur durée de vie (surfaces libres internes réduites, donc sensibilité moindre aux réactions chimiques). La solution mathématique idéale est l'empilement apollonien, dans lequel chaque interstice entre 4 sphères est rempli par une sphère tangente à ces 4 sphères, et où ce principe est reproduit à l'infini dans le but d'atteindre la compacité ultime. L'image de gauche présente cet empilement. L'empilement apollonien est un bel objet mathématique. Il a la particularité étonnante d'être une structure fractale (Borkovec, De Paris, 1994 [129]).

<sup>1</sup> Géomètre, astronome et mathématicien grec d'Alexandrie (262-180 av. JC). Disciple d'Archimède, il est l'auteur d'une grande synthèse sur les sections coniques.

L'empilement apollonien a ainsi servi de modèle pour concevoir des bétons toujours plus résistants : entre un béton conventionnel et un super-béton, la porosité a évolué d'une valeur comprise entre 10% et 20% à une valeur comprise entre 1 et 2%, tandis que la résistance mécanique passait de 20MPa à 200MPa. Toutefois, la recherche de la compacité ultime se heurte aux nécessités de la mise en place des matériaux et aux lois de comportement rhéologique. Il faut donc rechercher un compromis entre maniabilité et compacité. C'est ainsi que l'on s'éloigne de l'empilement apollonien pour aller vers des modèles d'empilement espacé (Vernet 2004 [22]), où l'espacement est obtenu, non pas en ajoutant de l'eau, mais en insérant des classes de particules de plus en plus fines, en léger excès à chaque échelle par rapport à la situation apollonienne (voir schémas suivants). Ces empilements sont plus faciles à cisailier, donc plus maniables, bien que légèrement moins compacts. A titre indicatif, un « sacrifice » de compacité de 1 à 2 % peut amener un gain de maniabilité de 200 %. Il est possible aujourd'hui de formuler des bétons secs (d'affaissement nul) comme des bétons autocompactants (ou autonivelants) (Larrard, Sedran, [14]). L'empilement espacé, comme son nom l'indique, consiste à remplir l'espace avec des sphères qui ne se touchent pas et, comme dans l'empilement apollonien, à utiliser des sphères de plus en plus petites pour remplir la porosité restante. A partir d'un tel modèle, les grains peuvent se déplacer plus facilement, ce qui se traduit par un matériau plus maniable lors de la mise en œuvre.



Passage de l'empilement apollonien à l'empilement espacé



*La fumée de silice est constituée de grains micrométriques de tailles très variées*

Au-delà des problèmes de proportion de grains, l'enjeu se résume en partie à trouver les plus petits grains possibles, ceux qui vont permettre de remplir les pores les plus infimes du matériau. Pour les supers bétons, l'emploi de la fumée de silice, constituée de grains de taille relativement hétérogène dont les plus gros n'excède pas  $1\ \mu\text{m}$ , a été une révolution (Holland 2005 [16]). Ces grains sont idéaux pour remplir les pores les plus petits et de tailles variables qui sont présents dans un béton conventionnel.

La terre contient des particules de granulométrie très étendue, qui peuvent être complétées avec divers sables et graviers. Il serait intéressant de savoir si ces concepts s'y appliquent. Mais au-delà des considérations sur les proportions optimales, il est clair qu'un éventail de taille de grains très étalée contribue à construire un squelette granulaire compact. La terre à pisé de la région contient des grains qui vont du galet de 10 cm aux particules d'argiles de quelques microns. Elle constitue à ce titre un excellent matériau de construction.

**5 – Sur le tas**



Plus l'empilement est compact, plus le nombre de contacts entre grains est important, plus les forces d'interactions sont nombreuses. Ainsi, l'utilisation de grains d'échelles de tailles très diverses permet de densifier la matière et d'obtenir des matériaux plus résistants. Mais quelles sont ces interactions qui se mettent en jeu au niveau des surfaces de contact ? Pour répondre à cette question, il faut commencer par observer l'équilibre des forces dans un milieu granulaire sec sans cohésion. Un simple tas de sable constitue à lui seul une mine d'informations. Son organisation révèle en particulier l'existence des forces de frottements, qui sont responsables de la pente du tas.



**MANIPULATION 16 :** Un tas de sable se forme par avalanches successives. Ces avalanches permettent au tas de conserver une pente d'équilibre. Au fur et à mesure que le tas grossit, la pente reste constante. Le tas adopte la forme d'un cône de révolution.



## La pente d'équilibre

Si l'on verse du sable sur une surface plane avec un débit constant, les grains forment tout d'abord un petit tas dont la base grandit au fur et à mesure que le monticule s'élève. Puis, très vite, la pente atteint un angle maximal qui se stabilise (manipulation 16). C'est la pente d'équilibre, appelée aussi angle de repos ou angle de talus (manipulation 17).



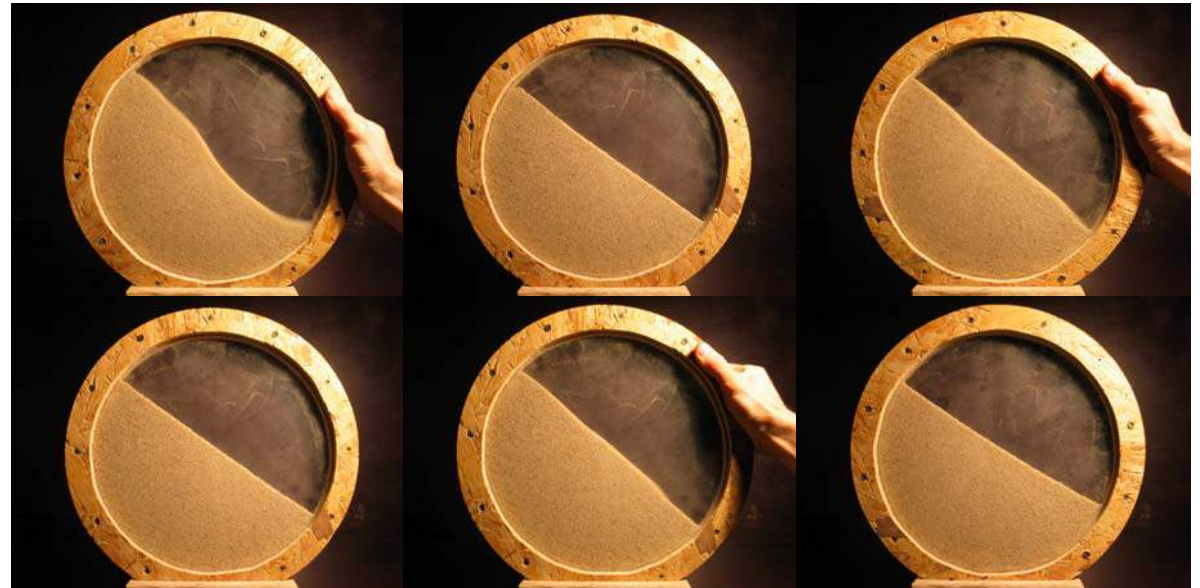
**MANIPULATION 17 :** Voici une vue en coupe d'un tas de sable. On appelle angle de repos l'angle que forme la surface du tas avec l'horizontale. Cet angle est caractéristique des grains utilisés. Si on reforme le tas, il adoptera toujours le même angle de repos.

Si cette pente devient trop inclinée, on observe de petites avalanches qui rétablissent l'angle initial. L'angle au-delà duquel la pente du sable devient instable est appelé l'angle d'avalanche (manipulations 18 et 19).



**MANIPULATION 18 :** On peut observer la pente du sable dans de simples bocaux cylindriques que l'on fait rouler sur les côtés. En tournant un bocal on crée une avalanche qui réorganise la pente selon l'angle de repos. A cet angle correspond l'angle d'avalanche, plus grand d'environ 2 degrés pour les sables.





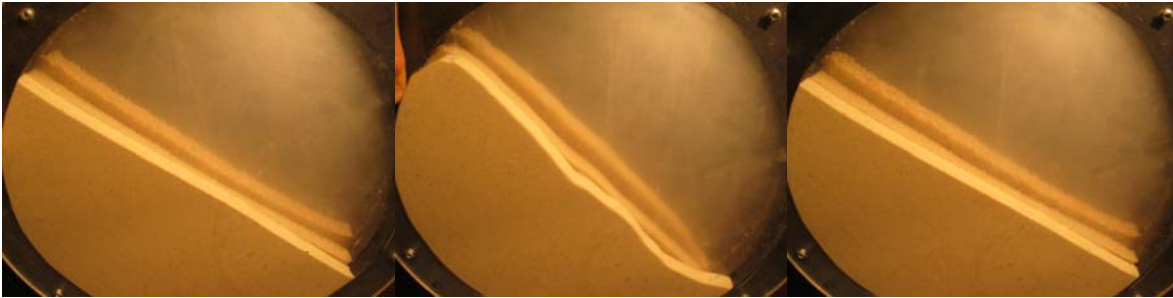
**MANIPULATION 19 :** L'angle d'avalanche est l'angle au-delà duquel la pente du sable devient instable. Les écoulements de sable ainsi formé ramènent systématiquement le sable à son angle de repos.

Cet angle est plus grand que l'angle de repos d'environ 2 degrés (Duran 2003 [34]). La pente du tas dépend des grains qui le constituent. Il varie selon la taille, la rugosité, la forme, l'angularité et la densité des grains considérés. Par exemple, l'angle de repos d'un ensemble de billes de verre est plus faible que celui d'un ensemble de graviers ronds, qui est plus faible que celui de grains anguleux (manipulation 20). Plus les grains sont lisses et ronds, moins il y a de frottement, plus l'angle de repos est faible.



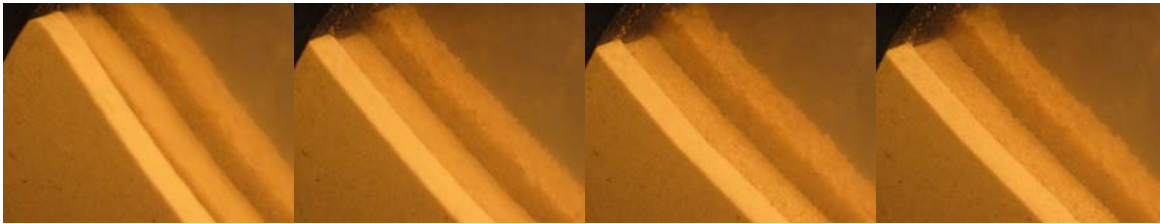
**MANIPULATION 20 :** La pente du tas dépend des grains qui le constituent. L'angle de repos des billes de verre est plus faible que celui de graviers ronds de même taille, qui est plus faible que celui de grains anguleux.

Dans le cas des sables, la pente du tas reste relativement constante et sa valeur avoisine les 30 degrés (manipulation 21).



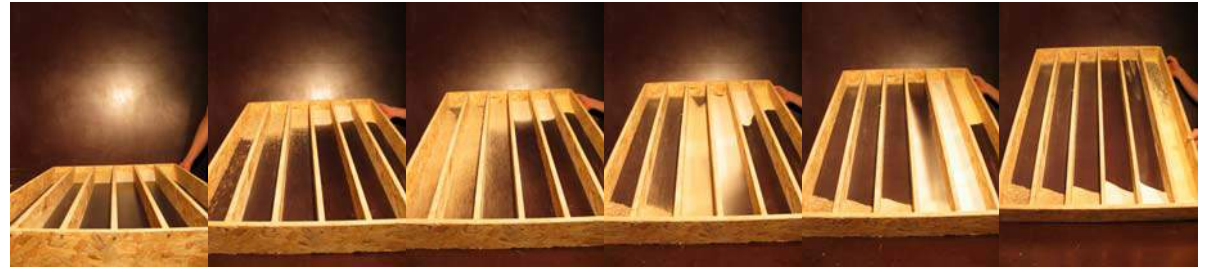
**MANIPULATION 21 :** Des sables de différentes tailles de grains ont des angles de repos relativement semblables dont la valeur est comprise entre 30 et 35°. On retrouve fréquemment cette valeur dans la nature, au niveau de l'angle de talus des terrains meubles.

L'angle d'avalanche semble également le même, mais une observation plus minutieuse permet de voir que l'avalanche du sable gros se déclenche et se termine légèrement avant celle du sable moyen qui se déclenche et se termine légèrement avant celle du sable fin.



**MANIPULATION 21 BIS :** Dans le cadre rond à trois compartiment, l'avalanche du sable grossier se déclenche et se termine légèrement avant celle du sable moyen, qui se déclenche et se termine légèrement avant celle du sable fin.

Cette différence est plus visible encore dans un banc à plusieurs pistes. Dans chaque compartiment sont placés des grains à granulométrie décroissante de gauche à droite : gravier, sable grossier, sable moyen, sable fin, sable très fin et silt. Lorsqu'on incline le support, les graviers glissent en premier, puis les grains de sable grossier et ainsi de suite jusqu'au silt.



**MANIPULATION 22 :** Dans ce banc à plusieurs compartiments sont placés des grains à granulométrie décroissante (du plus gros au plus fin de gauche à droite). Lorsqu'on incline le support, les avalanches se déclenchent l'une après l'autre en commençant par les graviers et en finissant par le silt. L'angle d'avalanche augmente au fur et à mesure que la taille des grains diminue.

Plus les grains sont fins et plus l'angle d'avalanche est important. Une première explication de ceci réside dans la rugosité du support. Si l'on rapporte celle-ci à la taille des grains, il est facile d'imaginer qu'elle devient de plus en plus importante au fur et à mesure que la taille des grains diminue : pour un gravier, le support fera l'effet d'un chemin de terre légèrement caillouteux, pour le grain de silt ce support ressemblera davantage à une piste noire avec des bosses de plus de 1 mètre de haut ! Pour des grains extrêmement petits, la moindre rugosité peut constituer un obstacle infranchissable.

Cette différence ne suffit pas cependant à expliquer pourquoi dans le multirond l'avalanche se produit pour le sable grossier avant celle du sable fin. Dans ce cas, la rugosité du support est constituée par les grains eux-mêmes. Elle augmente donc de manière proportionnelle avec la taille des grains. La deuxième explication réside dans la notion de surface spécifique des grains. La force qui tire les grains vers le bas est la gravité. Elle dépend de la masse qui dépend du volume (les grains petits ou grands ont la même masse volumique). Les forces qui retiennent les grains et les empêchent de descendre sont les forces de frottement, qui dépendent de la surface de contact. La force qui fait glisser les grains dépendant du volume et celle qui les retient dépendant de la surface, lorsque la taille des particules augmente, la force qui fait descendre les grains devient plus importante que celle qui les retient.

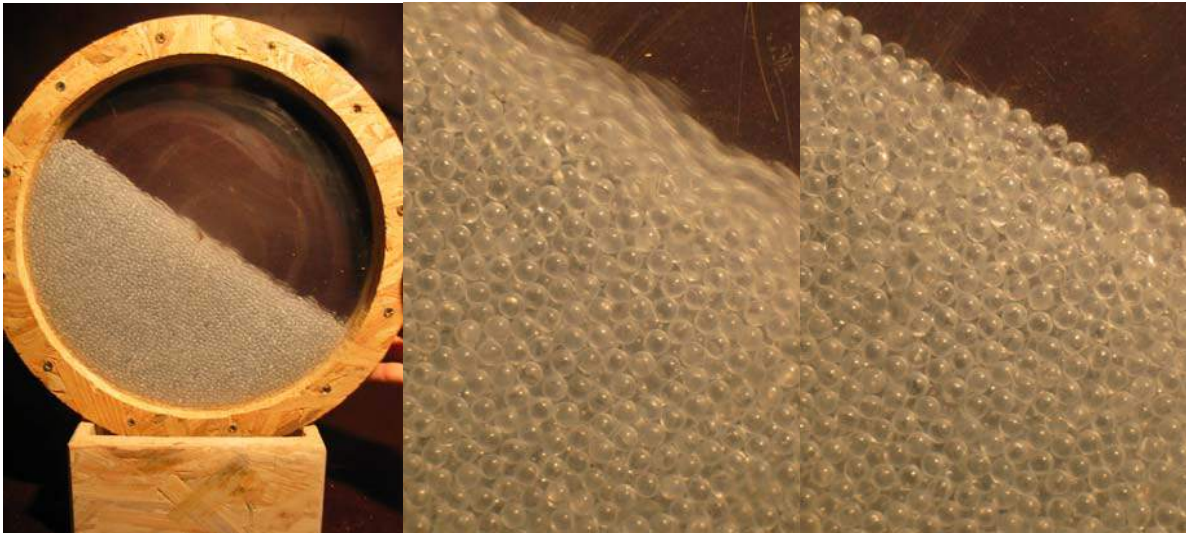
## Coulomb, le frottement et l'angle de repos

Sans le frottement qui s'exerce entre les grains, le sable ne pourrait se présenter sous la forme d'un tas. Il adopterait alors sa forme d'équilibre la plus stable en exhibant une surface horizontale, comme un liquide. Le frottement « bloque » la matière dans un état d'équilibre particulier. La première explication de l'angle de repos a été proposée en 1773 par Charles de Coulomb qui se préoccupait de la stabilité des talus de terre et de sable utilisés dans la réalisation de fortifications et autres ouvrages d'art. Coulomb avait introduit le concept de frottement solide, qui explique qu'un solide posé sur une surface horizontale ne puisse être mis en mouvement que si on lui applique une force horizontale suffisante pour vaincre le frottement. Le rapport entre cette force  $F_t$  et la force verticale appliquée  $F_n$  – généralement le poids de l'objet – est une constante qui dépend de la nature des surfaces en contact. On peut lui associer un angle  $\theta$  dont la tangente est égale à  $F_t/F_n$ . Cet angle est aussi celui d'un plan incliné au-delà duquel le solide va se mettre à glisser. Coulomb reprend cette étude mécanique à partir du glissement d'un bloc de terre sur un plan incliné. Ainsi, l'existence d'un angle de frottement au-delà duquel un solide se met en mouvement n'est pas spécifique au tas de sable.

## Reynolds, l'angle de repos et l'angle d'avalanche

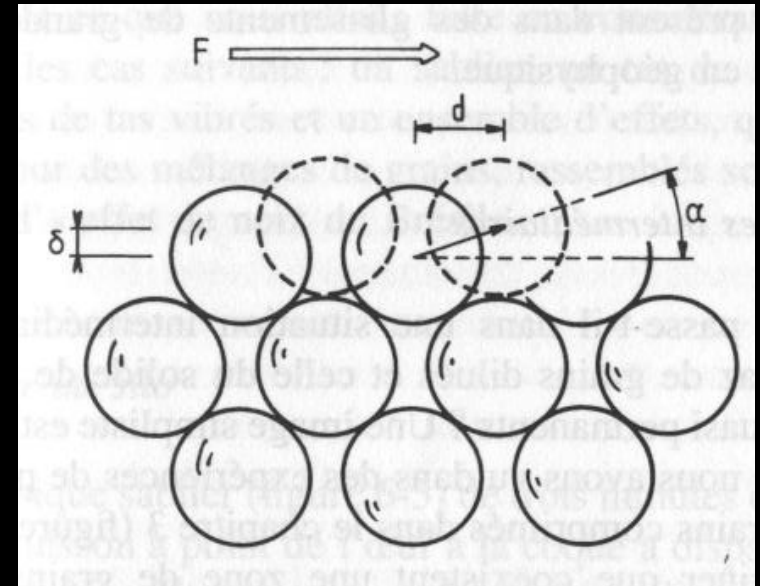
Guyon, Troadec 1994 [39]

Cependant le modèle de coulomb est insuffisant pour expliquer la nécessité de deux angles (repos et avalanche) pour définir la stabilité d'un milieu granulaire. L'existence de ces deux angles ne résulte pas uniquement de la compétition entre les forces de pesanteur et les forces de frottement. Il faut considérer d'autres facteurs liés à la géométrie des grains et à leur arrangement. La surface d'un tas n'est pas lisse. Elle est constituée de creux et de bosses. Au repos, les grains se placent entre les bosses, à l'image d'une pyramide de billes, dans laquelle une bille se place dans le creux formé entre les trois billes de la base. Pour pouvoir glisser, l'inclinaison de la pente doit être suffisante pour que l'angle de frottement soit atteint mais il faut aussi que le grain se déloge de sa cavité. La manipulation 18 permet d'observer de près la manière dont se fait l'écoulement pendant l'avalanche.



**MANIPULATION 23 :** L'écoulement granulaire se fait par couches qui glissent les unes sur les autres. La première couche glisse très vite, la deuxième un peu moins vite, la troisième encore moins, jusqu'à l'immobilité au niveau de la 5<sup>ème</sup> couche environ. Les grains pour pouvoir descendre adoptent un déplacement « en dents de scie ».

D'une part on voit que l'écoulement se fait par couches : la première couche glisse très vite, la deuxième un peu moins vite... jusqu'à l'immobilité des grains à partir de la 5<sup>ème</sup> couche environ (les grains situés en profondeur supportent le poids des grains placés au-dessus, ils sont plus facilement bloqués). Mais surtout en observant le mouvement d'un seul grain, on voit qu'il descend la pente « en dents de scie ». La différence entre l'angle d'avalanche et l'angle de repos provient de ce type de déplacement où, pour pouvoir descendre, un grain doit aussi se déplacer transversalement par rapport aux autres grains. Il y a donc une origine commune entre les deux angles de stabilité du tas et la rigidité d'un milieu granulaire dans une enveloppe mise sous vide. Les grains pour pouvoir se déplacer (qu'il s'agisse de l'avalanche sur la pente d'un tas ou de la déformation d'un milieu granulaire sous contrainte) doivent d'abord s'écarter les uns des autres.



*La différence entre l'angle d'avalanche et l'angle de repos provient de ce type de déplacement où, pour pouvoir glisser, un grain doit aussi se déplacer transversalement par rapport aux autres grains © Guyon, Troadec 1994 [39]*

## L'avalanche et la théorie de la criticalité auto-organisée

Bak 1996 [26]

Le comportement du sable est étrange. Quand il adopte la forme du tas, il se met dans un état d'équilibre que l'on peut qualifier de « critique ». La plupart des systèmes, lorsqu'ils sont en déséquilibres, adoptent ensuite une forme d'équilibre stable. Or le sable, après une avalanche, se place à nouveau dans une configuration instable. Il s'organise de lui-même selon un état d'équilibre critique. Une infime perturbation, comme l'ajout d'un nouveau grain, peut provoquer une nouvelle avalanche par réaction en chaîne parce que de nombreux grains à la surface du tas sont en limite d'équilibre et glissent facilement lorsqu'ils sont heurtés par un grain en mouvement. Le simple passage d'un skieur, ou même un simple son, peut provoquer une avalanche de neige par exemple.

Le tas de sable a ainsi servi de modèle à une des théories les plus connues de la physique contemporaine : la criticalité auto-organisée. Selon cette théorie, introduite en 1987 par le physicien Per Bak, la nature est en permanence hors d'équilibre, mais organisée dans un état suspendu - l'état critique - où tout peut arriver selon des lois statistiques bien définies. Des événements mineurs, comme l'ajout de quelques grains, peuvent déclencher des fluctuations de grande amplitude. Ce modèle peut s'étendre à de nombreux phénomènes dits complexes : les tremblements de terre, les embouteillages, les krachs boursiers et même l'évolution, à condition d'interpréter les extinctions massives comme de grandes avalanches. Pourtant, si le modèle de criticalité auto-organisée semble s'appliquer aujourd'hui à de nombreux phénomènes, le hasard a voulu qu'il ne s'applique précisément pas au tas de sable qui l'avait inspiré. Le tas de sable ne produit pas des avalanches de toutes tailles et toutes durées prévues par le modèle, mais des avalanches de tailles similaires qui se produisent de manière presque périodique dans le temps. Si l'alimentation en grains est régulière, la taille des avalanches est simplement proportionnelle à la taille du tas, la quantité de matière en mouvement étant définie par la différence entre l'angle d'avalanche et l'angle de repos.

## L'angle de repos et les paysages naturels

### L'effet volcan

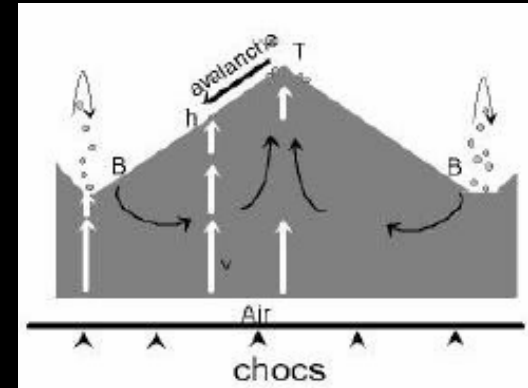
Si on étale du sable fin sur une plaque vibrante, celui-ci se réorganise de manière spectaculaire et adopte un relief qui ressemble à s'y méprendre à un paysage. Pendant longtemps, ce phénomène a constitué une énigme de la physique contemporaine. Les scientifiques ne comprenaient pas comment des vibrations pouvaient être à l'origine de formes aussi complexes.



**MANIPULATION 24 :** Du sable fin étalé sur une plaque vibrante se réorganise de manière spectaculaire pour dessiner des reliefs semblables à des paysages.

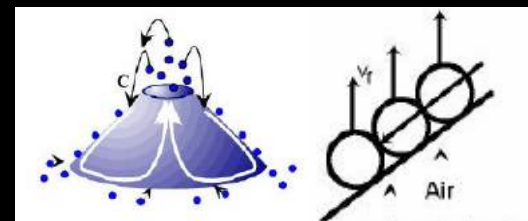
En réalité, ce ne sont pas les vibrations qui sont à l'origine de cette réorganisation du sable, mais les mouvements d'air créés autour de la plaque. Pour comprendre ce qu'il se passe, il suffit de considérer le cas d'un petit monticule de sable. Au moment du choc, le tas de sable « décolle » de la plaque. Une lame d'air se crée entre les deux. Lorsque le tas retombe, il comprime cette lame d'air, contraignant ce dernier à passer à travers le tas. En sortant, cet air va expulser avec lui des grains qui vont retomber sur les flancs du monticule. Celui-ci va peu à peu s'élever jusqu'à atteindre son angle de repos. Les grains les plus faciles à éjecter sont ceux qui se situent au sommet du tas, puisque ceux qui sont sur les côtés sont bloqués par le poids des grains situés au-dessus. Au fur et à mesure que la plaque est vibrée, il se crée un mouvement de convection dans le tas, qui amène les grains du bord au centre puis les expulse de la « cheminée centrale » vers le haut. Ce phénomène a ainsi été baptisé « l'effet volcan ».

Les reliefs complexes obtenus sont ainsi structurés par l'angle de repos. Les surfaces sont bien plus variées que celle du simple cône de révolution du tas de sable envisagée ci-dessus. Leur beauté réside sans doute dans leur lien de parenté avec certains paysages naturels. Les reliefs présentés sur la page de droite rappellent parfois ceux d'un réseau complexe de vallées, de lits de rivières et de leurs affluents. Dans le contexte actuel des recherches poursuivies pour discerner les traces de la présence d'eau sur les planètes de notre système solaire, Jacques Duran, dans son livre « Sables émouvants » (Duran 2003 [34]), précise qu'il convient d'être très prudent quant à l'interprétation des clichés issus des sondes spatiales. En l'absence totale d'eau, les instabilités des sols formés de petits grains, sous la poussée de gaz émergents peuvent très bien imiter des structures orographiques dans un milieu complètement sec.



*Au moment du choc, le tas « décolle » de la plaque. Une lame d'air se crée entre les deux. Lorsque le tas retombe, il comprime cette lame d'air, contraignant ce dernier à passer à travers le tas. En sortant, cet air va expulser avec lui des grains qui vont retomber sur les flancs du monticule. Celui-ci va peu à peu s'élever jusqu'à atteindre son angle de repos. Les grains les plus faciles à éjecter sont ceux qui se situent au sommet du tas, puisque ceux qui sont sur les côtés sont bloqués par le poids des grains situés au-dessus. Au fur et à mesure que la plaque est vibrée, il se crée un mouvement de convection dans le tas, qui amène les grains du bord au centre puis les expulse de la « cheminée centrale » vers le haut. Ce phénomène a ainsi été baptisé « l'effet volcan ».*

© Duran 2001 [36]



*Les grains les plus faciles à éjecter sont ceux qui se situent au sommet du tas, puisque ceux qui sont sur les côtés sont bloqués par le poids des grains situés au-dessus.*

© Duran 2001 [36]



*Au fur et à mesure que la plaque est vibrée, il se crée un mouvement de convection dans le tas, qui amène les grains du bord au centre puis les expulse de la « cheminée centrale » vers le haut. Ce phénomène a ainsi été baptisé « l'effet volcan ».*

© Duran 2001 [36]

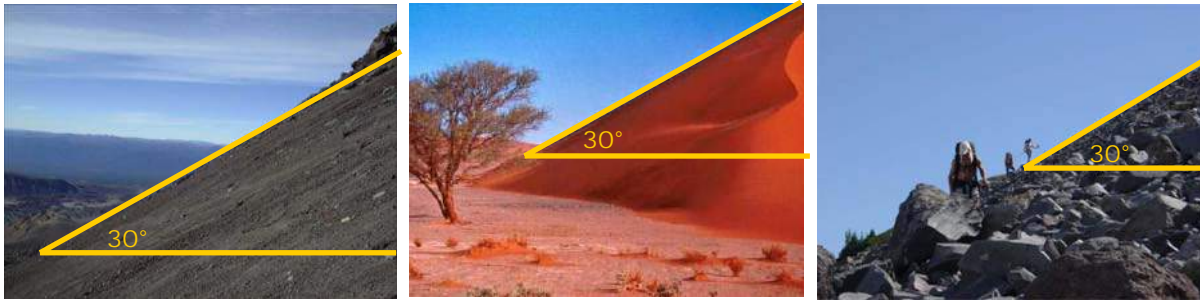
*Les reliefs complexes obtenus sont structurés par l'angle de repos. Les surfaces sont bien plus variées que celle du simple cône de révolution du tas de sable. Leur beauté réside sans doute dans leur lien de parenté avec certains paysages naturels qui sont structurés par l'angle de talus en terrain meubles.*





## Les paysages naturels en terrains meubles

L'angle de repos du sable, compris entre 30 et 35°, se retrouve fréquemment dans la nature.



L'angle de repos du tas de sable, compris entre 30 et 35°, se retrouve fréquemment dans la nature

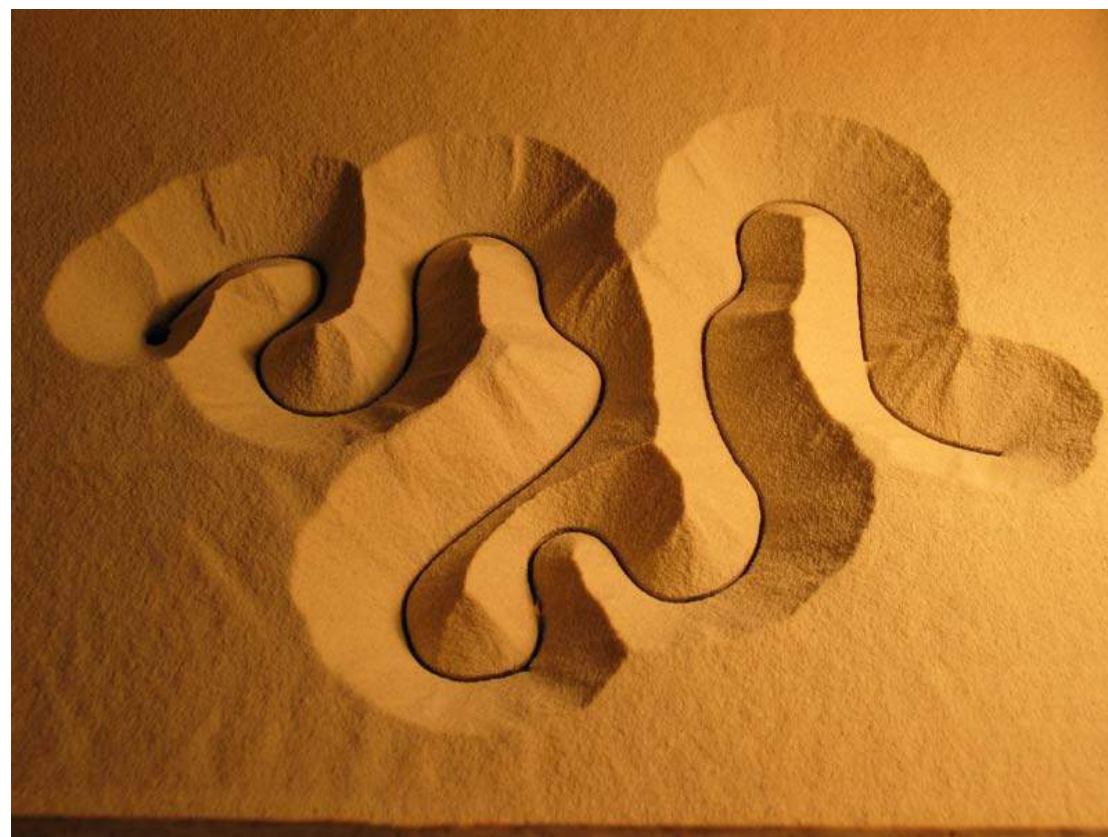
L'estimation de cette pente permet d'évaluer la stabilité des terrains meubles. Certains paysages sont modelés, structurés par leur pente. Dans certains cas, les volumes naturels reproduisent des surfaces d'égales pentes avec beaucoup d'évidence : la forme conique d'un volcan exhibe une pente parfaitement régulière et le lien avec l'angle de repos du tas de sable est criant. Mais le cône de révolution n'est qu'un exemple très particulier des surfaces réglées d'égales pentes. Ces surfaces peuvent définir des volumes beaucoup plus complexes et déboucher sur une grande diversité de formes et de paysages, en particulier en terrains meubles.



*Les surfaces  
d'égales pentes  
peuvent déboucher  
sur une grande  
diversité de formes  
et de paysages  
© Delarue*



En découpant un trou linéaire au fond d'un bac rempli de sable, on arrive à reproduire des formes complexes qui ressemblent aux vallées creusées par certains lits de rivière (manipulation 25).



**MANIPULATION 25 :** Un trou de forme linéaire et serpentine est découpé dans le fond d'un bac. Une trappe permet de remplir le bac de sable pour ensuite le laisser s'écouler à travers l'orifice. La forme obtenue reproduit le relief creusé par une rivière au fond d'une vallée.

*Site de Navacelle (Larzac)*  
© Delarue

Les dunes de sable avec leurs formes longues et sinueuses sont des parfaits exemples de surfaces réglées complexes (Iss 2004 [40]). Les rides de sable formées sur les dunes sont aussi le fruit de la structuration du sable selon son angle de repos.



© National Geographic

## L'architecture et les surfaces d'égal pente

De nombreuses surfaces d'égal pente se retrouvent dans diverses formes architecturales.



Le sable se révèle être un outil particulièrement simple et intéressant pour explorer la géométrie des surfaces à pente constante.

## MORPHOGENESE DES RELIEFS D'EGALE PENTE

*Versé sur tout objet de forme quelconque, un matériau granulaire comme le sable fin, s'y dispose, par gravité selon un relief volumique délimité par une surface dont, en chaque point, la pente extrême est constante, donc rectiligne.*

*De telles surfaces, exclusivement constituées de droites, s'avèrent développables (on peut les engendrer par la simple déformation d'une feuille souple, initialement plane).*

*Les caractéristiques de ces surfaces sont donc propices à la réalisation d'enveloppes et de toitures pouvant abriter des enceintes architecturales de formes variées. Aux commodités constructives s'adjoignent aussi des capacités de performance, puisqu'il s'agit de configurations d'équilibre de forces.*

*Ces reliefs conviennent encore pour toutes sortes d'aménagements paysagers car ils correspondent à la sculpturation naturelle de certains sols.*

*Or, en dehors des formes premières élémentaires (plans, cônes, cylindres...), les surfaces d'égale pente auxquelles on impose des supports non triviaux, adoptent souvent des dispositions complexes et imprévisibles, où siègent des emplacements singuliers difficiles à localiser.*

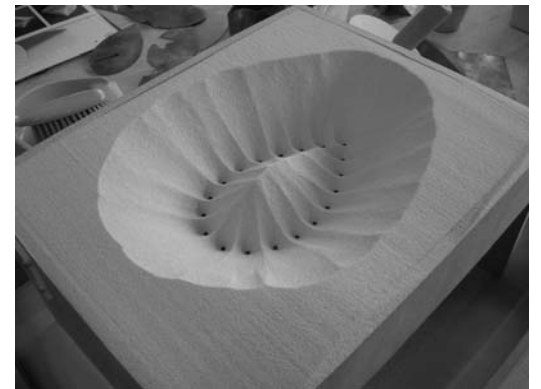
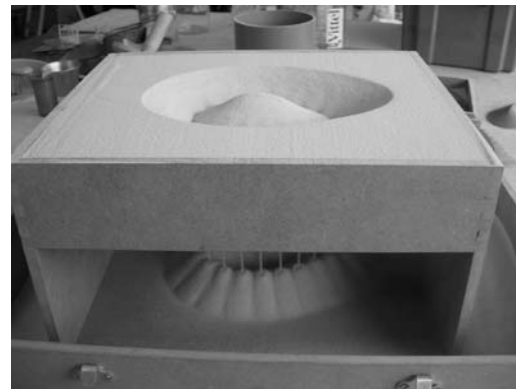
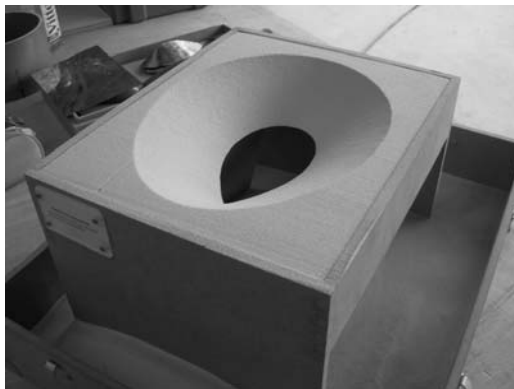
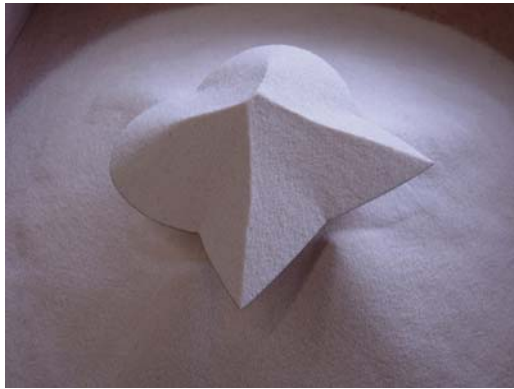
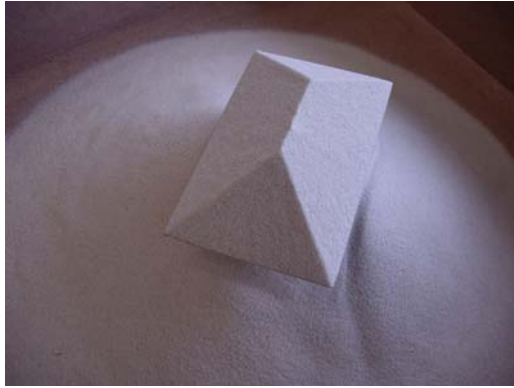
*Il s'agit donc de proposer les dispositifs expérimentaux qui, avec un sable de granulométrie adéquate, permettent la mise en scène physique de la constance de pente dans tous ses états imaginables, afin d'en saisir, à divers niveaux de compréhension, les propriétés attenantes d'ordre géométriques et structurales.*

*Ainsi devient-il aisé et plaisant de procéder à une exploration méthodique des reliefs d'égale pente, en vue d'applications constructives.*

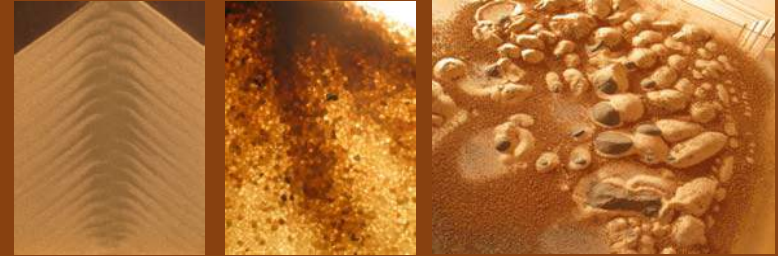
Jean-Marie Delarue<sup>1</sup>  
2005



<sup>1</sup> Jean-Marie Delarue, enseignant à l'Ecole d'Architecture Paris Malquais, utilise le sable pour explorer les surfaces réglées d'égaux pentes.



## 6 – *La ségrégation*



**Duran 1997 [35], 2003 [34]- Guyon, Troadec 1994 [39]**

**Il arrive fréquemment qu'un mélange de grains de différentes tailles (ou différentes formes, densités, rugosités, angularités, etc.) se séparent spontanément par catégories de même type. Il s'agit du phénomène de « ségrégation granulaire ». Ce mécanisme est courant dans la nature (Friedmann 2003 [105]), notamment lors du transport des grains qui sont séparés par certains agents comme le vent ou l'eau pour former différents types de dépôts et de paysages. On retrouve des figures de gradation dans les roches sédimentaires ou dans les dépôts du fond des océans, où la taille des particules diminue lorsque l'on va de bas en haut. Les grains sont classés lors de la sédimentation : la géologie parle de « granoclassement » pour désigner ce phénomène. De même, un champ labouré fait apparaître sans cesse de nouvelles pierres. Les phénomènes de ségrégation sont aussi présents dans la vie de tous les jours : dans un paquet de corn flakes les pétales brisées se trouvent au fond du paquet.**

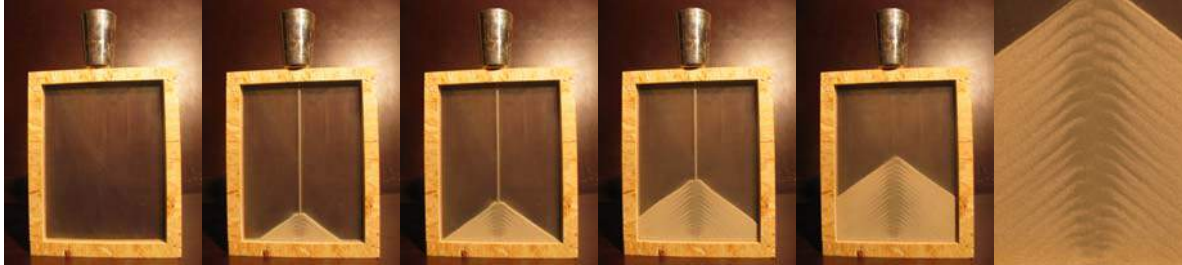
**A l'état sec, des grains différents se révèlent particulièrement difficiles à mélanger, ce qui constitue un réel problème pour certaines industries spécialisées dans le mélange (industrie pharmaceutique notamment qui doit faire face au problème complexe de mélanger des poudres constituées de grains très différents). Au niveau de la construction, on peut imaginer les conséquences sur la tenue mécanique d'un ouvrage d'un mauvais mélange des composants du béton (Constans S&V 2004 [33]).**

**Dans ce qui suit, la ségrégation est présente chaque fois que le système permet des déplacements des différentes espèces de grains les unes par rapport aux autres. Les expériences présentées ici semblent violer un principe d'entropie : plus on crée de l'agitation, plus on met en mouvement, et plus la matière se structure et se classe !**



## Ségrégation dans un tas

Si l'on fait couler un mélange de sable blanc et de silt noir à travers un entonnoir dans un cadre transparent, les grains se séparent par catégorie de taille. Le sable se place sur les côtés tandis que le silt reste au centre en dessinant une figure stratifiée qui ressemble à un sapin de Noël.



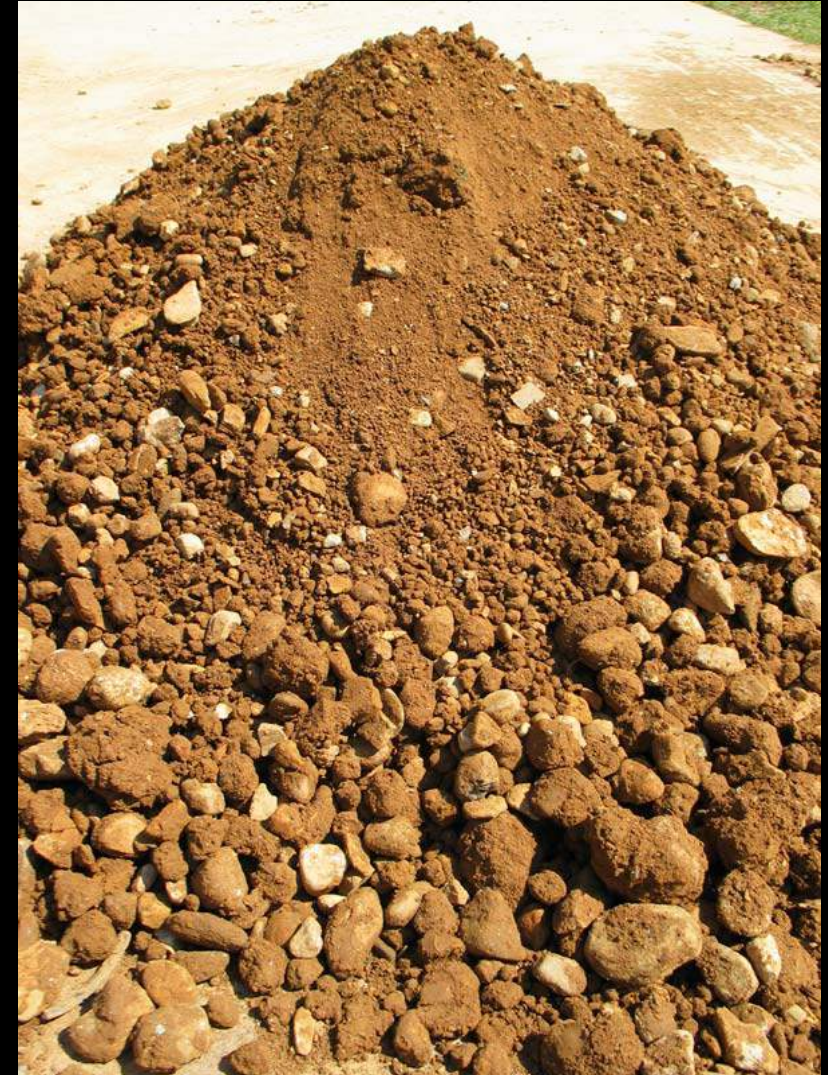
**MANIPULATION 26 :** Un mélange de silt noir et de sable blanc contenu dans un gobelet percé s'écoule à l'intérieur d'un cadre en plexiglas. Peu à peu les grains se séparent : les plus gros grains se placent sur les côtés alors que les grains de silt restent au centre. La figure obtenue se présente sous forme de strates, semblable à un sapin de Noël.

Cette ségrégation est liée aux angles d'avalanches respectifs du sable et du silt. La pente du monticule constitue un plan rugueux sur lesquels les grains roulent. Relativement à leur taille, cette rugosité est beaucoup plus importante pour les grains de silt (qui sont plus facilement bloqués) que pour les grains de sable. La régularité des strates est remarquable. Elle dépend de la hauteur de chute et du débit de l'écoulement. Lorsque l'alimentation en grain est constante, le cycle d'avalanche est régulier (le tas de sable n'est pas un système critique auto-organisé). La même expérience est reproduite avec des grains différents : sable blanc et terre rouge tamisée à 100 microns, grains de pisé de 2 mm et sable blanc. Elle fonctionne aussi avec trois tailles de grains différents (grains de pisé de 2mm, sable blanc, silt noir). La terre à pisé tamisée à 3 mm est un mélange de grains de différentes tailles. Elle est aussi sujette au phénomène de ségrégation. On a donc ici une vue en coupe de ce qui se passe à l'intérieur d'un tas.



**MANIPULATION 26 BIS :** L'expérience précédente est reproduite avec du sable blanc et de la terre rouge tamisée à 100 microns, puis avec du sable fin et des conglomérats de terre à pisé de 2mm, avec un mélange de 3 grains de trois types différents, et enfin, avec de la terre à pisé tamisée à 3 mm.

Dans un tas de terre de terre à pisé, les plus gros grains se retrouvent généralement à la base du tas (sur la circonférence) et les grains fins restent au sommet (au centre du tas).



*Ségrégation dans un tas de terre à pisé*

A l'aide d'un cadre à deux compartiments, on peut observer ce qui se passe à l'intérieur de l'entonnoir : il se forme un cône d'écoulement dans la partie du dessus. Notons la symétrie des reliefs créés par l'angle de repos dans la partie haute et la partie basse du cadre lorsque celui-ci est placé dans des positions diverses au cours de l'écoulement.



**MANIPULATION 27 :** L'expérience est reproduite dans un cadre à deux compartiments. On peut ainsi observer la forme du cône d'écoulement dans la partie supérieure. En inclinant le cadre dans diverses positions, on obtient des motifs variés. On note en particulier la parfaite symétrie des angles de repos.

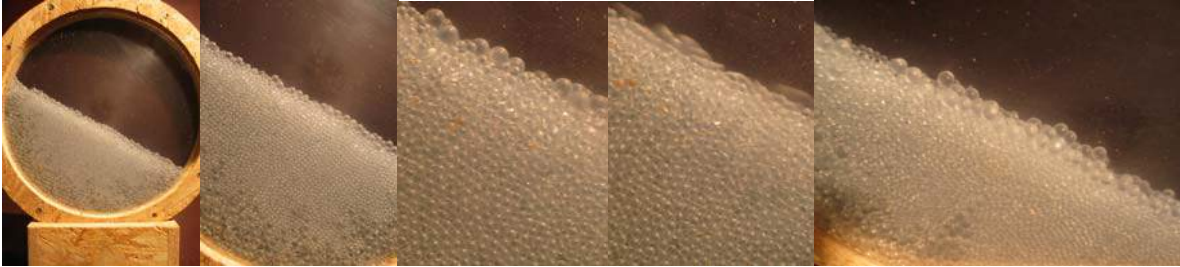
## Ségrégation dans une bétonnière

Un mélange « trois grains » est placé dans un cadre circulaire que l'on peut faire tourner sur son axe comme une roue de vélo. Là encore, le mélange de grains se réorganise par taille et dessine peu à peu une figure en forme d'étoile : les grains les plus fins restent au centre (sous forme de strates), et les plus gros roulent sur les côtés.



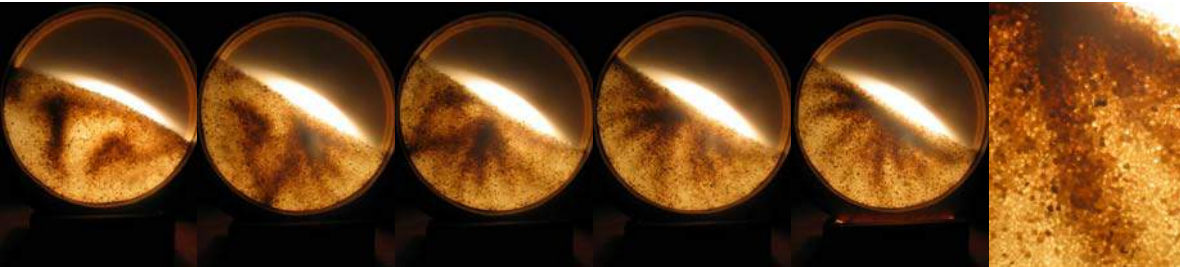
**MANIPULATION 28 :** Un mélange constitués de grains de 3 tailles différentes dans un disque tournant se sépare par catégorie de taille. Les plus fins restent au centre et dessinent une figure en forme d'étoiles à branches multiples.

Les raisons de cette ségrégation sont similaires à celles évoquées pour le tas. Dans un cadre circulaire identique rempli de grosses et de petites billes de verres, on peut clairement observer le phénomène. Lors des phases d'écoulement, les plus petites étant plus facilement bloquée sur la pente, les grosses billes se retrouvent systématiquement au-dessus. Or il a été vu précédemment que la première couche glisse plus vite que les couches situées dessous : les grosses billes arrivent les premières en bas. Il s'agit de plus d'un cercle vicieux, puisqu'au demi-tour suivant, les grosses billes se retrouvant en haut sont en situation privilégiée pour rouler par dessus les autres.

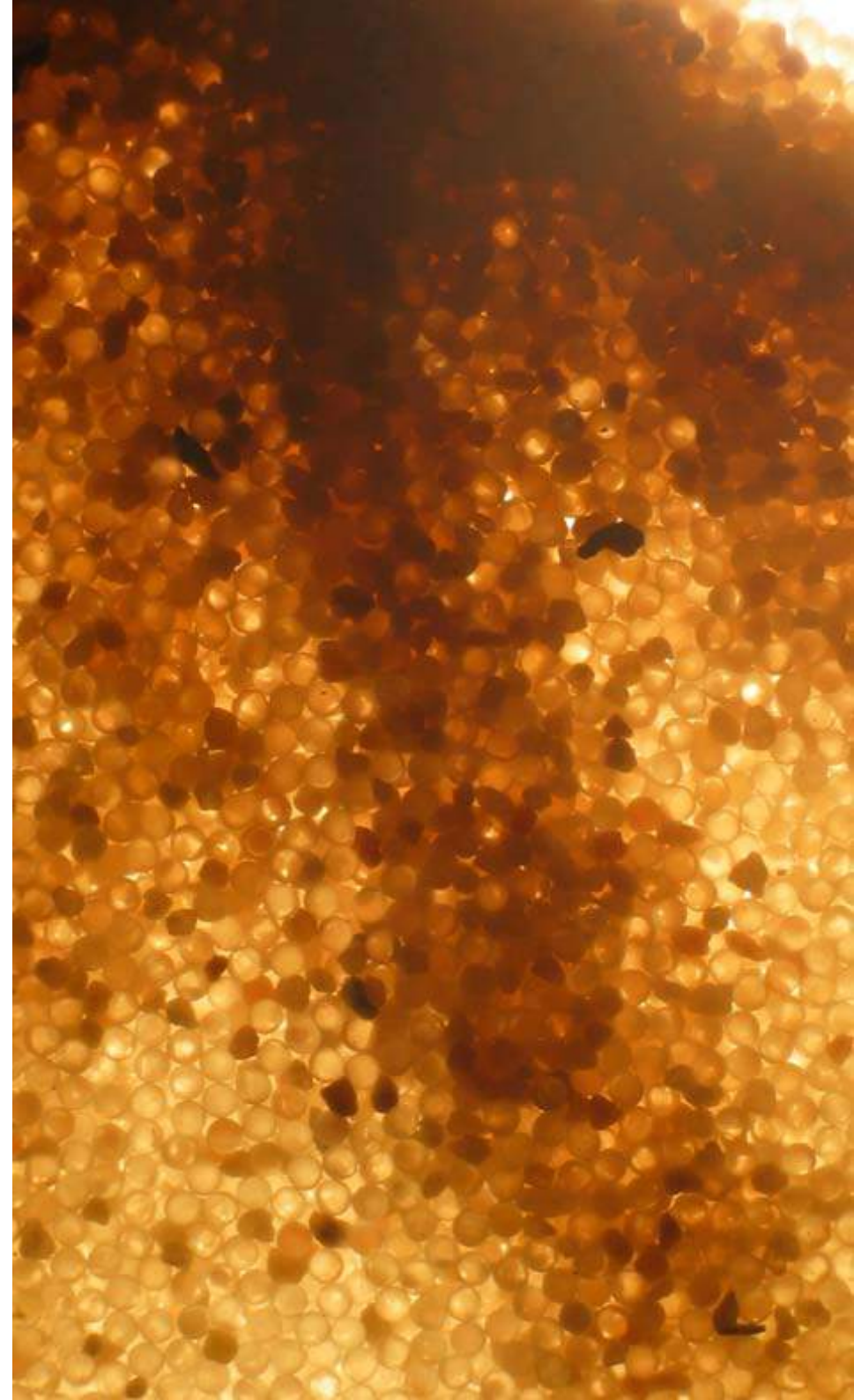


**MANIPULATION 29 :** Dans un mélange constitué de grosses et de petites billes de verre, les plus grosses s'écoulent au-dessus, les petites étant plus facilement bloquées par la rugosité constituée par l'empilement de billes. L'écoulement se faisant par couches, les grosses billes arrivent plus rapidement en bas.

On retrouve cette ségrégation avec un mélange de grains de même taille mais de type différents : billes de verre et grains de sable grossier. Les billes de verre, beaucoup plus lisses, roulent jusqu'aux bords et les graviers restent au centre.



**MANIPULATION 30 :** La même expérience est reproduite avec un mélange de billes de verre et de graviers de même taille. Les graviers, plus rugueux, restent au centre.



## La noix du brésil

Hong, Quinn 2001 [110] – Trujillo 2004 [122]

Une expérience simple consiste à placer quelques grosses billes de verre et du sable dans un gobelet. Des chocs successifs sont appliqués sur le fond du gobelet en tapant ce dernier bien à plat sur une table. Les billes remontent et finissent par réapparaître à la surface.



**MANIPULATION 31** : Un gobelet rempli de sable et de quelques billes de verre est frappé sur une table. Les chocs successifs font peu à peu remonter les billes à la surface. Ce phénomène est appelé « la noix du brésil ».

Au moment du choc l'ensemble des grains est soulevé, un interstice se forme sous les billes de verre dans lequel se fauillent quelques petits grains de sable. Ainsi, peu à peu, les grosses billes remontent. Une publication de 1987 dans les lettres à la *Physical Review*, dont le titre signifiait « Pourquoi les noix du Brésil sont sur le dessus... », a éveillé l'intérêt des physiciens sur ce sujet bien connu et décrit par les mécaniciens des sols. Les noix du Brésil sont de gros fruits de quelques centimètres de diamètre. Empilées dans des camions en même temps que d'autres fruits plus petits, elles se retrouvent au sommet du chargement après leur transport, secoué sur les routes brésiliennes.

## Ségrégation par vibration

On retrouve un phénomène de ségrégation avec un ensemble de grains étalés sur une plaque vibrante (manipulation 32). Les grains les plus fins sont les plus sensibles à l'effet volcan. Ils atteignent plus vite leur angle de repos et se retrouvent au centre des monticules. Les plus gros grains de matière ne réagissent que peu aux courants d'air et restent étalés sur la plaque.

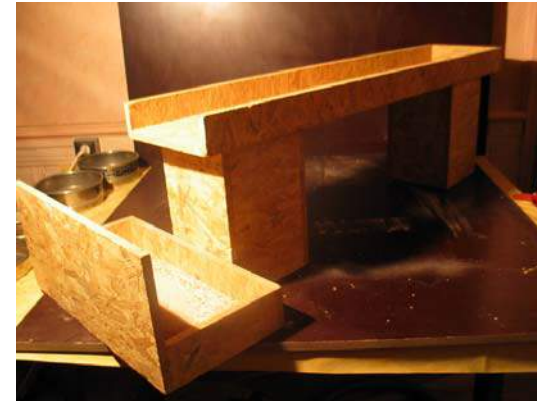


**MANIPULATION 32 :** La ségrégation se produit également par vibration avec un mélange de grains de différentes tailles. Les particules les plus fines, les plus sensibles à l'effet volcan, se retrouvent au centre, tandis que les plus gros grains, insensibles aux courants d'air, s'étalent sur la plaque.



## La benne de camion

On observe aussi de la ségrégation lorsqu'une benne de camion est vidée. L'expérience est reproduite ici avec une rampe remplie d'un mélange de graviers et de sable à son extrémité. Le tout est vidé dans un bac à deux compartiments.



MANIPULATION 33 : voir ci-dessous

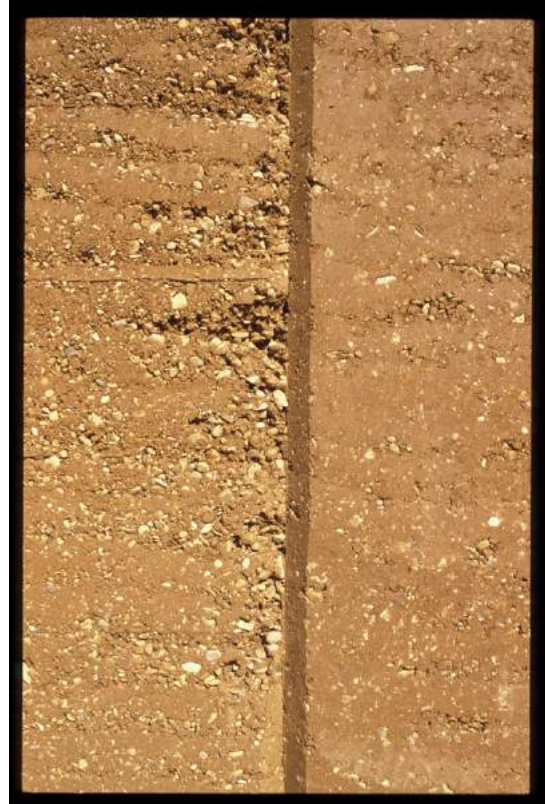
Lorsque la rampe est inclinée, les graviers et le sable se séparent : les graviers se placent dans le compartiment le plus éloigné de la rampe et le sable dans le compartiment le plus proche.



MANIPULATION 33 : Une rampe est remplie d'un mélange de sable et de gravier à son extrémité. Lorsqu'elle est inclinée, le gravier se dépose plus loin que le sable.

Les graviers descendent plus vite de la rampe. Ils sont plus lourds et plus rapides que les grains de sable, ce qui se traduit par un excès d'énergie cinétique qui les fait tomber plus loin.

Lors de la mise en œuvre du pisé, les systèmes de rampe destinés au remplissage des banches sont à éviter. Une ségrégation granulaire se produit à l'intérieur du coffrage, les plus gros grains se plaçant à l'extérieur de la banche. La tenue mécanique du mur est diminuée. Ci-dessous, sur la photo de droite, on peut observer l'aspect final d'un mur réalisé avec ce système de banche (côté gauche de la photo) et celui d'un mur réalisé normalement.



Lors de la mise en œuvre du pisé, les systèmes de rampe destinés au remplissage des banches sont à éviter. Une ségrégation granulaire se produit à l'intérieur du coffrage, les plus gros grains se plaçant à l'extérieur de la banche. © CRAterre





## *7 – Les chaînes de forces*



Duran 1997 [35], 2003 [34]- Guyon, Troadec 1994 [39]

La matière en grain distribue les efforts d'une manière bien particulière, caractérisée par sa propension à construire des réseaux plus ou moins complexes de chaînes de contacts solides, bâties à l'image des voûtes de cathédrales. Une force appliquée ponctuellement sur la surface d'un empilement, au lieu de se répartir uniformément comme elle le ferait dans un solide comprimé, se répand en une infinité de petits canaux, qui ont tendance à fuir vers les bords latéraux.

La création de voûtes peut avoir des effets néfastes dans de nombreuses applications industrielles. Les matériaux granulaires se trouvent souvent stockés dans des réservoirs (silos) constitué d'une partie supérieure cylindrique et d'une partie inférieure convergente. Lors de la vidange de ce réservoir, il peut se former, au niveau de l'orifice de la partie convergente une véritable voûte qui bloque totalement l'écoulement. Lors du transport en conduite de graviers, de sables ou de grains de blés, les blocages sont fréquents, obligeant les industriels à équiper leurs tuyaux de dispositifs coûteux et compliqués, comme des vis d'Archimède motorisées.

A une échelle bien plus grande, Stuart Savage, professeur à McGill University, décrit ces « effets de voûtes » avec des grains bien plus gros : les icebergs (Guyon, Troadec 1994 [39] – Kubat, Sayed, Savage, Carrieres 2005 [235]). Les mouvements induits par le vent et les courants marins sur des champs de blocs de glace fracturés flottant à la surface de l'eau dans l'arctique reproduisent des mécanismes de collisions, frictions, déformations, etc. et d'impressionnants effets de blocages lorsque les « grains » sont contraints de passer dans une zone plus étroite comme le détroit de Béring.

Dans le domaine de la construction, les effets de voûtes peuvent poser problème, en particulier en créant de petits espaces au sein de la matière protégés par un ensemble de grains en contact qui empêchent l'empilement de se placer dans sa configuration la plus compacte. Avec des grains arrondis, les voûtes sont plus instables et la matière se comprime plus facilement. D'autre part, la dispersion des efforts sur les côtés oblige à utiliser des coffrages résistants, que se soit dans le cas du pisé ou du béton.

Dans d'autres cas, la distribution des forces au sein d'un édifice granulaire peut être mise à profit de manière très efficace : depuis 200 ans, les performances des ballasts des chemins de fer, simplement constitués de granulats, restent inégalées. Ils ont la propriété unique d'être auto-adaptatifs : souples pour de faibles charges, rigides pour les charges les plus importantes (Duran 1997 [36], 2003 [35]).

## Arcs, voûtes et coupoles dans la matière en grain

### Arcs naturels

Les arcs sont des formes récurrentes dans la nature. Il en existe de toutes formes et de toutes tailles. Les structures obtenues sont d'une grande stabilité et leur durée de vie peut être extrêmement longue. L'arc existe à des échelles de taille très différentes. Ci-dessous, sur la photo en haut à droite et celle en bas au milieu, les personnages donnent une idée des dimensions impressionnantes que peuvent atteindre de telles structures.



## Arcs et systèmes constructifs

L'arc fonctionne en compression. Il permet de franchir un espace sans avoir recours à des matériaux qui résistent bien à la traction. Une fois que la clé de voûtes est posée, le poids se répartit le long des surfaces de contact, de briques en briques, jusqu'au sol.

Les bâtisseurs ont toujours su mettre à profit ce système pour élaborer des structures toujours plus complexes et toujours plus élancées. La matière est agencée dans l'espace pour créer une enveloppe qui cloisonne ou qui couvre un volume avec un minimum de matière. Au fil du temps, les formes architecturales ont évoluées de l'empilement le plus grossier de Stonehenge, où trois énormes blocs de pierre sont empilés, aux formes complexes des cathédrales telle que la Sagrada Familia. Les concepteurs de tels édifices, en tenant compte du chemin des efforts dans la matière de manière de plus en plus affinée, ont su réaliser des structures toujours plus hautes et élancées.

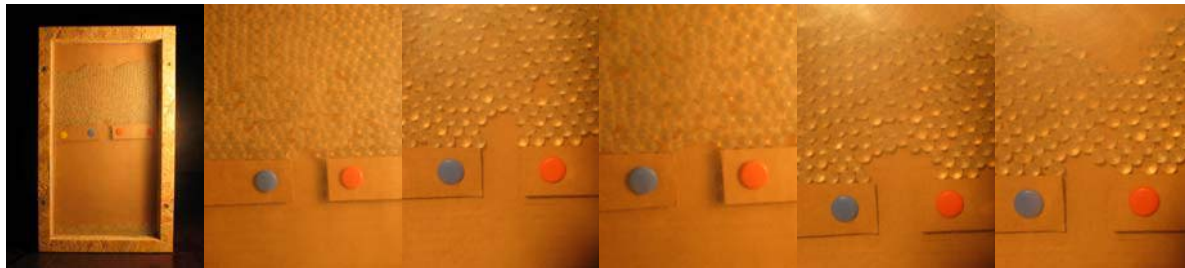


## Des grains et des arcs

Bien que les constructeurs utilisent la plupart du temps des blocs ou des briques à faces régulières, il est possible de fabriquer un arc, une voûte ou une coupole avec de petits grains sphériques. Il n'est d'ailleurs pas rare d'observer des ouvertures en forme d'arc dans un mur en pisé (voir page de droite). La photo ci-contre représente une voûte croisée creusée dans de l'ocre à Roussillon.

A partir de sphères métalliques aimantées, il est possible de construire un arc. En utilisant des billes de même taille, l'arc ne tient pas. En s'aidant avec de petites sphères, on multiplie les surfaces de contact, ce qui permet de faire tenir l'ensemble (manipulation 34).

Sans mortier, sans cohésion, un ensemble de grains secs, par contact et par frottement, peut aussi former des arcs. Un simple cadre, séparé en deux compartiments et rempli de billes de verre, peut le prouver (manipulation 35). Un orifice 5 fois plus grand que les billes permet de les faire passer de haut en bas, à la manière d'un sablier à 2 dimensions. Malgré leurs petites tailles, les billes restent bloquées dans la partie supérieure du sablier. On constate que les billes en contact forment un arc au-dessus de l'ouverture. En secouant le cadre, l'arc s'effondre, permettant aux billes de s'écouler. Mais, aussitôt, un nouvel arc se forme.



**MANIPULATION 35 :** Dans un sablier plan, des billes de verre se bloquent en formant des arcs au-dessus de l'orifice.



*Voûte croisée creusée dans une galerie d'ocre à Roussillon.  
© OKHRA 2004 [236]*

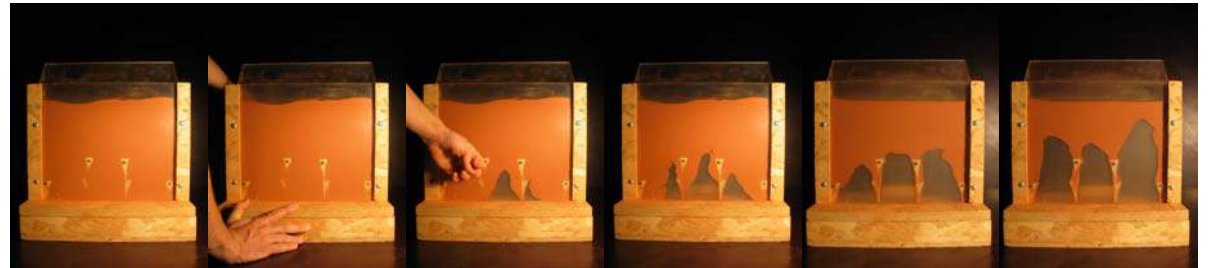


*MANIPULATION 34 :* Avec des sphères métalliques aimantées, il est possible de construire un arc. En utilisant des billes de même taille, l'arc ne tient pas. En s'aidant avec de petites sphères, on multiplie les surfaces de contact, ce qui permet de faire tenir l'ensemble.



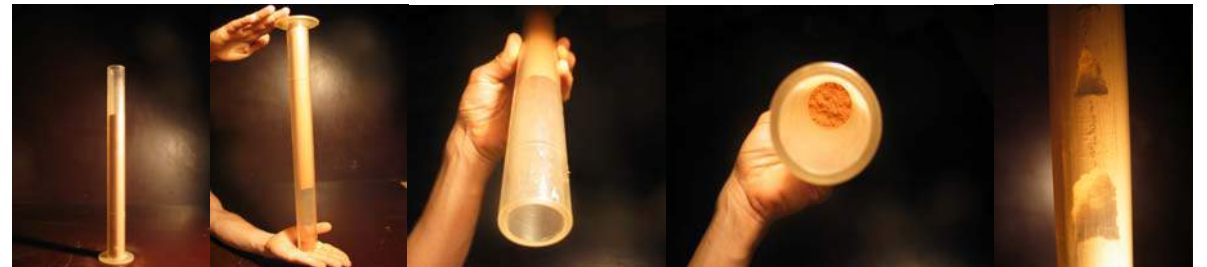
*Il n'est pas rare d'observer des ouvertures en forme d'arc dans des murs en pisé. © CRATerre*

Une poudre contenue dans un cadre, dont on peut ouvrir la base à l'aide d'une trappe, forme des arcs en s'écoulant par l'ouverture. La matière crée également une minuscule voûte entre les deux parois du cadre.



**MANIPULATION 36 :** Un cadre muni d'une trappe à la base est rempli de poudre rouge. Lorsque la trappe est ouverte, il se forme des arcs au-dessus de l'ouverture.

La même expérience est reproduite dans un tube rempli de poudre (préalablement tassée). Lorsqu'on retourne le tube, la poudre s'écoule par strates : il s'agit de coupoles qui s'appuient sur les parois du tube et qui bloquent la matière pendant un très bref instant avant de s'écrouler pour laisser apparaître une nouvelle coupole. Parfois, la coupole résiste suffisamment pour bloquer totalement l'écoulement. Il arrive aussi que, sur les parois du tube, se forment de petites voûtes.



**MANIPULATION 37 :** Dans un tube où la poudre a été préalablement tassée, en tapant le fond sur une table, l'écoulement se fait par écoulement de strates successives lorsqu'on retourne le tube. Il arrive que la poudre reste bloquée en formant une coupole qui s'appuie sur les parois.

Le sable ne coule pas comme de l'eau ou tout autre liquide ordinaire. En comparant la vitesse d'écoulement du sable et de l'eau, l'eau s'écoule dans un premier temps beaucoup plus vite que le sable, puis son débit ralentit jusqu'à ce qu'elle se fasse rattraper par le sable qui finit par « gagner la course » (manipulation 38).



**MANIPULATION 38 :** Si l'on compare la vitesse d'écoulement de l'eau et du sable, on observe que l'eau coule beaucoup plus vite que le sable au début de l'expérience, puis elle ralentit sa course et se fait « doubler » par le sable juste avant l'arrivée.

Le sablier de sable possède un avantage décisif sur les horloges à eau, dont le débit varie en fonction de la hauteur de liquide contenu dans le récipient supérieur : le débit du sable est constant. Une observation à la loupe de la ligne de front de l'écoulement dans un sablier montre que le sable s'écoule par écroulements successifs de coupes. Les grains de sable créent un réseau de chaînes de forces dans la matière qui disperse le poids sur les parois du tube, ce qui explique pourquoi le débit du sable n'est pas influencé par la quantité de matière située au-dessus de l'ouverture et reste constant.



*Dans un sablier, les grains de sable créent un réseau de chaînes de forces qui dispersent le poids sur les parois, de sorte que le débit du sable n'est pas influencé par la quantité de matière située au-dessus de l'orifice et reste constant.*

## Les phénomènes de blocages

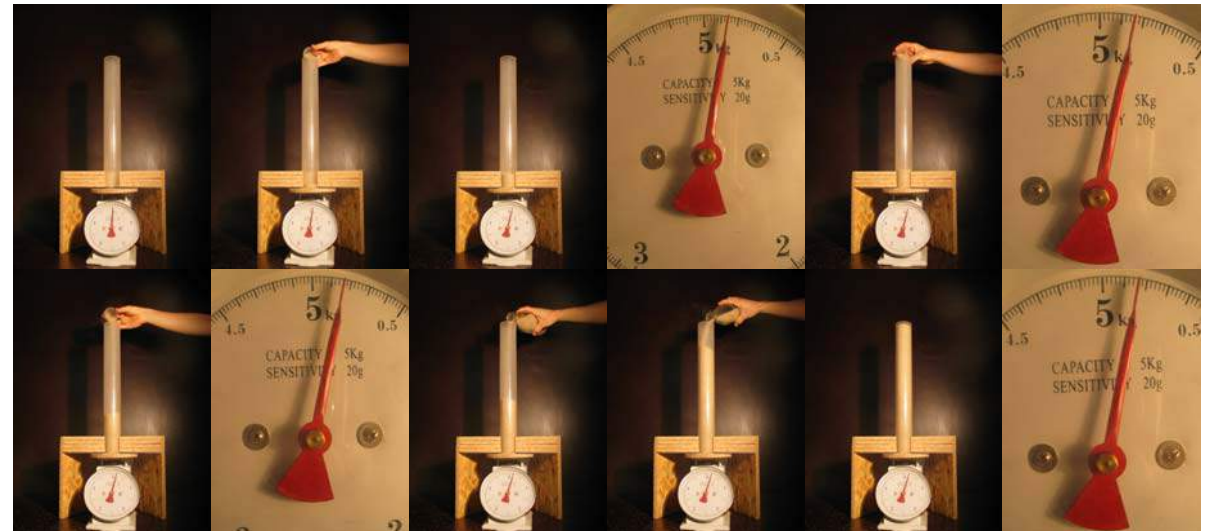
Ces arcs et ces voûtes observées précédemment ne sont que la partie visible d'un ensemble de réseaux de contacts qui se forment au sein de la matière en grain. Ces « effets de voûtes » sont responsables de nombreux phénomènes de blocages.

### La balance magique

Dans certaines conditions, peser du sable peut se révéler compliqué. Dans l'expérience qui suit (manipulation 39) un tube est placé au-dessus d'une balance, de telle sorte que le tube ne repose pas directement sur le plateau. On remplit le tube de sable petit à petit, en notant l'évolution du poids. Un premier volume est versé dans le tube : la balance indique 140 grammes. On verse un deuxième volume à peu près identique. La balance indique 160 grammes (au lieu de 280) ! A partir du troisième volume, le poids reste inchangé. On peut remplir le tube en entier, rien n'y fait, le poids n'évolue plus. Il reste constant. La balance semble bloquée.



*Dans un silo à grains, toute surcharge en hauteur doit être supportée par les parois qui doivent être pensées pour supporter ces forces. Dans le cas contraire, les pressions latérales sont telles qu'elles peuvent faire effondrer le silo.*



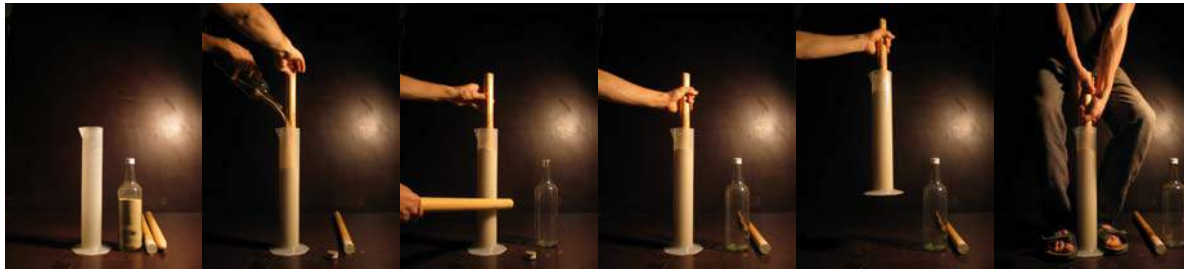
**MANIPULATION 39 :** Un tube est placé au-dessus du plateau d'une balance de telle sorte qu'ils ne soient pas en contact. Le tube est rempli de grains et l'évolution du poids est notée au fur et à mesure. Très vite, l'aiguille de la balance se bloque indiquant que le poids n'augmente plus.

A l'intérieur du tube, les grains forment des chaînes de contact. Les forces existants dans l'empilement ont tendance à se redistribuer vers les parois latérales, plutôt que de se diriger tout droit vers le bas comme la force de gravitation. Ainsi, le poids du sable n'est pas transmis jusqu'au plateau de la balance. Il est dévié vers les parois du tube, qui par friction, en supportent une partie. Ainsi, seul une petite partie des grains contribue à la masse apparente. La balance ne mesure que les grains les plus proches (à une hauteur inférieure au diamètre du silo approximativement). La friction des parois joue un rôle essentiel et amplifie les effets de voûte. Ainsi, dans un silo à grains par exemple, toute surcharge en hauteur doit être supportée par les parois qui doivent être pensées pour supporter ces forces. Dans le cas contraire, les pressions latérales sont telles qu'elles peuvent faire effondrer le silo (photo ci-contre).



## Bâton-béton

Il est parfaitement possible de s'arranger pour que du sable totalement sec et sans liaison chimique particulière entre les grains se comporte comme un vrai bloc de béton. L'expérience consiste à faire couler du sable dans un récipient dans lequel on place un bâton verticalement (manipulation 40). Le sable remplit l'espace autour du bâton. On le tasse légèrement en tapant sur les parois du tube. Puis on saisit le bâton d'une main pour le retirer. Surprise : le bâton est totalement solidaire du sable et du récipient et c'est tout l'ensemble qui se soulève. Le sable qui s'écoulait comme un liquide semble avoir pris comme un béton. Le bâton se révèle particulièrement difficile à retirer, surtout si sa surface est rugueuse.



**MANIPULATION 40 :** Un bâton est placé dans un récipient cylindrique. L'espace entre le bâton et les parois est rempli de sable. Celui-ci est légèrement tassé en tapant sur les côtés du récipient. Le bâton devient impossible à retirer comme s'il était pris dans du béton.

Encore une fois, dans le tube se sont formés une succession de petits arcs entre le tube et le bâton avec leur concavité dirigée vers le bas. Les deux extrémités de ces arches sont bien arrimées par frottement sec aussi bien sur la surface externe du bâton que sur la paroi interne du tube. Le fait de tasser le sable, en améliorant les contacts, renforce l'efficacité et la solidité de ces voûtes. Ces structures opposent une grande résistance lorsqu'on exerce sur le bâton une traction verticale de bas en haut. La tentative d'extraction du bâton impose une compression supplémentaire de ces arches. Or cette compression se révèle impossible, les grains étant particulièrement résistants à divers modes de déformation.

Une autre hypothèse pouvant expliquer la rigidité soudaine du sable réside dans la parenté du phénomène décrit ici avec celui d'un milieu granulaire enfermé dans une enveloppe qui devient solide lorsqu'on fait le vide. Ici, on peut imaginer que les grains convenablement tassés entre les parois et le bâton ne peuvent s'écarter les uns des autres, ce qui empêche tout mouvement des grains qui sont bloqués par leur empilement.

## Les chaînes de forces

Au sein de la matière en grain se constitue un réseau de contacts qui génèrent en particulier les phénomènes de blocages que nous venons de voir. C'est par ce réseau que vont se propager et se distribuer les forces dans la matière.

### La photoélasticimétrie

Ces chaînes de forces sont invisibles. La photoélasticimétrie permet cependant de visualiser les contraintes dans la matière. Un matériau photoélastique, placé dans un faisceau de lumière polarisée, change de couleur quand on lui impose une contrainte.

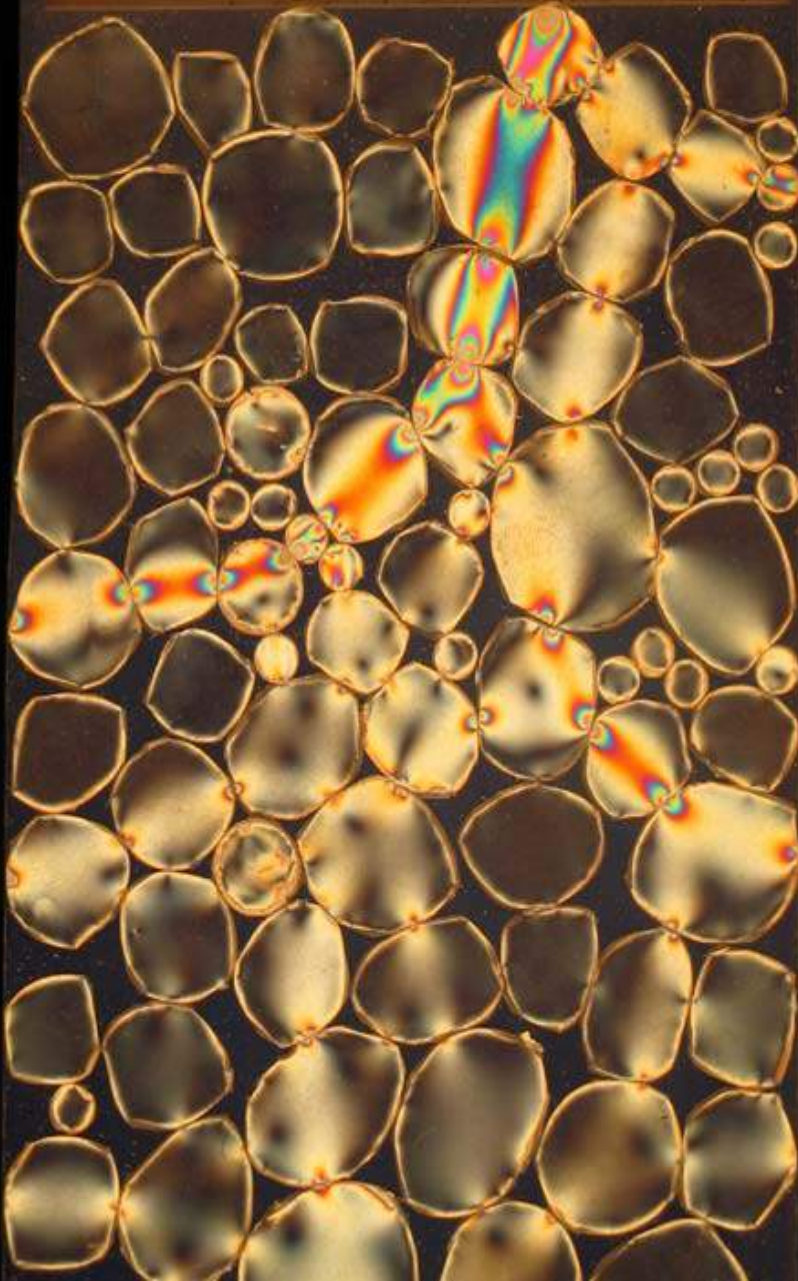


En lumière polarisée, un matériau photoélastique change de couleur lorsqu'il est contraint.

Des grains plats photoélastiques ont été découpés et placés entre deux plaques transparentes : on peut ainsi observer ce qui se passe à l'intérieur d'un empilement granulaire. Lorsqu'on appuie sur ces grains avec une languette, les chaînes de forces apparaissent comme des faisceaux lumineux dont la couleur change en fonction de l'intensité de la contrainte.



**MANIPULATION 41** : Un ensemble de grains plats découpés dans un matériau photoélastique est placé entre deux films polarisés sur un banc de photoélasticimétrie. On peut alors visualiser le trajet des chaînes de forces dans la matière en présence d'une contrainte.



On constate que la plupart des grains ne sont pas contraints. Une zone de grains en bons contacts entre eux et transmettant les efforts coexiste avec une zone voisine de grains lâches et plus mobiles. D'où l'intérêt d'utiliser de plus petits grains placés dans les pores entre les gros pour multiplier le nombre de contacts et répartir la charge sur un plus grand nombre.

D'autre part, les efforts verticaux sont transmis sur les parois latérales. Lors de la mise en œuvre du pisé, les coups du piseur sont redirigés dans les coffrages. Ceux-ci doivent être extrêmement résistants pour vaincre les poussées horizontales. L'intensité des couleurs est proportionnelle à l'intensité des contraintes et les grains du bas sont beaucoup moins contraints que ceux du haut. Le pisé se met en œuvre par couches minces : si la couche est trop épaisse, lorsque l'on pise, aucune force de compression n'est transmise au bas de la couche. Le gradient de densité est nettement visible sur un échantillon qui a été volontairement réalisé en une seule couche (photo de droite).

## Le ballast des chemins de fer

Duran 2003 [34]

Depuis les origines du rail, personne n'a jamais pu trouver mieux pour constituer les soubassements des voies ferrées que le ballast. La matière en grains se révèle un support quasi idéal pour la fabrication des voies empruntées par de très lourds transports. Le ballast redirige les forces verticales vers l'horizontale. Pour un ballast de forme pyramidale, cela revient à étaler le poids du train sur une grande surface horizontale au sol, plutôt que sur deux rails appuyés sur une seule rangée de traverses. La pression du sol est ainsi minimisée de manière spectaculaire.

Mais ce n'est pas tout. En transport ferroviaire, l'idéal est de disposer d'un support de rails dont la dureté s'adapte au poids du train, à la fois souple et facilement déformable lorsqu'il supporte de faibles charges et au contraire, plus résistant et moins déformable lorsqu'il est soumis à un lourd chargement. Le ballast de graviers répond à ce cahier des charges. La plupart des matériaux qui nous entourent sont élastiques : ils se déforment de manière proportionnelle à la force qui leur est appliquée. Le ballast a la propriété unique d'être « hyperélastique » : il devient de plus en plus dur lorsque la charge augmente. Cette propriété résulte de deux mécanismes fondamentaux.

Le premier se déroule au niveau du contact entre deux grains. Imaginons deux boules de billards pressées l'une contre l'autre. Pour une faible sollicitation, la surface de contact est un disque de faible diamètre. La déformation est relativement aisée. Quand la force pressante augmente, le diamètre du cercle augmente rapidement. Pour continuer à déformer les boules il faudra appuyer beaucoup plus fort. Ainsi, sous une faible sollicitation, le matériau constitué par les deux boules de billard est relativement souple. Mais s'il est comprimé très fortement, le matériau constitué par les deux boules devient très dur.

Le deuxième mécanisme est lié à l'empilement du ballast. En son sein, en l'absence de train, certains cailloux sont en contact. Ce sont eux qui supportent le poids lorsqu'un train léger roule sur la voie. Dans cet empilement, d'autres cailloux se trouvent très peu comprimés, voire non soumis au contact de leurs voisins du dessus. Si un chargement plus lourd s'engage sur la voie, toutes ces pierres, initialement libres et qui ne contribuaient pas à supporter la charge, vont se mettre en contact et participer au soutien de la voie ferrée. Soumis à une lourde charge, la quantité de matière comprimée va augmenter de sorte que le ballast sera beaucoup plus dur.

Ainsi ce milieu granulaire est doublement hyperélastique. Il a la capacité irremplaçable d'être autoadaptatif puisque son élasticité s'adapte au poids des trains.



*Gradient de densité dans une couche de pisé volontairement trop épaisse.*

## Le tas de sable

[http://www.cmla.ens-cachan.fr/Utilisateurs/scopos/fichier\\_scopos\\_19/sable.pdf](http://www.cmla.ens-cachan.fr/Utilisateurs/scopos/fichier_scopos_19/sable.pdf)

Si l'on mesure les variations de pression à la base d'un tas de sable formé par écoulement à travers un entonnoir, on découvre que c'est le centre du tas qui est le moins chargé. Intuitivement, on pense plutôt à un profil de pression en forme de dos de dromadaire, or on trouve un profil en forme de dos de chameau ! Ce « trou » de pression est la signature de la façon dont se propagent les forces à l'intérieur du tas. Elles ne se propagent pas verticalement, elles suivent au contraire les voûtes présentes au sein du tas, qui distribue le poids des grains de sable vers l'extérieur du tas. Au centre du tas, la base se trouve ainsi « protégée » et la pression y est moins forte. Les grains, en sortant de l'entonnoir, tombent sur le sommet du tas, puis roulent sur la pente avant de s'arrêter. Ceci a pour effet de créer une structure interne dans le tas qui peut s'interpréter en termes de voûtes, qui rejettent le poids des grains vers l'extérieur du tas.

## ***8 – De l'eau pour construire***





Après ce tour d'horizon des différents comportements des milieux granulaires sec, il est intéressant de revenir au tas de sable, pour constater à quel point son observation minutieuse peut être riche en enseignements.

Le sable coule à travers l'entonnoir et forme peu à peu un monticule. La fluidité apparente du filet de sable sortant de l'entonnoir et la solidité de l'édifice granulaire formé, dont on sait qu'il est capable de supporter de fortes charges, révèle l'ambivalence de comportement de la matière en grain qui peut être fluide et solide à la fois. On retrouve cette dualité en observant attentivement le fragile équilibre de la surface du tas, où se succèdent sans cesse, au cours de l'écoulement, les phases de stabilité et d'instabilité.

Le tas, quelque soit sa taille, possède une pente étonnamment constante, qui est l'expression des forces de frottements qui se trouvent au sein de l'empilement granulaire et sans lesquelles le sable adopterait une surface horizontale (sa forme d'équilibre la plus stable), comme un liquide. En l'absence de cohésion, l'angle de repos est un élément structurant de la matière en grain : sur la plaque vibrante, le sable s'organise de lui-même selon cet angle. Dans la nature, un grand nombre de paysages sont modelés par leur angle de talus.

La nécessité de deux angles (repos et avalanche) pour décrire la stabilité d'un milieu granulaire sec est due à la façon dont les grains sont empilés : quand la pente a atteint l'angle de frottement (l'angle de repos), les grains en surface doivent encore se déloger des « creux » sur lesquels ils reposent pour pouvoir descendre. La pente doit donc atteindre un angle supérieur (angle d'avalanche) pour que les grains puissent glisser. Dans un empilement compact, un déplacement de grains implique que ceux-ci s'écartent légèrement les uns des autres pour pouvoir bouger. Il y a donc un mécanisme commun entre nos deux angles de stabilité et la rigidité d'un ensemble de grains enfermés dans une enveloppe mise sous vide. La curiosité de l'équilibre de la pente du tas de sable, qui se place de lui-même dans un état « critique », a inspiré une des plus célèbres théories de la physique contemporaine : la criticalité auto-organisée.

Si le tas est constitué de grains différents, on peut observer le phénomène de ségrégation granulaire, les plus gros grains se retrouvant sur la circonférence et les plus fins se retrouvant au centre.

Enfin, c'est au centre du tas que la pression à la base est la plus faible, les chaînes de forces répartissant les efforts sur les côtés.

Dans l'expérience qui suit (manipulation 42), deux tas de sable sont formés par écoulement dans un entonnoir. Pour le premier tas (à gauche sur la photo), le sable coule dans une assiette sèche. Pour le deuxième (à droite), l'assiette a été préalablement remplie avec une nappe d'eau d'environ un centimètre d'épaisseur. Avant de démarrer la manipulation, si on demande à un public, quelque soit son âge, de décrire ce qu'il va se passer lorsque le sable va s'écouler dans l'eau, la réponse est invariablement la même : « le sable va s'étaler dans l'eau » ou « l'eau va disperser le sable ». Intuitivement, on associe systématiquement à l'eau le pouvoir de rendre la matière en grain liquide : quand il pleut, la terre se transforme en boue, par exemple. Pourtant dès que le sable dépasse le niveau de l'eau, il commence à former une petite colonne. L'eau, au lieu de déconstruire le tas de sable, construit une structure beaucoup plus verticale. La « stalagmite » ainsi formée est due à l'action combinée de deux mécanismes qui sont les remontées capillaires et la cohésion capillaire, tous deux liés à la présence d'eau dans le milieu granulaire. On a donc sous nos yeux la différence entre la physique des milieux granulaires secs (la « physique du tas de sable ») et la physique des milieux granulaires insaturés (la « physique du château de sable »). A sec, les grains sont soumis aux seules forces de contact et de frottement. Dès qu'on ajoute de l'eau, on ajoute de nouvelles forces : les forces capillaires.



**MANIPULATION 42 :** Du sable sec s'écoule dans deux assiettes dont l'une a été remplie d'une nappe d'eau de 1cm d'épaisseur environ. Dans l'assiette sèche, le sable forme un tas, par avalanches successives. Dans l'eau, une « stalagmite » se forme. Elle est le fruit de l'action conjuguée des remontées et de la cohésion capillaires.









## 9 – L'état liquide



Cabane, Hénon 2003 [133]

L'importance de l'état liquide pour notre vie quotidienne et pour nos activités industrielles est évidente, et pourtant, des trois états usuels de la matière, c'est celui qui est le plus mal compris. Les liquides sont des états denses et fluides de la matière. Leurs caractéristiques principales donnent accès à toute une série de propriétés remarquables :

- **Écoulement** : un liquide peut s'écouler en réponse à une contrainte extérieure. Pour certains liquides, il est possible de combiner une résistance à des contraintes faibles et un écoulement facile sous l'effet de contraintes fortes (yaourts, peintures, boues)
- **Mélange** : les liquides peuvent se mélanger complètement, et aussi dissoudre des solides ou des gaz (solutions). Ils peuvent aussi se séparer spontanément. On peut même empiler les uns sur les autres sept liquides qui ne se mélangent pas complètement : mercure, gallium, phosphore, perfluorokérosène, eau, aniline et heptane.
- **Cohésion et forces de surface** : un liquide est un milieu dense caractérisé par une forte cohésion, comme celle d'un solide. A cause de cette cohésion, il exerce une force sur sa surface extérieure (tension superficielle) qui tend à être lisse et aussi réduite que possible.
- **Forces entre surfaces immergées** : un liquide peut exercer une force entre deux surfaces, de manière dynamique (lubrification) ou statique (adhésion). Il peut disperser et transporter des particules solides (peintures, pâtes céramiques, boues), des gouttes liquides (émulsions) ou des bulles de gaz (mousses). En manipulant les forces que le liquide exerce sur les surfaces des particules dispersées, on peut soit conserver ces particules dans un état dispersé, soit déclencher leur agrégation et leur coalescence.

Ces propriétés sont la conséquence des interactions entre toutes les espèces moléculaires qui constituent le liquide (molécules et ions) et de leur agitation thermique. Les interactions entre molécules, entre ions, ou entre molécules et ions dans un liquide sont pratiquement aussi fortes que dans un solide. Elles s'opposent à l'évaporation des molécules et à leur dispersion dans tout le volume accessible, ou à leur mélange avec d'autres qui ont entre elles des interactions assez différentes (c'est le cas de l'eau et de l'huile). Elles sont à l'origine de la cohésion et de la tension de surface des liquides.

L'agitation thermique de ces molécules est telle qu'elles peuvent effectuer des sauts de position qui leur donne une extraordinaire mobilité. Dans l'eau liquide, les molécules changent de place cent milliards de fois par seconde, et les arrangements qu'elles forment évoluent continuellement. C'est évidemment cette mobilité qui permet l'écoulement des liquides.

L'agitation thermique est également le moteur du mélange complet de liquides miscibles (comme l'eau et l'alcool) et de la dissolution de solides dans les liquides (le sel dans l'eau).

Les gaz et les solides sont des états de la matière moins difficiles à décrire que les liquides. Pour les gaz, une théorie simple, où l'on suppose que les molécules sont soumises à une agitation thermique qui est peu perturbée par leurs interactions, permet de prévoir de manière très satisfaisante les propriétés des gaz usuels. Pour les solides, on considère au contraire que les interactions sont dominantes, et l'agitation thermique est introduite comme une perturbation. Ce modèle décrit très bien non seulement les propriétés essentielles des solides

crystallins parfaits, comme la cohésion, l'absorption de chaleur, la conductivité électrique, mais aussi celles des défauts de l'arrangement cristallin (surfaces, joints de grains, dislocations), et par conséquent les propriétés des alliages, sur lesquelles repose toute la métallurgie.

Pour les liquides, les difficultés tiennent à la présence simultanée d'interactions fortes et d'un désordre important. Dans cet état physique, les interactions sont pratiquement aussi fortes que dans les solides, mais elles ne parviennent pas à maintenir les molécules dans des positions ordonnées. Par conséquent, aucune théorie ne permet de décrire de manière simple ni les structures des liquides ni les mouvements de leurs molécules. Il existe ainsi une certaine parenté entre la complexité des liquides et celles de la matière en grains.

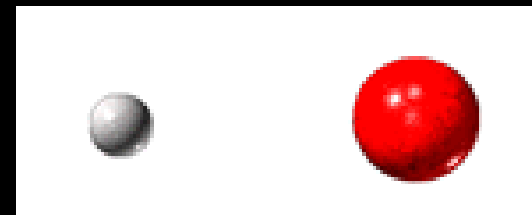
## L'eau

Bourdet 2005 [136]

L'eau, pourtant si répandue à la surface de la Terre, reste une énigme. La compréhension de la structure de l'eau est un des grands problèmes non résolus en physico-chimie. Les physiciens n'hésitent pas à parler de liquide anormal. Pour être plus précis, ils ont identifié un certain nombre d'anomalies de l'eau, dont trois principales :

- Très forte cohésion, qui se traduit par des températures de fusion et d'ébullition élevées
- Constante diélectrique élevée, qui lui permet de dissoudre tous les sels
- Grande expansion à basse température (en dessous de 4°C) et aussi lors de la cristallisation (sa forme solide - la glace - est plus légère que sa forme liquide).

Sa structure est très différente des fluides idéaux, comme l'argon, qui servent de modèles d'étude. Si on regarde les éléments qui suivent directement l'oxygène dans la classification périodique pour essayer de savoir sous quelle forme devrait être l'eau à température ambiante, tout laisse à penser qu'elle doit être gazeuse, comme l'est, par exemple, le sulfure d'hydrogène, de formule H<sub>2</sub>S. Mais elle est bel et bien liquide. Ces propriétés uniques de l'eau proviennent de sa structure, et en particulier de ce qu'on appelle « la liaison hydrogène » qui s'établit entre les molécules et assure la cohésion de l'eau.



*Représentation de l'atome d'hydrogène (à gauche) et de l'atome d'oxygène (à droite).*

© CNRS

## La molécule d'eau, une molécule polaire

Armand 2000 [136]

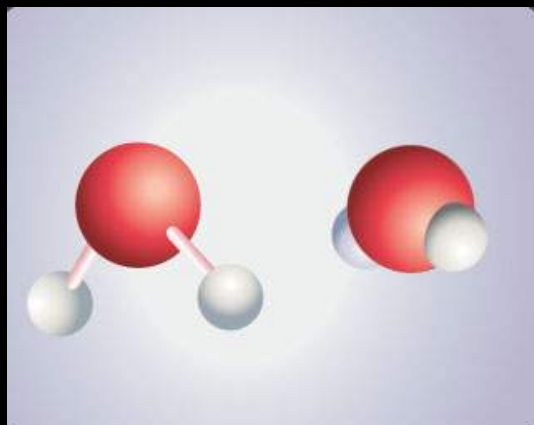
L'eau est un corps dont l'unité de base est une molécule : la molécule d'eau. Celle-ci est formée d'un atome d'oxygène relié à deux atomes d'hydrogène (schémas de gauche). On la note  $H_2O$  (H pour atome d'hydrogène et O pour atome d'oxygène).

Tous les atomes sont formés d'un noyau dense, porteur d'une charge électrique positive, autour duquel gravitent des électrons, particules élémentaires, porteurs d'une charge électrique négative. Du point de vue de la charge électrique, un atome est toujours globalement neutre, sans charge. Le plus petit de tous les atomes est l'atome d'hydrogène qui ne possède qu'un seul électron. Il est courant de représenter un atome en faisant tourner ses électrons (son électron dans le cas de l'atome d'hydrogène) autour de son noyau car un tel modèle est facilement compréhensible. Mais cela laisse entendre que les électrons ont des trajectoires connues, bien définies et quasi circulaires autour du noyau, comme les planètes autour du soleil. Or, ce n'est pas le cas.

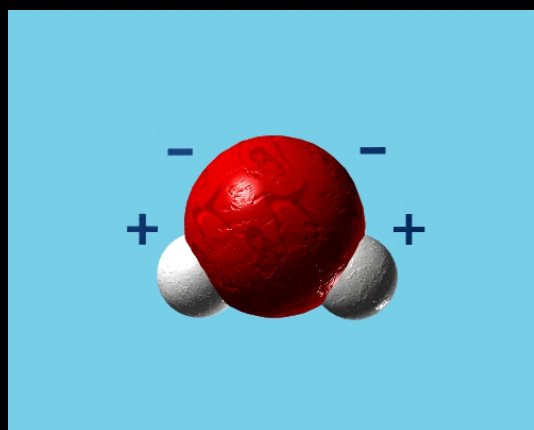
Les physiciens ne connaissent pas le mouvement des électrons, mais ils peuvent en revanche calculer la probabilité de trouver un électron en un lieu donné autour du noyau et représenter alors l'atome comme ci-contre. Sur cette représentation, il est beaucoup plus probable de trouver un électron là où la densité de coloration est la plus forte.

La présence de ces électrons est très importante car ce sont eux qui permettent aux atomes de se lier les uns aux autres. En effet, dans une molécule, l'union entre deux atomes - la liaison chimique - est assurée grâce à la mise en commun par chacun d'eux, d'un - voire de deux ou trois - électrons. Les électrons ainsi "partagés" n'appartiennent plus ni à l'un, ni à l'autre des atomes mais aux deux.

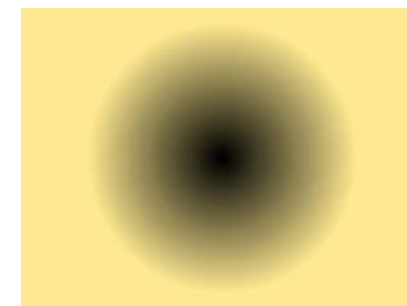
Un tel « partage » n'est pas toujours équitable, car certains atomes peuvent être plus avides d'électrons que d'autres. C'est ce qu'il se passe dans la molécule d'eau, où l'oxygène a tendance à capter plus fortement les électrons que l'hydrogène. Dans cette molécule, la charge négative des électrons engagés dans les liaisons n'est donc pas répartie de manière homogène entre les atomes d'hydrogène et d'oxygène : l'atome d'oxygène est chargé négativement et l'atome d'hydrogène positivement. On dit d'une telle molécule que c'est une molécule polaire. Cette polarité est une propriété extrêmement importante de la molécule d'eau. La représentation très schématique de la molécule d'eau proposée à gauche ne permet pas de voir de quelle manière les électrons de chacun des atomes sont répartis au sein de la molécule.



Deux représentations de la molécule d'eau.  
© CNRS



Représentation de la polarité de la molécule d'eau. © CNRS



Représentation de la probabilité de présence d'un électron autour du noyau. © CNRS

En revanche, la représentation proposée ci-contre, résultat d'un calcul rigoureux effectué par des scientifiques, montre les régions au sein desquelles la probabilité de trouver une paire d'électrons et une seule est la plus grande. La molécule d'eau possède en effet au total dix électrons dont huit proviennent de l'atome d'oxygène, les deux autres provenant des deux atomes d'hydrogène. Les lobes bleus figurent les domaines où se situent préférentiellement les paires d'électrons qui assurent les liaisons oxygène - hydrogène au sein de la molécule (une paire pour chaque liaison).

La petite sphère rose matérialise le domaine des deux électrons de l'atome d'oxygène qui ne participent pas aux liaisons chimiques, et que l'on appelle des électrons « de cœur ».

Enfin, le domaine orangé correspond aux 4 derniers électrons de l'atome d'oxygène groupés par paires. Ces électrons dits " libres ", très importants, sont ceux qui permettent la formation des fameuses liaisons hydrogène dont il est question plus loin.

## Les trois états de l'eau

Armand 2000 [136]

### L'agitation thermique

Au sein de toute matière, quel que soit son état, les briques de base qui la fondent, atomes ou molécules, ne sont jamais immobiles mais en perpétuelle agitation. Et ce mouvement continu est directement corrélé à la température : il est de moins en moins important lorsque la température diminue et inversement. Car en fait la température est une mesure de ce qui se passe au niveau microscopique, c'est-à-dire au niveau des atomes et des molécules. On appelle ce phénomène l'agitation thermique.

Pour l'eau, bien sûr, il en est de même : ses molécules sont plus ou moins agitées en fonction de sa température.

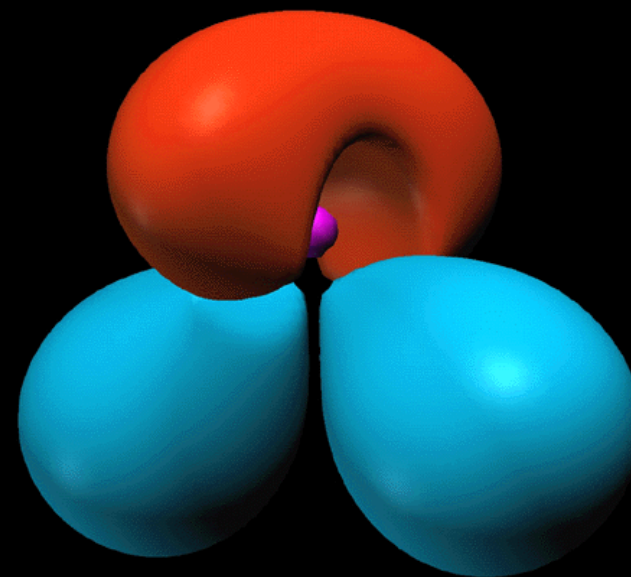
### La vapeur d'eau

Au sein de la vapeur d'eau l'agitation thermique des molécules d'eau est grande : elles se déplacent en tous sens, séparément les unes des autres et de façon apparemment désordonnée, défiant les lois de la pesanteur car l'énergie thermique qui les habite est suffisamment importante pour les empêcher de s'associer et de tomber sous l'action de leur poids.

Un tel comportement est typique de tous les gaz. La vapeur d'eau est donc un gaz normal.

Comme pour tous les gaz, il est possible de comprimer la vapeur d'eau car l'espace entre les molécules est suffisamment grand pour leur permettre de se rapprocher les unes des autres : on dit qu'elle est compressible.

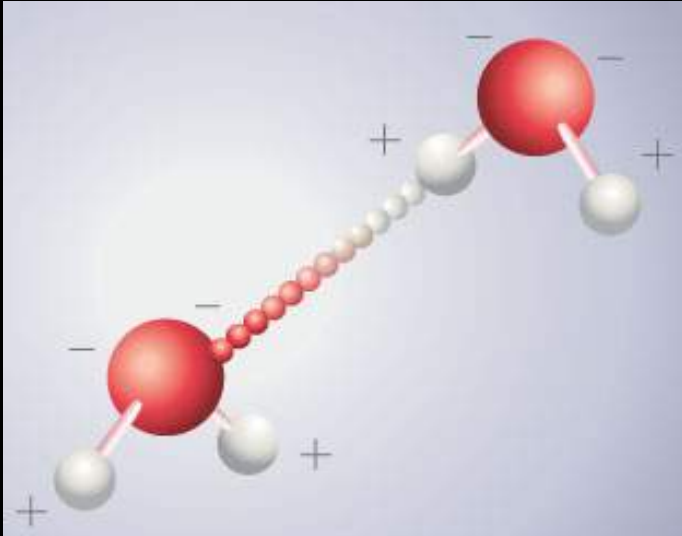
Inversement, si on lui donne plus d'espace, elle occupera tout le volume disponible grâce à l'agitation des molécules qui se déplacent partout où c'est possible : comme tous les gaz, la vapeur d'eau est expansible.



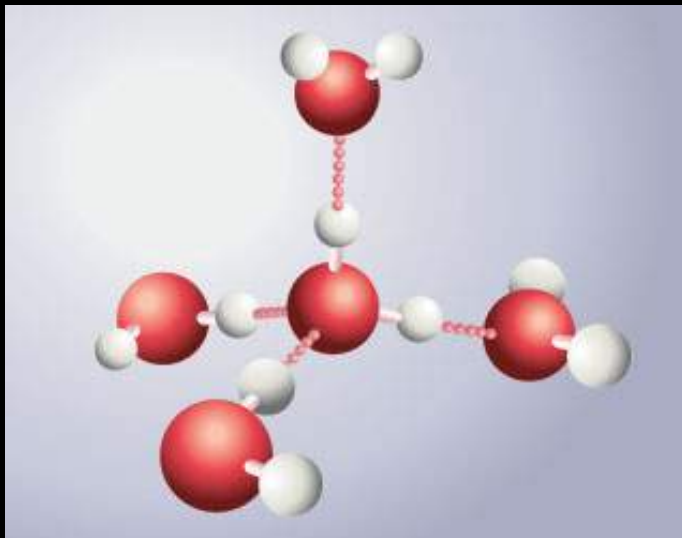
*Les lobes bleus figurent les domaines où se situent préférentiellement les paires d'électrons qui assurent les liaisons oxygène - hydrogène au sein de la molécule (une paire pour chaque liaison).*

*La petite sphère rose matérialise le domaine des deux électrons de l'atome d'oxygène qui ne participent pas aux liaisons chimiques, et que l'on appelle des électrons " de cœur ".*

*Enfin, le domaine orangé correspond aux 4 derniers électrons de l'atome d'oxygène groupés par paires. Ces électrons dits " libres ", très importants, sont ceux qui permettent la formation des fameuses liaisons hydrogène. © CNRS*



Représentation de la liaison hydrogène due à la polarité des molécules d'eau. © CNRS



A un instant donné, il existe toujours dans l'eau liquide une structure locale dans laquelle chaque molécule d'eau est entourée de quatre molécules voisines selon une géométrie tétraédrique. © CNRS

### L'eau liquide et la liaison hydrogène

Si l'on refroidit la vapeur d'eau, l'agitation thermique des molécules d'eau diminue. Lorsque leur énergie d'agitation n'est plus suffisante pour les en empêcher, les molécules commencent à se lier les unes aux autres. Elles se rassemblent en paquets pour finalement former, au sein de la vapeur d'eau, des gouttes d'eau liquide qui tombent sous l'action de leur poids au fond du récipient. La vapeur se transforme ainsi progressivement en eau liquide.

Des liaisons peuvent en effet se former entre les molécules d'eau car ce sont des molécules polaires et les charges de signes contraires s'attirent. Ces liaisons, dues à la polarité, s'établissent entre les atomes d'hydrogène de certaines molécules d'eau et les atomes d'oxygène de molécules d'eau voisines. On les appelle des « liaisons hydrogène » (schéma de gauche).

De telles liaisons peuvent exister dans la vapeur d'eau, mais l'énergie d'agitation des molécules y étant supérieure à l'énergie de ces liaisons, les molécules ne peuvent s'associer en grand nombre. Elles peuvent tout au plus s'associer par deux ou par trois pour former ce que l'on appelle des dimères ou des trimères. Dans l'eau liquide en revanche, les molécules d'eau s'associent les unes aux autres sous la forme de paquets de grande taille qui se font et se défont en permanence.

L'eau est le seul liquide à développer un aussi grand nombre de ces liaisons hydrogène qui jouent un rôle extrêmement important en lui conférant des propriétés très particulières. Malgré la présence de ces liaisons, dans l'eau liquide les molécules d'eau ont encore la possibilité de changer de positions, car l'agitation thermique est encore importante et a pour effet principal de permettre à ces liaisons de se tordre.

Dans l'eau liquide, les molécules d'eau sont extrêmement mobiles et, en particulier, elles sont libres de se réorienter de façon presque indépendante. Cependant, à un instant donné, une molécule d'eau est toujours entourée de quatre molécules voisines, ordonnées comme ci-contre, suivant une géométrie tétraédrique (schéma de gauche). Ainsi, malgré l'aspect dynamique du système dû à la mobilité des molécules, il existe toujours dans l'eau liquide une structure locale (à courte distance) instantanée.

### La glace

Si l'on refroidit l'eau liquide, l'agitation thermique des molécules d'eau diminue progressivement et les liaisons hydrogène, qui pouvaient aisément se tordre dans le liquide, se raidissent progressivement pour devenir pratiquement rectilignes (droites). Les molécules d'eau forment alors une structure rigide très organisée : l'eau s'est transformée en glace.

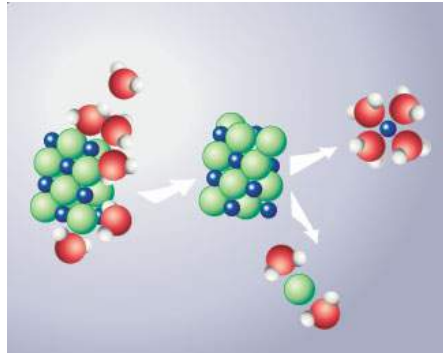
Dans la glace, aussi bien que dans l'eau liquide, toutes les molécules d'eau sont reliées entre elles par des liaisons hydrogène et sont en relation avec quatre molécules voisines. Mais, alors que dans l'eau liquide l'agitation thermique résiduelle permet aux liaisons hydrogène de se tordre, donnant aux molécules d'eau une certaine liberté de mouvement, au sein de la glace, l'agitation thermique des molécules d'eau est réduite au minimum : les molécules ne peuvent plus changer de position, elles ne peuvent que vibrer autour de cette position. Elles forment un ensemble structuré où chaque atome d'oxygène est au centre d'un tétraèdre dont les sommets sont occupés par les atomes d'oxygène des 4 molécules d'eau voisines.



## Un solvant quasi universel

Armand 2000 [136]

Si l'on ajoute du sel à de l'eau et qu'on agite, très rapidement, l'eau redevient claire et le sel n'est plus visible : on dit que le sel s'est dissous dans l'eau. De même, le sucre se dissout très bien dans l'eau. L'eau est en effet un très bon solvant. Elle dissout un grand nombre de corps ioniques, comme les sels par exemple dont les briques de base sont des ions, ainsi que certaines substances formées de molécules polaires. Ce phénomène de dissolution résulte du caractère également polaire des molécules d'eau qui, du fait des charges positives et négatives dont elles sont porteuses, sont attirées par les charges de signes contraires des ions ou des molécules polaires qui leur sont proches. Elles forment alors un écran autour de ces ions ou de ces molécules polaires, les séparant de leurs congénères et favorisant ainsi leur dispersion au sein du liquide. Aux molécules polaires, elles se lient même par liaisons hydrogène. Dans la nature, lorsqu'elle dévale les pentes, l'eau dégrade les roches et se charge en sels minéraux solubles.



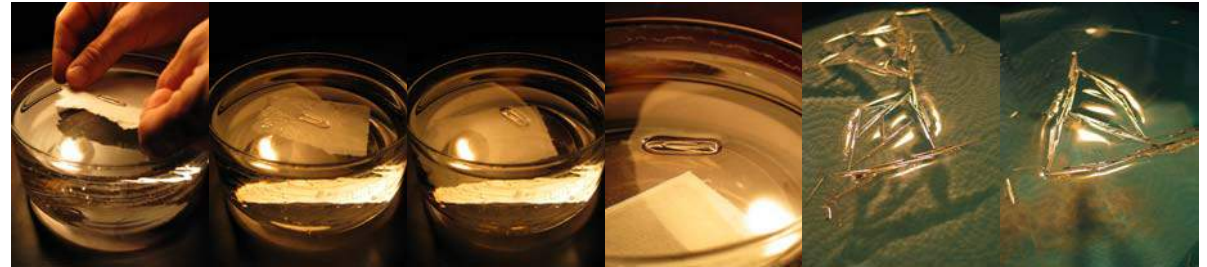
Grâce à la polarité de sa molécule, l'eau peut dissoudre quasiment tous les sels. © CNRS

## La tension superficielle

De Gennes, Brochart-Wyart, Quéré 2002 [134]

Une observation attentive de la surface de l'eau permet d'oublier un instant sa fluidité et de découvrir qu'elle est capable d'adopter des formes géométriques très stables. Perles d'eau, ondes, gouttes sont des morphologies de l'eau fréquentes dans la nature. « La peau de l'eau » (Vandewalle, Caps, Lecocq 2001 [139]) est comme une membrane tendue caractérisée par une tension superficielle qui s'oppose à ses déformations. Certains insectes utilisent cette tension superficielle pour se déplacer sur la surface de l'eau. Elle existe dans tous les liquides et est proportionnelle à l'énergie de cohésion : c'est l'expression « externe » de l'intensité des interactions attractives « internes » existants entre les molécules (ou ions) du liquide. Grâce aux liaisons hydrogènes, l'eau a une très grande cohésion et en conséquence une grande tension superficielle. Celle-ci est telle qu'elle permet de faire flotter du métal (manipulation 43 et 44).





**MANIPULATION 43 :** Un trombone métallique sur un morceau de papier est posé délicatement à la surface de l'eau. Le papier s'imbibe et coule. Le trombone flotte. Il en est de même avec un ensemble de petits clous.

Elle est plus de trois fois plus grande que celle des huiles ( $\gamma_{\text{eau}}=72\text{mJ}$ ,  $\gamma_{\text{huile}}=20\text{mJ}$ ) dont la cohésion est due à des interactions attractives plus faibles.



**MANIPULATION 44 :** Une feuille de métal flotte à la surface de l'eau.

Pour le mercure, qui est un métal liquide très cohésif, la tension superficielle est 7 fois plus grande que celle de l'eau ( $\gamma=500\text{mJ/m}^2$ ).



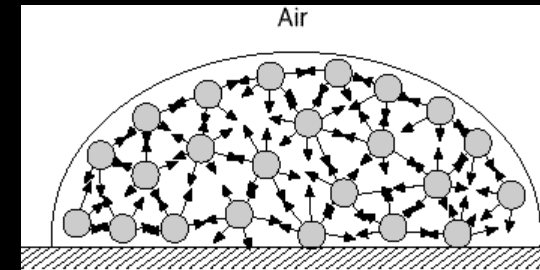
*La tension superficielle d'un liquide est d'autant plus grande que sa cohésion est forte. La tension superficielle du mercure, liquide à très grande cohésion, est environ 7 fois plus grande que celle de l'eau.*

Les molécules au sein du liquide bénéficient d'interactions attractives avec toutes leurs voisines et sont dans un état « heureux ». Au contraire, à la surface du liquide, elles perdent la moitié des interactions cohésives et sont « malheureuses ». Ainsi l'eau cherche à éviter le contact avec l'air. La manipulation 45 montre à quel point cette répulsion est importante : l'eau ne coule pas à travers la poudreuse car elle empêche les bulles d'air de rentrer dans le récipient.



**MANIPULATION 45 :** Du sable fin s'écoule très facilement d'une salière, alors que l'eau reste bloquée. On peut reproduire l'expérience avec des poudreuses dont les trous sont plus importants : l'eau ne coule toujours pas. Le résultat est le même avec une poudreuse dont les trous sont encore plus larges. Le sable semble plus fluide que l'eau.

Exposée à la surface, une molécule est dans un état énergétique défavorable : elle perd la moitié de son énergie de cohésion. La tension de surface mesure directement ce défaut d'énergie par unité de surface. Une autre manière de définir la tension superficielle est de l'aborder sous l'angle de l'énergie mécanique à apporter pour créer de la surface. Lorsqu'on déforme le liquide de manière à augmenter sa surface, le travail est proportionnel au nombre de molécules qu'il faut amener à la surface. Ainsi, la tension de surface représente l'énergie à fournir pour augmenter la surface d'une unité. On peut mieux se représenter cette idée à l'aide de deux fluides non miscibles dont la surface de séparation est caractérisée par une tension interfaciale. L'interface entre l'huile et l'eau dans un verre (manipulation 46) permet de bien visualiser cette tension d'interface : elle apparaît comme une toile tendue, semblable à une matière élastique qui s'allonge quand on appuie dessus.



*En surface, les molécules d'eau perdent la moitié des interactions cohésives et sont dans un état énergétique défavorable. Ainsi l'eau cherche à minimiser le contact avec l'air.*



**MANIPULATION 46 :** De même qu'entre l'eau et l'air, il existe une tension d'interface entre l'eau et l'huile. Dans un verre rempli de ces deux liquides, l'interface apparaît comme une toile tendue élastique qui s'allonge quand on appuie dessus.

La manipulation 47 permet de visualiser « au ralenti » le passage à travers l'interface huile-eau lorsqu'un objet coule : dans un premier temps celui-ci allonge la ligne d'interface. On comprend mieux pourquoi le trombone délicatement posé à la surface de l'eau ne coule pas : son poids est insuffisant pour allonger la surface créée autour du trombone.



**MANIPULATION 47 :** On peut visualiser « au ralenti » le passage à travers l'interface huile-eau lorsqu'un objet coule. Dans un premier temps, celui-ci allonge la surface avant de la traverser. Dans la manipulation 43, le poids du trombone est insuffisant pour allonger la surface créée autour de lui.

Des gouttes d'eau dans l'huile prennent la forme de sphères parfaites (manipulation 48). Les liquides, comme n'importe quels corps, cherchent toujours à minimiser leur énergie. Ainsi l'eau minimise sa surface de contact avec l'air ou avec l'huile. La sphère est la plus petite surface pouvant contenir un volume donné. Ce qui explique la forme arrondie des perles d'eau dans l'air, et dans l'huile.

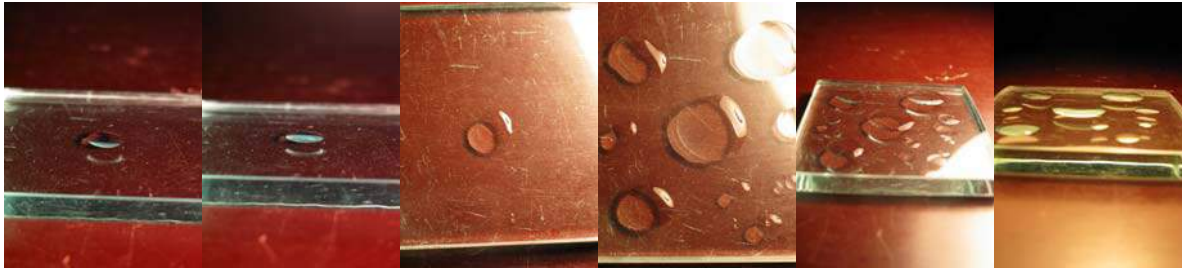


**MANIPULATION 48 :** Des gouttes d'eau dans l'huile minimisent leurs surfaces en prenant la forme de sphères parfaites.

## Le mouillage

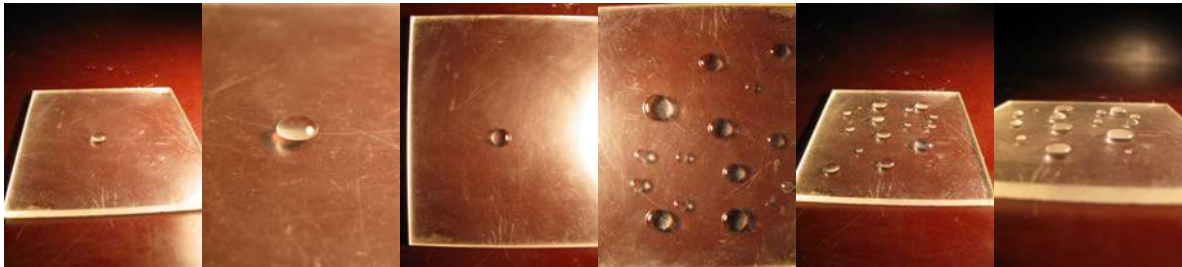
De Gennes, Brochart-Wyart, Quéré 2002 [134]

L'eau mouille. C'est une évidence, pourtant ce n'est pas aussi systématique qu'on le croit. Certaines surfaces solides repoussent l'eau à tel point qu'elles restent sèches après avoir été trempée dans l'eau. On dit que ce sont des surfaces hydrophobes. A l'inverse, une surface qui attire l'eau est dite hydrophile. Lorsqu'on pose une goutte d'eau sur du verre très propre, on la voit s'étaler complètement : le verre est hydrophile.



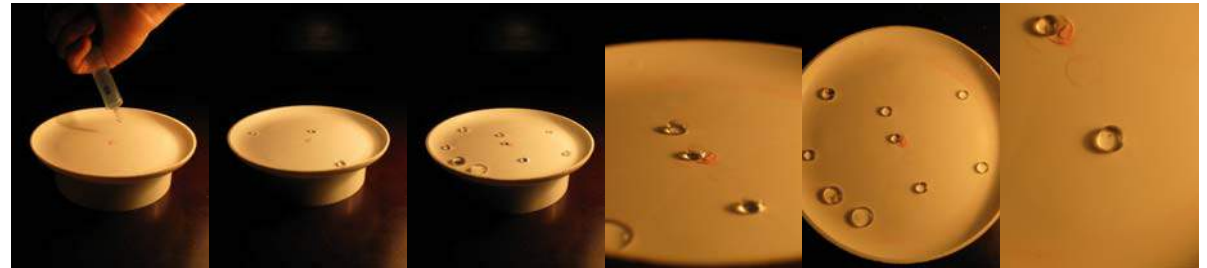
**MANIPULATION 49** : Une goutte d'eau sur une plaque de verre s'étale et adopte une forme plate. Le verre est hydrophile.

Sur une plaque de plexiglas, l'eau reste rassemblée en gouttes arrondies : le plexiglas est moins hydrophile que le verre.



**MANIPULATION 49 (SUITE)** : Sur du plexiglas, l'eau reste rassemblée en gouttes arrondies.

Enfin sur une surface fluorisée, l'eau forme des perles d'eau, elle est complètement repoussée par le support : c'est une surface hydrophobe.



**MANIPULATION 49** : Sur un support hydrophobe, l'eau forme des perles. Elle est complètement repoussée par la surface.

Dans la manipulation 50, le support n'a pas été rendu hydrophobe partout. On peut ainsi donner à l'eau la forme que l'on souhaite.







**MANIPULATION 50** : En traitant le support localement, on peut dessiner avec l'eau.

Le mouillage est l'étude de l'étalement d'un liquide déposé sur un substrat solide. Un liquide est dit mouillant lorsqu'il a une forte attraction avec une surface solide, non mouillant dans le cas contraire. Sur le plexiglas, une goutte d'huile s'étale beaucoup plus que l'eau : l'huile est plus mouillante que l'eau. L'éthanol est encore plus mouillant que l'huile et l'eau puisque la goutte qu'il forme s'étale encore plus (manipulation 51).



**MANIPULATION 51** : Sur le plexiglas, l'éthanol est plus mouillant que l'huile qui est plus mouillante que l'eau.

Le mouillage peut se définir par l'angle de contact  $\theta$  que l'on trouve au niveau de la ligne triple (solide, liquide, gaz). Un liquide est plutôt mouillant si  $\theta$  est inférieur à  $90^\circ$ , plutôt non mouillant si  $\theta$  est supérieur à  $90^\circ$ .

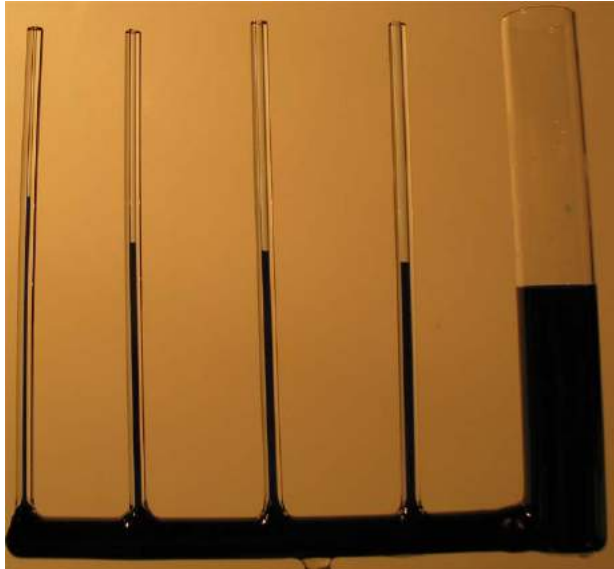
			
Parfaitement mouillant	Mouillant	Non mouillant	Parfaitement non mouillant
$\theta = 0^\circ$	$0 < \theta < 90^\circ$	$90 < \theta < 180^\circ$	$\theta = 180^\circ$
Liquide mouillant pour un solide donné Cos $\theta$ est positif		Liquide non mouillant pour un solide donné Cos $\theta$ est négatif	

La tension superficielle telle que décrite au chapitre précédent ne faisait intervenir que deux phases (liquide-gaz ou liquide-liquide). Le mouillage implique un contact à trois phases (solide-liquide-gaz). On définit, en plus de la tension superficielle liquide-air, une tension interfaciale liquide-solide et une tension interfaciale solide-air. La forme que prend une goutte sur une surface solide résulte de la compétition entre ces trois tensions de surface. Cette compétition se formalise par l'angle de mouillage au niveau de la ligne triple.

## Saut de pression

Dans les liquides, une courbe de surface correspond toujours à une différence de pression. Une goutte d'eau dans l'air ou dans l'huile est en surpression par rapport à son milieu environnant, comme un ballon de football. La tension de surface est à l'origine de cette surpression. Lorsqu'on traverse une surface courbe, il y a un saut de pression. D'après Laplace<sup>1</sup>, la différence de pression est égale au produit de la tension de surface par la courbure de la surface. Une courbure positive induit une pression positive au sein du liquide, une courbure négative induit une pression négative. D'autre part, un petit volume liquide présentera une dépression ou une surpression plus importante qu'un volume plus grand de forme analogue.

<sup>1</sup> Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827) : Mathématicien, astronome et physicien français.



**MANIPULATION 53 :** Remontées capillaires dans des tubes : plus le tube est fin, plus l'eau monte haut.



**MANIPULATION 54 :** Remontées capillaires entre deux plaques de verre très légèrement écartées à droite et en contact à gauche.

## Ménisques

Un liquide est souvent contenu dans un récipient solide, dont les parois sont verticales. Sa surface est horizontale, à cause de la gravité, sauf près des parois où l'angle de mouillage impose une déformation. Pour un liquide plutôt mouillant, le liquide monte légèrement à cet endroit, tandis qu'il descend si le liquide est non mouillant. On appelle ménisque (du grec *méniskos*, qui signifie « croissant ») la zone où la surface est courbe.



**MANIPULATION 52 :** À proximité d'un solide, la surface de l'eau se courbe. Les ménisques représentent ces courbures de la surface de l'eau.

## Montées capillaires

Si un tube très fin est mis en contact avec un liquide mouillant, du liquide s'élève dans le tube. On a là une des manifestations les plus spectaculaires de la capillarité, à l'origine même de cette science, appelée la montée capillaire. La hauteur atteinte par le liquide dépend du diamètre du tube (manipulation 53) : plus le tube est fin, plus l'eau monte haut. Le verre attire l'eau et lui permet de monter dans le tube. Un liquide s'élève si le tube sec a une énergie de surface supérieure à celle du tube mouillé. Dans ce cas-là le système abaisse son énergie si de la surface sèche est remplacée par de la surface mouillée : il y a montée ou imprégnation dans le cas d'un milieu poreux. On peut aussi décrire le phénomène en terme de pression. Un ménisque convexe (centre de courbure au-dessus de la surface) implique une chute de pression sous le ménisque : le liquide du bain est aspiré par cette dépression. Il y a remontée capillaire pour un angle de mouillage inférieur à  $90^\circ$ . La remontée est équilibrée par le poids de la colonne d'eau. Le gain d'énergie de surface est équilibré par le coût d'énergie potentielle de gravité. Plus l'espace interstitiel est large, plus la colonne d'eau est importante, moins le liquide monte eau. Cet effet n'est pas spécifique à la géométrie du cylindre : le liquide s'élève aussi entre deux plaques parallèles très proches l'une de l'autre. Dans la manipulation 54, entre deux plaques de verre presque parallèles et se rejoignant le long d'une verticale avec un angle très aigu, la remontée capillaire décrit une courbe hyperbolique. Encore une fois, la montée est d'autant plus haute que l'espacement entre les plaques est réduit.



## 10 – La cohésion capillaire



*Humidité. – Cause de toutes les maladies*

**Gustave Flaubert, Dictionnaire des idées reçues**

Gelard 2005 [4] - Albert, Albert, Hornbaker, Schiffer, Barabasi 1997 [88]

Un sable sec ne présente quasiment aucune cohésion. Il est impossible de construire un château de sable dans ces conditions puisqu'on ne peut édifier aucune paroi verticale, même très petite. Dès que l'on réalise une pente trop forte, une avalanche se déclenche et ramène la pente à la valeur de l'angle de repos déterminée par le coefficient de frottement du sable. Pour faire un pâtre de sable, il faut ajouter de l'eau. L'eau confère son énergie de cohésion au sable et permet, à partir d'un ensemble divisé, d'obtenir un matériau cohésif qui permet de réaliser un pâtre aux parois verticales capable de résister à une certaine contrainte mécanique.

Le sable et l'eau sont particulièrement complémentaires. Le sable apporte les forces de contacts et de frottements, l'eau apporte la cohésion. Pour construire un château de sable, il existe un optimum de teneur en eau pour lequel le sable mouillé est particulièrement cohésif. Dès qu'il est trop mouillé, il perd sa cohésion. Ceci est lié à la formation de ponts liquides et de ménisques entre les grains. Dans un premier régime, la cohésion augmente avec l'humidité relative, pour atteindre un optimum. Au-delà, lorsque la présence de film liquide devient visible, la cohésion s'écroule rapidement pour finalement s'annuler lorsque le sable est saturé, c'est-à-dire lorsque tout l'espace poreux est rempli d'eau..

L'origine des forces capillaires entre grains est à chercher dans les forces de tension superficielle à l'interface entre l'eau et l'air qui génèrent, chaque fois que l'interface adopte une courbure négative (ce qui est le cas pour un pont liquide entre deux surfaces hydrophiles), une pression attractive à la surface des grains reliés par un ménisque. Plus le sable est grossier, plus il est difficile de construire un édifice stable. La pression attractive exercée par les ponts liquides augmente à mesure que la taille des grains diminue.

## Lien entre l'angle de repos et la cohésion

La cohésion d'un milieu granulaire se définit différemment de celle d'un matériau massif. En physique du solide, l'énergie de cohésion d'un cristal représente l'énergie nécessaire pour rompre les liens interatomiques ou (intermoléculaires) et amener les atomes (ou les molécules) à distance infinie les uns des autres, de manière à annuler toutes les interactions. Il est facile, connaissant l'énergie de cohésion et la structure du cristal (parfait), de calculer certaines propriétés mécaniques (Gelard 2005 [4]). Pour les milieux granulaires, la présence du frottement implique une autre définition. Pour un sable sec, la couche superficielle du tas reste en équilibre tant que la pente n'excède pas un certain angle au-delà duquel le frottement n'est plus suffisant pour l'empêcher de glisser. En effet, une partie du poids tend à faire glisser la couche dans une direction parallèle à la pente (composante tangentielle du poids) tandis que l'autre partie « plaque » cette couche vers l'intérieur du tas (composante normale à la pente). Plus la pente augmente et plus la composante tangentielle du poids augmente par rapport à la composante normale. Il y a déséquilibre de la couche superficielle lorsque le rapport entre la composante tangentielle et la composante normale dépasse une certaine valeur appelée coefficient de frottement. Cette notion relative à l'équilibre de la surface du tas peut être étendue à l'intérieur du tas : le matériau reste en équilibre si on ne peut trouver aucun plan interne où le rapport entre la contrainte tangentielle et la contrainte normale est supérieur au coefficient de frottement. Dans un tas de sable humide, la cohésion due aux forces capillaires renforce la contrainte normale en plaquant les grains voisins, ce qui entraîne une augmentation de l'angle maximal de stabilité. Une pente de tas de sable supérieure à l'angle de repos du sable sec (dont on sait qu'elle avoisine les  $30^\circ$ ) révèle la présence de cohésion au sein du matériau.

## Lien entre tension superficielle et cohésion

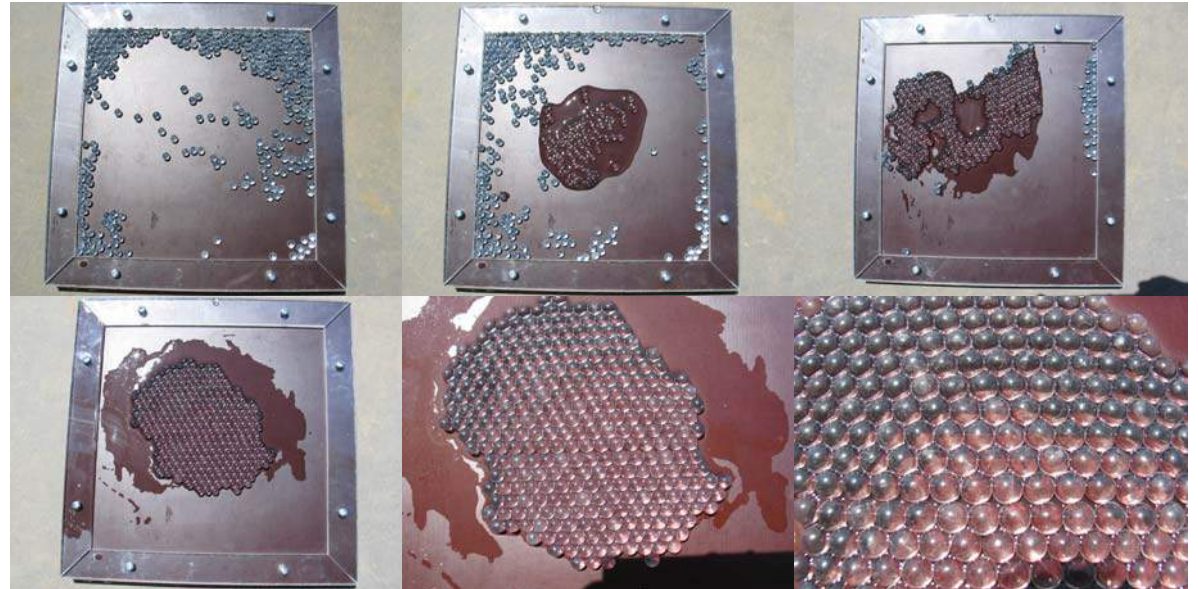
Les manipulations 55, 56, 57 permettent d'illustrer le lien entre les forces capillaires (qui permettent de faire flotter du métal sur l'eau) et la cohésion d'un édifice granulaire mouillé. Lorsqu'on fait tomber une goutte d'eau entre deux billes de verre espacées de 1cm environ, elles se rapprochent pour se mettre en contact.



**MANIPULATION 55** : Une goutte d'eau entre deux billes de verre les rapproche.

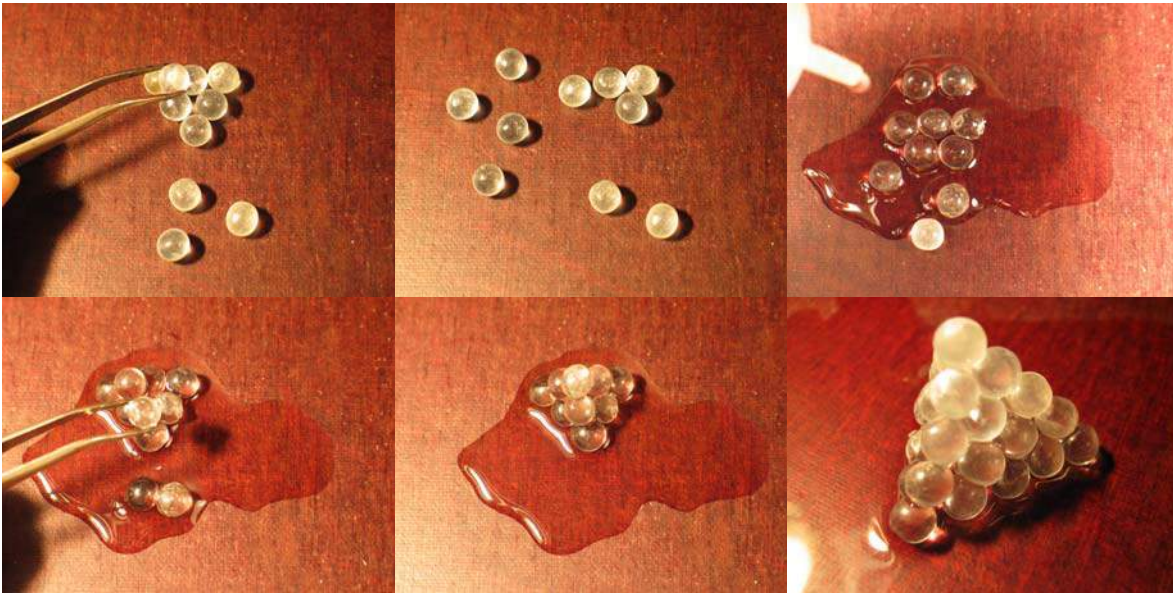
La surface courbe créée autour des billes est plus grande lorsque les billes sont séparées que lorsqu'elles sont en contact. L'eau, par l'intermédiaire des forces capillaires, attire les billes afin de minimiser sa surface de contact avec l'air.

La même expérience est reproduite avec un plus grand nombre de billes. A sec, les billes étalées dans un cadre sont dispersées et restent dans cet état après agitation du cadre. Il suffit de faire une petite flaque d'eau au centre du cadre et de le remuer pour que toutes les billes se rassemblent en s'organisant selon la structure hexagonale (qui comme nous l'avons vu est l'empilement le plus compact pour un ensemble de sphères de même taille dans un plan). Non seulement les forces capillaires rapprochent les billes, mais elles les ordonnent dans la configuration la plus compacte en les maintenant dans cette position.



**MANIPULATION 56 :** La même expérience est reproduite avec un grand nombre de billes. En remuant le cadre, celles-ci se réorganisent selon une structure hexagonale compacte.

Il est impossible d'empiler des billes de verre en pyramide lorsqu'elles sont sèches : le frottement est insuffisant, les billes glissent et la base s'écarte dès qu'on pose une bille dessus. Le simple fait de rajouter quelques gouttes d'eau sur les billes permet de les empiler et de construire une structure qui s'élève et s'oppose à la gravité.

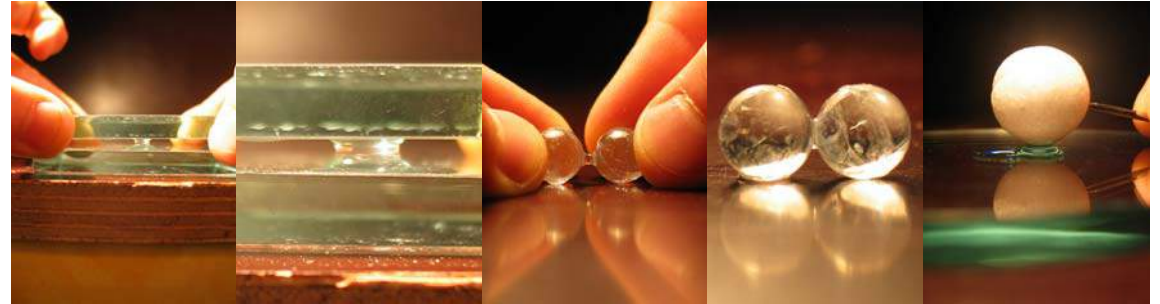
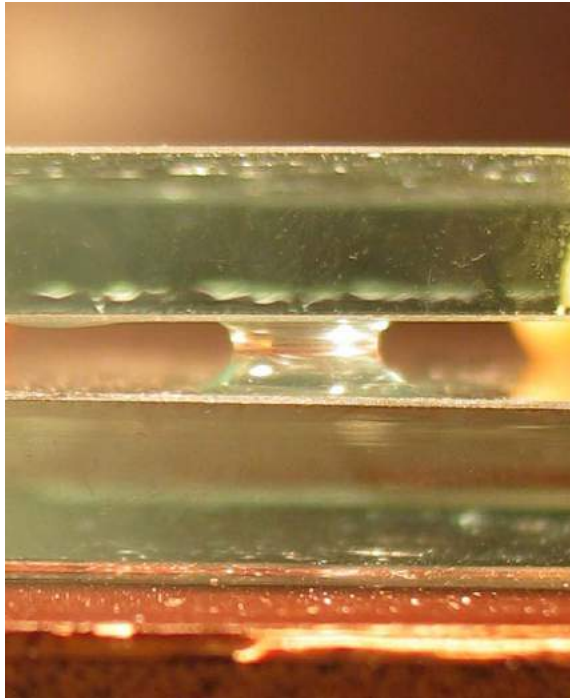


**MANIPULATION 57 :** Il est impossible de construire une pyramide avec des billes de verre sèches. Ceci devient possible en rajoutant quelques gouttes d'eau.

En minimisant sa surface, l'eau agit sur les objets avec lesquels elle est en contact. Sa tension superficielle comprime la matière en grain et lui permet de jouer le rôle de liant. Dans le cas d'un édifice granulaire, cette énergie permet à l'ensemble de s'opposer à la gravité et d'augmenter l'angle de repos pour se rapprocher de la verticalité.

## Pont capillaire

Parmi toutes les formes de ménisque, il y en a une qui nous intéresse particulièrement : celle que forme un volume d'eau entre deux surfaces. Le ménisque créé est un pont capillaire (Manipulation 58). On retrouve ces ponts liquides entre deux billes de verre et entre les grains d'un château de sable.



**MANIPULATION 58:** On peut visualiser un pont capillaire chaque fois qu'une goutte d'eau se trouve entre deux surfaces qu'elle mouille.

Un pont capillaire exerce une force attractive sur les surfaces qu'il mouille. Dans la manipulation 59 les billes de métal mouillées prennent la forme d'un pont capillaire. Elles sont soumises à 3 forces : la force de l'aimant qui les attire vers le haut, la gravité qui les attire vers le bas, l'eau qui les attire entre elles.



**MANIPULATION 59 :** Des billes de métal mouillées prennent la forme d'un pont capillaire lorsqu'on pose un aimant dessus.

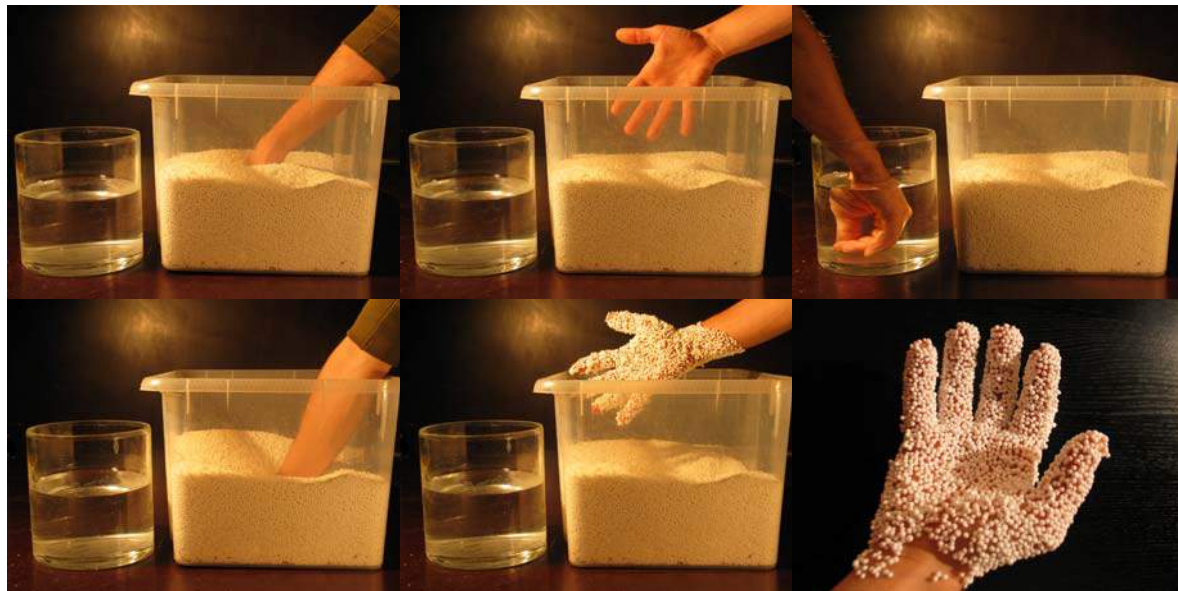
De même pour le ménisque d'eau : une surface attire l'eau dans une direction, l'autre surface l'attire dans la direction opposée, et les molécules s'attirent entre elles.

La cohésion du sable mouillé provient de la différence de pression entre le pont liquide et l'air extérieur. Cette différence de pression est appelée la pression de Laplace. A cause de la courbure négative du ménisque (le centre de courbure est en dehors du ménisque), la pression est plus faible dans le liquide que dans l'air et ceci mène à une force attractive entre les deux surfaces en contact avec le liquide.

Un pont capillaire très petit (non déformé par son propre poids) prend la forme d'une caténoïde. Il s'agit encore une fois d'une surface minimale. Un film de savon entre deux cercles reproduit cette surface. On peut expliquer la force attractive du ménisque en raisonnant en surfaces minimales. Si l'on écarte les deux cercles, on augmente la surface. Tout liquide cherchant à établir une surface de contact minimum avec l'air, l'eau cherche à rapprocher les grains de sable.

## L'eau est une colle

L'eau est une véritable colle, capable de coller aussi des matériaux non minéraux, comme des grains de polystyrène.

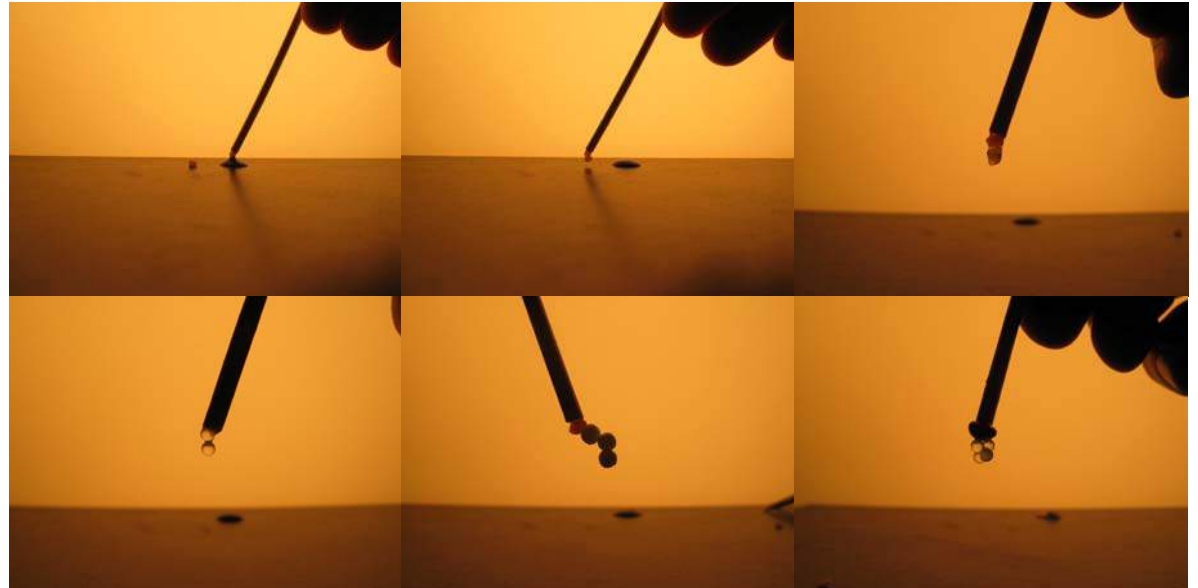


**MANIPULATION 60** : Si on trempe sa main dans un bac d'eau puis dans un bac rempli de billes de polystyrène, celles-ci recouvrent toute la main.



*Un film de savon entre deux cercles adopte une surface minimale semblable à celle d'un pont capillaire.*

On peut s'amuser à observer le pouvoir collant de l'eau avec des baguettes chinoises au bout desquelles on a collé (avec de la glue cette fois) différents grains de différentes tailles.



**MANIPULATION 61** : Avec une baguette chinoise, on peut jauger la force capillaire de l'eau en essayant d'attraper différents grains en mouillant un grain fixé au bout de la baguette.

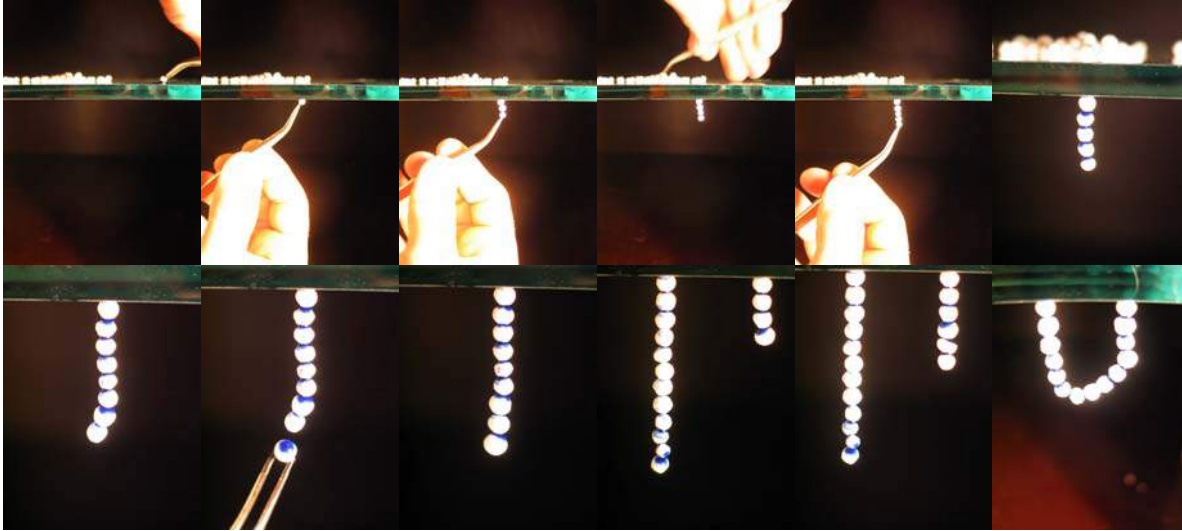
Il suffit de créer un ménisque d'eau entre deux surfaces pour que l'eau agisse comme une colle : on peut observer ce pouvoir de cohésion de l'eau avec des objets relativement gros, comme 2 billes de polystyrène dont l'une est tractée par l'autre par l'intermédiaire d'un simple ménisque d'eau.



**MANIPULATION 62** : Une grosse boule de polystyrène est tractée par une autre boule en maintenant un volume d'eau entre les deux.



En réalisant un « point de colle d'eau » sur un grain de polystyrène, il est facile de le coller sous un support. De la même manière, on peut coller un autre grain sur celui qui est collé contre la plaque, et petit à petit réaliser une chaînette d'une douzaine de grains qui ne sont liés entre eux que par des ménisques d'eau. En faisant une deuxième chaîne, on peut réaliser un arc en chaînette constitué de grains et d'eau.



**MANIPULATION 63 :** On peut réaliser une chaînette de billes de polystyrène liées entre elles juste par de petits ponts capillaires.



## Taille des grains, taille des ménisques, cohésion

La photo ci-contre présente différents pâtés de sables réalisés pour des teneurs en eau croissantes de haut en bas de l'image.

La rangée de gauche a été réalisée avec du silt, la deuxième rangée avec du sable fin, la troisième avec du sable moyen et la dernière avec des petits graviers. On voit bien que la cohésion capillaire augmente avec la finesse des grains.

Intuitivement on peut imaginer que le rayon de courbure du ménisque situé entre deux grains en contact diminue à mesure que les grains rapetissent. La pression attractive étant inversement proportionnelle à ce rayon de courbure, celle-ci est plus grande pour des grains de petite taille.

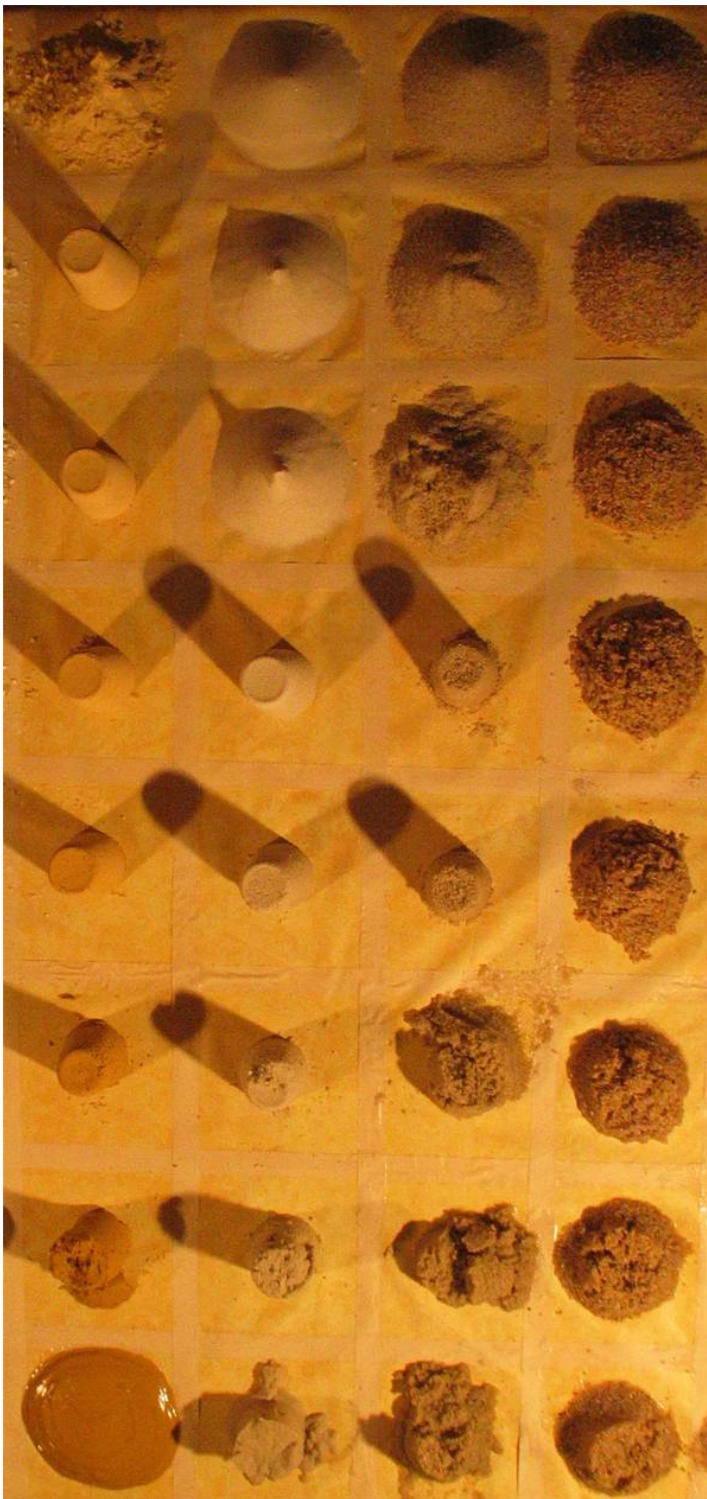
D'autre part la taille des grains diminuant, le nombre de pont capillaire augmente. Ainsi plus les particules sont petites, plus les ménisques sont petits et nombreux, plus la cohésion est grande. Un pâté de sable fin peut supporter une charge beaucoup plus grande qu'un pâté de sable fin (manipulation 64).

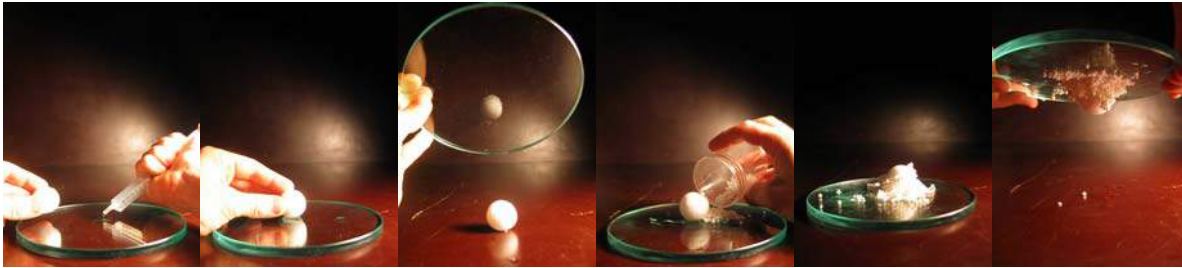


MANIPULATION 64 : Un pâté de sable fin résiste à une charge beaucoup plus importante qu'un pâté de sable grossier.

## Intérêt de la polydispersion pour la cohésion capillaire

Au-delà d'un certain diamètre, l'eau ne peut plus coller les grains. La manipulation 65 montre qu'il est impossible de coller un grain de polystyrène de 2cm de diamètre sur une plaque de verre. Pourtant, si on ajoute des petites billes autour de la grosse boule, l'ensemble reste collé quand on retourne la plaque.





**MANIPULATION 65 :** Un pont capillaire ne permet pas de coller une grosse bille de polystyrène. En ajoutant de petites billes autour de la boule, on multiplie le nombre de ménisques et l'ensemble reste collé sur la plaque.

Autrement dit, de la même manière que les petits grains entre les gros permettent de répartir les chaînes de forces et d'obtenir un matériau plus résistant, les plus petits grains permettent d'augmenter la cohésion capillaire. Ils multiplient les surfaces de contacts et le nombre de ponts capillaires comme on peut l'observer sur l'image de droite. On peut reproduire l'expérience avec nos grains minéraux. Il est impossible de réaliser un pâtre avec des graviers de 2 mm.



**MANIPULATION 66 :** Il est impossible de réaliser un pâtre avec des graviers de deux millimètres.

Il suffit de mélanger le gravier avec du sable fin (un tiers environ) pour obtenir un pâtre résistant.



**MANIPULATION 66 (SUITE) :** Il suffit de mélanger les mêmes graviers à un tiers de sable fin pour obtenir un pâtre résistant.

Lors de la préparation du mélange, on voit bien les grains de sable fin enrober les graviers. L'eau empêche ainsi les phénomènes de ségrégation.



*Vue de dessous de la plaque de verre : les petits grains de polystyrène multiplient les surfaces de contact et permettent à l'ensemble de tenir*



*Lorsqu'on humidifie le sable fin et les graviers, on voit les petits grains enrober les plus gros. L'eau empêche les phénomènes de ségrégation.*

## La cohésion et le caractère hydrophile du sable

Un grain de sable est généralement constitué de silice, comme le verre. L'eau adhère particulièrement sur ces surfaces avec lesquelles elle établit des liaisons hydrogène (en surface se trouvent des groupes SiOH qui se lient aux molécules d'eau). Ainsi, le même phénomène électrostatique assure à la fois la cohésion des molécules d'eau entre elles et l'adhésion de l'eau sur un grain de sable.

La cohésion d'un milieu granulaire ne serait pas possible sans l'adhésion de l'eau sur la surface hydrophile des grains (Manipulation 67). On peut s'en rendre compte avec un sable dont la surface a été traitée pour être hydrophobe. Les grains repoussent l'eau. Lorsqu'on humidifie ce sable, l'eau forme des perles d'eau qui sont incapables de mouiller le sable. On peut plonger intégralement ce sable dans l'eau, il restera toujours sec. A l'air libre, aucun pont capillaire ne peut s'établir entre les grains.



*Pellicule d'air autour d'un sable hydrophobe sous l'eau*



**MANIPULATION 67** : L'eau imprègne de sable hydrophile mais forme des perles d'eau à la surface hydrophobe qui reste sec.

Par contre une fois sous l'eau, le sable hydrophobe forme des agglomérats.



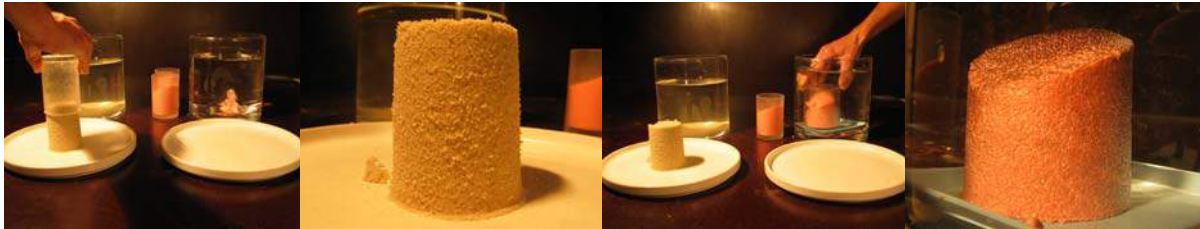
**MANIPULATION 67 (SUITE)** : Le sable normal se disperse dans l'eau alors que le sable hydrophobe s'agglomère.

Il a de la cohésion et il est malléable. La réalité semble inversée.



**MANIPULATION 67 (SUITE) :** Le sable normal humide est malléable dans l'air. Le sable hydrophobe, qui reste sec dans l'eau, est malléable sous l'eau.

Dans un pâté de sable normal, les grains sont enrobés d'un film d'eau et le tout a de la cohésion à l'air libre. Pour le sable hydrophobe, sous l'eau les grains sont enrobés d'une pellicule d'air et l'ensemble a de la cohésion dans l'eau.



**MANIPULATION 67 (SUITE) :** On peut faire un pâté de sable hydrophile mouillé dans l'air. On peut aussi faire un pâté de sable hydrophobe sec dans l'eau.

Dans les deux cas la cohésion nécessite la présence de trois phases. Elle correspond à une interaction solide-liquide-gaz. Dès qu'une des phases fluides disparaît, il n'y a plus de cohésion. Le pâté de sable hydrophobe se délite complètement dès qu'on le sort de l'eau, de la même manière qu'un pâté de sable hydrophile se disperse dans l'eau.

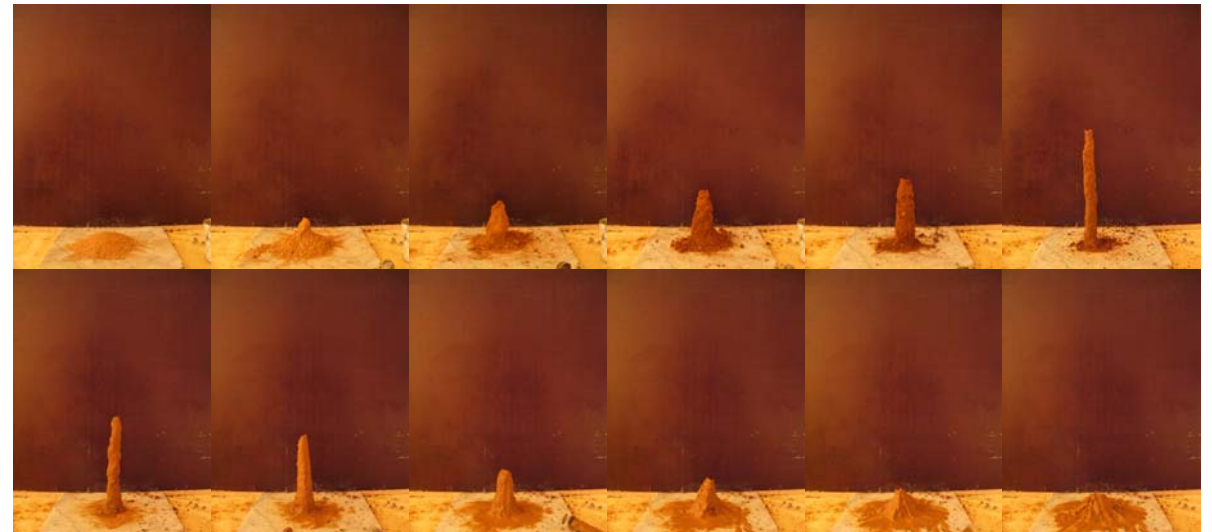


**MANIPULATION 67 :** Dans les deux cas, la cohésion nécessite la présence de trois phases. Dès qu'on met le pâté de sable hydrophile dans l'eau, il se délite, de la même manière que lorsqu'on met le pâté de sable hydrophobe hors de l'eau, il perd sa cohésion.

En résumé, le sable sec n'a pas plus de cohésion que le sable saturé en eau. La cohésion capillaire n'est possible que dans un milieu granulaire insaturé.

## L'optimum de teneur en eau

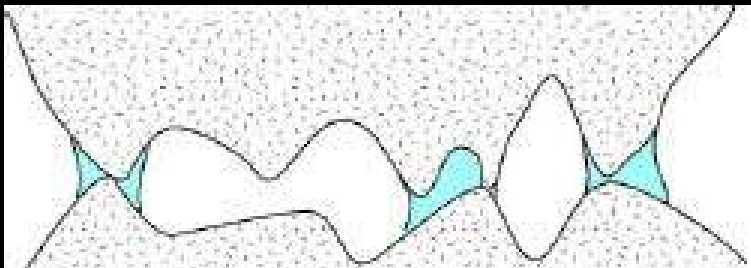
Le tenant de ce qui vient d'être évoqué, c'est l'existence d'un optimum de teneur en eau pour lequel on obtient un maximum de cohésion capillaire. C'est vrai aussi bien pour le sable que pour la terre. Une manipulation simple consiste à réaliser des colonnes les plus hautes possibles à l'aide d'échantillon de terre, de sable ou de silt dont on fait varier la teneur en eau de l'état sec à l'état saturé. Partant de l'état sec, on commence avec le tas, dont l'angle de talus augmente peu à peu jusqu'à l'obtention d'une colonne qui passe par un maximum de hauteur pour une certaine teneur en eau avant de redescendre jusqu'à la flaque de boue.



**MANIPULATION 68** : Avec un même volume de terre, on façonne des colonnes les plus hautes possibles en faisant varier la teneur en eau de l'état sec à l'état liquide. On met ainsi en valeur l'existence d'un optimum de teneur en eau qui permet de construire la colonne la plus haute pour un certain taux de compression (la force manuelle).

Restagno 2000 [75] – Hornbaker, Albert, Albert, Barabási, Schiffer, 1997 [73] - Gelard 2005 [4]

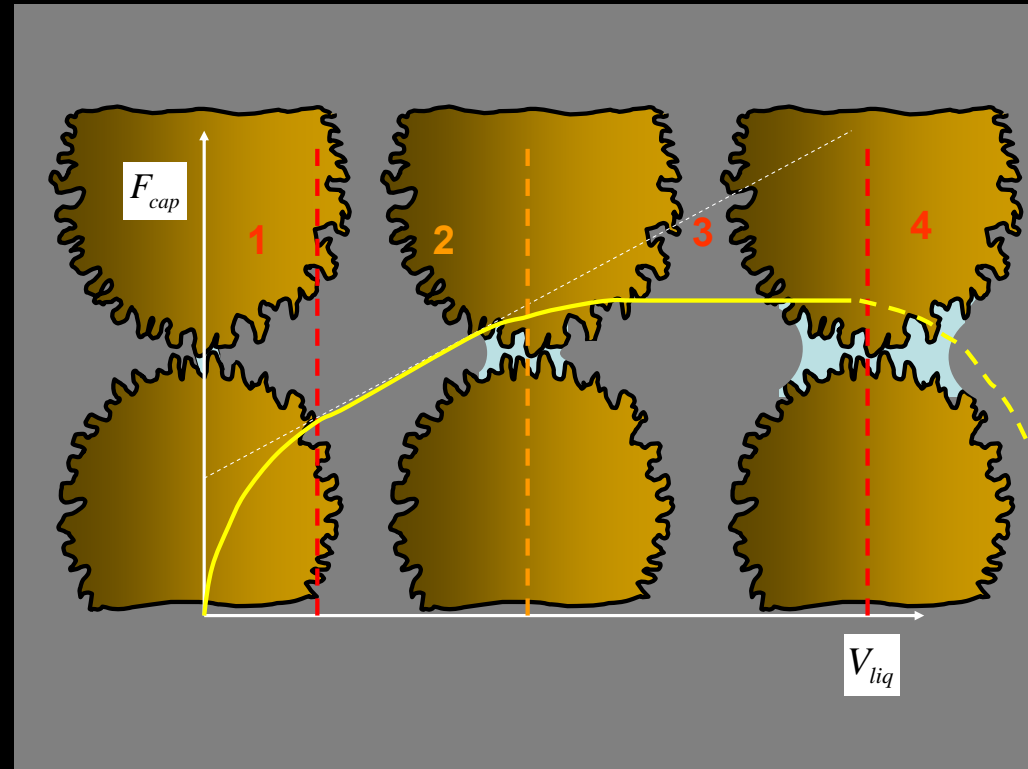
L'existence de cet optimum semble intuitivement acquise pour tout un chacun. Pourtant les physiciens ont eu beaucoup de mal à le décrire. Lorsque la teneur en eau augmente, il est facile de comprendre que les ménisques voisins finissent par fusionner de sorte que la cohésion diminue avec le nombre de ponts capillaires, jusqu'à ce qu'en régime saturé, il n'y ait plus de phase gazeuse. Par contre, l'expression mathématique de la force capillaire entre 2 sphères parfaites est très étonnante puisqu'elle laisse entendre que la cohésion ne dépend pas du volume d'eau du pont capillaire. Autrement dit, d'après cette théorie, la cohésion ne diminue pas au fur et à mesure que l'on s'approche de l'état sec : les plus infimes traces d'humidité suffirait à construire un château de sable ! Pour comprendre ce paradoxe, il faut regarder ce qu'il se passe à l'échelle du contact. La surface d'un grain de sable n'est pas lisse, comme le laisse entendre le modèle des sphères parfaites. Les surfaces sont rugueuses et seules quelques aspérités sont en contact (voir schéma ci-contre).



*A l'échelle du contact, la surface d'un grain de sable n'est pas lisse. Les surfaces sont rugueuses et seules quelques aspérités sont en contact. © Restagno 2000 [75]*

Halsey, Levine 1998 [73]

Quand le sable est très proche de l'état sec, les ponts capillaires se forment seulement au niveau des ces aspérités en contact. Ainsi, l'aire de la surface des grains réellement immergée dans les ponts n'est qu'une faible fraction de ce qu'elle serait si les surfaces étaient lisses et la force d'adhésion se trouve diminuée dans ce rapport. Lorsque l'humidité augmente, un nombre de plus en plus important d'aspérités se trouve immergé dans un pont liquide et la force d'adhésion augmente d'autant. On parle de régime d'aspérité : la force attractive augmente alors très rapidement selon la racine cubique du volume d'eau contenu entre deux grains. Il arrive un moment où l'humidité est telle que le liquide envahit tout le contact (l'épaisseur du volume d'eau dépasse la hauteur des aspérités). A partir de là, la force d'adhésion évolue différemment : on parle de régime de rugosité, et la force augmente de manière linéaire avec le volume liquide. A ce stade de l'extension latérale du pont capillaire, celui-ci n'est toujours pas sensible à la courbure moyenne des billes (tout se passe comme s'il se trouvait entre deux surfaces planes, et la distance entre surface n'évolue pas). Le pont capillaire augmentant, la courbure des grains devient prépondérante et on se retrouve à nouveau dans le modèle des sphères parfaites où la force attractive reste constante au fur et à mesure que le volume liquide augmente : c'est le régime sphérique.



L'existence de l'optimum de teneur en eau d'un château de sable est liée à la rugosité des grains de sable. Halsey, Levine 1998 [73] distinguent trois régimes pour l'évolution de la force capillaire en fonction du volume d'eau dans le contact appelés régime d'aspérité (1), régime de rugosité (2) et régime sphérique (3). Au-delà les ponts capillaires voisins fusionnent et les forces capillaires diminuent (4).

© Gelard 2005 [4]





## 11 – *L'eau et les grains*



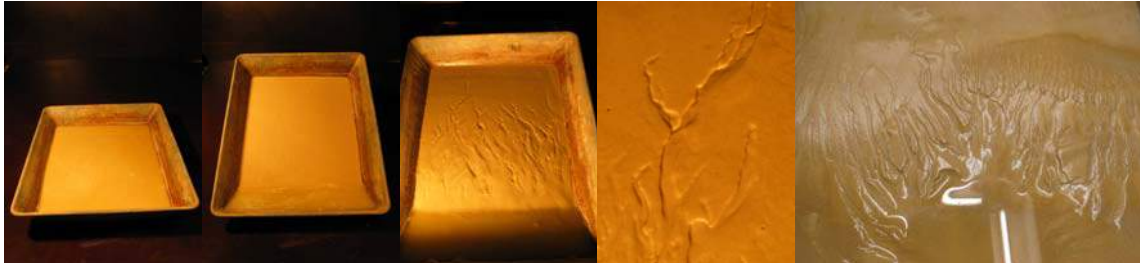
La cohésion capillaire n'est pas le seul fruit de l'interaction entre les grains et l'eau. Celle-ci entretient d'autres rapports avec la matière. Ainsi, lorsqu'elle est en mouvement, elle modèle la surface d'un milieu granulaire de différentes façons. Son écoulement crée des reliefs d'érosion, phénomène que l'on retrouve dans nos petits bacs de sable aussi bien qu'à l'échelle de nos paysages ou d'un mur en pisé exposé à la pluie, sur lequel les particules les plus fines se retrouvent arrachées de leur substrat pour ne laisser apparaître au fil du temps que les gros grains de matière. Un autre exemple est fourni par les rides de sable créées par le va et vient des vagues au bord de la plage.

Au-delà des interactions de surface, ce sera l'occasion d'observer avec plus d'attention l'eau contenue dans l'espace poreux, et ainsi de revenir sur la notion de porosité avant d'observer comment l'eau peut d'elle-même se déplacer par capillarité à l'intérieur du mur.

## Mouvements de l'eau et paysages

### Des micro-rivières dans un bac de sable - Marques de ruissellement

Un bac rempli de silt saturé en eau est faiblement incliné. Le surplus d'eau s'évacue peu à peu en surface et forme de véritables lits de rivières miniatures, avec leurs affluents et leurs deltas.



**MANIPULATION 69** : Dans un bac rempli de silt saturé en eau et légèrement incliné, l'écoulement de l'eau forme des marques de ruissellement semblables à des lits de rivières miniatures.

L'eau en s'évacuant emporte avec elle des grains de silt, l'inclinaison étant faible, de petits sillons se forment et partent légèrement en biais. Lorsqu'ils se rencontrent, le sillon s'élargit, jusqu'à ce que celui-ci rencontre un autre sillon et qu'un nouveau sillon encore plus large soit formé. Les marques de ruissellement sont des figures d'érosion dendritiques millimétriques à centimétriques formées par un système de « micro-rivières » lors du retrait des eaux sur les plages ou lors de phénomènes de ruissellement subaérien sur des sédiments fins. La divergence des ramifications se fait vers l'aval (dans le sens du ruissellement) - Boulvain 2004 [227].

### Relief d'érosion

La même expérience est réalisée avec une inclinaison beaucoup plus forte. On fait ensuite couler des gouttes d'eau sur le plan incliné et peu à peu se dessine un relief d'érosion. Le débit de l'eau arrache les grains de silt et creuse des stries plus ou moins verticales.



*Surface de la plage Saint-Michel, Erquy, Bretagne.*  
© Boulvain 2004 [227]



**MANIPULATION 70 :** La même expérience est reproduite avec une inclinaison beaucoup plus forte du support et en faisant couler des gouttes d'eau sur la surface. Il se dessine peu à peu un relief d'érosion.

L'eau, lorsqu'elle est en mouvement, peut également exercer une usure sur les roches. Les torrents, les rivières et les fleuves, spécialement en période de crues, déploient une grande énergie qui peut arracher de leur substrat d'importantes quantités de particules minérales.

### Rides de sable en bord de plage

En remuant un aquarium rempli de sable et d'eau, on simule le mouvement des vagues. Peu à peu le relief du sable s'organise en petites dunes plus ou moins parallèles aux allers-retours de l'eau. Les figures qui se forment sont similaires à celles que l'on peut observer au fond de l'eau à l'endroit où les vagues viennent s'échouer sur la plage. Le flux et le reflux de l'eau soulèvent le sable qui se dépose selon un certain angle, exactement comme les mouvements d'air de la plaque vibrante réorganisaient les grains selon l'angle de repos.



**MANIPULATION 71 :** Dans un aquarium rempli de sable et d'eau, on recrée le mouvement de va-et-vient des vagues. Petit à petit le relief du sable évolue jusqu'à imiter les rides de sables de bord de plage.



*Rides de courant*

On distingue deux grands types de rides : les rides de vagues et les rides de courant. Les premières sont formées par l'action des vagues, en général dans la gamme des sables fins. Leur coupe transversale est typiquement symétrique. Les secondes sont générées par l'action de courants unidirectionnels. L'asymétrie qui les caractérise permet de déduire le sens du courant. Ces observations de rides de sables sont très précieuses pour l'étude des dépôts anciens. Sur le terrain, le géologue peut par exemple déduire la direction d'une rivière aujourd'hui disparue en mesurant les structures géométriques observées dans les dépôts anciens (Ayer, Bonifazi, Lapaire 2003 [25]).

## L'eau dans l'espace interstitiel

### Le bruit de la terre

Dans un matériau granulaire, le pourcentage de vides par rapport au volume total du matériau est appelé porosité. Lorsqu'on mouille un tas de terre sèche, l'eau remplace l'air dans l'espace poral. En tendant l'oreille, un gargouillement se fait entendre : la terre boit l'eau et, se faisant, l'air s'échappe en faisant des bulles à la surface (manipulation 72).



**MANIPULATION 72 :** De la terre particulièrement sèche lorsqu'elle est mouillée fait un bruit semblable à un gargouillement. L'eau remplace l'air situé dans les pores et celui-ci en s'échappant fait des bulles en surface.

### Le sable « réservoir »

L'espace disponible entre les grains d'un sable dépend de la taille relative des particules. Lorsque celle-ci est uniforme, la porosité est relativement élevée. Dans le cas d'un sable composé de grains de dimensions variables, les petits se logent entre les gros. Ainsi dans un mélange de sable grossier et de sable fin, la porosité est moins importante que dans les sables pris séparément (manipulation 73).



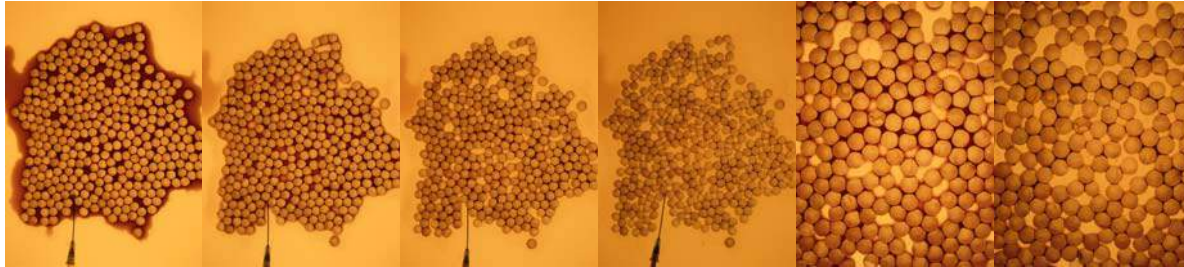
**MANIPULATION 73 :** En remplissant l'espace poral d'un volume de sable fin, d'un volume de gravier et d'un volume de sable fin et gravier mélangés, on observe que le mélange a la porosité la plus réduite alors que le sable fin et le sable grossier ont des porosités similaires.

Contrairement à ce que peut laisser entendre notre intuition, un ensemble de grains fin n'a pas une porosité plus réduite que des grains grossiers. Dans des graviers, la taille individuelle des pores est plus grande que celle d'un sable, mais leur nombre diminue en proportion. La porosité d'une roche est un paramètre important puisqu'il détermine sa capacité à stocker des fluides comme l'eau et le pétrole.

Les terrains sédimentaires sont recherchés par les hydrogéologues pour les réserves en eau qu'ils peuvent contenir. Dans les sables et les graviers, le volume d'eau stocké peut être considérable. En plus de la porosité, un autre paramètre important détermine la capacité d'un sédiment à transporter un fluide : c'est la perméabilité ou porosité effective. Celle-ci est liée au volume des pores connectés entre eux et permet l'infiltration et la circulation d'eaux souterraines. Les terrains qui répondent à ces deux critères sont appelés aquifères. Leur localisation en profondeur et leur protection sont les principales préoccupations des hydrogéologues. Les pores des sables et des grès sont parfois occupés par du pétrole. Leur porosité et leur perméabilité permettent l'imprégnation d'hydrocarbures dans les espaces inter-granulaires. Ces terrains qui représentent des gisements potentiels importants sont très recherchés par les géologues pétroliers. Au Canada, dans la province de l'Alberta, des milliards de tonnes de sables bitumineux sont extraits avec des moyens titanesques pour récupérer la précieuse substance qu'ils contiennent. Les sédiments sont lavés à l'eau chaude pour séparer le sable du bitume. Le gisement de la rivière Muskeg, par exemple, contiendrait plus de cinq milliards de barils de pétrole exploitable (Ayer, Bonifazi, Lapaire 2003 [25]).

## Porosité interconnectée

Dans une assiette, des billes de verre sont étalées de manière à ce qu'elles soient à peu près en contact tout en créant des pores de différentes tailles. Les pores sont remplis de liquide coloré. Lorsqu'on retire le liquide avec une seringue, les pores qui se vident en premier ne sont pas les plus proches de la tête de la seringue : ce sont les plus gros. Les pores de taille intermédiaire se vident ensuite et tout en dernier les plus petits.



**MANIPULATION 74 :** Lorsqu'on aspire le liquide contenu entre un ensemble de billes étalées, les premiers pores qui se vident ne sont pas les plus proches de la tête de la seringue mais les plus gros.

Cette expérience montre deux choses. La première est que dans un milieu granulaire, les pores sont tous interconnectés. Cette interconnectivité permet la circulation de fluides (air ou eau) dans l'ensemble du matériau. La porosité de la terre permet ainsi des échanges d'eau (liquide et vapeur) entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et le milieu poral. Les grandes surfaces disponibles permettent au mur en terre de jouer le rôle de régulateur hygrométrique.

En construction, les larges porosités des graviers, qui ne permettent pas les phénomènes de remontées capillaires, sont souvent utilisées pour leur aptitude à drainer l'eau. Cette expérience montre aussi que plus les surfaces sont rapprochées et plus l'eau qui les mouille est bien « accrochée ». La dépression à appliquer pour retirer l'eau contenue dans les pores augmente au fur et à mesure que la taille des ponts capillaires diminue : plus les ménisques sont petits, plus la cohésion est importante.

Les hydrogéologues s'intéressent beaucoup à la capacité d'un sédiment à transporter un fluide. Ils définissent la perméabilité ou porosité effective comme le volume de pores connectés permettant l'infiltration et la circulation d'eau.

## Remontées capillaires

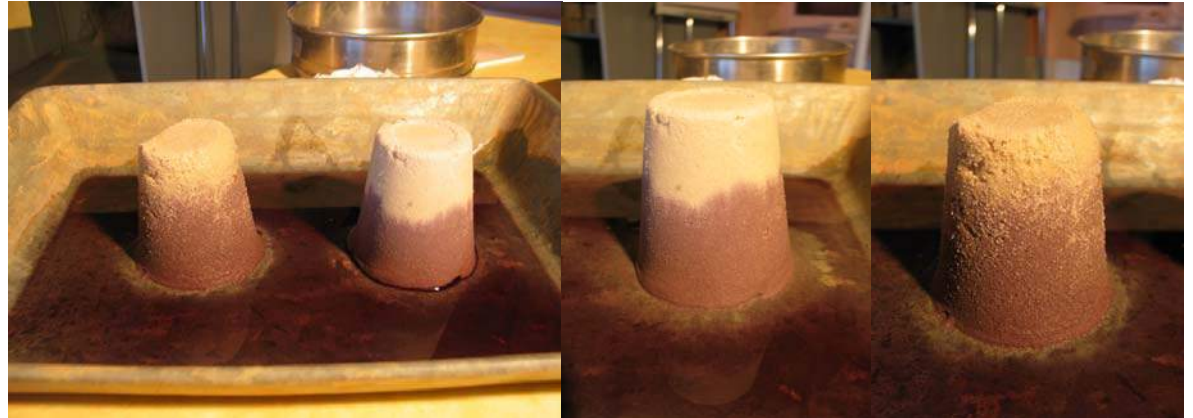
Nous avons déjà vu le phénomène de remontée capillaire dans un tube. Ce phénomène se produit aussi par l'intermédiaire de la porosité dans les milieux granulaires. Dans l'expérience qui suit, quatre tubes en plexiglas translucides sont remplis de grains de différentes tailles : silt, sable fin, sable moyen, sable grossier. Ils sont posés verticalement dans un bac rempli d'eau. Ces remontées diffèrent en fonction de la taille des grains. Plus les grains sont fins, plus le milieu poral est étroit, plus l'eau monte haut, exactement comme dans les expériences de remontée capillaire dans des tubes de différents diamètres.



**MANIPULATION 75 :**

Dans des tubes en plexiglas remplis de sables de différentes tailles, l'eau remonte d'autant plus que les grains sont fins.

A mesure que les grains diminuent, la remontée capillaire est beaucoup plus importante mais elle est aussi beaucoup plus lente. On peut comparer la vitesse de remontée capillaire avec deux pâtes de sable (fin et gros) déposés dans de l'eau colorée. La viscosité de l'eau freine d'autant plus la remontée capillaire que la porosité est étroite.



**MANIPULATION 76** : La remontée capillaire est plus rapide dans du sable fin que dans du sable grossier.

Cette expérience permet aussi de visualiser le processus de séchage dans le pâté de sable. L'eau colorée s'évapore de manière privilégiée à la surface du pâté. Des particules d'encre solides s'y déposent. Au fur et à mesure de cette évaporation, de l'eau liquide située à l'intérieur s'achemine vers la surface et s'évapore à son tour. L'encre sèche s'accumule en surface alors que l'intérieur semble « propre ». Si l'on crée une nouvelle surface en coupant le pâté en deux, le processus d'évaporation se poursuit et la surface initialement blanche se trouve recouverte par un nouveau dépôt de particules d'encre solide.

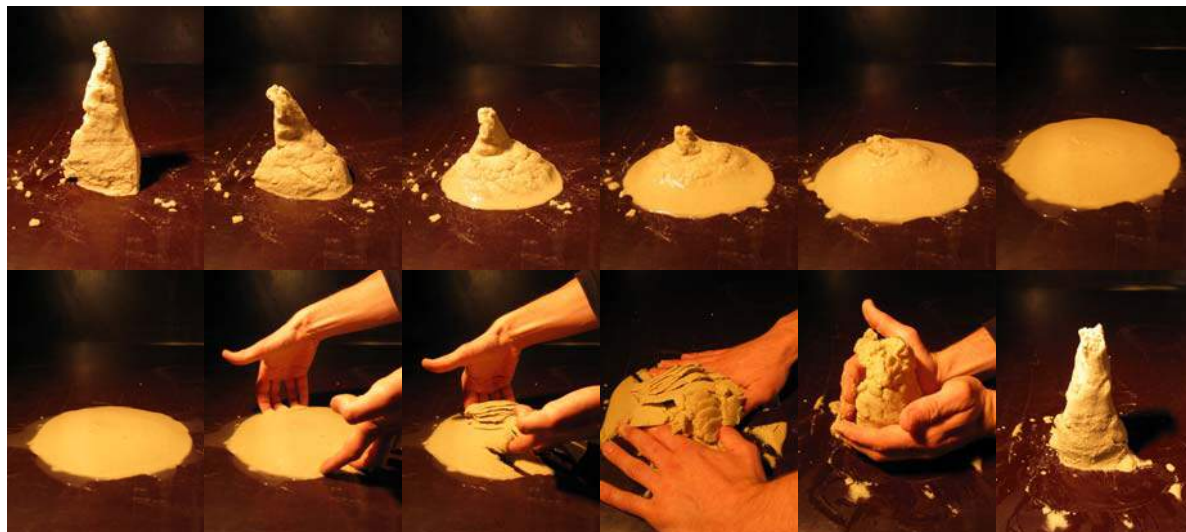


**MANIPULATION 76 (SUITE)** : Au bout d'une journée, lorsque le pâté a séché, celui-ci est coupé en deux et la blancheur de l'intérieur du pâté contraste avec celle de l'extérieur qui est couvert d'encre séchée. Le deuxième jour, cet intérieur est devenu violacé comme l'extérieur. Si l'on recoupe une moitié en deux, l'intérieur apparaît toujours blanc.



## La dilatance

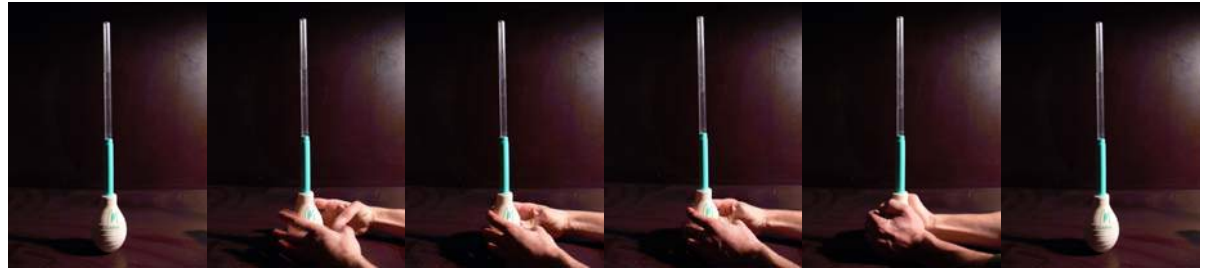
En marchant sur le sable mouillé au bord de la plage, une auréole plus claire se dessine autour du pied. Le sable sèche à cet endroit en formant un léger renflement. Ce phénomène est appelé « la dilatance ». Du sable fin est mouillé juste en dessous de sa limite de saturation, à un stade de teneur en eau où il peut encore être modelé pour former une boule avec une certaine cohésion. Une petite colonne d'une quinzaine de centimètre de haut est réalisée. En faisant vibrer cette colonne, elle se liquéfie littéralement. On voit très nettement un film d'eau à sa surface : le sable a dépassé sa limite de saturation en eau, il est complètement mouillé. Dès que l'on saisit cette crêpe en appuyant sur les côtés, le sable sèche quasiment instantanément, l'eau qui était à sa surface disparaît. On peut reformer une boule d'aspect relativement sec. En refaisant des vibrations, le sable se liquéfie à nouveau.



**MANIPULATION 77 :** Du sable fin est humidifié de telle sorte qu'il soit proche de sa limite de saturation tout en gardant une certaine cohésion. On fait alors une petite colonne sur une plaque vibrante. Lorsqu'on vibre, le sable se liquéfie peu à peu jusqu'à devenir une crêpe étalée sur la table. Sa surface est couverte d'eau. Dès qu'on saisit cette crêpe, le sable sèche instantanément et il est à nouveau possible de faire une colonne et de recommencer l'expérience.

Ce spectaculaire changement d'état est dû aux différences d'arrangement entre grains. En faisant vibrer la boule, les grains se mettent dans une configuration plus compacte, la taille des pores diminue, l'air est peu à peu expulsé : des bulles éclatent à la surface. Moins il y a d'air, plus le mélange est saturé en eau, plus le sable semble se liquéfier. Quand l'air est expulsé, un film d'eau finit par apparaître. En appuyant sur le mélange, cet arrangement optimal est désorganisé et les espaces interstitiels sont agrandis qui laissent plus de place pour l'eau et l'air qui peuvent à nouveau rentrer dans la matière : le film d'eau en surface disparaît. Ce changement d'état s'accompagne d'une perte de cohésion : dans leur arrangement compact, les grains de sables sont saturés en eau, et les ponts capillaires voisins fusionnent et finissent par disparaître avec la phase gazeuse. D'où l'apparente liquéfaction du sable vibré.

Une autre manière de visualiser la dilatance consiste à remplir une poire en caoutchouc de sable et d'eau (Manipulation 78). En appuyant sur la poire, le niveau d'eau descend au lieu de monter : la compression fait rentrer l'eau entre les grains.



**MANIPULATION 78** : Une poire est remplie de sable et d'eau. Un tube relié à la poire permet de visualiser le niveau d'eau. Lorsqu'on appuie sur la poire, le niveau baisse au lieu de monter.

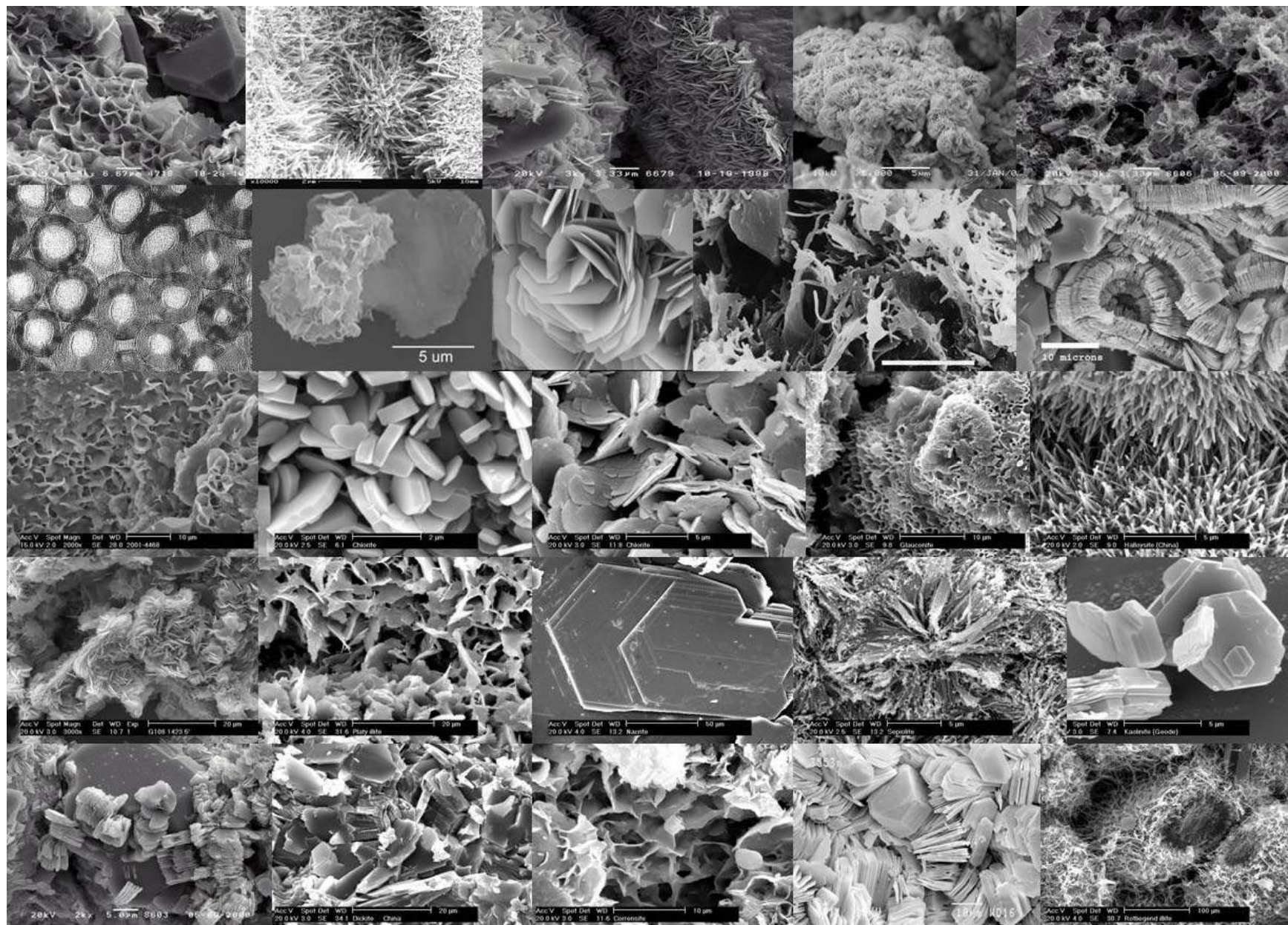
Le sable fonctionne exactement à l'inverse d'une éponge : lorsqu'il est comprimé, son volume augmente. On retrouve le principe de Reynolds selon lequel un empilement granulaire compact pour se déformer doit d'abord augmenter de volume. Les grains pour pouvoir se libérer de leur arrangement compact doivent s'écarter les uns des autres : le sable dilate son volume lorsqu'il est comprimé et déformé. Ce qui nous renvoie encore une fois à la rigidification du sable dans une enveloppe indéformable mise sous vide.

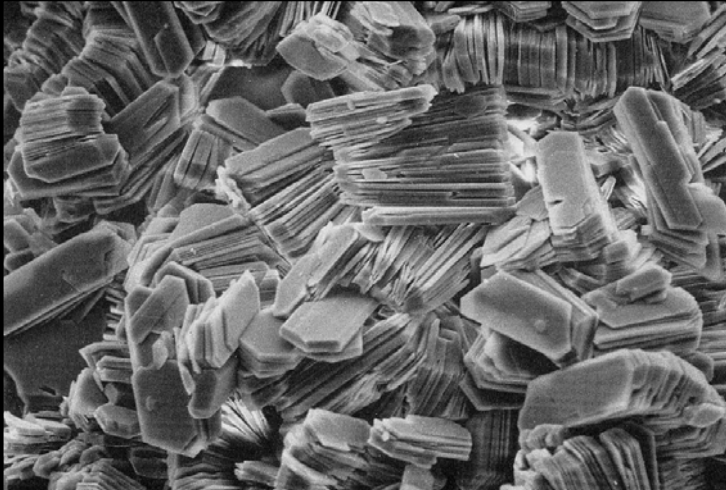
## 12 – Les argiles



Rautureau, Caillère, Hénin 2004 [145], Meunier 2003 [144]

Au siècle précédent, les utilisateurs des argiles, en particulier les agronomes, ont pris conscience que ce qui était considéré comme « argile » était constitué par des substances diverses sous forme de particules de très petites tailles. Divers techniciens ont pu constater que les propriétés de plasticité et d'adsorption de leurs matériaux étaient en relation avec la présence de particules fines ; la taille de 2  $\mu\text{m}$  a été fixée par les agronomes comme limite supérieure de la fraction argileuse. En donnant cette spécification, on englobait des minéraux de natures très différentes. Les argiles sont des « colloïdes minéraux » (du grec *kolla*, colle, et *eidos*, sorte de). Pour les physiciens, les colloïdes sont des particules de tailles inférieures à 1  $\mu\text{m}$ . La mise en regard de l'étymologie du mot, relative à une propriété macroscopique (une matière collante) et la définition des physiciens, relative à la taille microscopique des particules, est très révélatrice. Lorsque les dimensions d'un objet diminuent, ce sont les propriétés de surface qui prennent de l'importance. L'argile (ou plutôt les argiles, car il en existe plusieurs sortes) n'est pas le seul colloïde minéral du sol. Elle est souvent mélangée à des débris de quartz très fins (1 à 2  $\mu\text{m}$ ), de la silice plus ou moins hydratée, des oxydes de fer et d'alumine, des cristaux de calcaires très fins. L'ensemble constitue les colloïdes minéraux que l'analyse granulométrique classe dans la fraction argile (moins de 2  $\mu\text{m}$ ). On les appelle aussi parfois le « complexe d'altération ». On retiendra deux définitions de l'argile. L'une granulométrique : ce sont des particules de taille inférieure à 2 micromètres. L'autre minéralogique : ce sont des silicates phylliteux. En d'autres termes, ce sont des microcristaux qui ont l'aspect de feuilles. D'une variété à l'autre, la structure cristalline est différente, et la présence en faible ou grande quantité de défauts conduit à des densités de charge surfacique très différentes selon le type d'argile considéré. Ces feuillets vont alors se structurer dans l'espace de manières très diverses, et adopter différents types de comportement en fonction de l'état de dispersion ou d'agrégation des feuillets. La page suivante donne un aperçu de la grande diversité structurale des argiles. Certaines argiles à faible charge de surface se présentent sous la forme de particule agrégée (les feuillets sont liés) et ressemble à des grains plats, sortes de pièces de monnaie microscopique. L'idée de grain reste alors pertinente : la kaolinite sédimente dans l'eau et doit sa cohésion principalement aux forces capillaires, comme un château de sable. Dans d'autres cas, les charges de surface sont telles que mélangés à l'eau, les feuillets se repoussent et sont dans un état très dispersé. Les comportements de ce type d'argiles dites « gonflantes » sont très différents des gros grains de matière utilisés jusqu'à présent.





Les argiles sont des microcristaux « qui ont l'aspect de feuilles ».  
© Bertaux

Page de gauche :  
Bref aperçu de la diversité  
structurale du monde des  
argiles. De gauche à droite et  
de haut en bas :  
1.montmorillonite, 2.halloysite,  
3.corrensite, 4.gibbsite, 5.illite,  
6.chrysotile, 7.diagénèse d'une  
smectite en illite, 8.kaolinite,  
9.illite et smectite, 10.kaolinite  
vermiforme, 11.tosudite,  
12.chlorite-Fe, 13.chlorite-Mg,  
14.glaucosite, 15.halloysite,  
16.kaolinite, 17.chlorite rosette  
dans un grés, 18.illite,  
19.nacrite, 20.sepiolite,  
21.kaolinite, 22.kaolinite,  
23.dickite, 24.corrensite,  
25.kaolinite, 26. illite fibreuse.

## Des microparticules à faciès lamellaire

Les argiles sont des microparticules à faciès lamellaire. Ce sont des phyllosilicates hydratés (du grec *phullon* signifiant « qui a l'aspect de feuille »). Ces microcristaux présentent une particularité originale : leur structure à quelque échelle d'observation que ce soit est organisée en plans successifs. La photo de gauche représente des particules de kaolinite (argile du potier). On discerne clairement des paquets de plaquettes d'argile empilées les unes sur les autres face contre face. Ces plaquettes sont elles-mêmes constituées par l'empilement d'une centaine de feuilletts. Les feuilletts sont constitués de deux couches empilées l'une sur l'autre : la couche tétraédrique et la couche octaédrique. Une couche est un empilement de deux plans d'atomes. Ces spécificités de taille et de forme différencient les argiles des autres grains, leur conférant en particulier des propriétés de cohésion et de plasticité particulières.

## La cohésion capillaire

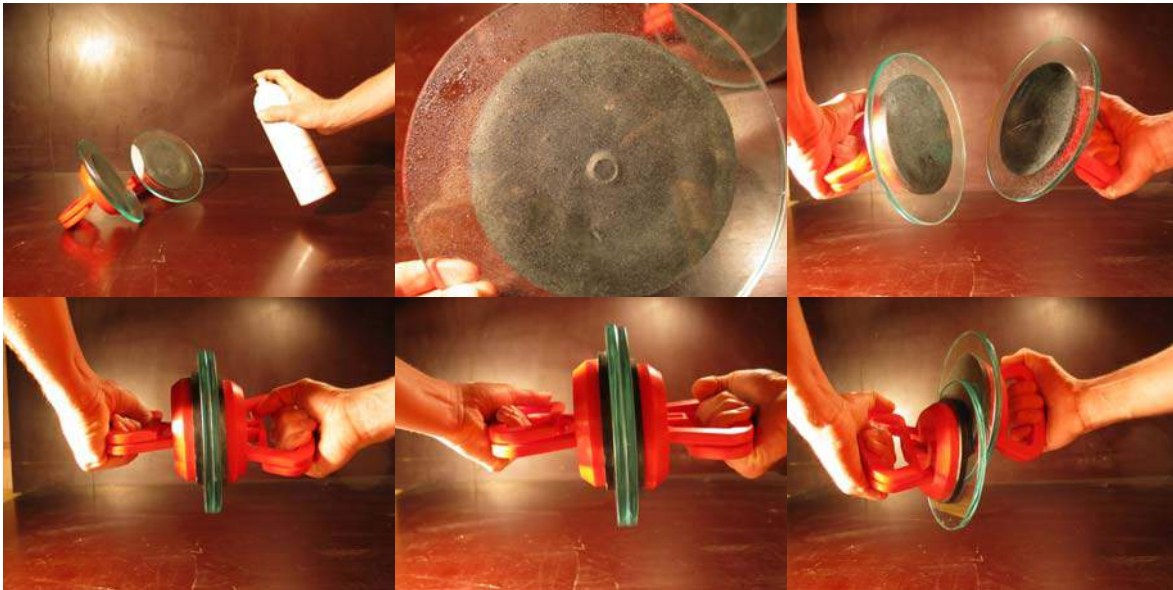
Des objets plans sont beaucoup plus sensibles aux forces capillaires que des objets sphériques. De la buée suffit à coller ensemble deux plaques de verre (manipulation 79).



**MANIPULATION 79 :** Un petit peu de buée suffit à coller deux plaques de verre entre elles. Les forces capillaires sont plus efficaces sur des objets plans que sur des grains sphériques : la surface de contact est beaucoup plus grande.

Nous avons vu précédemment que la cohésion capillaire augmente à mesure que la taille des grains diminue. Dans le cas des argiles, cette cohésion est d'autant plus importante que leur forme plane participe à l'augmentation des forces capillaires. La cohésion capillaire qui semblait être une force si faible avec de gros grains sphériques peut se révéler particulièrement importante à mesure que les surfaces de contact augmentent et qu'elles sont proches.

Si l'on reproduit l'expérience avec 2 grandes plaques de verre dont on a vaporisé les surfaces avec de l'eau (manipulation 79bis), la cohésion est telle qu'il devient impossible de séparer les deux plaques une fois qu'elles ont été mises en contact.

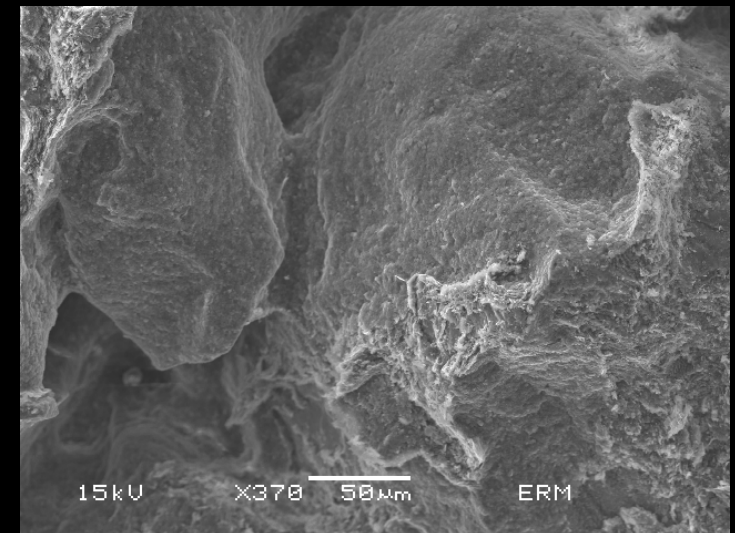


**MANIPULATION 79 BIS :** De l'eau est vaporisée sur de plus grandes plaques en verre reliées à des ventouses. Lorsqu'elles sont mises en contact, il est quasiment impossible de les décoller. Par contre elles glissent facilement l'une contre l'autre.

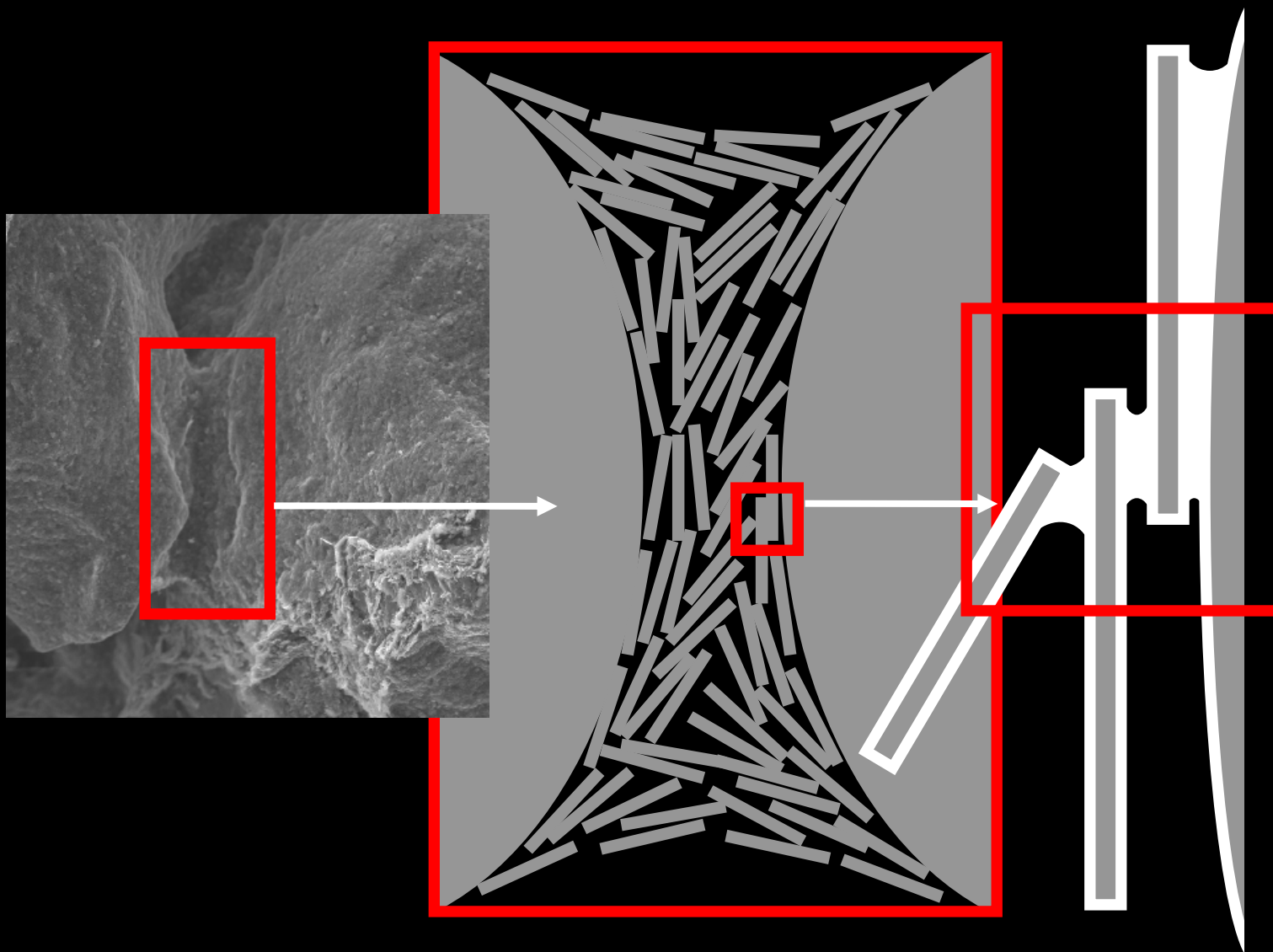
La photo ci-contre montre un pont argileux reliant deux grains de sable, vestige figé d'un ménisque de boue qui s'est formé lors de la préparation du matériau. Il est courant de considérer la terre comme un béton dont l'argile serait le liant. En réalité, s'il on regarde de plus près (schéma de la page de droite), on se rend compte que ce ménisque d'argile est constitué d'une multitude de particules solides liées entre elles par des ponts capillaires. Finalement, le liant de la terre, c'est l'eau. Les argiles sont juste des grains dont la taille et la forme particulière permettent à la cohésion capillaire d'être beaucoup plus grande. Grâce à l'extrême petite taille des ponts d'eau, les forces capillaires dépassent largement celles d'un simple château de sable et permettent d'obtenir à notre échelle un matériau solide et suffisamment résistant pour construire un édifice de taille imposante.

La démonstration des plaques de verre est cependant simplificatrice, puisqu'elle laisse entendre que les surfaces en contact sont beaucoup plus importantes avec des objets plans que dans le cas de grains sphériques. La situation est moins simple dans la réalité. Dans le cas des plaquettes de kaolinite, le désordre de l'empilement induit essentiellement des contacts en coin (plutôt que plans) même si l'angle est très petit. Les aires de contact restent faibles. Selon Fripiat et Setton<sup>1</sup> (1987), le désordre de l'empilement implique que la fraction de la surface des plaquettes qui est en situation de contiguïté avec une voisine est de l'ordre de 1% (Gelard 2005 [4]).

<sup>1</sup> Fripiat J.J., Setton R., Cohesion energy in anisotropic particles aqueous slurries, Journal of Applied Physics 65(5), pp. 1811-1815, 1987



*Pont argileux reliant deux grains de sable.*  
© Van Damme



*Un ménisque d'argile est constitué d'une multitude de particules solides liées entre elles par des ponts capillaires. Finalement, le liant de la terre, c'est l'eau.*  
© Van Damme



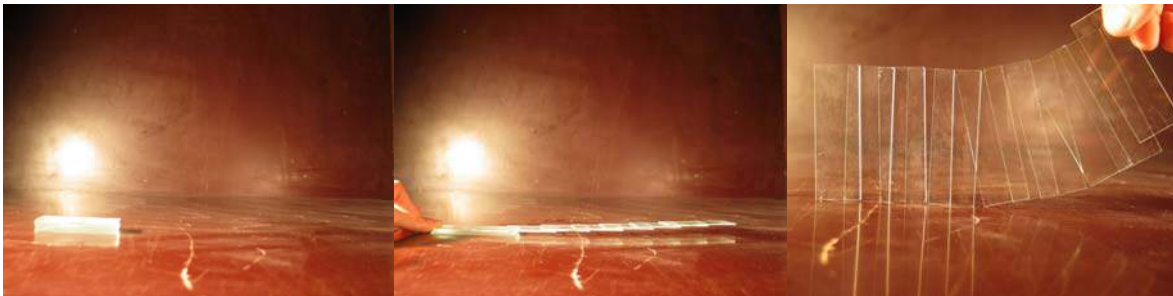
## La plasticité

Avec la manipulation 79 bis, on a pu constater qu'il était difficile de séparer les plaques de verre mais qu'elles coulissaient aisément l'une sur l'autre. De même, en mouillant une grande quantité de confettis métallisés, ceux-ci collent et sont difficiles à séparer. Par contre en les manipulant, ils glissent facilement les uns sur les autres.

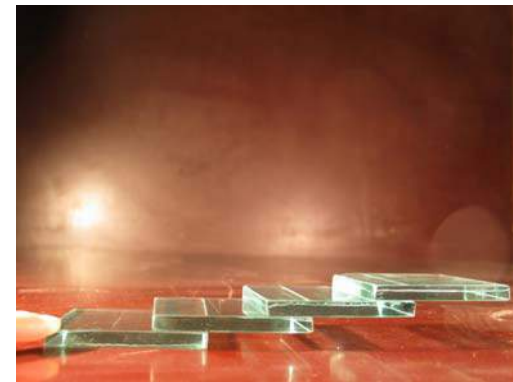
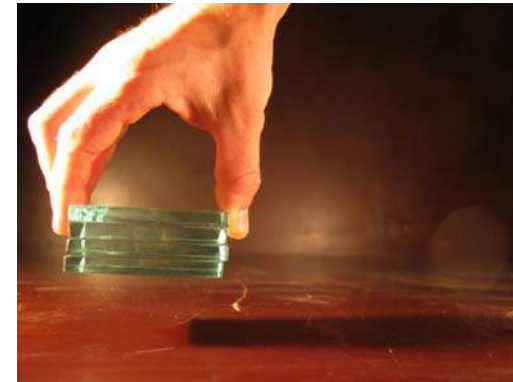
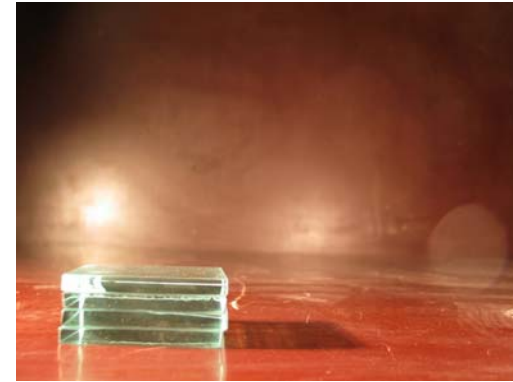


**MANIPULATION 80 :** Des confettis métallisés mouillés collent entre eux. Il est difficile de les séparer. Par contre ils glissent les uns sur les autres. Ce déplacement face contre face à notre échelle est responsable de la grande plasticité des argiles.

Lorsque la teneur en eau est suffisante, il en est de même avec les particules d'argile. Ce déplacement face contre face à notre échelle permet de modeler la terre : c'est la plasticité. On peut reproduire l'expérience avec plusieurs plaques de verre ou des lames de microscopes (manipulation 81)



**MANIPULATION 81 :** Des lames de microscope humides sont empilées face contre face. Elles sont impossibles à décoller mais il est facile de les faire glisser l'une sur l'autre.



## La cohésion des poudres et l'humidité de l'air

La pente d'un tas de poudre sèche est beaucoup moins constante et régulière que celle d'un tas de sable. Les photos ci-dessous (manipulation 82) présentent l'évolution de la forme du tas pour des granulométries de plus en plus fines : sable moyen, sable très fin, silt, argile.



**MANIPULATION 82** : La régularité de la pente du tas s'amenuise à mesure que la taille des grains diminue. De gauche à droite : tas de sable moyen, tas de sable fin, tas de silt, tas de poudre d'argile.

S'il l'on verse le contenu d'un récipient rempli de poudre sèche légèrement tassée, elle forme de petits blocs (manipulation 83, photo ci-contre). En regardant de près, on peut les observer sur notre tas d'argile. Ainsi même sèche, les poudres ont de la cohésion. D'autre part si on écrase une poudre d'argile (smectite) avec un marteau, il se forme une petite pastille dont on peut éprouver la résistance en la cassant entre ses doigts (Manipulation 84).



**MANIPULATION 84** : Un petit coup de marteau sur une poudre de smectite suffit à fabriquer une petite pastille dont on peut éprouver la résistance en la brisant entre les doigts.

De nombreuses surfaces, dans une atmosphère un peu humide, s'hydratent spontanément. C'est le cas de la plupart des grains minéraux qui se trouvent enrobés d'un film d'eau. Cette hydratation de surface correspond à 2 à 3 couches de molécules d'eau entre 10% et 80% d'humidité relative (Cabane, Hénon 2003 [133]). L'humidité de l'air suffit à assurer la cohésion des feuillets d'argiles : le simple fait de les rapprocher pour les mettre en contact provoque une adhésion. C'est le principe du pisé, où le simple fait de comprimer la terre permet de rapprocher les particules afin de donner de la cohésion à l'ensemble et passer d'un état granulaire à un état solide. L'industrie pharmaceutique utilise ce procédé pour fabriquer des comprimés à partir de poudres.

**MANIPULATION 83** : Blocs de poudre « sèche » révélant la présence de cohésion.

La même expérience est reproduite avec une poudre argileuse d'un autre type : la kaolinite.



**MANIPULATION 85** : L'expérience est reproduite avec une poudre de kaolinite. Cette fois, aucune pastille n'est formée.

Cette fois, la compression de la poudre ne forme aucune pastille. Ceci est dû aux différences structurales entre les plaquettes de kaolinite et les feuillets de smectites. Les particules de kaolinites sont des plaquettes comparables à des pièces de monnaie constituées d'un empilement de feuillets (une centaine environ) qui sont fortement solidaires.



**MANIPULATION 86** : Les particules de kaolinite se présentent sous la forme de plaquettes relativement épaisses. Elles sont constituées de l'empilement d'une centaine de feuillets fortement solidaires.

Elles sont donc très rigides et un simple coup de marteau ne suffit pas à les aligner pour les mettre en contact. Les smectites se présentent sous la forme de paquets de feuillets moins fortement liés que ceux de la kaolinite. La structure obtenue est plus flexible, à l'image de ce paquet de feuilles.

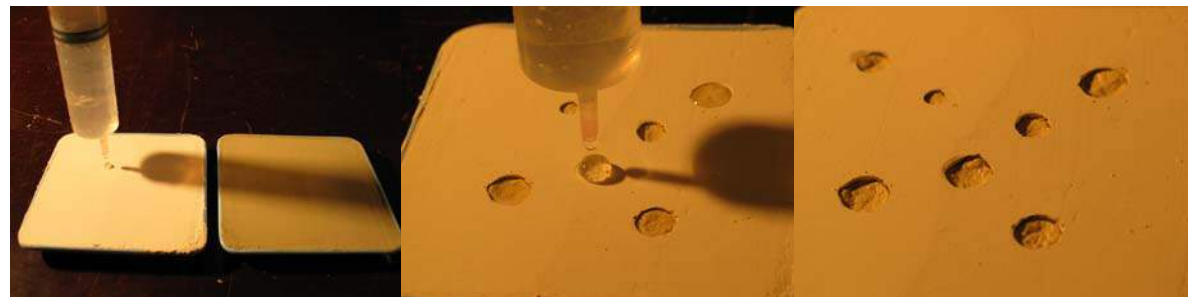


**MANIPULATION 86 :** Les smectites se présentent sous la forme de paquets de feuillets. Les particules obtenues sont plus souples que les plaquettes de kaolinite.

Le coup de marteau parvient ainsi à aligner grossièrement ces feuillets pour les rapprocher et produire une pastille cohérente.

## L'eau pour comprimer la matière

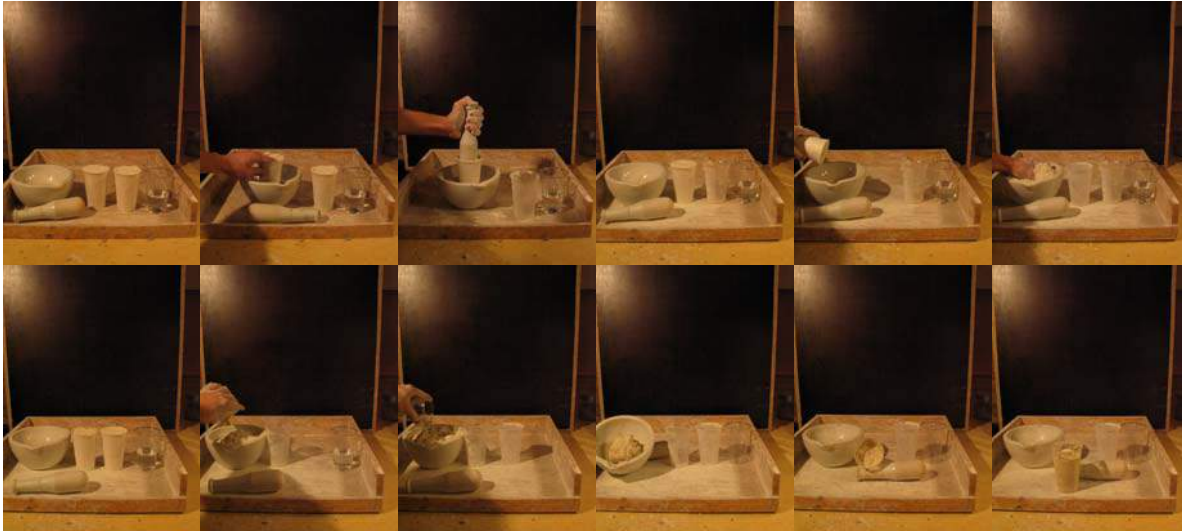
Au-delà des propriétés de cohésion et de plasticité qu'elle confère à l'argile, l'eau permet aussi de rapprocher les particules. Dans la manipulation 87, quelques gouttes d'eau sont déposées sur une poudre de kaolinite. On observe alors un retrait.



**MANIPULATION 87 :** Quelques gouttes d'eau sont déposées à la surface d'une poudre de kaolinite. L'eau comprime la poudre et on observe un retrait.

La poudre de kaolinite est remplie d'air. En ajoutant de l'eau, les plaquettes qui sont toutes désorientées s'alignent. L'eau réorganise la matière dans une configuration plus compacte exactement comme elle réorganisait nos billes de verre dans l'empilement hexagonal.

Il est beaucoup plus laborieux d'essayer de comprimer une poudre « sèche » de kaolinite mécaniquement qu'en rajoutant de l'eau. Dans l'expérience qui suit (manipulation 88), deux verres de poudres de kaolinite sont comprimés manuellement. On arrive alors à réduire le volume initial à l'équivalent d'un seul verre rempli à raz bord. En ajoutant un demi verre d'eau aux deux verres de poudre initiaux, on obtient une pâte qui rempli seulement les  $\frac{3}{4}$  d'un verre !

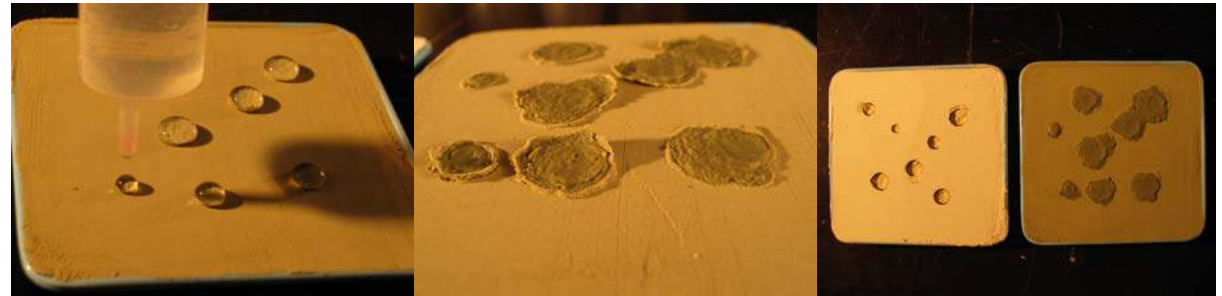


**MANIPULATION 88 :** L'équivalent de deux verres de poudre de kaolinite est comprimé manuellement. Le volume laborieusement obtenu est celui d'un verre rempli à raz bord. En mélangeant ces deux verres de poudres à un demi verre d'eau, on obtient une pâte qui rempli seulement les  $\frac{3}{4}$  d'un verre.

Bien que les poudres présentent une certaine cohésion, il est illusoire d'espérer construire un mur en pisé avec une terre trop sèche. L'eau joue un rôle « mécanique » dans la compression de la terre aussi important que celui du pisol. Elle permet en l'occurrence de lubrifier les contacts entre grains pour que ceux-ci s'arrangent plus facilement dans une configuration plus compacte.

## Le gonflement

Certains sols absorbent de l'eau, et la retiennent facilement (sols argileux). D'autres ne gonflent pas, et laissent drainer l'eau qui les imprègne (sables). Le gonflement des sols argileux dépend du type d'argile considéré. En reproduisant l'expérience de la goutte d'eau sur une poudre de smectite, les particules d'argile, au lieu de s'aligner dans une configuration plus compacte, forme un renflement de surface. Cette fois l'eau gonfle les argiles au lieu de les comprimer.



**MANIPULATION 88 (SUITE)** : Des gouttes sur une surface de poudre de smectite forment des renflements alors que sur une poudre de kaolinite on observait du retrait.

Les smectites font partie des argiles gonflantes. Leur comportement à l'eau est radicalement différent de celui de la kaolinite. Dans la manipulation 89, un volume de smectite est mélangé à un volume de sable et un litre d'eau. Un autre mélange est fait en remplaçant la smectite par la kaolinite tout en conservant les mêmes proportions d'argile, de sable et d'eau.



**MANIPULATION 89** : Deux bouteilles sont remplies avec un mélange d'argile, d'eau et de sable en proportions identiques. L'une contient de la kaolinite, l'autre de la smectite. Le résultat obtenu montre que la kaolinite ne gonfle presque pas alors que la smectite occupe quasiment tout le volume d'eau disponible.

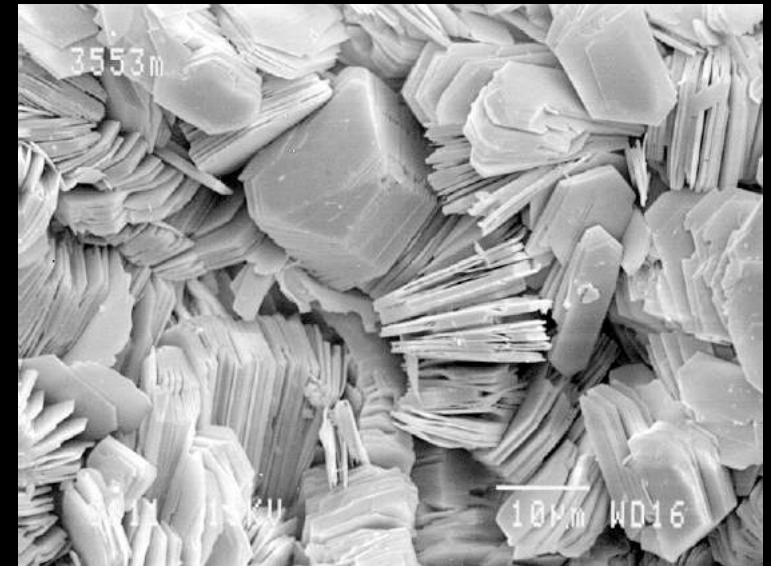
Alors que la kaolinite n'augmente quasiment pas de volume, la smectite gonfle à tel point qu'elle occupe presque tout le volume d'eau disponible. Les smectites ont des capacités de rétention d'eau très importante. On peut s'en rendre compte en mélangeant un verre d'eau respectivement à un verre de poudre de kaolinite et de smectite. La kaolinite se retrouve alors dans un état complètement fluide, alors que la smectite est encore à l'état de pâte plastique.



**MANIPULATION 90** : Un verre d'eau mélangé à un verre de kaolinite forme un mélange liquide, alors que le même mélange avec une poudre de smectite produit une pâte de consistance bien différente.

L'origine de ses différences de comportement est liée à l'état d'agrégation des particules. Les deux photos ci-contre montre bien la différence déjà évoquée entre les épaisses plaquette de kaolinite rigide (en haut) et les paquets de feuillets de smectite qui ne sont pas agrégés comme les feuillets de kaolinite. La surface disponible des smectites est bien plus supérieure puisque l'eau peut s'infiltrer entre les feuillets, alors que dans le cas de la kaolinite elle ne fait qu'enrober les plaquettes. On comprend dès lors intuitivement que la quantité d'eau nécessaire pour rendre une pâte plastique est beaucoup plus importante dans un cas que dans l'autre.

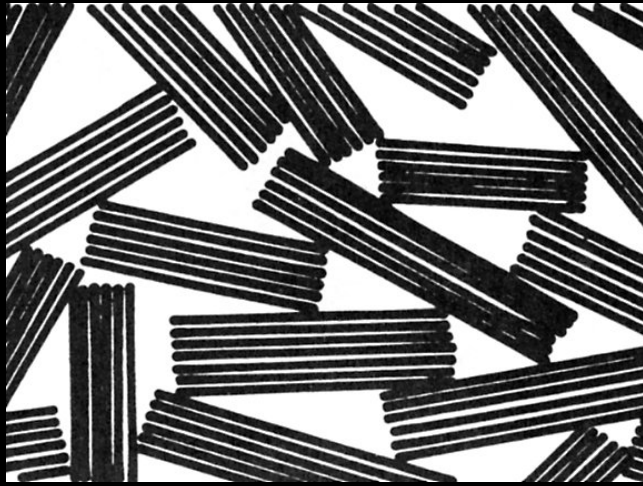
D'autre part, les surfaces des feuillets de smectite sont électriquement chargées. Lorsqu'elles sont immergées dans l'eau, elles se repoussent, ce qui les conduit à un état de dispersion bien plus important (schémas de la page de droite). Ce phénomène de répulsion à l'origine du gonflement de certaines argiles est dû à ce qu'on appelle la « pression osmotique ».



Plaquettes de kaolinite  
© Liewig, Karcher, CGS – CNRS – UMR 7517



Feuillets de smectite © Van Damme



*Schématisme de l'état d'agrégation des feuillets de kaolinite dans l'eau.*

© Van Damme



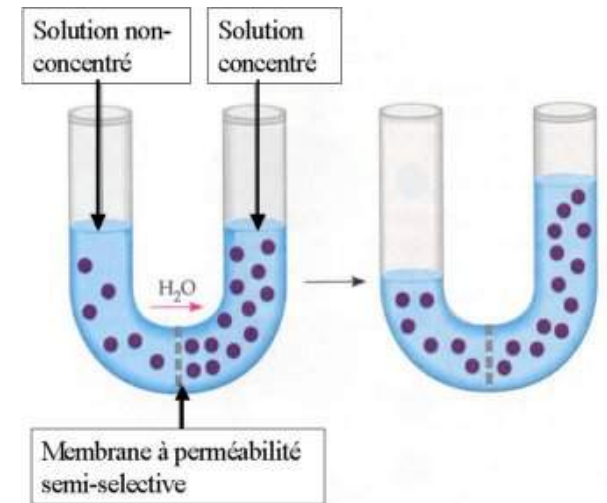
*Schématisme de l'état de dispersion des feuillets de smectite dans l'eau.*

© Van Damme

## La pression osmotique

Cabane, Hénon 2003 [133]

Dans un tube en U contenant de l'eau salée (à gauche) et de l'eau pure (à droite) séparées par une membrane semi-perméable, de l'eau passe de gauche à droite par osmose. Il s'en suit une différence de hauteur dans les tubes qui représente la pression osmotique de la solution. On peut s'opposer à ce passage en appliquant une surpression du côté droit. L'eau peut alors passer de droite à gauche : c'est le principe de l'osmose inverse utilisée pour désaler l'eau de mer. L'osmose se manifeste dans de nombreux mécanismes biologiques. Lorsqu'une bactérie est plongée dans un milieu aqueux, de l'eau entre et sort de la cellule à travers la membrane, qui est perméable. Si la bactérie est plongée dans du sucre, la quasi-totalité de l'eau intra-cellulaire traverse la membrane vers le sucre. La bactérie se déshydrate et meurt. C'est un phénomène connu et utilisé depuis des milliers d'années : le sel conserve viandes et poissons, tandis que le sucre préserve les confitures de la prolifération bactérienne. Inversement, le contact avec l'eau pure est dangereux pour les cellules de notre organisme qui contiennent des fluides physiologiques salés. Si par exemple, pour nettoyer nos yeux nous utilisons de l'eau pure au lieu de sérum physiologique, en vertu de son « droit au mélange », l'eau va passer par osmose dans les cellules de la cornée, ce qui risque de créer un œdème.



*Dans un tube en U contenant de l'eau salée (à gauche) et de l'eau pure (à droite) séparées par une membrane semi-perméable, de l'eau passe de gauche à droite par osmose. Il s'en suit une différence de hauteur dans les tubes qui représente la pression osmotique de la solution. Le gonflement de certaines argiles dans l'eau est dû à cette pression osmotique, les surfaces électriquement chargées des feuillets attirant des cations et créant, localement, une différence de concentration ionique que le système tend à « diluer ».*

Les liquides purs sont très rares dans notre environnement : la plupart des liquides que nous manipulons sont des solutions. L'eau contient ainsi généralement des sels, des sucres, des protéines, ou des tensioactifs. Lorsque l'on parle de l'eau contenue entre les particules d'argiles, il est plus précis de parler de solution aqueuse. Ce sont les ions contenus dans cette solution qui vont induire une pression osmotique entre les feuillets et qui sont responsables du gonflement des smectites. Les surfaces chargées des feuillets attirent des ions à charge opposée. Il y a donc localement une différence de concentration ionique près des surfaces. L'eau, pour qui la situation la plus favorable est celle du mélange maximal, cherche à diluer cette concentration pour homogénéiser la solution, ce qui conduit à l'écartement des feuillets et au gonflement.



## Le retrait

Lorsqu'une pâte d'argile sèche, la plus grande partie de l'eau s'évapore et l'argile fissure. Les différences de gonflement des argiles impliquent des différences de retrait. La kaolinite, qui présente une faible capacité de rétention d'eau, fissure peu.



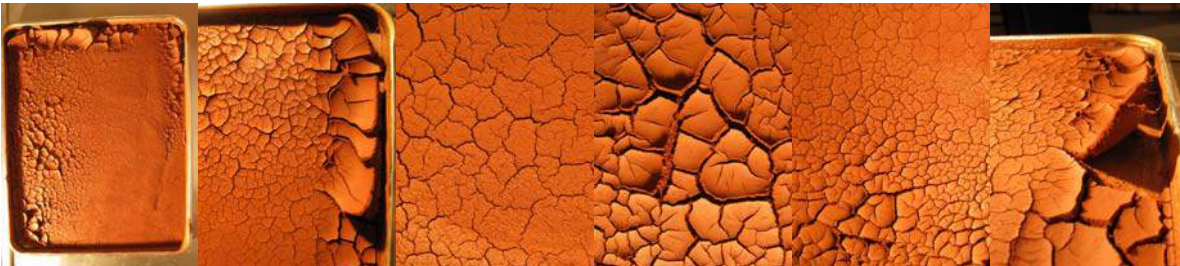
MANIPULATION 91 : Retrait de la kaolinite.

Les smectites, à l'état de boue, contiennent majoritairement de l'eau. Le retrait est énorme.



MANIPULATION 91 (SUITE) : Retrait des smectites.

A un stade intermédiaire entre ces deux extrêmes d'argile gonflante et non gonflante, cette argile rouge, provenant d'une terre latéritique, présente un retrait moyen.



MANIPULATION 91 (SUITE) : Retrait d'une argile de terre latéritique.





Cabane, Hénon 2003 [133]

Les propriétés de gonflement et de retrait dépendent du type de particules considérées, notamment de leur taille, de leur état de dispersion ou d'agrégation, et de leur charge surfacique. De manière générale, les dispersions grossières, ou celles ne contenant que des particules agrégées, ont une pression osmotique nulle, et une rétention de liquide faible. En effet, si les particules peuvent venir en contact en expulsant le liquide qui les sépare, elles seront pour les mêmes raisons incapables de retenir le liquide. Inversement, les dispersions qui sont finement divisées, et dans lesquelles les particules se repoussent, ont une pression osmotique importante qui provoque la rétention de liquide, et le gonflement lors d'un ajout de liquide. La pression osmotique d'une dispersion est donc intrinsèquement liée à son état de dispersion. Mais cette pression osmotique étant le fait des espèces attirées par les surfaces, ces propriétés dépendent aussi de la nature de la phase liquide qui vient gonfler la dispersion. Pour une boue smectitique, le retrait varie en fonction du liquide utilisé comme on peut l'observer sur les clichés ci-dessous (manipulation 91). Il change légèrement en fonction du type d'eau utilisée (eau déminéralisée, eau du robinet ou eau de pluie).



**MANIPULATION 91 :** Le retrait d'une boue de smectite varie en fonction du liquide utilisé. Les cations contenus dans la solution provoquent des comportements de gonflement différents. De gauche à droite : eau du robinet, eau de pluie, eau déminéralisée, lait caillé, vinaigre.

Il est donc possible de modifier l'état de dispersion d'une argile en ajoutant des solutés dans l'eau du mélange. On change ainsi sa capacité de rétention d'eau et on peut modifier le degré de gonflement et de retrait. La présence d'ions calcium en particulier, a des effets spectaculaires. Sur les photos de gauche, on peut constater les différences de gonflement d'une smectite pour différents ajouts de solutés dans l'eau déminéralisée.

## Les boues et les gels d'argiles

### Les dispersions colloïdales

Cabane, Hénon 2003 [133]

On appelle dispersions solide/liquide des systèmes formés d'un liquide dans lequel sont immergés de petits morceaux de solide. Par rapport aux liquides (ou solides) homogènes, ces systèmes sont donc caractérisés par la présence d'interfaces. Lorsque les particules sont très petites et très nombreuses, les propriétés des dispersions sont complètement déterminées par les interfaces et n'ont rien de commun avec celles des deux phases liquide et solide qui les constituent.

Si les particules sont de tailles supérieures à  $1\mu\text{m}$ , on parle de suspensions. Ce nom vient du fait que les particules de grandes tailles, dispersées dans un liquide, sédimentent sous l'effet de la gravité. Pour conserver l'état de la dispersion, il faut les « suspendre », par agitation mécanique par exemple.

Si les particules sont de tailles inférieures à  $1\mu\text{m}$ , on parle de dispersions colloïdales. La petitesse des particules colloïdales leur confère des masses insignifiantes, ce qui les rend capables d'occuper le moindre recoin du milieu dans lequel elles baignent. Elles ne sédimentent pas spontanément. L'énorme quantité d'interfaces qu'elles contiennent (de l'ordre de  $100\text{ m}^2$  par gramme de matière dispersée) les rend très sensibles à tout ce qui modifie les interactions entre interfaces : on passe ainsi facilement d'un état fluide à divers états pâteux, gélifiés, granulaires. Les dispersions colloïdales correspondent donc à la limite des dispersions contenant beaucoup d'interfaces ; dans cette limite, les propriétés ne sont ni celles de la phase solide ni celles de la phase continue liquide.

Le fait que chaque particule demeure séparée de ses semblables est une infraction aux lois de la thermodynamique. Les atomes, ions ou molécules qui se situent à l'interface des particules et du milieu qui les abrite « dépensent » plus d'énergie à tenir leur place que s'ils se regroupaient. Le risque d'agrégation, irréversible ou non, est donc très grand, puisque tout système tend naturellement à minimiser son énergie. On dit donc des dispersions colloïdales qu'elles se trouvent en équilibre « métastables ». Sur des temps très longs, comme le prévoit la thermodynamique, les dispersions ne se maintiennent pas. Mais aux échelles de temps courantes, elles paraissent stables.



*Boue d'atapulгите*



*Boue de terre rouge tamisée à  $100\mu\text{m}$ )*



*Boue de montmorillonite*



*Boue de chlorite*

*Boue de silt  
noir (terre  
d'Isère  
tamisée à  
100  $\mu\text{m}$ )*



*Boue de  
kaolinite*



*Boue de silt  
beige  
(déchet de  
lavage de la  
carrière  
Peysson)*



*Boue de  
terre à pisé  
tamisée à  
100  $\mu\text{m}$*



Les dispersions peuvent être dans un état fluide, pâteux ou solide, suivant les interactions entre particules dispersées. Lorsque les particules sont complètement séparées par le liquide et lorsqu'il y a suffisamment de liquide pour permettre leurs mouvements relatifs, les dispersions sont dans un état fluide. C'est le cas des eaux naturelles, des boues et aussi de dispersions plus concentrées comme le sang. D'autres dispersions sont des pâtes ou des solides, parce que les particules sont agrégées, et forment un réseau qui traverse tout le matériau. C'est le cas des sols argileux, des pâtes dentifrices, des peintures et des ciments en cours de prise. Les propriétés mécaniques des pâtes dépendent de la force des interactions de contact entre particules (parce que pour déformer ou faire couler la pâte, il faut briser les contacts et les reformer).

### Les sols et les boues

Beaucoup de milieux naturels sont des dispersions de petites particules dans un liquide. Les sols que nous cultivons et sur lesquels nous marchons sont des dispersions de particules dans une phase aqueuse. La séparation du solide et du liquide est très difficile, alors qu'il s'agit pourtant de phases distinctes et non d'un mélange à l'échelle moléculaire : il faut chauffer à haute température pour extraire la phase aqueuse. Cette séparation reste délicate même quand la teneur en phase aqueuse est importante : les boues ne se séparent ainsi pas sous l'effet de la gravité. Il s'agit d'un premier exemple de système métastable. L'état d'énergie libre la plus basse est certainement la séparation complète du solide et du liquide, par exemple par croissance d'un agrégat dense de plaquettes d'argile. En effet, cette séparation permettrait de minimiser l'aire de contact entre solide et liquide, et donc aussi l'énergie interfaciale. Cependant, dans les conditions usuelles d'hygrométrie, le système n'atteint jamais cet état d'énergie libre minimale : il reste sous forme dispersée.

## Les liquides à seuil

Cabane, Hénon 2003 [133]

En contrôlant les interactions entre particules par des moyens physico-chimiques, on peut passer d'une pâte qui a un comportement tout à fait solide à une dispersion qui coule comme un liquide newtonien. Mais lorsque les interactions sont plus faibles et réversibles, comme dans une boue d'argile, des propriétés mécaniques plus subtiles apparaissent. Beaucoup de pâtes ont par exemple un seuil d'écoulement, ce qui signifie que contrairement à un liquide newtonien, ces liquides ne coulent qu'à partir d'une certaine inclinaison du support où ils se trouvent. Ceci s'explique par le fait qu'ils opposent une certaine résistance au cisaillement (on décrit souvent l'écoulement d'un liquide comme un cisaillement de « couches » superposées). Dans l'expérience de gonflement des argiles mélangées à du sable et de l'eau dans des bouteilles (manipulation 89), la kaolinite et le sable sédimentent. Par granoclassement, le sable se retrouve dessous et la kaolinite dessus. Ce n'est pas le cas dans l'autre bouteille, où l'on observe les grains de sables uniformément répartis au sein de la smectite. Celle-ci, totalement dispersée dans l'eau, forme un liquide à seuil. Le poids des grains de sable n'est pas suffisant pour cisailier le liquide néoformé et descendre au fond de la bouteille, par gravité.



**MANIPULATION 89 (SUITE)** : Le mélange sable-kaolinite sédimente dans l'eau (les particules de sable descendent au fond de la bouteille). La smectite mélangée à l'eau forme un liquide à seuil, qui empêche les grains de sable de sédimenter.

## Les fluides rhéofluidifiant

Certains fluides sont fortement rhéofluidifiants, ce qui signifie que l'écoulement devient plus facile lorsqu'on augmente la vitesse de cisaillement. Une boue de montmorillonite (smectite particulièrement gonflante) fait partie de ces fluides. Lorsqu'elle est correctement mélangée à l'eau (à l'aide d'un mixer), elle a un aspect gélatineux. Dans la manipulation qui suit, cette boue est étalée entre deux plaques de verre. Si l'on injecte un liquide moins visqueux entre les deux plaques, il se forme une arborescence fractale au sein du gel. On appelle ce phénomène la digitation.



*Aspect gélatineux d'une boue de montmorillonite*



*Arborescences dues au phénomène de digitation sur une lisseuse*



**MANIPULATION 90** : Un gel de montmorillonite est étalé entre deux plaques de sorte qu'il forme une sorte de crêpe. Un petit trou au centre de la vitre supérieure permet de faire couler un liquide moins visqueux au sein du gel. On assiste alors à la morphogenèse d'un arbre fractal.

La digitation est due au caractère rhéofluidifiant du gel de montmorillonite. Sous la contrainte du nouveau liquide, le gel va s'écouler en certains endroits, où il devient d'autant plus facile à déplacer au fur et à mesure qu'il s'écoule et que les liaisons faibles des particules connectées sont brisées. Le décolllement des deux plaques laisse entrer un nouveau fluide entre les plaques : l'air. On observe à nouveau des figures de digitation, que l'on peut retrouver parfois sur une lisseuse lorsque celle-ci est plongée dans un mortier fin et liquide (photos de gauche).

## Les gels

Certaines argiles ont de telles capacités de rétention d'eau qu'elles forment des gels. Mélangée à l'eau, les particules se dispersent dans tout le volume disponible en formant un réseau au sein duquel les particules sont interconnectées. La figure ci-contre schématise l'état de dispersion en réseau des particules au sein d'un gel. Les propriétés évoquées précédemment (liquide à seuil et fluide rhéofluidifiant) sont liées à ce type de structures : les interactions entre particules s'opposent à l'écoulement. Celui-ci se produit lorsque les connections entre particules sont détruites (par alignement des surfaces dans le sens de l'écoulement par exemple), le gel oppose alors une résistance bien plus faible.

La laponite est une argile synthétique utilisée comme épaississant dans des peintures et des produits de soins personnels. Elle contient des particules discoïdales d'épaisseur 1 nm et de diamètre 25 nm. En présence d'eau, les faces de ces particules s'hydratent en libérant des cations. La densité surfacique de charge est de 0,47 charges par nm<sup>2</sup>. Cette charge est compensée par les cations Na<sup>+</sup> en nombre équivalent. Sa capacité de rétention d'eau est exceptionnelle. Par exemple, l'exposition à une atmosphère très humide (98%) suffit à introduire une quantité d'eau égale à 65% du poids total. Une petite cuillère de laponite en poudre mélangée à l'eau suffit à former un gel.



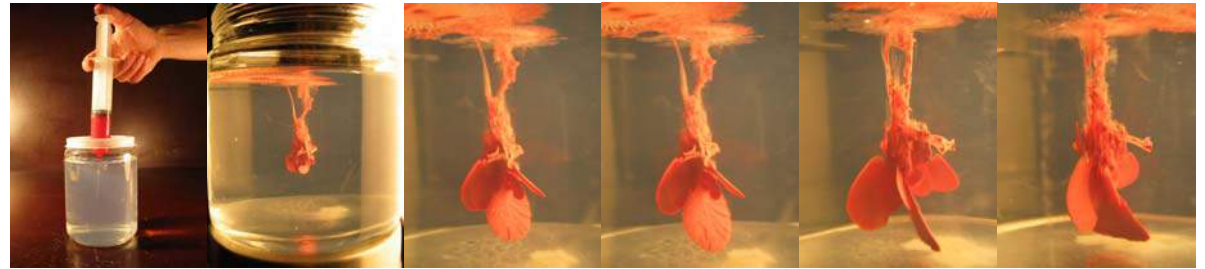
**MANIPULATION 91** : Une cuillère de laponite en poudre mélangée à un litre d'eau et du sel suffit à former un gel : celui-ci est donc constitué de 99% d'eau et 1% d'argile !

Les particules de laponite ont des interactions répulsives entre faces mais attractives entre bord et face, et forment ainsi un réseau de liaisons faibles à travers tout le fluide. Les propriétés des gels peuvent être très étonnantes. Si l'on injecte un liquide faiblement visqueux au sein du gel de laponite, celui-ci se propage dans la matière selon un réseau de plans de cisaillement (manipulation 92).



*Schématisme d'un réseau de particules colloïdales interconnectées dans un gel.*

© Van Damme



**MANIPULATION 92 :** Lorsqu'on injecte un liquide peu visqueux au sein d'un gel de laponite, celui-ci se propage au sein de la matière selon une série de plans de cisaillement. Le gel semble se « casser » comme du verre.

Le gel semble se fracturer comme du verre. L'injection du liquide brise les liaisons faibles entre particules. Encore une fois, on se trouve face à une matière qui n'est ni liquide ni solide. Comme les milieux granulaires secs, elles adoptent un comportement hybride.

En résumé, d'un point de vue chimique, les dispersions sont caractérisées par les échanges et les réactions qui ont lieu entre les surfaces des particules et le milieu liquide qui les disperse. Comme la surface développée est énorme, ces échanges ou réactions sont très efficaces. Cette brève revue suffit à faire comprendre pourquoi les propriétés des dispersions sont originales par rapport à celles des liquides homogènes : elles ne sont pas déterminées principalement par la composition globale, mais plutôt par l'état de division de la matière, c'est-à-dire par l'état d'agrégation des particules, et par leurs interactions. Dans les boues et les gels, il existe un état complètement dispersé, et puis toute une collection d'états plus ou moins agrégés, qui diffèrent par l'extension des réseaux de connections et par l'intensité des liaisons. Une dispersion peut être dans beaucoup d'états différents, on peut facilement la basculer d'un état dans un autre par des actions chimiques ou physiques. Cela permet d'envisager un contrôle efficace des propriétés de la matière par des actions portant sur l'état de dispersion.



**Au terme de ce voyage dans la matière en grains, il est temps de revenir sur les différentes thématiques abordées par le projet.**

**Le fil conducteur principal réside dans la description des mécanismes de cohésion de la terre. Il s'agit de faire apparaître la manière dont cette matière divisée, essentiellement constituée de grains et de particules colloïdales, peut devenir un matériau solide et cohérent à notre échelle, suffisamment résistant pour permettre de construire des édifices de taille imposante. L'eau joue un rôle prépondérant dans la cohésion d'un mur en terre, et il est extrêmement surprenant d'apprendre que cet élément si fluide, dont on sait qu'en trop grande quantité il transforme la terre en boue, soit à l'origine de cette cohésion. L'état d'un matériau granulaire dépend fortement de la proportion de surfaces de contact entre les grains. C'est par l'intermédiaire de ces surfaces de contact que les interactions responsables de la « tenue » d'un mur en terre se mettent en jeu. La notion d'empilement est primordiale puisqu'elle permet de comprendre la meilleure manière d'agencer un ensemble de grains dans l'espace pour maximiser la contiguïté solide-solide. A l'état sec, l'équilibre du milieu granulaire est gouverné par les interactions de contact et de frottement. Celles-ci distribuent les efforts d'une manière toute particulière selon un réseau de chaînes de forces. Elles sont également responsables de la pente régulière du tas de sable. A l'état humide, s'ajoutent les forces capillaires. A mesure que la taille des grains diminue, les ponts capillaires qui les relient exercent des pressions attractives de plus en plus fortes : la cohésion capillaire augmente avec la finesse des grains. On comprend dès lors l'intérêt des grains de très petites dimensions telles que les particules colloïdales et en particulier les argiles, dont la taille microscopique s'accompagne d'une forme plane qui confère à ces minéraux des surfaces spécifiques énormes. Au vu de l'extrême diversité des terres utilisées pour la construction, il est important de souligner que les forces capillaires ne sont certainement les seules. Cependant elles sont toujours présentes et jouent un rôle prépondérant.**

**Le long de ce parcours de découverte, et en complément de ce thème directeur, des liens avec la géologie et la construction sont établis à travers différents phénomènes tels que l'effet volcan et la structuration des paysages en terrain meuble, la ségrégation granulaire, les chaînes de forces, la formation de rides de sable, etc.**

**Cet ensemble d'expériences est principalement axé sur la découverte des grands principes de la physique des grains appliqués à la construction, à la géologie et aux paysages. Pour aller plus loin dans l'exploration de la matière, il semble nécessaire de vulgariser les grands principes d'un autre champs d'étude : la physique des colloïdes. Ceci permettrait d'approfondir la description du matériau terre, et des argiles en particulier, et serait l'occasion de mettre en lumière l'extraordinaire potentialité de ces colloïdes en termes de pluralité d'états de la matière.**

**Il faut aussi aller plus loin dans l'illustration des liens avec la géologie et l'architecture. Cette illustration ne doit pas forcément être basée sur l'utilisation d'expériences contre-intuitives et on peut imaginer d'autres supports de médiation qui viennent compléter l'information contenue dans l'atelier pédagogique.**



## **IV – REFLEXIONS AUTOUR DE NOUVEAUX HORIZONS POUR LE MATERIAU TERRE**

Jusqu'à présent, on identifiait 3 champs d'études scientifiques et techniques principaux du matériau terre. Le premier concerne l'ensemble des recherches axées sur la caractérisation thermophysique du matériau. Les deux autres concernent les disciplines parallèles liées à l'étude des sols, avec d'une part la géologie (la sédimentologie, la pédologie et la minéralogie des argiles) et d'autre part la mécanique des sols.

A ces domaines de savoirs « classiques » du matériau terre, s'ajoutent aujourd'hui de nouvelles disciplines susceptibles de favoriser l'émergence d'une approche fondamentale du matériau dans la lignée de ce qui existe actuellement pour les autres matériaux. En terme de perspectives d'une science des matériaux, deux thèmes unifiés semblent émerger du paysage multiple et hétérogène des matériaux de construction (Scrinever, Van Damme, 2004 [20]). Le premier concerne le verre, l'acier et le ciment, qui requièrent tous une connaissance des phases d'équilibres à haute température et de la formation de la microstructure. Le deuxième place le béton, la terre et le bois ensemble. Les trois sont des matériaux poreux, avec un large éventail de niveaux microstructuraux. Les trois présentent des relations étroites avec l'eau et le gonflement ou le retrait dépendant des conditions hydriques. Les trois bénéficient des recherches et développements actuels dans les champs de la matière granulaire, de la matière colloïdale et des milieux poreux. Cependant, ils ont encore un grand chemin à parcourir avant que leur complexité puisse être modélisée dans une structure conceptuelle aussi élégante que celle des métaux ou des polymères.

Le matériau terre a toujours été considéré à l'échelle macroscopique (mur, brique ou échantillon dont on essaie de connaître les caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques). On s'est rarement intéressé à la relation entre les propriétés mécaniques et physiques des matériaux de structure et leur microstructure définie à différents niveaux d'échelle (méso, micro et nanométrique), ce qui constitue pourtant une démarche classique au niveau de la recherche sur les matériaux. L'essor de la recherche au niveau mondial dans le champ de la physique des grains et la physique des colloïdes justifie une telle démarche pour le matériau terre puisque grâce à elles, les conditions favorables à une recherche fondamentale axée sur une compréhension physique du matériau terre sont réunies. Par ailleurs, les vastes secteurs industriels concernés par la matière en grains et la matière colloïdale placent l'étude du matériau terre dans un champ pleinement interdisciplinaire. Parmi ces secteurs industriels, le béton est certainement le plus proche de tous. On savait depuis longtemps que la terre avait de nombreux points communs avec le béton de ciment, dans la mesure où le terme béton définit un matériau constitué d'un squelette granulaire associé à un liant. Mais l'analogie ne s'arrête pas là, puisque les plus récentes recherches montrent que les hydrates de ciment (la « colle » du béton) présente des analogies étonnantes avec les argiles (la « colle » de la terre) – Van Damme, Pellenq, Delville 1998 [21], Viallis-Terrisse 2000 [23].

## ***1 – L'approche classique***

La recherche sur le matériau terre en tant que matériau de construction comprend essentiellement des études destinées à établir ses caractéristiques thermiques, physiques et mécaniques. Pour la majorité, elles se résument à des tentatives de « chiffrage » de ses performances. Elles accordent généralement peu d'importance à l'évolution de ses performances en fonction des différents paramètres. On entrevoit dans ce qui suit les limites de telles études dans la mesure où les tentatives d'établissement de lois de comportement du matériau sont extrêmement rares. Pour celui qui entreprend une analyse globale des résultats de ces études en vue de rassembler ces ensembles de valeurs en une compréhension unifiée du matériau, la tâche s'avère particulièrement ardue et infructueuse. Il est impossible de répondre à des questions de base. La lacune la plus flagrante concerne certainement l'absence de recherche sur le comportement hydrique du matériau corrélée à l'humidité relative de l'air. Ceci vient du fait que dans ce champ d'étude, on considère le matériau au niveau macroscopique comme un solide continu. Or, la terre entretient des rapports privilégiés avec la vapeur d'eau. On sait aujourd'hui que l'eau piégée dans les argiles est responsable en grande partie de la cohésion du matériau (Gélard 2005 [4]). Les variations de teneur en eau ont une influence sur les propriétés mécaniques, ce qui est également vrai pour les autres propriétés.

Si la littérature scientifique sur la terre comme matériau de construction est relativement restreinte, elle s'est nourrie jusqu'alors des connaissances accumulées dans les disciplines voisines de la science des sols.

En premier lieu la géologie. Grâce à elle, on a aujourd'hui une connaissance relativement bonne de la nature des sols utilisés pour la construction. On connaît très bien les différents minéraux qui les constituent. La minéralogie des argiles nous décrit la structure cristalline de ces particules jusqu'à l'échelle atomique. Ce qui est un atout majeur. A titre indicatif, jusqu'à une époque récente, la recherche sur le béton ne disposait pas d'une information aussi cruciale : la nature cristallochimique des principaux hydrates de ciment responsables de la cohésion du béton était inconnue. La sédimentologie, la pétrologie et la pédologie sont trois disciplines qui placent le sol dans un champ évolutif. Avec elles, on prend conscience que la terre est le produit de transformations qui ont lieu à l'échelle géologique. On découvre ainsi l'origine des minéraux argileux grâce aux descriptions de leurs mécanismes de genèse et de transformation.

Enfin, la mécanique des sols, discipline liée aux sciences de l'ingénieur des travaux publics et du bâtiment, présente un certain nombre d'outils d'identification des sols et d'essais mécaniques destinés à caractériser les propriétés mécaniques de ces matériaux. Elle porte une vision technicienne sur les sols, mais elle a l'avantage de considérer leurs structures à une échelle inférieure par rapport aux études sur les caractéristiques thermophysiques du matériau, en portant l'attention sur sa nature triphasique.

## Caractérisation thermophysique du matériau terre

Le lecteur pourra se référer à la partie « caractérisation thermophysique du matériau terre » de la bibliographie pour consulter la liste des ouvrages concernés par ce chapitre.

Il existe plus de 200 ouvrages de tous types (textes normatifs, publications scientifiques, rapports de thèses, résultats d'essais, etc.) susceptibles de fournir des indications sur les caractéristiques thermiques, physiques et mécaniques du matériau terre. Face à une telle littérature, on pourrait penser avoir affaire à un matériau bien connu et pour lequel il est facile de trouver des informations précises sur tel ou tel type de comportement (résistance mécanique, conductivité thermique, comportement hydrique, etc.). En réalité, il n'en est rien. La majorité de ces documents est relative à la brique de terre comprimée. Vient ensuite l'adobe, puis le pisé, les mortiers, et pour le reste (bauge, torchis, enduits), les sources documentaires sont rares. Un rapide calcul permet de se rendre compte de la disparité de l'information. Divisez ce nombre (200 ouvrages) par deux en considérant que la moitié traite de la brique comprimée ; divisez les 100 restants par le nombre des autres techniques de mise en œuvre (disons 6 en ne comptant que l'adobe, le pisé, les mortiers, la bauge, le torchis, les enduits), redivisez par le nombre de grande famille de propriétés généralement ciblées (mécaniques, thermiques, acoustiques, comportement à l'eau, comportement au feu) et vous comprendrez qu'il est courant de se retrouver avec une liste inférieure à 5 valeurs relatives à une caractéristique d'une technique particulière. Il faut ajouter à ça que seuls les documents fournissant des résultats d'essais comptent. Beaucoup donnent des informations de seconde main.

Or, un chiffre informe peu. Les tests classiques concernant la terre comme matériau de construction restent dans leur ensemble assez sommaires et permettent d'avoir simplement accès à des valeurs qui peuvent être utilisées pour du contrôle, pour comparer les matériaux entre eux et effectuer un classement. Elles ne permettent pas d'appréhender le comportement du matériau et les tests ne peuvent déboucher que sur une connaissance et une compréhension partielle des phénomènes mis en jeu. Au niveau mécanique par exemple, on se contente couramment de caractériser le matériau par une simple valeur de contrainte à la rupture en compression. On peut s'interroger quant à l'utilité de celle-ci : selon le critère choisi (contrainte maximale, déformation maximale), un matériau peut constituer le meilleur choix dans un cas mais pas dans l'autre. Les essais mécaniques servent d'une part à déterminer les caractéristiques intrinsèques du matériau lorsqu'il est soumis à des sollicitations (résistance, déformation élastique, module élastique, ténacité, etc.) et d'autre part à déterminer sa loi de comportement (évolution de la déformation en fonction de la charge appliquée, mode d'endommagement). Il n'existe quasiment pas d'étude du comportement mécanique de la terre.

Au final, on retient deux choses de ces sources documentaires. La première est qu'elles ont le mérite de fournir des ordres de grandeur des caractéristiques thermophysiques du matériau. La deuxième, en examinant les fourchettes de valeurs des résultats d'essais, est que les résultats sont très dispersés. Prenons quelque chose d'aussi simple que la résistance en compression du pisé, qui peut sembler, à priori, bien connue : les résultats d'essai disponibles dans la littérature indiquent comme valeur la plus faible 0,5 MPa et comme valeur la plus forte 5 MPa. Soit un facteur 10 entre les deux ! Pour comprendre les raisons de tels écarts dans la mesure, il est important de se pencher sur toutes les causes de dispersions des résultats.

## 1er facteur de dispersion : les terres

Ce qu'on appelle le matériau terre représente une multitude de matières qui peuvent être très diverses. Il est probable que les mécanismes de cohésion soient sensiblement différents d'une terre à l'autre. On n'a pas un matériau terre mais des matériaux terre. Le mémoire de CEAA de Fadli (Fadli 1995 [197]) illustre très bien cette hétérogénéité de propriétés physiques en fonction des terres considérées. Ses travaux portent sur une série de terres non stabilisées (17 terres différentes) sans ajouts minéraux ou organiques. Des essais comparatifs de retrait, de sensibilité à l'eau et de résistance à l'abrasion ont été réalisés. Systématiquement les résultats sont dispersés, avec en particulier une terre dont les performances « surpassent » de très loin toutes les autres. Par exemple, le test de sensibilité à l'eau comporte un système qui fait tomber une goutte d'eau par seconde d'une hauteur de 2 m. La vitesse de perforation des échantillons (qui se présentent sous la forme de plaques carrées de 9 cm de côté et 2 cm d'épaisseur) est mesurée. Les résultats obtenus vont de 6 minutes à plus de 300 minutes ! De même, le coefficient d'abrasion ( $\text{g/cm}^2$ ) est mesuré à l'aide de l'essai d'abrasion qui consiste en un brossage à l'aide d'une brosse métallique : on mesure la quantité de matériau détaché par brossage rapportée à la surface brossée. Ici les résultats vont de 0 à plus de 2,63  $\text{g/cm}^2$ . Il est vraisemblable que dans d'autres configurations, pour d'autres techniques de mise en œuvre que les enduits et pour d'autres caractéristiques que la sensibilité à l'eau ou la résistance à l'érosion, un large éventail de terres diversifiées présente des comportements sensiblement différents. On attribue généralement ces différences de propriétés d'une part à la granularité de la terre et d'autre part aux types d'argiles qu'elle contient. A titre d'exemple, la terre à pisé du Bas Dauphiné présente une granularité singulièrement différente de la terre à pisé de la Bresse (où la granularité est beaucoup plus fine). Les propriétés des matériaux obtenus, pourtant relativement voisins géographiquement, sont certainement très différentes. D'autres facteurs, plus singuliers, peuvent aussi rentrer en ligne de compte. La présence de certains cations dans la terre ou dans l'eau du mélange (eau ou terre particulièrement riche en magnésium ou en calcium par exemple) a une influence sur la réactivité de certaines argiles. Aucune étude à l'heure actuelle ne permet d'évaluer son importance. Dans certaines zones géographiques il est possible de tomber sur des terres particulières (présence de matériaux volcaniques, roche-mère calcaire, etc.). Il est probable que les caractéristiques soient sensiblement différentes pour de tels sols. Par exemple, Wolde-Mariam 1996 [217] a effectué une étude sur une terre éthiopienne riche en matériau volcanique fin. Les BTC (Briques de Terre Comprimées) obtenues présentent des masses volumiques diminuées de 30% par rapport à la « normale » (environ 1300  $\text{kg/m}^3$  au lieu de 1800-2200  $\text{kg/m}^3$ ). Or, (voir « 6<sup>ème</sup> facteur de dispersion »), la masse volumique est un paramètre auquel toutes les autres caractéristiques sont liées.

## 2<sup>ème</sup> facteur de dispersion : la stabilisation

A la diversité naturelle des terres s'ajoute les différentes techniques de stabilisation à la chaux aérienne, hydraulique, au ciment ou à des dizaines d'autres produits qui augmente considérablement l'éventail de matériaux, d'autant plus que le degré de stabilisation est variable (entre 2 et 8 % massique généralement). Cette stabilisation ne se résume pas à augmenter les caractéristiques mécaniques, elle change du même coup les autres propriétés : on sait que la présence de ciment modifie la conductivité thermique. Ainsi, la stabilisation n'est pas anodine : elle transforme la terre en de nouveaux matériaux aux caractéristiques thermophysiques différentes et aux performances accrues (mécaniques, sensibilité à l'eau, résistance à l'érosion) ou diminuées (thermique, hygrométrie).



### **3<sup>ème</sup> facteur de stabilisation : les ajouts organiques**

Là encore, toutes les fois où de la matière organique est ajoutée, le cas le plus fréquent étant celui de la paille, les propriétés sont modifiées. Les proportions sont là aussi très variables ce qui élargit encore considérablement le champ d'étude. La paille diminue la conductivité thermique en augmentant la proportion d'air dans le matériau et augmente certaines propriétés mécaniques : elle augmente en particulier la résistance à la traction en augmentant les forces de frottement au sein du matériau. On se retrouve ainsi avec une nouvelle gamme de matériaux.

### **4<sup>ème</sup> facteur de dispersion : les techniques de mise en oeuvre**

C'est bien sûr la grande diversité de techniques de mise en oeuvre qui vient en premier lieu à l'esprit pour désigner la pluralité des matériaux à base de terre. La BTC permet d'atteindre des densités plus importantes que les autres techniques. Les résistances mécaniques en sont accrues. Pour les techniques pour lesquelles la mise en oeuvre se fait à l'état plastique (bauge, adobe) ou liquide (mortier, enduit), lors du séchage, la proportion d'eau évaporée est beaucoup plus grande que pour la BTC et le pisé, où la terre est mise en oeuvre à l'état humide. L'eau en s'évaporant laisse sa place à l'air, et la porosité ainsi créée va changer les propriétés du matériau en conséquence (moins bonnes résistances mécaniques, conductivité thermique plus faible, etc.). Dans le cas du pisé, l'épaisseur des couches damées est un élément crucial. La technique de mise en oeuvre implique la réalisation d'un matériau de densité hétérogène dans le sens vertical. Une augmentation de l'épaisseur de couche conduit à une augmentation de cette hétérogénéité et encore une fois à des variations de propriétés locales, donc globales. Par ailleurs, il est possible que la mise en oeuvre à l'état plastique assure une répartition différente des particules les plus fines dans le matériau, avec notamment une meilleure dispersion des agrégats argileux et des organisations plus ou moins isotropes des plaquettes ou feuillets d'argile au niveau de la microstructure (plaquettes plus ou moins orientées face contre face). Encore une fois, cette différence d'organisation des particules au sein de l'édifice granulaire peut être source de différences au niveau des propriétés macroscopiques.

### **5<sup>ème</sup> facteur de dispersion : les essais**

Le protocole expérimental varie d'une étude à l'autre, rendant parfois impossible la comparaison de résultats, étant donné qu'il peut être un facteur de dispersion important. L'essai de compression uniaxiale couramment utilisé pour déterminer la résistance à la compression est un bon exemple de la complexité de la mesure (Fontaine 2004 [3]). Un premier problème qui se pose est celui de la représentativité de l'éprouvette. Dans le cas du pisé, la densité du matériau mis en oeuvre dépend de l'effort de compactage et de la teneur en eau du mélange de terre au moment de la mise en oeuvre. D'autre part, il est difficile d'estimer en quelle mesure du « pisé en éprouvette » est représentatif de la réalité. Pour un échantillon, il semble plus judicieux d'enlever les granulats les plus gros. Ce faisant, on modifie le squelette granulaire du mur d'origine. D'autre part si on ne le fait pas, il est probable que des effets de voûtes ou effets de parois trop importants faussent la mesure. L'épaisseur des couches de l'éprouvette doit être représentative de celle du mur réel. Mais il n'est pas évident que dans un coffrage confiné il suffise de reproduire la même épaisseur de couche pour être représentatif de la réalité. La forme et les dimensions de l'éprouvette peuvent être un facteur très important de dispersion des résultats. Walker a mesuré les résistances à la compression d'une série d'éprouvettes d'élancement variable et de même densité sèche (Walker 1997 [216] – Pk1a 2002 [213]).

Pour la même terre, la résistance est égale à 3 MPa pour un élancement de 2 et elle devient supérieure à 12 MPa pour un élancement de 0,5 ! Pour une autre terre, cette évolution est plus marquée encore. La valeur mesurée peut ainsi être 10 fois supérieure à la valeur réelle pour un élancement de 0,5. Ceci est lié aux forces de frottements à l'interface entre les plateaux de la presse et les faces inférieure et supérieure de l'éprouvette qui « maintiennent » le matériau à ces endroits et l'empêche de se déformer (apparition d'un « effet tonneau »). Pour annuler ces forces de frottement, il est nécessaire d'appliquer un système anti-fretage. Inversement, des élancements trop importants peuvent provoquer du flambement et donner des valeurs de résistance plus faible que les valeurs réelles. D'autre part les variations de contraintes sont plus importantes pour une éprouvette cubique que pour une éprouvette cylindrique. Lorsque les faces de l'éprouvette ne sont pas parfaitement parallèles aux plateaux de la presse, une flexion parasite apparaît. Certains essais sont ainsi réalisés avec un dispositif particulier intercalé entre l'éprouvette et le plateau supérieur qui permet à la pièce d'appui de s'orienter correctement sur l'éprouvette au moment de la mise en charge. Enfin, le délai de séchage est variable d'une étude à l'autre. Il n'y a pas de règles fixes pour ce délai : il faut attendre que l'éprouvette est atteint son équilibre hydrique. Or beaucoup d'essais adoptent un délai de séchage de 28 jours, prenant modèle sur le béton, dont on pense qu'il atteint sa résistance maximale au terme de cette durée. Pour la terre rien n'est plus faux. Ce délai est variable et dépend fortement des conditions hygrométriques de cure de l'éprouvette, du stabilisant utilisé et bon nombre d'autres facteurs.

### **5<sup>ème</sup> facteur de dispersion : la teneur en eau**

La teneur en eau est essentielle. Une brique de terre sèche contient toujours de l'eau. Cette proportion d'eau est variable et dépend des conditions hygrométriques extérieures. On ne peut pas considérer le matériau sans le rattacher à son environnement. En permanence, il se produit des échanges entre celui-ci et l'air ambiant. Le matériau terre change à chaque instant, si bien qu'on n'a pas un matériau avec des caractéristiques mécaniques et thermiques figées mais une succession d'états de la matière qui se succèdent au fil du temps et des conditions climatiques et qui correspondent à des caractéristiques thermophysiques bien définies. La terre est en équilibre hydrique avec son environnement. Il ne faut pas entendre par là que le système est stable, au contraire : il change quand son environnement change. C'est ce qui fait une des difficultés majeures de la caractérisation précise du matériau terre. A des variations d'humidité relative de l'air, correspondent des variations de la teneur en eau du matériau. Or, il est probable que de faibles variations de teneur en eau suffisent à modifier les propriétés mécaniques et thermiques du matériau de manière sensible. Si on envisage cette nature changeante du matériau terre lorsque celui-ci se trouve à l'équilibre hydrique, on comprend mieux encore l'envergne de la dispersion des mesures alors que beaucoup d'auteurs font souvent abstraction du contexte hydrique dans lequel les essais ont été réalisés et du temps de séchage permettant au matériau d'atteindre cet équilibre hydrique.

### **6<sup>ème</sup> facteur de dispersion : la masse volumique**

La masse volumique est un facteur auquel toutes les autres propriétés physiques et thermiques du matériau sont liées. Pour les matériaux en terre en général, lorsque la masse volumique augmente : l'isolation phonique augmente, l'inertie thermique augmente, la conductivité thermique augmente, la résistance mécanique augmente et la capacité de rétention d'eau diminue.

En résumé, si effectivement on dispose d'un grand nombre d'études réalisées en vue de caractériser les propriétés physiques, thermiques et mécaniques du matériau, peu sont ciblées. Elles ne fournissent que des informations disparates et lacunaires, cette disparité étant liée d'une part à la grande quantité de caractéristiques recherchées et d'autre part à tous les facteurs de dispersions évoqués ci-dessus. Au final, si l'on s'intéresse à une caractéristique bien précise d'un type de mise en œuvre donné, on se rend compte que l'information récoltée est faible à la fois quantitativement et qualitativement. D'autre part on dispose de très peu d'études approfondies qui établissent des lois de comportement du matériau. Au final, cet ensemble de données se révèlent d'une utilité limitée dans la mesure où le recoupement des informations est souvent rendu difficile voire impossible en vue d'établir une description globale et cohérente du matériau.

## La géologie

Parmi les nombreuses disciplines de la géologie, 3 d'entre elles constituent des sources d'informations pour le matériau terre. Il s'agit de la pédologie, de la sédimentologie et de la minéralogie (celle des argiles plus particulièrement). Ne seront pas repris ici les grands processus sédimentaires, à savoir l'altération, le transport, le dépôt et la diagenèse qui sont déjà décrits dans la partie III.2.

A titre anecdotique cependant, il est intéressant de rajouter que les minéraux argileux se transforment au cours de la diagenèse en d'autres minéraux argileux. La transformation de la smectite en illite est un des processus diagenétique les plus communs des bassins sédimentaires du monde entier. Au fur et à mesure de l'enfouissement des sédiments, la chaleur et la pression augmentant, la smectite (argile gonflante) se transforme en illite (argile non-gonflante). La réaction progressant, l'empilement devient ordonné et le taux d'illite augmente. La réaction Smectite-Illite (réaction S-I) est fréquemment utilisée comme « géothermomètre », permettant de reconstruire l'histoire thermique et tectonique des bassins sédimentaires. L'importance de telles séquences s'étend à l'industrie du pétrole, en donnant des indications sur la pression de l'eau contenue dans les pores, la migration des fluides et l'ensemble de l'évolution chimique du bassin sédimentaire. Pendant les 20 dernières années, les chercheurs ont abondamment étudié la réaction S-I considérant son origine comme totalement physico-chimique. En 2004, une équipe de chercheurs a prouvé que cette réaction pouvait être provoquée par des bactéries (du moins dans des conditions de laboratoire). Normalement, en l'absence de bactéries, la réaction a lieu entre 300 et 350°C sur une période de plusieurs mois. Mais les chercheurs<sup>1</sup> ont découvert que la bactérie « *Shewanella oneidensis* » peut transformer les smectites en illites à température ambiante en quelques semaines. Ils étudiaient le rôle de ces microbes dans la réduction du fer des argiles dans des buts de biorémediation (dépollution des sols). Pendant leurs expérimentations, ils ont assisté à la formation d'un nouveau minéral : un minéral biogène, fabriqué par le vivant ! Après avoir identifier le minéral argileux, ils ont pu conclure que ce minéral était de l'illite et que les bactéries catalysaient la réaction S-I. Cette découverte est indicative du recoupement croissant entre les disciplines de la biologie et de la géologie.

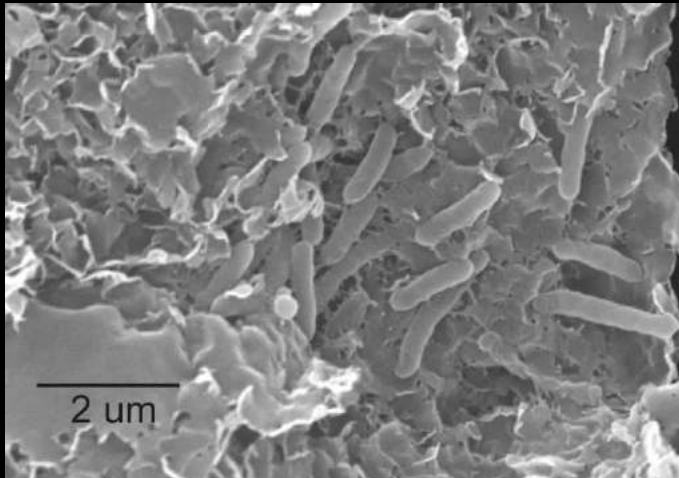


Image MET de cellules de *Shewanella* fixées sur une smectite pour la réduction du fer.

© Dong, [www.biogeosciences.org](http://www.biogeosciences.org)

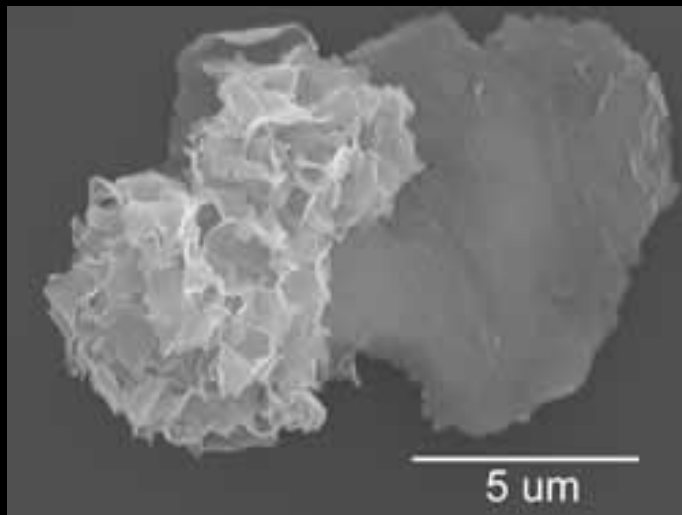


Image de la transformation par les *Shewanella* d'un feuillet de smectite (grande feuille sombre sur la droite) en illite biogène.

© Dong, [www.biogeosciences.org](http://www.biogeosciences.org)

<sup>1</sup> Kim, J., Dong, H., Seabaugh, J., Newell, S., and Eberl, D., 2004, Role of Microbes in the Smectite-to-Illite Reaction: Science, v. 303, p. 830-832

## La pédologie

Soltner 1978 [10] – Beauchamp 2003 [226]

La pédologie (du grec *pedon*, sol) est l'étude des sols, de leur formation et de leur évolution. La science des sols prit son essor au XVI<sup>e</sup> siècle avec Bernard Palissy et Olivier de Serres, se développa au XVIII<sup>e</sup>, mais devint un sujet d'étude privilégié au XIX<sup>e</sup> siècle, en particulier avec les travaux du Russe Vassili Dochouchaev. Cette discipline est connue sous plusieurs noms : la science des sols, l'édaphologie ou l'agrologie. La diversité des noms associés à cette discipline est liée aux divers corps de métiers concernés. Les agronomes, les chimistes, les géologues, les géographes, les biologistes, les sylviculteurs, les spécialistes de l'aménagement du territoire ont tous contribué à faire avancer les connaissances en matière de sols et de formation des sols. Le sol ne constitue pas un support inerte et stable, mais est au contraire le siège d'interactions entre le climat, les êtres vivants (micro-organismes, végétaux, animaux) et le matériau minéral de la roche mère. Les utilisateurs du sol (tels que les agronomes) se sont, dans un premier temps, peu préoccupés de l'aspect dynamique du sol. Ils voyaient avant tout un milieu stable dont les propriétés chimiques, physiques et biologiques étaient définies une fois pour toutes. De leur côté, les pédologues et les géologues se sont initialement peu préoccupés des applications agronomiques du sol. Aujourd'hui, on observe une réunification des deux disciplines, sciences du sol (à vue statique) et pédologie (à vue dynamique). Les pédologues s'intéressent aujourd'hui davantage aux intérêts pratiques d'une bonne connaissance de la pédogenèse, science de l'évolution des sols, tandis que les agronomes comprennent que le sol cultivé est un milieu en équilibre, résultant souvent de plusieurs milliers d'années d'évolution. Cet équilibre est fragile et seule une connaissance approfondie de son histoire permet de le mettre en valeur de façon durable.

Ainsi la pédologie comporte deux divisions fondamentales :

- l'une liée à l'aspect statique de la science des sols : en particulier l'étude des constituants des sols, lesquels peuvent être minéraux ou organiques. Leur évolution est liée, et les complexes formés permettent d'interpréter les grands types de pédogenèse et de définir les principales propriétés physiques et chimiques des sols.
- l'autre liée à l'aspect dynamique : la pédogenèse définit les processus physico-chimiques de la formation des sols et sert de base à la classification génétique des sols.

### Le profil pédologique

Un sol est une pellicule d'altération recouvrant une roche. Il est formé d'une fraction minérale et de matière organique (humus). Il prend naissance à partir de la roche puis il évolue sous l'action des facteurs du milieu, essentiellement le climat et la végétation. Le sol apparaît, s'approfondit et se différencie en strates superposées appelées les horizons pédologiques, qui forment le profil pédologique. Il atteint finalement un état d'équilibre avec la végétation et le climat. Classiquement, les principaux horizons sont :

- Horizon A: horizon de surface à matière organique (débris de végétaux)
- Horizon C: roche peu altérée
- Horizons B: horizons intermédiaires apparaissant dans les sols évolués.

Les sols peu évolués ont un profil AC, les sols évolués ont un profil ABC. Les horizons B sont formés par l'altération de la roche ou par les mouvements de matière depuis A. En climat tempéré il faut 1000 ans pour former un horizon A et plusieurs milliers d'années pour un horizon B.

### Désagrégation et altération des roches

La destruction des roches se fait par désagrégation mécanique qui donne des fragments et par altération chimique qui produit le complexe d'altération. L'altération demande de l'eau et une température suffisante. Elle est moyenne en climat tempéré, elle est maximale sous climat équatorial. Les réactions sont des hydrolyses, accessoirement des oxydations, des hydratations, des décarbonatations pour les roches calcaires. Les éléments solubles sont lessivés en partie, parfois en totalité sous les climats très agressifs. Les parties insolubles restent sur place telles quelles ou se recombinaient avec les ions disponibles. Des composés intermédiaires mal cristallisés (gels), des tronçons de chaînes silicatées et des ions en solution se recombinaient en minéraux de néoformation, principalement des argiles. Les organismes peuvent intervenir à tous les stades de ce processus. Les minéraux argileux rencontrés dans un sol dépendent du type de sol et de la profondeur. L'illite est le minéral le plus abondant en climat tempéré (50 % environ), suivi de la chlorite, des smectites et de la vermiculite ; la kaolinite est plus rare. Au cours de l'évolution du sol, l'illite et la chlorite, minéraux hérités de la roche, peuvent se transformer en vermiculite et smectite.

### Paramètres contrôlant l'altération

#### Le climat

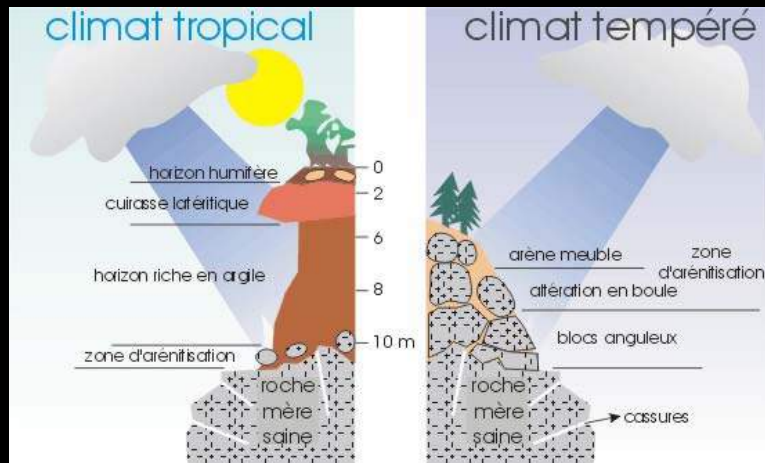
Le climat est probablement le facteur le plus important dans le contrôle de l'altération chimique. Si l'on considère l'aspect cinétique des réactions chimiques, il est clair qu'une température élevée va les favoriser. L'humidité est également importante, puisque beaucoup de réactions se passent en milieu aqueux.

En climat chaud et humide, l'hydrolyse est totale, elle se fait à pH neutre. Les silicates sont hydrolysés en gibbsite, l'acide silicique et les cations solubles sont lessivés, il reste sur place le fer et l'aluminium qui constituent un sol ferrallitique ou latéritique. Les oxydes de fer peuvent se concentrer en surface et constituer une croûte ferrugineuse, la croûte latéritique. La matière organique, oxydée, intervient peu. Les minéraux néo-formés à partir des ions libérés sont de la kaolinite ou des smectites selon la qualité du drainage. Les lessivages, en éliminant les cations, augmente l'acidité du sol.

En climat chaud et à saisons sèches et humides alternant, le lessivage et le confinement se succèdent, les solutions remontent à la surface en saison sèche, la matière organique est minéralisée rapidement et a peu d'action, des smectites se forment, la silice reste sur place. Le sol contient l'association Fe, Si et Al : c'est le sol fersialitique des pays tropicaux et méditerranéens.

En climat tempéré, les hydrolyses sont partielles. Les minéraux argileux sont hérités de la roche-mère (chlorites par exemple) ou transformés progressivement. Lorsque l'hydrolyse est neutre, comme sur roches calcaires, l'illite est dégradée en smectites ( $K^+$  remplacée par  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ). Pour une hydrolyse à pH acide, sous l'action des acides organiques (oxalique, citrique), l'illite est transformée plutôt en vermiculite par perte de  $K^+$  et ouverture des feuilletés. La transformation en chlorite est également possible. Des complexes organo-métalliques se forment par complexolyse.

Sous climat froid et humide, milieu de formation des podzols, les acides organiques attaquent les illites et vermiculites et les dégradent en smectites. La kaolinite peut être néoformée.



*En climat tempéré, l'altération est surtout mécanique. L'altération chimique est faible et consiste surtout dans le départ de cations très solubles comme  $Na^+$  et  $Ca^{2+}$  des minéraux les moins stables. En climat tropical, l'altération est surtout chimique. L'eau abondante et chaude provoque une mise en solution de la plupart des minéraux, avec reprécipitation des ions Fe, Al, Si sur place (cuirasse). L'horizon riche en argile résulte de processus de néoformation à partir des minéraux de la roche mère et à partir des ions venant des horizons supérieurs.*

© Boulvain 2004 [227]

CLIMAT	VEGETATION et SOL	ORIGINE des ARGILES	MINERAUX FREQUENTS
Glaciaire	toundra	héritage	illite chlorite
Boréal Tempéré	Taiga et Forêt Podzol, Sols Bruns	transformation héritage	vermiculite, interstratifiés, illite, chlorite, smectites
Méditerranéen Subtropical	Steppes, savane FerSiAlitique	transformation néoformation héritage	smectites
Désertique	néant	héritage	illite, chlorite
Equatorial	Forêt Ferralitique	néoformation	gibbsite, kaolinite

*Occurrence des minéraux argileux dans le sol en fonction du climat. © Beauchamp 2003 [226]*

#### La topographie

La topographie a également un rôle important sur la qualité du drainage. Le relief contrôle la pente des réseaux fluviaux et la rapidité des courants, donc l'intensité de l'évacuation des ions. Si les ions mis en solution ne sont pas évacués, un équilibre chimique sera atteint et les réactions d'altération vont s'arrêter. Sur une pente, où le drainage et le lessivage sont bons, la formation de kaolinite est favorisée. Dans une cuvette, milieu confiné où se concentrent les solutions, se forment plutôt des smectites.

#### La nature de la roche-mère

La nature de la roche-mère intervient sur les caractères de la fraction minérale. En climat équatorial, l'altération d'une roche acide, comme le granite, donne de la kaolinite, alors que les roches basiques, plus riches en cations, donnent de préférence des smectites. Sur roches calcaires, se forme un type de sol particulier, les « rendzines ».

L'acidité-alcalinité et le degré d'oxydo-réduction des eaux sont également des paramètres importants contrôlant l'altération chimique. L'eau pluviale est légèrement acide, tout comme les sols. Ce sont donc deux environnements où dissolution et hydrolyse vont jouer un rôle dominant. Par contre, l'eau de mer est légèrement basique : peu de réactions d'hydrolyse ont donc lieu en milieu sous-marin. On observe aussi que la plupart des environnements en contact avec l'atmosphère sont oxydants. Des conditions réductrices ne sont observées que dans des milieux isolés de l'atmosphère ou des milieux dont tout l'oxygène est consommé.

### Argiles héritées, transformées ou néoformées

Rautureau, Caillère, Hénin 2004 [145]

Selon le climat, l'origine des minéraux est variable. On parle d'héritage pour des argiles provenant de la roche-mère, de transformation pour des argiles provenant d'autres minéraux argileux et de néoformation lorsqu'elles sont formées à partir des ions transportés par l'eau du sol.

#### Héritage

C'est l'apport de minéraux argileux formés ailleurs sur le continent et transportés soit par l'eau (ruissellement ou cours d'eau) soit par le vent. Au cours du transport, les argiles déjà formées ne subissent que de faibles modifications de structure et de composition. En général, elles arrivent dans la mer ou dans les bassins lacustres. Ces sédiments argileux hérités reflètent souvent le climat des régions continentales où ils se sont formés.

#### Néoformations en milieux confinés

Les minéraux argileux sont dans ce cas formés par précipitation d'ions en solution : silicium, aluminium, potassium, susceptibles de réagir entre eux quand ils sont mis en contact par diffusion ou mélange. Les composés ainsi formés sont stables dans les conditions physicochimiques du milieu où ils ont pris naissance.

#### Transformations des minéraux argileux

Les minéraux néoformés ou hérités peuvent évoluer pour prendre un nouveau statut en équilibre avec le nouveau milieu. On distingue les transformations par dégradation (soustraction d'ions) et par aggradation (par fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que de la diagénèse. La kaolinite peut ainsi se transformer en chlorite et les smectites en illites.



## Minéralogie des argiles

Rautureau, Caillère, Hénin 2004 [146] - Meunier 2003 [145] – Bouchet, Meunier, Sardini 2000 [141]

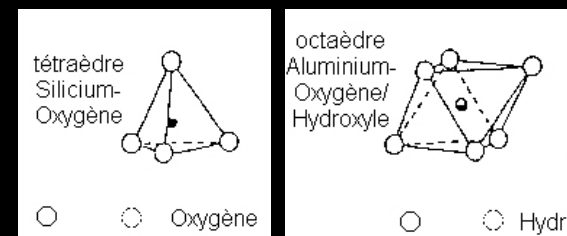
Les argiles sont des microparticules à faciès lamellaire. Ce sont des phyllosilicates hydratés. Elles présentent une structure cristalline qui a une particularité originale : leur structure à quelque échelle d'observation que ce soit est organisée en plans successifs. Elles sont essentiellement constituées d'oxygènes, de silicium et d'aluminium. Il est fréquent de rencontrer dans leur structure atomique d'autres éléments tels que le fer, le magnésium, le calcium, le sodium et le potassium. Le tableau ci-dessous rappelle la proportion de ces différents éléments dans la croûte terrestre.

élément	masse (%)	atome (%)	rayon (Å°)	volume (%)
O	46.60	62.55	1.40	93.77
Si	27.72	21.22	0.42	0.86
Al	8.13	6.47	0.51	0.47
Fe	5.00	1.92	0.74	0.43
Mg	2.09	1.84	0.66	0.29
Ca	3.63	1.94	0.99	1.03
Na	2.83	2.64	0.97	1.32
K	2.59	1.42	1.33	1.83

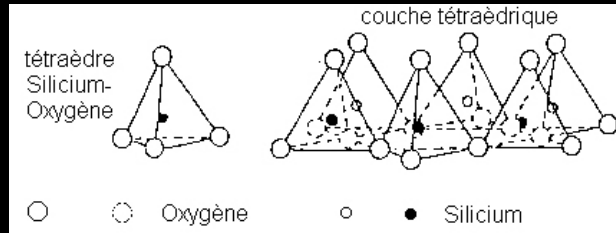
*Éléments chimiques les plus communs dans l'écorce terrestre © Mason, 1966*

### Le tétraèdre et l'octaèdre

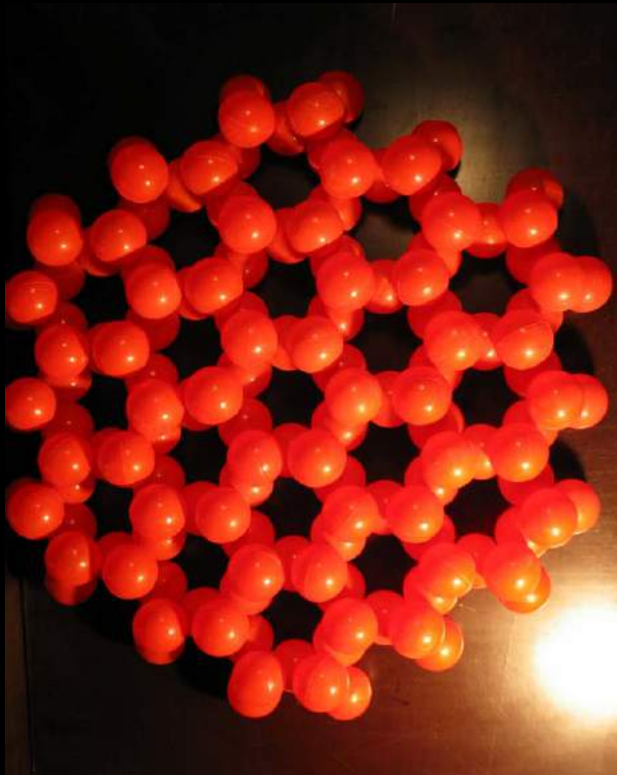
Les particules d'argile présentent une structure en feuillets. Ces feuillets sont constitués par l'empilement de 3 ou 4 plans d'oxygènes. Entre ces oxygènes se trouvent des « vides », appelés sites, dans lesquels viennent se loger les autres éléments. Ainsi l'empilement d'un oxygène sur une base de trois oxygènes forme un site tétraédrique (schéma de droite). L'empilement de trois oxygènes sur trois autres oxygènes forme un site octaédrique. On définit la structure cristalline des feuillets en fonction de ces sites. 2 plans d'oxygènes peuvent s'empiler de manière à former des sites tétraédriques : on parle de couche tétraédrique. Ils peuvent aussi s'empiler de manière à former des sites octaédriques : c'est la couche octaédrique. Pour comprendre la structure cristalline, la première étape consiste donc à comprendre l'empilement géométrique des oxygènes qui constituent la charpente d'un feuillet. Celui-ci est généralement constitué par superposition d'une ou deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique.



*Un feuillet d'argile est souvent décrit comme un assemblage selon des structures planes de tétraèdres et d'octaèdres d'oxygènes (et d'hydroxyles) au sein desquels viennent se placer d'autres éléments (silicium et aluminium généralement) © Beauchamp*



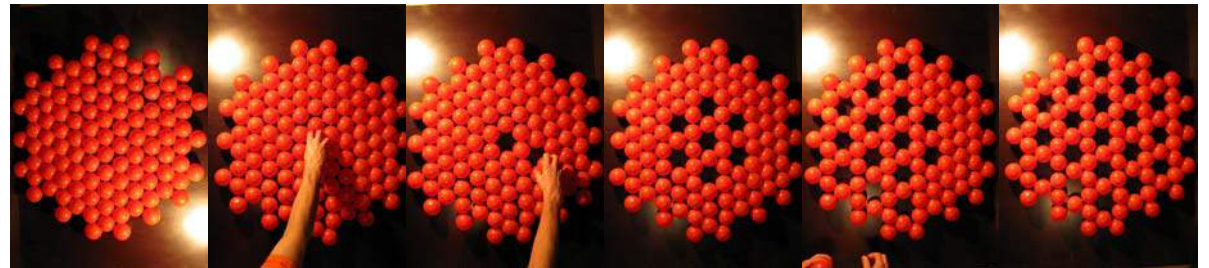
*La couche tétraédrique est constituée d'un assemblage plan de tétraèdres d'oxygènes au sein desquels se placent des cations silicium (généralement) © Beauchamp*



*Vue de dessus de la couche tétraédrique*

### La couche tétraédrique

Sur les images ci-dessous, on peut observer comment les oxygènes (représentés par des boules rouges) sont empilés dans une couche tétraédrique. A partir d'un plan d'oxygène compact (il faut imaginer que cette structure s'étend sur des dimensions latérales environ 500 fois supérieures à celles qui sont représentées ici) et en enlevant des atomes à intervalles réguliers, on obtient un plan d'atomes dans lequel apparaissent des vides de telle sorte que les oxygènes restant sont liés entre eux en formant des hexagones. Sur le plan obtenu, le centre des atomes forme un réseau de triangles équilatéraux reliés entre eux par leurs sommets. Ces triangles constituent la base des tétraèdres : ce plan d'atome, caractérisé par la présence de lacunes qui jouent un rôle important dans l'empilement des feuillets (chez les illites par exemple), est appelé le « plan basal »



Du plan hexagonal compact au « plan basal » : dans le plan obtenu, le centre des oxygènes forment des triangles équilatéraux reliés entre eux par leurs sommets. Ces triangles constituent la base des tétraèdres.

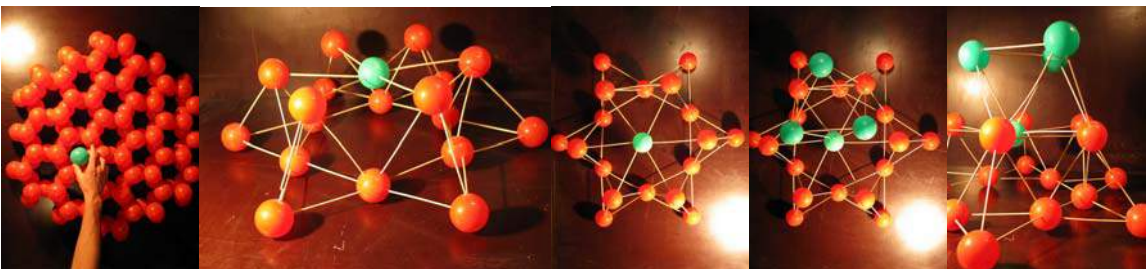
Pour former les tétraèdres, il ne reste plus qu'à placer les sommets sur ces bases triangulaires. On obtient ainsi la couche tétraédrique. C'est au coeur de ces tétraèdres (sites tétraédriques) que se placent le plus souvent les cations de silicium dont la taille correspond à l'interstice formé par l'empilement de 4 atomes d'oxygènes.



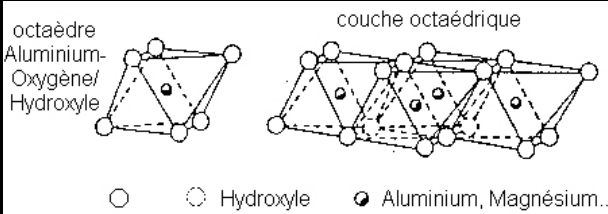
En plaçant les sommets sur ces bases triangulaires, on forme les tétraèdres. L'ensemble constitue la couche tétraédrique.

La couche octaédrique

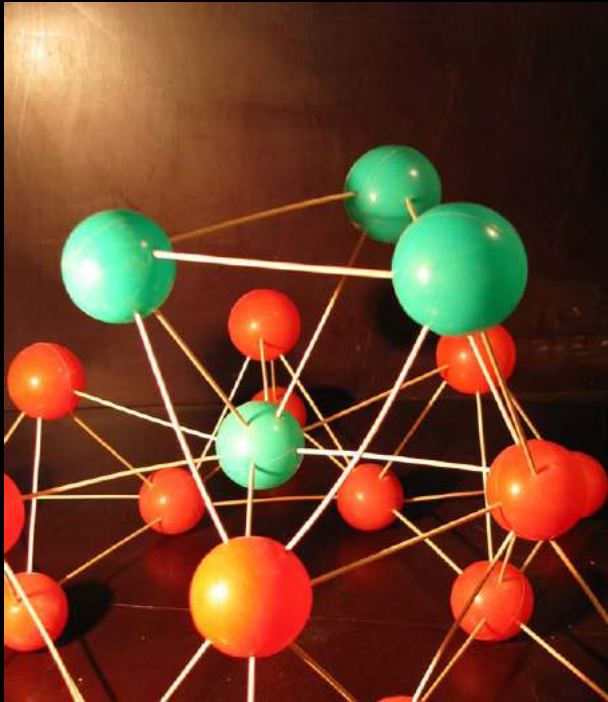
La couche octaédrique vient se placer sur les sommets de ces tétraèdres, de telle sorte que ces sommets appartiennent à la fois à la couche tétraédrique et à la couche octaédrique. Par contre certains atomes du plan commun de la couche octaédrique et tétraédrique n'appartiennent pas à la couche tétraédrique : ces oxygènes sont alors associés à un atome d'hydrogène et forment des hydroxyles (OH). Ceux-ci viennent se placer au centre des sommets des tétraèdres, comme ceci est représenté sur l'image ci-dessous à gauche (boule verte). Sur l'image suivante la structure a été dilatée pour faire apparaître les tétraèdres. En vert figure l'hydroxyle de la couche octaédrique. Ces atomes avec les sommets des tétraèdres forment un plan compact dont les centres des atomes sont plus éloignés que ceux du plan de base de la couche tétraédrique. On forme les octaèdres en superposant un troisième plan compact d'atomes au-dessus des deux premiers plans. Sur les images suivantes, un seul octaèdre a été représenté en ajoutant 3 boules vertes au niveau du troisième plan : l'octaèdre est formé de 4 boules vertes (dont une qui appartient au deuxième plan) et de 2 boules rouges (2 sommets des tétraèdres). C'est au cœur de ces octaèdres (sites octaédriques) que viennent se placer généralement des cations aluminium ( $Al^{3+}$ ).



La couche octaédrique s'associe à la couche tétraédrique de telle sorte que les sommets des tétraèdres appartiennent aux deux couches à la fois. Sur la photo de gauche, on voit comment les hydroxyles (OH) qui n'appartiennent qu'à la couche octaédrique, se placent entre les sommets des tétraèdres pour former un plan compact. La couche octaédrique est formée par superposition sur ce plan compact d'un autre plan compact. Sur les photos de droites, seuls trois atomes de ce plan compact sont représentés. Disposés en triangle, ils forment un octaèdre avec les 3 qui sont situés dessous.



*La couche octaédrique est constituée d'un assemblage plan d'octaèdres d'oxygènes et d'hydroxyles au sein desquels se placent généralement des cations aluminium, de magnésium ou de fer © Beauchamp*



*Sur cette image, l'octaèdre est constitué des 4 boules vertes et des deux boules rouges situées au premier plan*

**Feuillets de type 1 : 1 et feuillets de type 2 : 1**

En empilant une couche tétraédrique et une couche octaédrique, on obtient « un feuillet 1 : 1 » : la kaolinite (argile du potier) est constituée de feuillets de type 1 : 1 par exemple. Lorsqu'une couche octaédrique est prise en sandwich entre deux couches tétraédriques, on obtient « un feuillet 2 : 1 », comme dans le cas des smectites, des illites et des chlorites. Dans les feuillets 2 : 1, les sommets des tétraèdres sont dirigés vers l'intérieur, de sorte que les deux faces externes du feuillet sont constituées de plans d'atome parsemés de « trous » (les plans basaux).

**Argiles dioctaédriques et trioctaédriques**

Lorsque le cation aluminium  $\text{Al}^{3+}$  occupe les sites octaédriques, il n'en occupe que deux sur trois, afin d'assurer l'électroneutralité du feuillet. Il arrive aussi que ces sites soient occupés par des cations bivalent (à deux charges positives) de magnésium  $\text{Mg}^{2+}$  ou de fer  $\text{Fe}^{2+}$  par exemple. Dans ce cas la neutralité est assurée par le fait que tous les sites octaédriques sont remplis. Dans le premier cas, on parle d'argile dioctaédrique (2 sites sur 3 sont occupés) et dans le second d'argile trioctaédrique (3 sites sur 3 sont occupés).

**Défauts, charges surfaciques et cations interfoliaires**

Van Damme 2001 [11]

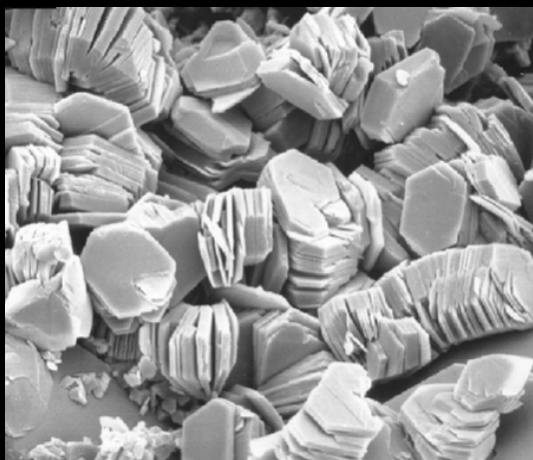
Cette neutralité idéale décrite jusqu'à présent ne correspond pas toujours à la réalité. Il arrive fréquemment que des défauts dans la structure cristalline des feuillets contribuent à un déficit de charges surfaciques. Ces défauts sont des substitutions de cations à forte charge positive par des cations à charge positive plus faible : par exemple des cations  $\text{Si}^{4+}$  des sites tétraédriques sont remplacés par des cations  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  de sites octaédrique est remplacé par  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  octaédrique est remplacé par  $\text{Li}^+$ , etc. Les feuillets sont alors chargés négativement. Cette charge négative attire des espèces à charges positives qui vont se placer entre les feuillets afin de préserver l'électroneutralité. Ces espèces interfoliaires peuvent être des cations anhydres ( $\text{K}^+$ ), des cations hydratés ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et parfois même une couche octaédrique continue, comme dans le cas des chlorites.

La classification des argiles dépend ainsi de trois paramètres : le **type de feuillet**, sa **charge** et la **nature des espèces interfoliaires**.

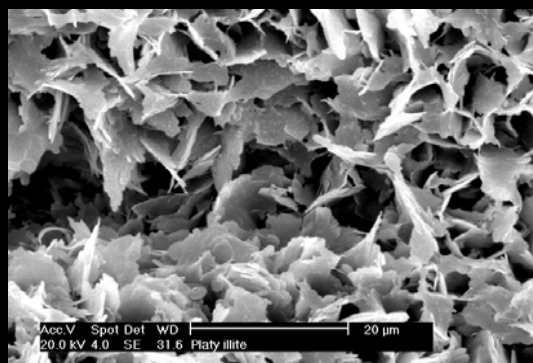
Structure cristallochimique des principales argiles rencontrées dans les sols

Van Damme 2001 [11]

La kaolinite est une argile formée de feuillets de type 1 : 1, résultant de l'association d'une couche tétraédrique avec une couche octaédrique. Il n'y a pas de substitution dans les couches et le feuillet ainsi formé est électriquement neutre. Les feuillets s'empilent de manière régulière et sont liés les uns aux autres par des liaisons hydrogènes et des forces de Van der Waals. La distance entre deux feuillets est de 7 Å et il n'y a pas d'espèces interfoliaires. L'empilement des feuillets conduit à la formation de cristaux à forme plaquettaire dont l'épaisseur est de quelques dizaines de nanomètres pour des dimensions latérales de l'ordre du micron. L'eau ne peut pénétrer entre les feuillets ce qui conduit à une surface spécifique assez faible par rapport aux autres argiles : de l'ordre de 10 à 20 m<sup>2</sup>/g. La kaolinite se forme dans les sols bien drainés par pH acide surtout en climat tropical et subtropical.

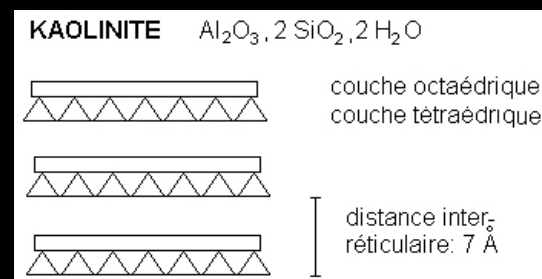


Kaolinite © Ralph, Kugler

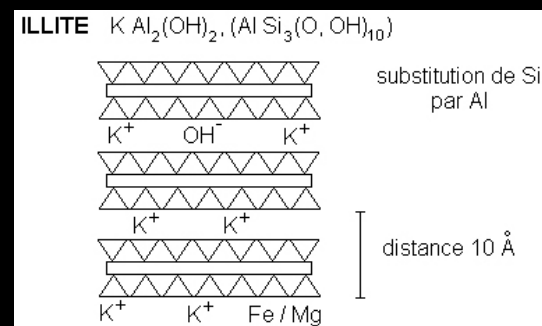


Illites © The Mineralogical Society  
www.minersoc.org/pages/gallery/claypix/

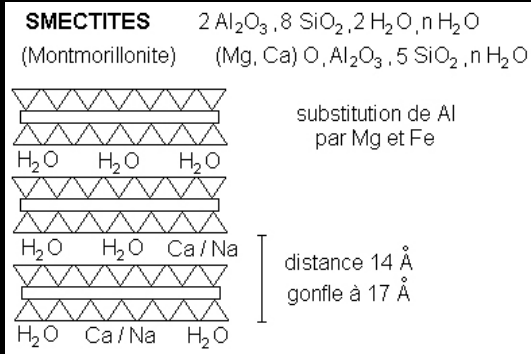
Les illites ont des feuillets de type 2 : 1. Des substitutions de Si<sup>4+</sup> de la couche tétraédrique par des Al<sup>3+</sup> créent un déficit de charge très élevé (de l'ordre de 1,6 charge par maille). Ce déséquilibre de charges est compensé par des cations potassium K<sup>+</sup> qui s'imbriquent étroitement dans les lacunes des plans extérieurs (les plans de bases des tétraèdres). Les feuillets sont ainsi fortement et étroitement liés par cette sorte d'assemblage « tenon-mortaise ». La distance interfoliaire est de 10 Å. Comme pour les kaolins l'empilement des feuillets forme des plaquettes et l'eau ne peut pas pénétrer entre les feuillets. Cependant la faible taille des plaquettes leur confère une surface spécifique plus élevée (de l'ordre de 150m<sup>2</sup>/g). L'illite est le minéral le plus abondant en climat tempéré (50% environ).



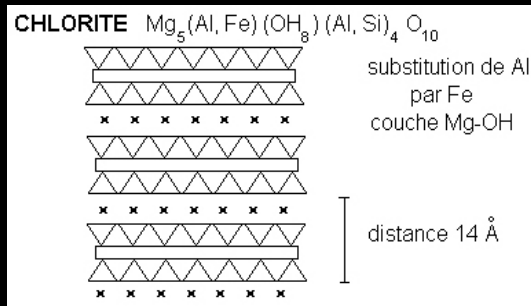
La kaolinite est une argile formée de feuillets de type 1 : 1, résultant de l'association d'une couche tétraédrique avec une couche octaédrique. Les feuillets, neutres, n'attirent pas d'espèces interfoliaires © Beauchamp



Les illites ont des feuillets de type 2 : 1. Les feuillets sont fortement chargés et attirent des cations potassiums K<sup>+</sup> qui s'imbriquent étroitement dans les lacunes des plans basaux : les feuillets sont ainsi fortement et étroitement liés par cette sorte d'assemblage « tenon-mortaise ». © Beauchamp



Les feuillets des smectites, de type 2 : 1, présentent un déficit de charges surfaciques plus faibles que les illites (de l'ordre de 0,7 charge par maille). Ce déficit est compensé par des cations interfoliaires plus mobiles que les cations potassium  $\text{K}^+$  des illites, grâce auxquels l'eau peut facilement pénétrer entre les feuillets © Beauchamp

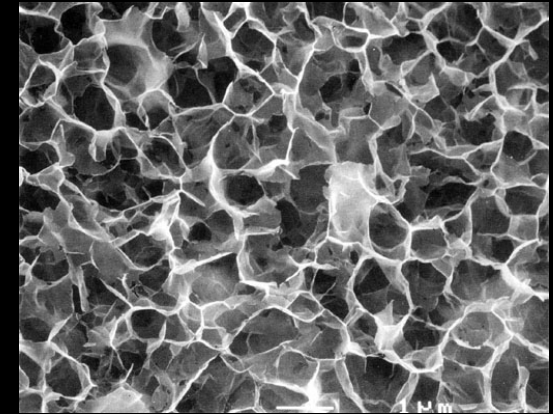


Les chlorites ont des feuillets 2 : 1. Le déficit de charge surfacique des feuillets est compensé par une couche octaédrique © Beauchamp

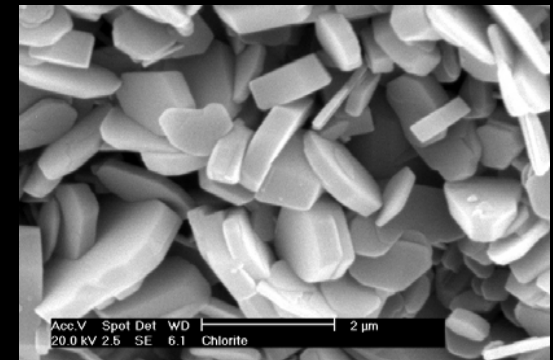
Les smectites ont des feuillets de type 2 : 1. Les substitutions des cations tétraédriques ou octaédriques sont importantes mais elles présentent un déficit de charges surfaciques plus faibles que les illites (de l'ordre de 0,7 charge par maille). Ce déficit est compensé par des cations interfoliaires plus mobiles que les cations potassium  $\text{K}^+$  des illites. Ces cations sont le plus souvent des ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  (smectite calcique), des ions magnésium  $\text{Mg}^{2+}$  ou sodium  $\text{Na}^+$  (smectite sodique). L'eau peut facilement pénétrer entre les feuillets grâce à la grande énergie d'hydratation des cations interfoliaires. Ce qui leur donne une surface accessible à l'eau théorique beaucoup plus importante ( $800\text{ m}^2/\text{g}$ ). Les smectites sont des argiles gonflantes et la séparation des feuillets en présence d'eau peut se poursuivre jusqu'à de très grandes distances. Les feuillets sont flexibles et s'empilent de manière beaucoup moins ordonnée que pour les kaolinite ou les illites : ils forment des « paquets » à l'inverse de plaquettes rigides. Ces paquets ne sont pas aussi flexibles que les feuillets : cette flexibilité est réduite par l'accolement induit par certains cations hydratés. Les smectites se forment dans les sols mal drainés plutôt alcalins. Certaines smectites sont dioctaédriques : ce sont les montmorillonites, dans lesquelles les substitutions sont essentiellement octaédriques. Les hectorites, les saponites et les vermiculites sont des smectites trioctaédriques.

Les chlorites ont des feuillets 2 : 1. Le déficit de charge surfacique des feuillets est compensé par une couche octaédrique composée d'hydroxyles OH (oxygène lié à un petit atome d'hydrogène) dont les sites sont occupés par un cation magnésium  $\text{Mg}^{2+}$ . Cette couche n'est pas liée aux couches tétraédriques qui l'entourent. L'appellation de cette couche est la brucite. L'eau ne pénètre pas entre les feuillets qui s'empilent pour former des plaquettes rigides comme les illites et les kaolinites.

Dans un sol, il est fréquent de trouver des configurations où des feuillets (ou paquets de feuillets) d'une espèce sont empilés avec les feuillets d'une autre espèce. On parle alors de minéraux interstratifiés : on trouve ainsi des interstratifications smectites-illites ou smectites-kaolinites.



Smectites © Van Damme



Chlorites © The Mineralogical Society  
[www.minersoc.org/pages/gallery/claypix/](http://www.minersoc.org/pages/gallery/claypix/)

Minéral	Surface interne (m <sup>2</sup> /g)	Surface externe (m <sup>2</sup> /g)	Surface totale (m <sup>2</sup> /g)	C.E.C. (milliéquivalent/100g)
kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
illite	20-55	80-120	100-175	10-40
smectites	600-700	80	700-800	80-150
vermiculite	700	40-70	760	100-150
chlorite	-	100-175	100-175	10-40

Surface spécifique et C.E.C. (Capacité d'Echange Cationique) de quelques minéraux argileux. © Beauchamp

## Mécanique des sols

Degoutte, Royet 2005 [231]

La mécanique des sols est une science jeune. Les premiers fondements peuvent être attribués à Coulomb (1773), mais la mécanique des sols moderne a véritablement été initiée en 1936 par Terzaghi. Il s'agit essentiellement d'une science appliquée aux techniques de l'ingénierie dont l'évolution est liée aux grands travaux d'aménagement des Travaux Publics et aux grands chantiers du Bâtiment.

En géologie, on appelle roche tout élément constitutif de l'écorce terrestre. Y compris ce que couramment nous appelons sable, gravier, terre, argile, etc. En géotechnique, le sol est défini par opposition au mot roche. Une roche est un agrégat naturel massif de matière minérale. Un sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. On conçoit donc que la limite entre un sol et une roche altérée ne soit pas définie nettement. Le sol est un matériau meuble, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles. Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble.

La mécanique des sols est l'application des lois mécaniques (et hydrauliques) au matériau sol. A la différence des nombreux autres matériaux étudiés en mécanique (bétons, aciers, plastiques, bois, etc.) qui sont envisagés comme des solides cohérents et continus, le sol est considéré dans ce domaine comme un milieu discontinu, qu'il faut étudier à la fois dans sa globalité et dans sa composition élémentaire, et comme un matériau triphasique formé de grains solides, d'eau et d'air, dans lequel les phases non solides jouent un rôle fondamental. Par certains aspects, la mécanique des sols est proche de la mécanique des milieux continus qui étudie de nombreux matériaux comme l'acier, le bois, les bétons, les plastiques dont la plupart sont artificiels et donc de constitution bien connue. Par d'autres aspects, elle est proche des disciplines qui étudient les milieux minéraux naturels : la géologie, l'hydrogéologie, la mécanique des roches. La géotechnique regroupe ces dernières disciplines.

Les domaines d'application de la mécanique des sols sont nombreux et variés. Ceux-ci ne se limitent pas aux constructions. Ils comprennent également des milieux naturels tels que les versants (problèmes de glissement de terrain) et les berges de cours d'eau ou de retenues. Toutefois, ils concernent essentiellement la profession des travaux publics, ainsi que celle du bâtiment. Les ouvrages où le sol est le matériau de base sont aussi bien les remblais (routes, voies ferrées, barrages, digues de bassins en terre, plates-formes maritimes...) ou des déblais (talus, canaux, bassins...). Dans les ouvrages mixtes, le sol intervient en relation avec un autre matériau, le béton ou l'acier par exemple. Les conditions d'ancrage dans le sol sont souvent primordiales pour des ouvrages tels que les murs de soutènements (béton, terre armée, sol renforcé par géotextile...), les palplanches utilisées dans les canaux, les ports, les constructions urbaines, les parois moulées (à fonction étanchéité ou à fonction soutènement). Dans l'étude des fondations, le sol et l'ouvrage ne constituent pas un ensemble mixte, mais deux ensembles dont il s'agit de connaître les interactions. Les mécaniciens des sols distinguent les fondations superficielles (semelles ou radiers) et les fondations profondes.



## Essais d'identification et classification des sols

La mécanique des sols se dote d'un ensemble d'essais d'identification permettant de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux,...). Une telle appellation est très utile quand elle est un peu rigoureuse car le mécanicien des sols sait, pour chaque type de sol, quelles sont les propriétés à étudier, quels sont les risques possibles, quelles sont les aptitudes principales, etc. Ainsi par exemple, « l'argile » ou un « limon argileux » conviennent a priori pour réaliser la zone étanche d'un barrage, un « sable » ne convient pas. Sous réserve d'une certaine propreté, un sable grossier peut convenir pour construire le drain d'un barrage. Un sol fin est plus compressible qu'un sol grossier ; un sol fin est plus sensible à l'eau qu'un sol grossier du point de vue de la mise en œuvre ; l'essai de compactage Proctor (présenté ci-dessous) permet, lors de la préparation d'un projet de remblai, de savoir si le sol se trouve naturellement à une teneur en eau proche de celle de l'optimum ; au stade du chantier, l'essai Proctor sert de base au contrôle de compactage pour savoir si un engin de compactage est susceptible de convenir, et pour déterminer le nombre de passages permettant un compactage efficace, etc.

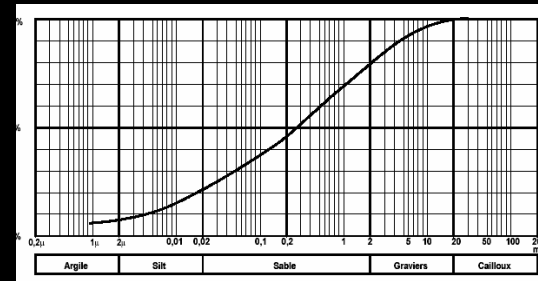
### Passage à l'étuve et pesée

Des essais très simples tels que pesée et passage à l'étuve permettent d'obtenir un certain nombre d'informations telles que :

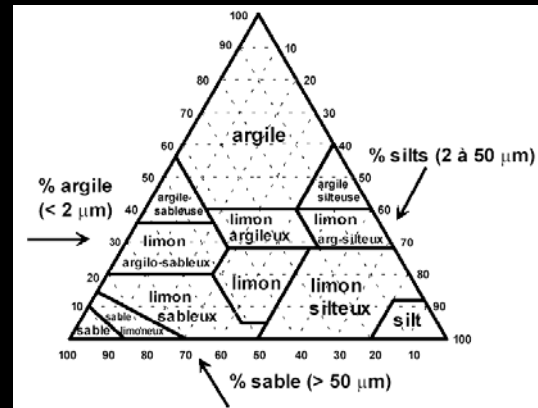
- le poids volumique du sol humide dans l'état où il se trouve ;
- le poids volumique sec (après expulsion de l'eau libre) ;
- le poids volumique des grains solides (en général compris dans la fourchette 26 à 28 kN/m<sup>3</sup>) ;
- la teneur en eau : rapport du poids d'eau au poids de sol sec ;
- la teneur en eau à saturation (l'eau remplit la porosité) ;
- l'indice des vides, rapport du volume des vides (air + eau) au volume des grains ;
- la porosité, rapport du volume des vides au volume total ;
- le taux de saturation, rapport du volume d'eau au volume des vides ;
- le poids volumique du sol saturé.

### L'analyse granulométrique

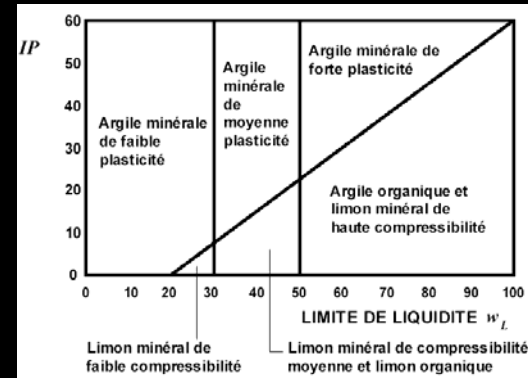
L'analyse granulométrique consiste à trier les grains selon leur taille par tamisage (pour les grains supérieurs à 80 µm) et densimétrie (grains inférieurs à 80 µm). On trace ensuite une courbe granulométrique (voir ci-contre en haut) qui permet de classer le sol en fonction des proportions respectives des grains. Cette analyse permet de différencier les sols à granulométrie uniforme des sols à granulométrie étalée et surtout, à partir de l'abaque triangulaire de Taylor (voir ci-contre) de baptiser un sol en fonction de la ou des classes dominantes (argile, limon, sable, limon argilo-sableux...). Pour appliquer le diagramme ci-contre, on détermine les pourcentages des trois catégories de sol par rapport à la fraction inférieure à 2 mm. Par exemple, le sol dont la courbe granulométrique est montrée en haut à gauche possède 7 % d'argile, 15 % de silts, 57 % de sable et 21 % d'éléments plus grossiers. Ramenés aux éléments de dimension inférieure à 2 mm, les pourcentages deviennent 9 % pour l'argile, 19 % pour les silts et 72 % pour les sables. Ce sol est donc un limon sableux au sens de la classification triangulaire de Taylor.



Courbe granulométrique d'un sol  
© Degoutte, Royet 2005 [231]



Abaque triangulaire de Taylor  
© Degoutte, Royet 2005 [231]



Abaque de plasticité de Casagrande  
© Degoutte, Royet 2005 [231]

<b>Sols FINS</b>  <b>A</b>  $d_{max} \leq 50$ mm <i>et</i> $d_{35} < 0,08$ mm	$VBS \leq 2,5^*$ ou $IP \leq 12$	<b>A<sub>1</sub></b> : limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
	$12 < IP \leq 25^*$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	<b>A<sub>2</sub></b> : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...
	$25 < IP \leq 40^*$ ou $6 < VBS \leq 8$	<b>A<sub>3</sub></b> : argiles et argiles marnieuses, limons très plastiques...
	$IP > 40^*$ ou $VBS > 8$	<b>A<sub>4</sub></b> : argiles et argiles marnieuses très plastiques
<b>Sols sableux</b> ou <b>graveleux avec fines</b>	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	<b>B<sub>1</sub></b> : sables silteux...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $VBS > 0,2$	<b>B<sub>2</sub></b> : sables argileux (peu argileux)...
<b>B</b>  $d_{max} \leq 50$ mm <i>et</i> $d_{35} \geq 0,08$ mm	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	<b>B<sub>3</sub></b> : graves silteuses...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $VBS > 0,2$	<b>B<sub>4</sub></b> : graves argileuses (peu argileuses)...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$ , $VBS \leq 1,5^*$ ou $IP \leq 12$	<b>B<sub>5</sub></b> : sables et graves très silteux...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$ , $VBS > 1,5^*$ ou $IP > 12$	<b>B<sub>6</sub></b> : sables et graves argileux à très argileux.
<b>Sols comportant des fines et des gros éléments</b>  <b>C</b>  $d_{max} > 50$ mm	$d_{12} < 0,08$ mm ou $d_{12} \geq 0,08$ mm et $VBS > 0,1$	<b>C</b> : Argiles à silice, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières.
<b>Sols insensibles</b>  à l'eau  <b>D</b>  $VBS \leq 0,1$ $d_{12} \geq 0,08$ mm	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} < 2$ mm	<b>D<sub>1</sub></b> : sables alluvionnaires propres, sables de dune...
	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} \geq 2$ mm	<b>D<sub>2</sub></b> : graves alluvionnaires propres, sables...
	$d_{max} > 50$ mm	<b>D<sub>3</sub></b> : graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires...

Classification des sols au sens de la norme AFNOR NFP 11-300 – Tableau simplifié

Limites d'Atterberg et valeur de bleu de méthylène

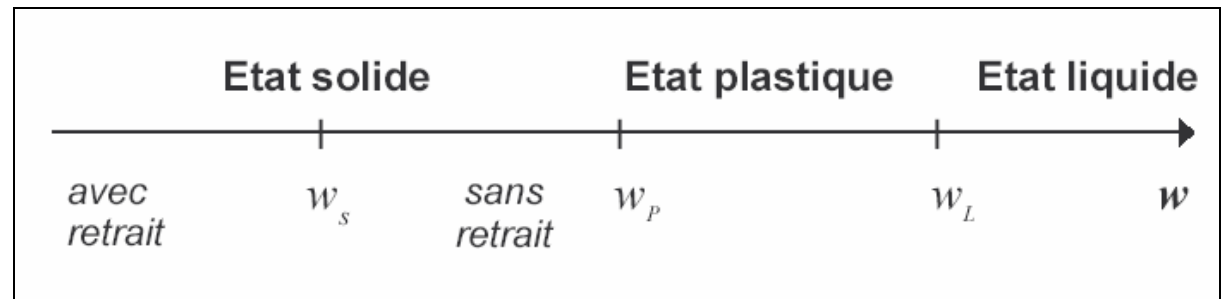
Des essais d'identification supplémentaires sont utilisés pour les « sols fins », qui sont des sols comportant au moins 50 % (en poids) de grains de dimension inférieure à 80 µm. Le comportement d'un sol fin est très lié à sa teneur en eau, mais aussi à sa structure cristalline et à sa composition minéralogique. Plus un sol est fin, plus la surface spécifique des grains est grande et plus l'eau, molécule polarisée, a un rôle important en étant à l'origine de forces d'attraction entre les grains. L'eau adsorbée est de l'eau attirée par polarité par les particules d'argiles. Elle constitue une fine pellicule qui entoure le grain, et qui peut être éliminée totalement, seulement par un chauffage très intense (200 à 300°C). Cette eau, très visqueuse, joue le rôle de lubrifiant des grains. L'eau libre, qui circule librement entre les grains, et que l'on peut éliminer à l'étuve à 100°C environ crée des attractions dues au phénomène de capillarité. En laboratoire, ce rôle de l'eau est couramment apprécié par des essais qui mesurent les teneurs en eau de changement d'état liquide, plastique, solide, aussi appelées limites d'Atterberg :  $w_L$  = limite de liquidité,  $w_P$  = limite de plasticité.

On appelle indice de plasticité la valeur :  $I_P = w_L - w_P$ .

L'indice de plasticité a un intérêt tout à fait fondamental. Ainsi, pour les chantiers de terrassement, des matériaux pour lesquels  $I_P > 30$  sont difficiles à mettre en place et à compacter.

Le diagramme de Casagrande, qui fait intervenir uniquement les limites d'Atterberg, permet une classification des sols fins (voir ci-contre).

Un essai, moins courant, mesure  $w_S$  (limite de retrait) qui permet de distinguer l'état solide sans retrait où l'eau capillaire est présente et un état solide avec retrait où l'eau capillaire est en partie éliminée. L'élimination de l'eau capillaire entraîne une diminution de volume (fentes de retrait). Ce phénomène de retrait, plus ou moins sensible selon les argiles, a une importance fondamentale dans les problèmes d'étanchéité des bassins : un bassin étanchéifié par un sol argileux peut voir son étanchéité compromise par les fentes de retrait s'il est maintenu vide pendant une certaine période, surtout par climat chaud.



Un autre essai caractérise l'argilosité des sols : la valeur de bleu de méthylène du sol (VBS). Il mesure la quantité de méthylène adsorbée sur les grains de sol. La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 grammes de sol. Comme l'indice de plasticité, l'essai au bleu est utilisé pour qualifier le sol au sens de la norme AFNOR NF P 11-300. Cette classification normalisée NFP 11.300 de septembre 1992 (tableau ci-contre) réalisée par le LCPC et le SETRA, remplace l'ancienne classification dite RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers). Elle est très utilisée en géotechnique routière et donne des renseignements pratiques sur l'aptitude des sols à être utilisés en remblai. Les sols d'indice faible (par exemple A1) sont les plus sensibles à l'eau.

### Identification de matière organique

Certains sols, issus de dépôts géologiquement récents, peuvent contenir de la matière organique. On les identifie in situ à leur couleur grise à noire, à la présence de débris végétaux et à leur odeur. Au laboratoire, la teneur globale en matière organique se mesure sur le résidu passant à 0,4 mm, préalablement séché à 65°C, que l'on fait réagir à l'eau oxygénée. Un deuxième étuvage permet par différence de connaître le poids et donc la teneur en matière organique. Au-delà de 2 à 3 % de matière organique, l'utilisation des sols en remblais peut engendrer des problèmes de tassements à long terme. Les sols contenant plus de 5 % de matière organique sont proscrits.

### L'essai proctor

L'essai Proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique (figure ci-contre). En construction de remblai en grande masse (barrages, remblais routiers...) on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Normal ; en couches de chaussée on se réfère à l'essai Proctor Modifié, réalisé avec une énergie supérieure. Cet essai permet de déterminer deux grandeurs fondamentales, en particulier pour le déroulement et le contrôle des chantiers de terrassement :

- teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié) ;
- poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié).

Si l'énergie de compactage croît, les courbes deviennent plus pointues. L'eau étant incompressible, ces diverses courbes ont pour enveloppe une hyperbole.

Tous ces essais (granulométrie, teneur en eau, Proctor, limites d'Atterberg, essai au bleu) sont des essais d'identification. Parmi ceux-ci, granulométrie et teneur en eau concernent le squelette du sol et ne renseignent absolument pas sur les relations entre grains. Les limites d'Atterberg, l'essai au bleu et l'essai Proctor sont au contraire des essais qui tiennent compte des relations intergranulaires. Mais tous ces essais d'identification sont effectués en remaniant le sol. Ils ne sont donc pas suffisants pour étudier un sol en place - une fondation d'ouvrage par exemple. Surtout, ils ne peuvent pas renseigner sur l'histoire du sol (au sens géologique).

### **Essais in situ**

Après avoir abordé les essais de laboratoire classiques, ne sont présentés ici que trois essais parmi les plus courants. Deux d'entre eux, le pénétromètre statique et le pressiomètre sont des essais fondamentaux pour les reconnaissances préalables à l'étude des fondations et pour leur dimensionnement.

### Pénétrromètre dynamique

Cet appareil dont le principe est montré sur la figure ci-contre permet la mesure de la résistance dynamique à l'enfoncement d'un pieu battu et l'estimation de la résistance de pointe conventionnelle par la formule dite des Hollandais :

M : masse du mouton ;

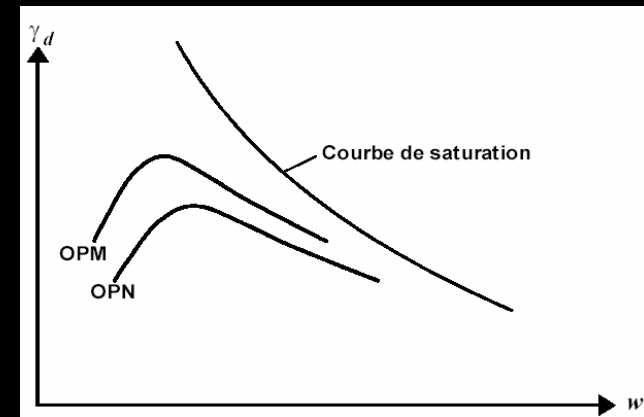
P : masse pointe + tiges ;

$\delta$  : enfoncement moyen par coup ;

A : section de la pointe ;

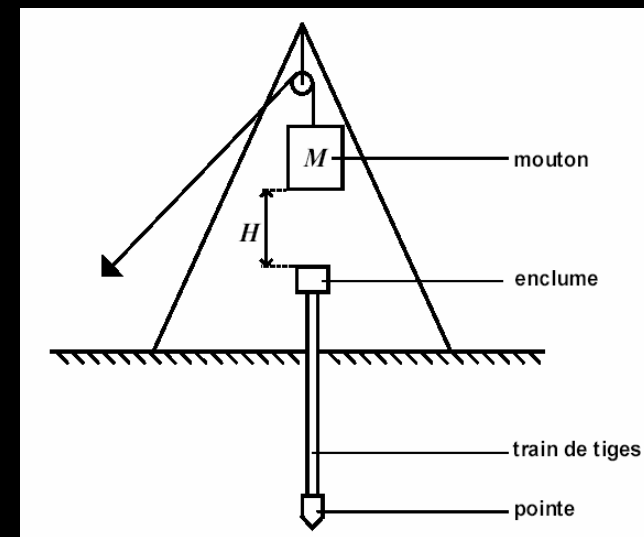
H : hauteur de chute du mouton ;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .



*L'essai proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau pour une énergie de compactage donnée.*

© Degoutte, Royet 2005 [231]



*Schéma du pénétromètre dynamique*

© Degoutte, Royet 2005 [231]

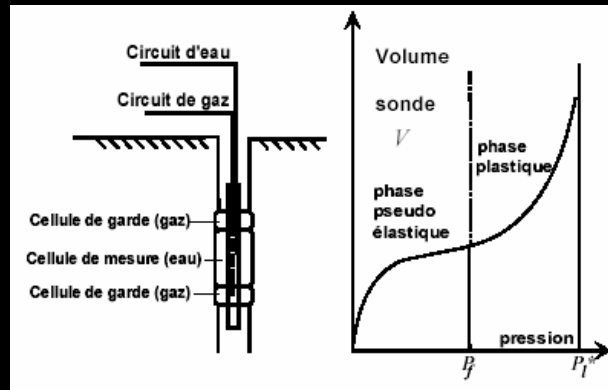
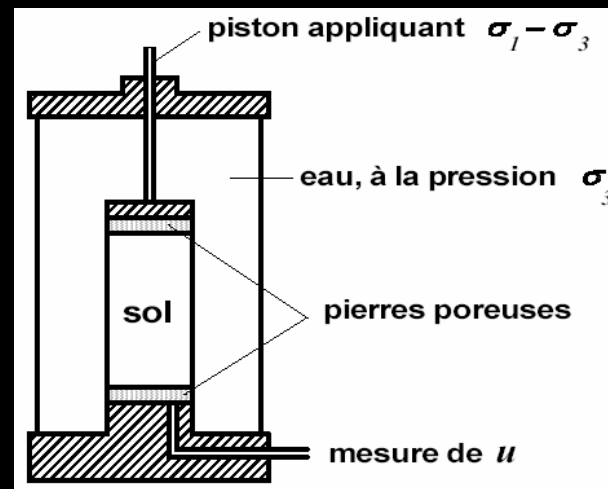


Schéma de l'essai pressiométrique et courbe d'interprétation  
© Degoutte, Royet 2005 [231]



Essai triaxial © Degoutte, Royet 2005 [231]

La valeur de résistance obtenue n'est pas utilisée pour vérifier la résistance d'une fondation mais donne une indication qualitative sur la nature des sols traversés. En particulier l'essai permet facilement de repérer des passages différents, par exemple une couche plus compressible ou bien une couche graveleuse, etc. Il est également utilisé pour apprécier le compactage de couches de chaussée ou le remblaiement de tranchées. Une version légère portable, appelée PANDA mise au point par le CUST de Clermont-Ferrand est équipée pour enregistrer automatiquement l'énergie de compactage appliquée à une pointe fine par un marteau. Elle est utilisable pour apprécier le compactage de remblais fins sur de petites profondeurs (projet de norme XP P 94-105).

Pénétromètre statique

Avec le pénétromètre statique, la pointe est enfoncée dans le sol à vitesse régulière. L'appareil permet la mesure de la résistance de pointe  $q_c$  et du frottement latéral  $f_s$  lors de l'enfoncement à vitesse lente et constante d'une pointe conique. Les résultats permettent de donner une indication sur la nature des sols traversés. La valeur de la résistance de pointe est utilisée pour le dimensionnement des fondations.

Pressiomètre

Cet essai dû à Louis Ménard est réalisé à l'aide d'une sonde cylindrique dilatable descendue dans un forage à la profondeur voulue. La cellule de mesure et les deux cellules de garde sont gonflées par paliers successifs. Grâce aux cellules de garde, la pression exercée sur la tranche de sol investiguée peut être considérée comme uniforme. Le graphe de l'essai trace le volume d'eau injecté dans la cellule de mesure en fonction de la pression appliquée sur le sol. Lorsque la pression augmente, le sol est dans une phase pseudo-plastique au sein de laquelle est calculé le module pressiométrique.

Puis au-delà de la pression dite de fluage ( $P_f$ ), le sol entre dans le domaine plastique, jusqu'à ce que la déformation augmente très rapidement, pour une pression baptisée pression limite ( $P_l$ ). Ces deux paramètres importants EM et PI sont utilisés pour calculer le tassement ainsi que la contrainte de rupture d'une fondation superficielle ou profonde. Le pressiomètre est également utilisé pour contrôler in situ l'amélioration d'un sol (compactage, consolidation dynamique, vibroflotation).

**Essais mécaniques classiques**

L'étude du comportement des matériaux de sol en régime quasi-statique est couramment réalisée par le biais d'essais de laboratoire spécifiques à ce domaine d'étude.

Essai triaxial

L'essai triaxial de révolution consiste à soumettre une éprouvette cylindrique, saturée en eau ou parfaitement sèche, à un état de contrainte homogène et constant (ou contrainte de confinement) et à une contrainte axiale (ou verticale) appliquée par l'intermédiaire d'un piston.

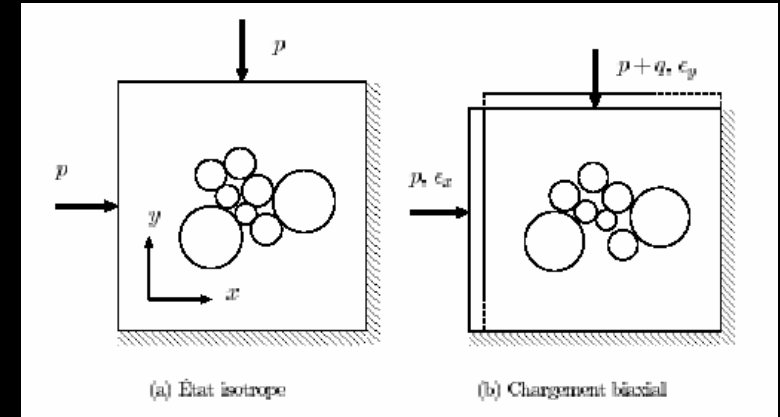
L'échantillon est entouré d'une poche plastique hermétique (membrane), fermée en ses deux extrémités par les pistons, et placé dans une cellule remplie d'eau. On fait croître la contrainte axiale en imposant une vitesse de déformation constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette, la contrainte de confinement restant constante. L'essai triaxial est dit drainé lorsque les mouvements d'eau entre l'échantillon de sol et l'extérieur de l'enceinte triaxiale sont possibles. Les essais triaxiaux en milieu non saturé et non complètement sec sont rares.

### Essai biaxial

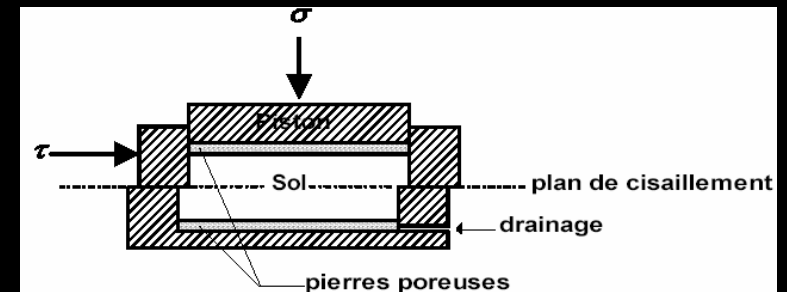
La compression biaxiale à contraintes contrôlées consiste à appliquer un déviateur, résultant d'une série d'incrémentes, tout en gardant une pression de confinement constante.

### L'essai de cisaillement rectiligne

La boîte de cisaillement ou de Casagrande est constituée de deux demi-coquilles sur lesquelles on exerce, perpendiculairement au plan de jonction des deux demi-coquilles, une pression. L'échantillon subit une compaction, c'est à dire qu'il perd une certaine proportion d'eau. L'une des deux coquilles étant fixe, on exerce alors une pression latérale, tendant à faire glisser l'autre parallèlement à leur séparation. En augmentant progressivement cette contrainte, on constate que la résistance de l'échantillon croît, passe par un maximum, puis décroît jusqu'au moment où se produit la rupture. L'expérience est renouvelée plusieurs fois avec des valeurs diverses de pression perpendiculaire. On détermine alors la courbe intrinsèque caractéristique de l'échantillon. Ces deux paramètres entrent dans une équation de droite dite de Coulomb dont la pente est  $\tan \alpha$ , où  $\alpha$  est l'angle de frottement interne de l'échantillon et l'ordonnée à l'origine  $c$ , la cohésion.



Essai biaxial © Degoutte, Royet 2005 [231]



Boîte de Casagrande © Degoutte, Royet 2005 [231]

L'objectif de cette partie, qualifiée « d'approche classique », était de fournir un bref panorama des différentes manières d'aborder le matériau terre par les trois champs d'étude évoqués précédemment (caractérisation thermophysique du matériau, géologie, mécanique des sols).

Les études portant sur la caractérisation thermophysique de la terre en tant que matériau de construction perçoivent la matière comme un solide continu à notre échelle dont elles essaient de déterminer les performances. On entrevoit les limites d'une telle démarche si l'on considère la nature changeante de la matière liée à sa sensibilité à l'humidité et à la grande diversité de matériaux considérés (nature des terres, stabilisation, techniques de mise en œuvre, etc) et aux nombreux facteurs de dispersion qui en résultent. La géologie porte un regard intéressant sur le sol, qu'elle considère comme un système en évolution et dont elle identifie les processus de transformation. On lui doit une connaissance précise des constituants, en particulier de la nature cristallographique des argiles, et de leur « histoire » (processus de genèse et de transformation). Elle nous indique en particulier la nature des sols rencontrés en fonction des climats, de la topographie, de la nature de la roche-mère, etc. Enfin la mécanique des sols apporte un certain nombre de techniques d'identification et d'essais mécaniques qui permettent de les classer et de les caractériser. Elle a l'intérêt de considérer le matériau comme une matière triphasique, se plaçant ainsi à une échelle d'observation inférieure à celle des essais de caractérisation thermophysique des matériaux de construction.

Entre ces trois disciplines complémentaires, il existe peu de passerelles. La physique des grains et des colloïdes pourrait permettre d'unifier ces différentes disciplines autour d'une science unique du matériau terre.

## ***2 – Vers de nouvelles sources de connaissance***

En science certains problèmes arrivent à maturité pour être résolus lorsqu'un ensemble de conditions sont réunies : nouvelles théories scientifiques, avancées dans d'autres domaines de savoir, puissance de calcul, progrès technologiques, etc. Il y a une vingtaine d'années, une description plus précise des mécanismes de cohésion du matériau terre, dans une approche fondamentale cherchant à relier la microstructure de la matière à ses différentes propriétés macroscopiques, aurait été impossible. Aujourd'hui, une meilleure compréhension des propriétés physiques du matériau peut s'appuyer sur un certain nombre d'avancées dans de nouveaux domaines du savoir tels que la physique des grains et la physique des colloïdes auxquelles participe un renouveau des théories des forces de surfaces. Par ailleurs, la caractérisation précise des argiles n'a été rendue possible que grâce à l'émergence de techniques de microscopie et de spectroscopie toujours plus performantes qui permettent aujourd'hui de connaître avec précision les structures cristallines de ces minéraux dans leur moindre spécificité. Parmi ces techniques, notons l'importance de la diffraction par rayons X, des microscopes électroniques à transmission et à balayage, qui permettent d'observer des zones de quelques nanomètres carrés. D'autres méthodes (résonance magnétique nucléaire, résonance paramagnétique électronique, effet Mössbauer, EXAFS, etc.) ont été employées dans les laboratoires de recherche pour des études plus poussées, lorsque le modèle structural était déjà bien établi par ailleurs. Notons aussi l'émergence de nouveaux outils susceptibles de fournir de plus amples informations : le microscope électronique environnemental, grâce auquel l'objet ne nécessite plus d'être observé sous vide et autour duquel on peut faire varier un paramètre tel que l'humidité, et le microscope à forces atomiques qui permet de mesurer des forces entre particules de très faibles tailles. Enfin, les secteurs industriels concernés par l'ensemble des domaines du savoir cités précédemment sont si multiples et variés et les enjeux économiques si importants qu'ils ont permis des progrès fulgurants de la recherche au niveau mondial dans ces domaines. Les problématiques fondamentales soulevées par l'approche granulaire et colloïdale dans le matériau terre se retrouvent dans des disciplines aussi variées que l'industrie chimique, l'industrie pharmaceutique, l'industrie agroalimentaires, les cosmétiques, les céramiques, etc. C'est bien sûr dans la recherche sur le béton de ciment que l'analogie des problématiques de cohésion du matériau est la plus marquante.



## Les progrès technologiques d'observation de la matière

Rautureau, Caillère, Hénin 2004 [145]

Si l'argile n'a été scientifiquement que peu connue jusqu'au XXe siècle, c'est qu'il fallait faire appel à des techniques nombreuses. Les principales méthodes d'étude physique et d'identification des argiles sont la microscopie électronique, la diffraction des rayons X et les analyses thermiques, autour desquelles se sont développées des techniques d'analyses interférentielles, de spectroscopie d'absorption et d'émission, et des moyens mathématiques complexes, mais classiques, de modélisation. Les méthodes basées sur la résonance avec les vibrations des constituants sont aussi utilisées : la plus employée est l'absorption des rayons infrarouges.

### La diffraction par rayon X

La découverte de la diffraction des rayons X en 1912 a conduit à utiliser cette technique particulièrement adaptée à l'étude de ses minéraux. Son utilisation et l'interprétation des résultats ont été affinées successivement par Debye et Scherrer puis par Bragg : ils ont montré la nature microcristalline des argiles, qui échappait préalablement aux observations. Leurs résultats ont permis, en 1930, de découvrir les grandes tendances de l'organisation de ces minéraux, en particulier leur organisation en feuillets. La comparaison des diagrammes de diffraction des rayons X a permis de montrer que ces minéraux sont constitués par empilement de couches considérées comme des feuillets, dont l'épaisseur conduit à définir trois grands groupes de phyllites à 7, 10 et 14Å. Quelques formes plus complexes ayant l'allure de briques creuses telles que la sépiolite ou la palygorskite ainsi que des structures tubulaires comme celle du chrysolite, ont été ensuite décrites très précisément. La connaissance de la structure a permis simultanément d'expliquer les propriétés essentielles, telles que la capacité d'échange et la plasticité. Dès lors, une classification logique était possible tandis que les minéralogistes précédents ne disposaient que de critères chimiques et macroscopiques peu spécifiques. La connaissance de la constitution et de la structure des argiles, outre les conditions de leur formation, a permis la compréhension de leurs comportements rhéologiques et l'analyse de leurs propriétés physiques et thermiques.

La méthode consiste à envoyer un faisceau de rayons X sur l'objet à observer. L'interaction de ceux-ci sur la matière provoque un phénomène de diffusion : une proportion importante des rayons incidents est diffusée, sans variation de la longueur d'onde et avec des caractéristiques de direction et d'amplitude qui sont directement liées à la position et à la nature des atomes, c'est-à-dire à la structure cristalline du matériau. Quand le cristal reçoit les rayons X, chaque atome ou ion devient un centre diffuseur, et, pour certaines positions dans l'espace, il y a concordance des phases des rayons diffusés par chacun de ces centres, dont les interférences sont observables.

### Le microscope électronique à balayage (MEB) et à transmission (MET)

Une autre technique d'observation consiste à envoyer des électrons sur l'objet. C'est le cas des microscopes électroniques grâce auxquels on peut analyser des zones de quelques nanomètres carrés. On distingue deux modes principaux d'utilisation de ceux-ci qui sont la microscopie électronique à balayage et la microscopie électronique à transmission.

Dans le cas du MEB (microscope électronique à balayage), un système de balayage permet de parcourir point par point la totalité de la surface et permet d'observer les électrons secondaires et rétrodiffusés ainsi que les rayons X émis lors de l'interaction du faisceau d'électron avec la matière. La microscopie électronique à balayage permet d'étudier les faciès des particules dans leur forme naturelle, souvent liée à leur évolution géologique. Si l'on désire observer des particules séparées, il faut utiliser un microscope électronique à transmission (MET), qui permet de visualiser les objets par leur propriété de transparence aux électrons. Il est alors possible d'enregistrer, au choix, l'image de l'échantillon ou le diagramme de microdiffraction d'une zone sélectionnée de l'objet. En employant les forts grossissements, on peut voir les feuilletés et même, dans des conditions favorables, les unités structurales à l'échelle atomique (tétraèdres et octaèdres).

### **Le microscope environnemental**

Dans le cas du MEB et du MET, l'objet à observer est placé dans une chambre sous vide, ce qui constitue une limite d'observation puisqu'il est impossible d'étudier la matière dans ses conditions atmosphériques réelles. Avec le microscope environnemental, avec des pressions quasi atmosphériques au niveau de l'objet, on peut aller jusqu'à l'observation de sujets vivants. Dans le cas des argiles, on envisage la portée d'un tel outil qui permettrait d'observer ces minéraux dans un milieu où l'on peut faire varier des paramètres comme l'humidité relative.

### **Le microscope à force atomique**

Le microscope à force atomique a une telle résolution qu'il permet de percevoir les atomes. Sa pointe, extrêmement fine, est reliée à un ressort qui transmet les irrégularités de la surface qu'elle balaye. L'intérêt majeur de cet outil est de pouvoir exercer des actions sur des particules de très faible taille. Il permet en particulier de séparer des particules en mesurant avec précision la force qui les lie. Ceci est évidemment d'une grande utilité pour les chercheurs qui travaillent sur la microstructure de la matière en leur permettant de comparer les modèles théoriques d'interactions interparticulaires avec une mesure réelle. Dans le cas du béton, cet outil a été utilisé pour mesurer la force d'interaction entre les principaux hydrates de ciment afin de lier cette mesure aux recherches sur la cohésion du matériau.

## Les argiles dans l'industrie

Rautureau, Caillère, Hénin 2004 [145]

La faible connaissance des moyens d'agir sur les argiles dans le domaine de la construction en terre contraste avec l'énorme utilisation de ces colloïdes dans l'industrie, qui sait très bien tirer profit des propriétés particulières de ces minéraux pour toutes sortes d'applications. Le large éventail de domaines présentés ici laisse entrevoir dans quelle mesure ces minéraux sont connus.

### Les céramiques

Les argiles comme la bentonite sont utilisées comme liant pour augmenter la résistance mécanique du compact.

### La fonderie

Les moules de fonderie sont fabriqués à partir d'un mélange de sable et d'argile, généralement une smectite sodique (la bentonite) qui sert de liant. Leurs propriétés dépendent de la dimension des particules et de la nature des ions échangeables interfoliaires.

### L'industrie pétrolière

Dans l'industrie pétrolière, les argiles ont un rôle important comme indicateur dans la recherche et la localisation du pétrole ainsi que du charbon. Elles sont également fréquemment utilisées comme boues de forage, principalement la montmorillonite sodique (bentonite) et, dans le cas de travaux sous-marins, la palygorskyte et la sépiolite. Les argiles forment une couche imperméable au-dessus de l'appareil de forage, empêchant la remontée des gaz et des liquides, permettant de conserver ceux-ci dans les carottes de sondage.

Dans le creusement des puits artésiens, elle permet de maintenir les parois bien colmatées même dans des roches meubles comme le sable.

L'halloysite, la kaolinite, la montmorillonite et la sépiolite servent également au cours du raffinage des pétroles, comme support de catalyseur. Leurs grandes surfaces et leur porosité permettent les contacts et les évolutions nécessaires : déshydratation, condensation, déchloritisation, polymérisation et hydrogénation.

### BTP

Les argiles peuvent également servir de matériaux pour l'édification de barrages où elles agissent par effets de masse, mais aussi pour leurs propriétés d'étanchéité. L'argile intervient dans la construction d'ouvrages très divers : barrages, installations portuaires, ponts, tunnels, voies ferrées, terrains d'aviation ou de sports, asphaltage des routes et autoroutes, monuments et grands immeubles, etc. Tous ces travaux nécessitent une connaissance de la plasticité, de la capacité de rétention d'eau et de la résistance des matériaux.

### Industries pharmaceutiques et médicales

Les argiles (kaolinite, smectites, sépiolite et palygorskites) constituent une importante base de pansements stomacaux et intestinaux. On utilise aussi des emplâtres pour la consolidation des fractures et des bains de boues pour le traitement des rhumatismes et des affections de la peau.

Cosmétiques

Les argiles, principalement les smectites, permettent la préparation de nombreux cosmétiques : savons et shampooings, pommades, onguents, crèmes, dentifrices où elles remplacent les matières grasses. Les esthéticiens les utilisent pour la réalisation de masques faciaux. On l'emploie également dans la fabrication de vernis à ongles.

Industrie chimique

Les propriétés absorbantes des argiles sont utilisées pour le dégraissage des laines, le nettoyage des vêtements et le traitement des cuirs et des peaux.

A partir des smectites, on prépare des composés d'insertion dans lesquels une molécule organique a pénétré dans l'espace interfoliaire. Les modifications structurales qui en résultent agissent sur leurs propriétés physicochimiques et permettent d'obtenir des matériaux nouveaux (couleurs, rétention et diffusion d'odeurs, etc.) La sépiolite est également employée comme produit déshydratant. Elle entre aussi dans la fabrication de pipes, de filtres et de fumes cigarettes.

Les montmorillonites activées sont utilisées pour régénérer les huiles résiduelles de graissage et pour clarifier les huiles en général.

Les argiles sont plus ou moins hydrophiles. Cette propriété permet de les employer dans la fabrication des papiers, des emballages, des caoutchoucs et des matières plastiques.

Le kaolin très pur, employé comme charge augmente la résistance des papiers tandis que pour le couchage, il supprime leur porosité. On retrouve encore les argiles lors du recyclage des vieux papiers : les smectites permettent l'élimination de l'encre d'imprimerie. Elles permettent d'incorporer des ignifuges, du bitume ou de la paraffine pour obtenir respectivement des papiers résistant au feu, à l'eau ou du parchemin.

Introduites dans le latex, les smectites en augmentent la consistance et permettent d'améliorer l'adhérence des caoutchoucs. Elles servent également de charges dans la préparation des matières plastiques, dont elles homogénéisent les mélanges. Elles favorisent la fixation des matières colorantes sur les tissus, ainsi que celle des pigments dans les peintures, les encres et les cires. On les trouve associées au graphite dans les mines de crayons.

Elles servent aussi à la fabrication des mastics et des pâtes à modeler.

La vermiculite sert de base pour fabriquer des matériaux translucides qui sont d'excellentes protections thermiques grâce à ses propriétés d'expansion par chauffage.

Les propriétés abrasives des argiles fines crues servent à polir les métaux précieux (c'est le cas du talc). Lorsqu'elles sont cuites, elles peuvent atteindre des duretés supérieures à celles des oxydes métalliques les plus durs.

Industrie minière et explosifs

La montmorillonite favorise la flottaison des sulfures et oxydes et celle des métaux lourds. Certains minéraux de la fraction inférieure à 2 micromètres (silice fine, argile) constituent d'excellents supports pour la nitroglycérine et permettent la fabrication d'explosifs plus stables.

Industrie agro-alimentaire

L'argile est employée pour la filtration et la clarification des boissons (eaux, cidres, vins, bières), ainsi que pour celle des huiles alimentaires, végétales et minérales.

L'industrie sucrière utilise la montmorillonite calcique pour améliorer le rendement en sucre des mélasses. Elle sert aussi comme agent de texture dans diverses fabrications (moutarde).

## Physique des milieux granulaires

Les grains et les poudres sont présents partout dans notre environnement quotidien et dans l'industrie. Nous ne reprendrons pas ici les larges champs d'application de la recherche dans ces domaines déjà évoqués dans la première partie de ce mémoire. La méconnaissance du comportement de la matière en grain a persisté jusqu'à une époque récente. Celle-ci a toujours été considérée comme un matériau à faible valeur ajoutée. Les efforts de la recherche fondamentale et appliquée ont toujours été limités dans ce domaine. Toutefois la complexité croissante des processus industriels impliquant la matière en grain ont conduit les industries à forte valeur ajoutée à s'intéresser de plus près à ce domaine.

Des réponses essentielles au comportement de base de ces milieux commencent à être établies et on assiste à l'émergence de premières tentatives de modélisations numériques de ces comportements. On étudie ainsi ses propriétés d'écoulement, la manière dont se distribuent les contraintes dans la matière, les mécanismes de cohésion des milieux humides, etc.

Les problématiques de comportement du matériau terre se retrouvent ainsi sur le même banc que celles de secteurs industriels à priori très différents. A titre d'exemple, les céramiques sont des matériaux formés par frottement (compaction de poudre). Dans ces procédés de fabrication, on connaît l'importance de la présence d'une phase liquide pendant la phase de compaction. Celle-ci induit une pression capillaire qui participe à la densification : elle participe au réarrangement des particules pour augmenter la compacité et augmente la pression de contact entre les particules. Un lubrifiant (huile, graphite, paraffine, etc.) est utilisé lors du compactage afin de diminuer les frictions inter particules et entre les particules et le liant, ce qui permet d'augmenter l'uniformité du compact et du corps en cru. Dans le matériau terre on connaît aussi l'importance des forces capillaires au moment de la mise en œuvre qui jouent le même rôle.

Les industriels qui manipulent des matériaux granulaires savent que la présence d'humidité peut modifier de manière importante les propriétés d'écoulement des matériaux granulaires conduisant par exemple dans le cas des matériaux solubles comme le sel de table à une cémentation, c'est-à-dire à une véritable prise en masse des matériaux. Le sel de table tel qu'il est vendu au public n'est donc pas une simple poudre de NaCl qui prendrait systématiquement en masse dans les salières sans l'ajout de matériaux « anticoagulants ». L'influence de l'humidité sur la cohésion d'un milieu granulaire est donc d'une grande importance dans la maîtrise et le contrôle de nombreux procédés industriels. A ce titre, les mécanismes par lesquels se produisent les processus de condensation capillaire dans un milieu granulaire sec font l'objet d'études qui sont susceptibles d'apporter des informations clés dans la compréhension du matériau terre (Halsey, Levine 1998 [73], Bocquet, Charlaix, Restagno 2002 [66], Restagno 2000 [75]).

## Physique des colloïdes

Cabane, Hénon 2003 [133], Daniel, Audebert 1995 [159]

Parmi les champs d'étude en plein essor actuellement se trouve également celui portant sur la matière colloïdale. La matière peut naturellement s'organiser dans un « état colloïdal » correspondant à un certain degré de division physique : le brouillard, la peinture, le lait, la mayonnaise sont tous des systèmes colloïdaux. Dès lors, c'est la taille des objets qui apparaît comme le paramètre pertinent pour définir l'état de la matière. L'extrême petite taille des objets colloïdaux conduit les interactions de surface et les interactions entre particules à devenir prédominantes devant la force de pesanteur. On appelle dispersion colloïdale un système formé d'un liquide dans lequel sont immergés de petits morceaux de solide inférieurs à 1 micron. Les boues et pâtes argileuses sont donc des dispersions colloïdales. Les dispersions colloïdales sont des états de la matière présentant des propriétés originales qui font tout leur intérêt. Les principales sont les propriétés de gonflement (rétention d'eau, pression osmotique), d'écoulement (les dispersions peuvent être dans un état fluide, pâteux ou solide, en fonction des interactions entre particules dispersées), et des propriétés chimiques particulières liées aux surfaces (les dispersions sont caractérisées par les échanges et les réactions qui ont lieu entre les surfaces des particules et le milieu liquide qui les disperse ; comme la surface développée est énorme, ces échanges ou réactions sont très efficaces).

L'originalité des propriétés des dispersions colloïdales par rapport à celles des liquides ou solides homogènes tient au fait qu'elles ne sont pas déterminées par la composition globale, mais plutôt par l'état de division de la matière, c'est-à-dire par l'état d'agrégation des particules, et par leurs interactions. Ceci permet un contrôle efficace des propriétés portant sur l'état de dispersion. Là encore, les secteurs industriels impliqués dans la manipulation de matières colloïdales sont très nombreux. Dans de nombreux procédés, on sait agir sur les propriétés de surface des particules colloïdales pour modifier l'état de dispersion de celles-ci et changer les propriétés macroscopiques de la matière. Dans la fabrication des céramiques, l'état de dispersion des barbotines est contrôlé afin d'atteindre un état stable de la barbotine. Les charges de surface des argiles sont modifiées afin d'assurer cette dispersion : par désorption d'ions à la surface du minéral (dans le cas de la kaolinite par exemple), par réaction chimique entre la surface et le milieu liquide ou par adsorption d'additifs ou d'impuretés présents dans le liquide. On déflocule en modifiant le pH (ajout de HCL, etc.), en ajoutant des charges (défloculant ionique) ou en diminuant les forces attractives en éloignant les particules avec des défloculants stériques (longues molécules). Les peintures sont des dispersions de pigments dans un liquide qui peut être une phase aqueuse ou organique. Un exemple typique est celui d'une peinture « latex » ou « acrylique ». Cette peinture reste fluide tant qu'elle n'est pas étalée et déshydratée : la métastabilité de la dispersion des particules minérales est excellente. Cependant, on obtient après séchage un film cohésif qui résiste à l'eau. Dans ce domaine, on a donc besoin de pouvoir basculer le film d'un état dispersé, métastable, vers un état cohésif, stable. Toutes les pâtes colorées sont des dispersions de pigments. Les exemples les plus courants sont les produits cosmétiques : les rouges à lèvres et les fonds de teint sont des dispersions de pigments dans les huiles, les crèmes anti-UV sont des dispersions de particules de dioxyde de titane, etc.

Dans la plupart des applications industrielles des dispersions colloïdales, on va au-delà de la correspondance entre un état de dispersion et un ensemble de propriétés. Il est généralement nécessaire d'ajuster certaines propriétés suivant les demandes de l'application sans pour autant modifier substantiellement la composition de la dispersion, ce qui dégraderait les autres propriétés. En reprenant l'exemple des peintures ou des pâtes céramiques, on doit régler le seuil d'écoulement, la fluidification sous l'effet du cisaillement et la réapparition de la résistance lors du retour au repos. Pour cela, on ajuste les interactions entre les petites particules qui forment un réseau de connexions fragiles à travers toute la dispersion, via des modifications mineures du milieu de dispersion (pH, sel, additifs) ou du procédé (succession des interventions chimiques ou mécaniques). Dans

certain cas, on doit assurer non pas un ajustement continu de l'état de dispersion, mais un basculement complet, d'un état initial à un état final de propriétés opposées. Dans le cas des dispersions céramiques, l'état initial obtenu après synthèse est une dispersion dans une solution aqueuse contenant des ions qu'il faut éliminer ; on doit donc flocculer la dispersion pour la laver, puis la redisperser dans un milieu convenant à l'application, et repasser à un état cohésif avant frittage. De même, la fabrication du papier fait intervenir le dépôt de couches garantissant l'opacité du papier, la réflexion de la lumière et une certaine résistance chimique. Ces couches sont obtenues à partir d'une dispersion aqueuse (le bain de couchage), par addition de macromolécules qui lient les particules colloïdales de la dispersion entre elles et aux fibres de papier, puis par drainage et évaporation de toute l'eau.

Tous ces changements d'états sont obtenus par modification des interactions entre particules dispersées et l'on voit qu'un contrôle rigoureux de ces états de dispersion par les interactions de surface permet de modifier les propriétés de la matière. Cette brève revue suffit à imaginer les possibilités d'agir au niveau des interactions entre feuillets d'argile afin de contrôler certaines propriétés, le cas le plus évident étant celui du gonflement et dégonflement de certains minéraux argileux en présence d'eau, et éventuellement d'améliorer les propriétés de cohésion du matériau.

## Analogies et différences entre béton de terre et béton de ciment

Parmi tous les secteurs industriels susceptibles de fournir des informations pour la compréhension des mécanismes de cohésion du matériau terre et des indications sur les moyens d'améliorer ses propriétés, le secteur du béton de ciment semble le plus pertinent.

### Qu'est ce qu'un béton ?

Béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, graves) agglomérés par un liant. Un matériau composite ou composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. Il est constitué d'une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection appelée matrice qui est généralement une matière plastique et qui assure la cohésion de la structure et répartit les efforts. Le bois est un exemple de matériau composite naturel. La première difficulté lorsque l'on est confronté aux matériaux composites est l'infini variété des structures qu'il est possible de rencontrer.

Dans le cas des bétons, le liant peut être « hydraulique » (car il fait prise par hydratation ; ce liant est couramment appelé ciment). On obtient dans ce cas un béton de ciment. On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux. Lorsque les granulats utilisés avec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de mortier. Dans le cas de la terre, le squelette granulaire présente une granularité continue (gravier, sable, silt) et le liant est l'argile. Dans le cas du béton de ciment conventionnel, le squelette granulaire présente une granularité discontinue (gravier, sable) et le liant est la pâte de ciment durcie.

### Le squelette granulaire

Dans le béton de terre et le béton de ciment, le renfort est de même nature : il s'agit de granulats.

Dans le cas du béton de terre, la granularité est généralement continue. Ces grains sont les graviers, le sable et le silt. Ceux-ci se trouvent en proportions variables en fonction du type de terre considéré et proviennent directement du sol. Ils sont déjà mélangés au liant et mis en œuvre tels quels. Dans le meilleur des cas, la terre est aussi mélangée à l'eau dans la proportion idéale : traditionnellement, en France, le pisé était mis en œuvre au printemps ou à l'automne lorsque la terre est à l'état humide. Il n'y a plus qu'à la mettre dans les coffrages : c'est un béton naturel prêt à l'emploi. La technique de mise en œuvre est généralement choisie en fonction de la proportion des grains contenus dans la terre. Lorsque la granulométrie d'une terre n'est pas satisfaisante, elle peut être modifiée soit par tamisage pour enlever les plus gros grains, soit par ajout de sable.

Dans le cas du béton de ciment, les grains proviennent de l'industrie du sable et du granulats. Pour un béton conventionnel, la granularité est discontinue (graviers, sables). Les grains ont été dans un premier temps séparés du sol dont ils proviennent, triés, classés par taille et lavés. Mais ce sont les mêmes grains que ceux de la terre à pisé. Le béton est ensuite recomposé à partir de ces grains séparés mis à disposition par l'industrie pour effectuer un nouveau mélange avec le ciment. Cette séparation des grains par catégorie a un avantage puisqu'elle permet au formulateur de choisir la taille et la proportion de ces grains en fonction du type d'ouvrage considéré. Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Si un béton classique est constitué d'éléments de granulométrie décroissante, en commençant par les granulats, le spectre granulométrique se



poursuit avec la poudre de ciment puis parfois avec un matériau de granulométrie encore plus fine comme une fumée de silice (récupérée au niveau des filtres électrostatiques dans l'industrie de l'acier). L'obtention d'un spectre granulaire continu et étendu vers les faibles granularités permet d'améliorer la compacité, donc les performances mécaniques. Les ajouts de fumée de silice ont également un effet rhéologique et permettent de fixer, en partie, la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en donnant des silicates de calcium qui font également prise par hydratation. Aujourd'hui, comme indiqué dans la partie III.4, on sait choisir les proportions des différents granulats d'un béton associés à d'autres adjuvants (superplastifiant) afin d'obtenir des propriétés mécaniques ou rhéologiques exceptionnelles (bétons hautes performances, bétons autocompactants ou autonivelants, etc.).

Dans les deux cas, les propriétés mécaniques dépendent fortement de l'optimisation du squelette granulaire.

## **Le liant**

### **Le ciment**

#### Généralités

Le ciment s'emploie le plus souvent sous forme de poudre utilisée avec de l'eau. Le ciment Portland est le plus utilisé dans la construction. Les ciments hydrauliques furent d'abord inventés par les Égyptiens puis améliorés par les civilisations suivantes par l'utilisation de chaux. Plus tard, les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques, usage repris par les Romains.

En géologie, le terme est utilisé en référence aux minéraux à grains fins qui tiennent ensemble une matrice de grains plus grossiers dans les roches sédimentaires. De tels ciments sont composés typiquement de minéraux calcaires, de quartz ou d'argiles.

Le ciment Portland a été découvert au 18<sup>ème</sup> siècle par un Anglais, Smeaton, qui obtint à partir d'un calcaire argileux et de cendres volcaniques siliceuses un mortier aussi dur et du même aspect que la pierre de la presqu'île de Portland, au sud de l'Angleterre, d'où son appellation usuelle. Le Châtelier, un français, fut le premier à s'intéresser aux différents constituants du ciment et aux réactions chimiques d'hydratation (1904). Néanmoins, les propriétés physico-chimiques du ciment, pourtant largement utilisé dans l'industrie, sont encore mal connues, en particulier en ce qui concerne les mécanismes de cohésion mis œuvre dans la pâte de ciment durcie.

#### La prise du ciment

Le béton nous est si familier que nous oublions parfois le processus remarquable par lequel on peut mélanger le ciment et l'eau à une grande variété d'agrégats afin d'obtenir une masse malléable pouvant être convertie, en un matériau résistant et durable, épousant à peu près toutes les formes que l'on désire. Un grand nombre de réactions chimiques et physiques ayant lieu durant la prise du béton et par la suite sont si compliquées qu'on ne les comprend pas encore tout à fait. Cela est dû en partie à la grande variété des substances chimiques qui se trouvent, soit parce qu'on l'a voulu, soit par hasard, dans tous les mélanges de béton.

La réaction chimique qui permet au béton de ciment de faire prise est lente : on obtient à peine 50% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale). Les grains de ciment réagissent à leur surface avec l'eau de gâchage : la réaction d'hydratation commence. De très petits produits d'hydratation, les hydrates de ciment, précipitent et enveloppent les différents grains de ciment. Pour que l'hydratation se poursuive, l'eau doit

diffuser à travers les pores de la couche de gel de ciment devenant de plus en plus dense et de plus en plus épaisse, jusqu'à ce qu'elle atteigne le noyau non-hydraté. L'hydratation, qui est de plus en plus lente, n'est jamais entièrement achevée. Une partie du ciment reste non-hydraté. Lors de son hydratation, le grain de ciment grossit et double à peu près par rapport à son volume initial. Quel que soit le stade d'hydratation du ciment, les pores capillaires représentent la partie du volume brut qui n'a pas été rempli par les produits d'hydratation. Le réseau capillaire diminue au cours de la réaction d'hydratation. Par conséquent, la porosité capillaire de la pâte dépend à la fois du rapport E/C (eau/ciment) et du degré d'hydratation. Ceci constitue une différence majeure avec le béton de terre puisque dans le béton de ciment, une partie de l'eau de gâchage est impliquée dans l'apparition d'une nouvelle phase solide, diminuant ainsi le retrait de séchage.

### L'argile

L'argile est un minéral non transformé par l'homme qui vient du sol. La pâte obtenue en ajoutant de l'eau est une dispersion de particules de dimensions colloïdales dans l'eau. Le durcissement ne dépend pas d'une réaction d'hydratation qui transforme les minéraux argileux en d'autres minéraux. La phase solide reste inchangée, et le durcissement ne dépend que de l'évaporation de la plus grande partie de l'eau. Il est réversible si l'on ajoute à nouveau de l'eau. La cohésion du matériau dépend d'un ensemble de forces attractives et répulsives entre particules qui sont sans doute différentes en fonction des minéraux considérés. Il existe cependant des forces qui sont présentes quelque soit le type d'argile et qui préside aux mécanismes de cohésion lorsque les particules sont neutres, comme dans le cas de la kaolinite : ce sont les forces capillaires (Gelard 2005 [4]). La matrice argileuse se présente alors comme un ensemble de particules à faciès lamellaires liées entre elles par des ponts capillaires, comme un château de sable dans lequel les grains sont liés entre eux par des ménisques d'eau.

### **Poursuite de l'analogie**

Lorsqu'on compare la terre au béton, les différences et les analogies sont généralement établies selon ce qui vient d'être évoqué ci-dessus. L'analogie principale provient du fait que ces deux matériaux sont des bétons, c'est-à-dire des matériaux composites constitués d'un squelette granulaire rigide et d'une matrice plastique. Cette matrice joue le rôle de « colle ». Dans un cas, il s'agit de l'argile et dans l'autre de la pâte de ciment durcie. Que ce soit pour la terre ou le béton, la porosité du matériau influence fortement les résistances mécaniques.

Les différences sont multiples. L'un est un matériau non transformé, naturellement prêt à l'emploi. L'autre est un matériau transformé, pour lequel tous les constituants ont été séparés, puis mélangés à nouveau. Le processus de fabrication du ciment incluant une phase de décarbonatation avec dégagement de CO<sub>2</sub> et un passage au four à 1450°C est le principal inconvénient du matériau en termes écologiques.

Mais la différence majeure provient évidemment de la prise du ciment, au cours de laquelle, en présence d'eau, une partie du ciment est transformée en de nouveaux produits. Ainsi une partie de l'eau du mélange est consommée pour former de nouvelles phases solides : le retrait de séchage dû à l'évaporation de l'eau est beaucoup moins important dans le cas du béton que dans le cas de la terre. Le mélange avec l'eau transforme le ciment de manière irréversible. Et surtout, la « colle » du béton est beaucoup plus forte que celle de la terre. Pourtant, en comparant les produits d'hydratation de la pâte de ciment et les argiles de la terre et en observant leurs microstructures, on découvre qu'au-delà de toutes ces différences, ces deux matériaux sont beaucoup plus ressemblants qu'il n'y paraît en première approche.

## *Des matières divisées*

Un mur en terre, contrairement à ce que nos sens peuvent nous faire croire, n'est jamais complètement sec. A l'équilibre hydrique, la terre contient entre 1 et 2% d'humidité (Laurent 1985 [206]). Sans cette eau, il serait impossible de construire un mur en terre : c'est à cette eau que le mur doit sa cohésion. Ainsi un bloc de terre, bien que nous le percevions comme un solide cohérent à notre échelle d'observation, est un milieu « triphasique ». A l'échelle de sa microstructure, ce matériau est composé d'une phase solide (les grains), d'une phase liquide (l'eau) et d'une phase gazeuse (l'air). L'eau se trouve en particulier « piégée » dans la matrice argileuse, dans laquelle elle sépare et elle lie les plaquettes ou les feuillets entre eux sous forme de ponts capillaires.

Van Damme, Pellenq, Delville 1998 [21], Pellenq, Van Damme 2004 [18]

Le béton est différent du matériau terre. La réaction chimique de la poudre de ciment avec l'eau semble produire un solide cohérent à notre échelle. Jusqu'à une époque très récente, une hypothèse courante était que, au cours de cette réaction d'hydratation du ciment, il se formait des liaisons iono-covalentes très fortes et à très courte portée, comme dans un cristal. Pour un non spécialiste, c'est cette conception qui prédomine : la pâte de ciment durcie est chimiquement liée. En fait, il n'en est rien. En observant la microstructure à l'échelle micro- et nanoscopique, on découvre que la continuité de la phase solide est interrompue presque partout par des molécules d'eau ou des films d'eau liquide. Ainsi le béton mis en œuvre ressemble beaucoup plus au matériau terre qu'on peut intuitivement le croire. Il est, lui aussi, un matériau granulaire divisé. A fortiori, dans le béton, comme dans la terre, l'eau (ou plus précisément la solution aqueuse) joue un rôle prépondérant. La cohésion de la pâte de ciment durcie est liée à un phénomène d'adhésion entre particules divisées comme dans le cas des argiles. Ceci a été prouvé par une expérience célèbre de Soroka et Sereda<sup>1</sup>. Ceux-ci ont préparé une poudre d'hydrates de ciment par hydratation complète de grains de ciment dans un très grand volume d'eau et filtration. Ils ont ensuite compacté cette poudre pour réaliser une éprouvette qui possédait une dureté et un module d'élasticité identiques à ceux d'un bloc de pâte de ciment durcie de même porosité préparée par gâchage. Sereda, Feldman, et Ramachandran<sup>2</sup> ont confirmé ce résultat en broyant une pâte de ciment durcie sous forme de poudre et en reformant, par compaction de cette poudre, un solide cohérent qui a la même résistance que le solide initial à porosité équivalente.

Dans la terre et dans le ciment, on observe la présence de particules liées entre elles par des phénomènes de surface. La question qui se pose maintenant est de savoir quelles sont les interactions de surfaces qui dans un cas aboutissent à un pouvoir cohésif très important et dans l'autre à une cohésion relativement faible.

---

<sup>1</sup> Soroka I., Sereda P.J., Symposium International sur la Chimie du Ciment, Tokyo, Suppl. Paper III-4, 67-73, 1968

<sup>2</sup> Sereda P.J., Feldman, Ramachandran V.S., 7<sup>e</sup> Congrès International de Chimie du Ciment, Vol 1, Rapports principaux, Paris, 1980

Analogie smectites - C-S-H

Van Damme, Pellenq, Delville 1998 [21], Viallis-Terrisse 2000 [23]

Un certain type d'argile, les smectites, présente une analogie cristallochimique et morphologique étroite avec les C-S-H, principaux hydrates de la pâte de ciment. Pourtant, elles sont loin de présenter les mêmes propriétés de cohésion. Généralement, elles présentent même un comportement opposé : en présence d'eau, elles gonflent au lieu de faire prise.

**Les C-S-H**

Le ciment Portland est fabriqué par cuisson à 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile. Le clinker obtenu est finement broyé et additionné d'une petite quantité de gypse. La composition typique du clinker est la suivante : 67% de CaO (chaux), 22% de SiO<sub>2</sub> (silice), 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 3% d'autres composés. Il contient 4 phases majoritaires, qui sont l'alite (3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S), la bélite (2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S), l'aluminate de calcium (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et le ferroaluminate de calcium (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Plusieurs autres phases comme les sulfates d'alcalins ou d'oxyde de calcium, sont présentes en quantités minoritaires. L'ajout d'eau au mélange clinker+gypse déclenche la réaction d'hydratation. Différents composés hydratés se forment au cours de cette réaction. La prise du ciment résulte de l'hydratation du constituant majoritaire du clinker (l'alite C<sub>3</sub>S) qui conduit à la formation d'une nouvelle espèce minérale : les silicates de calcium hydratés (C-S-H), l'hydrate le plus important de la pâte de ciment.

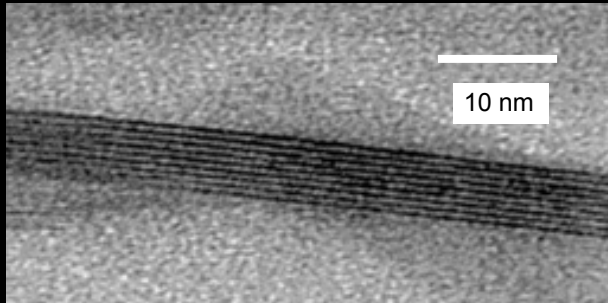
**La ressemblance des C-S-H et des argiles**

- La structure en feuillets :

L'analogie avec les smectites (et les argiles de type 2 : 1 de manière générale) se situe dans un premier temps sur le plan structural. Les deux matériaux sont constitués de feuillets répartis en 3 couches, 2 couches tétraédriques de silicates renfermant un plan d'atomes en coordinence plus élevée (7 pour le calcium pour les C-S-H, 8 pour l'aluminium ou le magnésium dans les smectites). Chaque feuillet est séparé d'un autre par un espace interfoliaire, dans lequel se logent des molécules d'eau et différents ions.

- La charge de surface négative :

Les C-S-H, comme les smectites, possèdent une charge de surface négative. Dans les smectites, la compensation de cette charge est assurée par l'adsorption de cations dans leur espace interfoliaire. Aux faibles pH, les cations compensateurs majoritaires sont les protons de la solution, progressivement remplacés par d'autres cations à pH plus basique, souvent du calcium lorsque les argiles sont à l'état naturel. Dans les C-S-H, la charge de surface est également compensée par les cations, protons ou calcium suivant l'activité en hydroxyde de calcium dans la solution d'équilibre, et par suite suivant le pH de la solution.



Sur cette image on discerne la structure lamellaire des C-S-H, principaux hydrates de la pâte de ciment.

© Van Damme



Les smectites, comme les C-S-H, présentent une structure en feuillets. Dans les deux cas, ces feuillets ont une charge surfacique négative.

© Van Damme

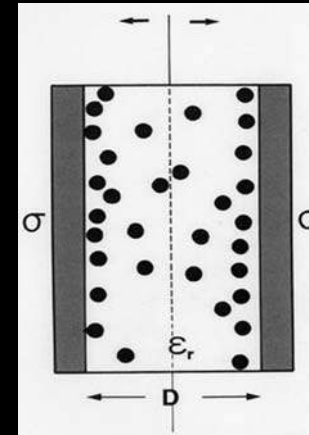
### Les interactions de surface entre feuillets de C-S-H et entre feuillets de smectite

Les hydrates de ciment et les smectites sont tous deux constitués de feuillets d'épaisseur nanométrique électriquement chargés. D'autre part, le milieu séparant ces feuillets est lui aussi d'épaisseur nanométrique, il est aqueux et contient des ions calcium hydratés (ou autre) assurant l'électroneutralité de l'ensemble.

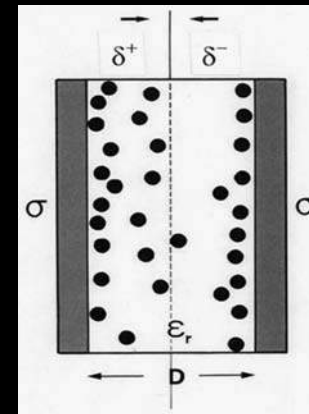
En simplifiant à l'extrême, le problème des interactions entre feuillets de C-S-H ou entre feuillets de smectites peut se ramener à celui de l'interaction de deux surfaces chargées négativement séparées par une solution aqueuse de cations.

Nous avons déjà vu dans la partie III.12 que, dans le cas des smectites, le nuage cationique confiné entre les deux surfaces chargées exerce une pression sur celles-ci qui les repousse : c'est la pression osmotique responsable du gonflement en présence d'eau. Pourtant, dans une configuration analogue, le bilan des interactions est fortement attractif dans le cas des C-S-H. On considère souvent comme allant de soit que deux couches électriques se faisant face (ici, deux surfaces négatives associées chacune à son nuage d'ions positifs) se repoussent, pour des raisons électrostatiques. En fait, l'évidence n'est qu'apparente. Pour comprendre pourquoi il faut considérer l'aspect dynamique et fluctuant des ions et des molécules d'eau. Les cations entre les surfaces sont en mouvement permanent. Si en première approche, les deux moitiés d'un tel système sont bien symétriques en moyenne, une « photographie » instantanée montrerait un déséquilibre des charges entre les deux moitiés du système. Dans certaines conditions, et c'est le cas pour les C-S-H, ce déséquilibre instantané de la distribution des charges peut conduire à des forces attractives très fortes : ce sont les forces de corrélation ionique de double-couche.

Le calcul des interactions entre surfaces uniformément chargées baignant dans l'eau en présence d'ions, et en prenant en compte l'aspect dynamique, a été réalisé numériquement par simulation Monte Carlo (Pellenq, Delville, Van Damme 1997 [19]). Cette étude de l'influence de la densité de charge et de la nature des ions de la solution montre que, effectivement, dans certaines conditions (lorsque la densité de charge surfacique est suffisamment élevée et en présence de cations divalents), les fluctuations ioniques pouvaient devenir très importantes et provoquer un bilan des forces attractif.

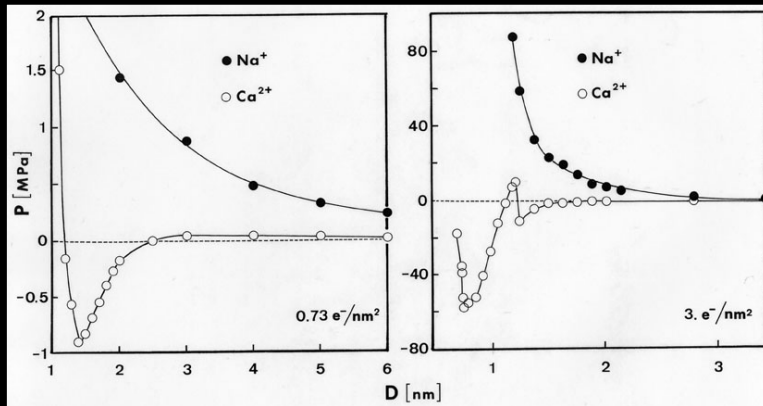


*On considère souvent comme allant de soit que deux couches électriques se faisant face (ici, deux surfaces négatives associées chacune à son nuage d'ions positifs) se repoussent, pour des raisons électrostatiques. C'est le cas pour les smectites, pour lesquelles le nuage cationique confiné entre les deux surfaces chargées exerce une pression sur celles-ci qui les repousse : c'est la pression osmotique responsable du gonflement en présence d'eau. © Van Damme*



*Pourtant dans le cas des C-S-H, le bilan électrostatique est fortement attractif. Pour comprendre pourquoi il faut considérer l'aspect dynamique et fluctuant des ions et des molécules d'eau. Les cations entre les surfaces sont en mouvement permanent. Si en première approche, les deux moitiés d'un tel système sont bien symétriques en moyenne, une « photographie » instantanée montrerait un déséquilibre des charges entre les deux moitiés du système qui peut conduire à des interactions attractives très fortes*

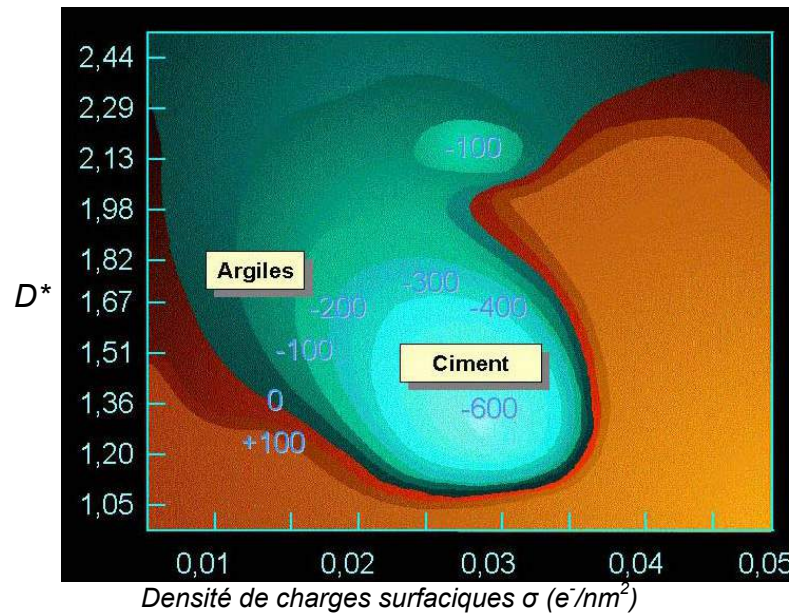
© Van Damme



Les courbes ci-contre montre l'évolution du bilan des interactions électrostatiques pour des densités de charges voisines de celles des smectites (à gauche) et de celles des C-S-H (à droite). Dans les deux cas, la présence d'un cation monovalent ( $\text{Na}^+$ ) dans la solution interfoliaire induit un bilan répulsif (pression positive) alors que la présence de cations divalents ( $\text{Ca}^{2+}$ ) induit un bilan attractif (pression négative). Ce résultat est à rapprocher de la pratique courante qui consiste à stabiliser certains sols à la chaux : la présence de cations  $\text{Ca}^{2+}$  en proportion suffisante peut participer à la réduction du gonflement du à la pression osmotique. Les pressions attractives obtenues restent cependant bien plus faibles que dans le cas du ciment. © Van Damme

Les courbes ci-contre montre l'évolution du bilan des interactions électrostatiques pour des densités de charges voisines de celles des smectites (à gauche) et de celles des C-S-H (à droite). Dans les deux cas, la présence d'un cation monovalent ( $\text{Na}^+$ ) dans la solution interfoliaire induit un bilan répulsif (pression positive) alors que la présence de cations divalents ( $\text{Ca}^{2+}$ ) induit un bilan attractif (pression négative). Ce résultat est à rapprocher de la pratique courante qui consiste à stabiliser certains sols à la chaux : la présence de cations  $\text{Ca}^{2+}$  en proportion suffisante peut participer à la réduction du gonflement du à la pression osmotique. Les pressions attractives obtenues restent cependant bien plus faibles que dans le cas du ciment.

Ainsi la différence entre la prise du ciment et le gonflement des smectites semble provenir d'une simple différence de densité surfacique de charge des particules solides et de la nature et de la concentration des ions contenus dans la solution interfoliaire.



Courbes d'iso-pression entre deux murs chargés séparés par de l'eau et des ions calcium, en fonction de la distance « normalisée » entre les murs ( $D^*$  représente la distance réelle divisée par le diamètre ionique des ions hydratés) et de la densité surfacique de charge : pressions positives s'il y a répulsion, pressions négatives s'il y a attraction. © Van Damme

Les conditions favorables à l'émergence d'une véritable science du matériau terre sont réunies. On a la chance que ce domaine d'étude soit « porté » par d'autres secteurs industriels. C'est donc dans une approche hautement transdisciplinaire que se trouve la solution d'une meilleure compréhension physique du matériau. La similitude du béton de terre avec le béton de ciment laisse songeur. Une connaissance précise de la microstructure du matériau et des forces en jeu à différents niveaux d'échelle permettrait certainement de cibler et d'améliorer ses performances. Tout ce qui vient d'être évoqué est significatif de la nécessité d'un changement de mentalité au niveau de la recherche. Un rapide point permet de cibler les atouts et les faiblesses de la connaissance sur le matériau :

- Les études portant spécifiquement sur le matériau terre sont rares, disparates et manquent de cohérence globale, de sorte qu'elles ne permettent pas d'élaborer un champ de connaissance unifié. L'accent jusqu'à présent n'était pas assez mis sur la nécessité d'établir des lois de comportement du matériau.
- La mécanique des sols a fourni de nombreux essais d'identification des terres et d'essais mécaniques de terrain et de laboratoire. Elle porte une vision technicienne du matériau plus qu'une compréhension physique, bien qu'elle ait le mérite de considérer la terre comme un milieu triphasique (une phase solide, une phase liquide, une phase gazeuse) : elle observe le matériau à une échelle inférieure.
- Grâce à la géologie, les constituants de la terre sont très bien identifiés, jusque dans les spécificités de la structure cristalochimique des feuilletés argileux. On connaît en outre les mécanismes par lesquels ils se forment et se transforment, mécanismes corrélés à des situations géographiques et topographiques qui permettent d'estimer la présence de telles ou telles espèces minérales en fonction du lieu, du relief et du climat.
- Les argiles sont couramment employées dans l'industrie. Ce qui laisse entendre une connaissance précise des propriétés de nos minéraux argileux et des procédés employés pour modifier leurs propriétés (charge surfacique, état d'agrégation ou de dispersion, etc.).
- La terre est constituée de grains et de colloïdes, deux des champs de la physique contemporaine en plein essor à l'heure actuelle. Les moyens alloués par des industries d'origines thématiques variées pour faire progresser la recherche dans ces domaines sont considérables. La modélisation du comportement des milieux granulaires avance.
- Le béton de ciment est un « frère jumeau » de la terre, ce qui constitue un réel atout dans la compréhension des mécanismes se déroulant au sein du matériau.

Il ne reste plus qu'à reconstituer le puzzle.





## **V – BILAN ET PERSPECTIVES**

# 1. Approfondir et élargir le contenu

Le fruit du travail sur le projet « Grains de Bâtisseurs » a débouché sur la réalisation d'un atelier pédagogique contenant une centaine d'expériences pour découvrir la matière en grains. Le fil directeur « la matière en grains, de la géologie à l'architecture » n'est que partiellement illustré. L'objectif étant, au travers d'une grille de lecture physique des phénomènes se déroulant au sein de la matière en grains, de faire apparaître clairement le lien entre géologie, paysage et architecture. Le projet tel qu'il existe aujourd'hui met surtout l'accent sur l'aspect « matière », mais il manque encore de lisibilité pour ce qui concerne le lien « de la géologie à l'architecture ». Le contenu doit être approfondi dans ce sens-là.

D'autre part, la méthode de vulgarisation faite autour de la matière en grains basée sur l'utilisation d'expériences contre-intuitives peut-être élargie à la matière colloïdale. Ce qui semble judicieux pour aller plus loin dans la description du matériau terre (des argiles plus particulièrement).

## Mieux faire apparaître le lien entre la géologie et l'architecture

### Géologie et paysages : histoire des grains

La partie III.2 intitulée « histoire de grains voyageurs » n'apparaît pas dans l'atelier pédagogique. Il faut donc imaginer une mise en scène du contenu qu'elle décrit. A travers cette histoire géologique, il s'agit de faire découvrir que le cycle humain de la construction s'inscrit dans des cycles géologiques plus vastes. Dans ce cadre, une interface écran et un travail sur l'image corrélée aux manipulations seraient particulièrement enrichissant pour le projet. L'écran peut servir à élargir le champ, faire comprendre la portée d'une expérience. Elle peut montrer ce qui ne peut l'être avec les manipulations. Pas de manière « succédanée » mais de manière plus intense, magnifiante : être une fenêtre sur le monde ouverte un bref instant pour faire comprendre tout ce qu'on a survolé avec cette si petite expérience. Au fil des expériences, on pourrait découvrir certains phénomènes comme le transport des grains (certaines vues du ciel des deltas de grands fleuves chargés en limon sont particulièrement impressionnantes, les tempêtes de sables sont parfois visibles sur les images satellites, elles transportent le sable du Sahara sur des milliers de kilomètres et forment des sols appelés « loess<sup>1</sup> », etc.). Ceci permettrait aussi l'exploration de certaines typologies de paysages, d'explorer certains déserts et les différentes formes de dunes, etc. En somme, une partie importante du discours porté par le projet ne peut être illustré par les manipulations. L'image, en tant qu'invitation au voyage, pourrait palier à ce manque.

### Architecture et construction : les hommes utilisent ces grains pour construire

De même l'idée que l'homme utilise ces grains pour construire peut faire l'objet d'un travail d'illustration particulier, lui aussi corrélé à l'image, afin de présenter ces « grains de bâtisseurs » : terre, béton, sable, graviers, pierres, etc. Cette présentation peut se faire au travers d'un panorama de réalisations des hommes qui les utilisèrent et les utilisent encore aujourd'hui. On estime qu'au minimum 30% de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17% des constructions inscrites sur la liste du 'patrimoine culturel mondial' de l'UNESCO sont des oeuvres architecturales en terre. Dans de nombreux cas, à des centaines de kilomètres à la ronde, les hommes ne disposent pas d'autres matériaux pour construire. Parfois, il n'en dispose même pas. Ainsi, des pans entiers de la grande muraille de Chine sont faits de sable. Dans les pays développés, le matériau le plus utilisé est un autre matériau granulaire : le béton de ciment. Tout ceci peut être décrit et être l'occasion de redécouvrir le génie des bâtisseurs d'hier et d'aujourd'hui. Il s'agit là aussi, au fil des expériences, de mieux faire

---

<sup>1</sup> Loess : Variété de limon, sans stratification, sans doute d'origine éolienne, dont la fertilité est liée à la richesse en calcaire.

apparaître l'implication de certains phénomènes dans la construction (ségrégation, chaînes de forces, etc) et le lien avec l'architecture (effets de voûtes et systèmes constructifs par exemple).

## **De la matière en grains à la matière colloïdale**

Dans le cadre de ce projet, la description des argiles est délicate, puisque ces particules microscopiques sont à la limite de la physique des grains et d'un autre champ d'étude : la physique des colloïdes. L'atelier pédagogique décrit essentiellement l'importance des forces capillaires dans la cohésion du matériau terre, établissant ainsi un parallèle singulier entre la terre et le château de sable. Il semble cependant opportun de faire apparaître une différence plus nette entre les argiles et les autres grains. De la même façon que sont décrit les grands principes de la physique des grains, il est possible de présenter les grandes lignes de la physique des colloïdes pour faire découvrir ces étranges états de la matière qui sont gouvernés par l'état de division ou d'agrégation des particules. Dans un premier temps il serait intéressant de faire apparaître l'importance de la charge surfacique des particules et de l'influence de certains cations dans la solution aqueuse du mélange argile-eau sur les propriétés macroscopiques de la matière. Ceci permettrait d'introduire les différences entre la prise du ciment et le gonflement des smectites. Dans un deuxième temps, il serait intéressant de montrer l'influence de certaines protéines et polymères naturels sur les propriétés des argiles. Ce thème permettrait d'aborder la problématique de la stabilisation des terres qui permet d'augmenter la cohésion ou de diminuer la sensibilité à l'eau.

## 2 - Les prochaines étapes du projet « Grains de Bâtisseurs »



*Actuellement atelier pédagogique à l'attention des collèges et des lycées, le contenu scientifique mis en scène permet d'envisager d'adapter le projet afin de cibler d'autres publics, d'autres lieux et d'autres supports de médiation..*

« Grains de Bâtisseurs » est actuellement un atelier pédagogique à l'attention des collèges et des lycées. Cependant, le contenu scientifique qu'il met en scène, par son aspect fortement pluridisciplinaire, permet d'envisager d'adapter le projet afin de cibler d'autres publics, d'autres lieux et d'autres supports de médiation. A travers les différentes formes sous lesquelles peuvent se présenter le projet, il faut repenser la forme et le contenu pour des cas où les publics, le temps de présentation et l'interactivité sont différents.

### Le DVD

Pour élargir la diffusion de la connaissance, la création d'un DVD d'accompagnement des expériences permettrait aux enseignants de reproduire les expérimentations, de les décrire et de les commenter en expliquant scientifiquement les propriétés spécifiques à la matière en grains et les mécanismes qui interviennent dans ses comportements. Ce support pourrait élargir le champ à la géologie d'une région, sa géographie et ses cultures constructives. Encore une fois, la simplicité du matériel est importante afin que les expériences puissent être reproduites avec un minimum de moyens.

### La valise (miniaturisation pour un enseignement sur terrain)

Le matériel utilisé par grains de bâtisseurs est assez conséquent (5 palettes environ). La version « atelier pédagogique » peut être considérablement réduite pour une version miniaturisée de salle de classe pour plusieurs raisons. En premier lieu, une grande partie du matériel et de la matière est actuellement utilisée pour permettre la reproduction en série des manipulations. La version 'atelier pédagogique' est prévue pour accueillir des groupes les uns après les autres. Elle est donc pensée pour qu'à la fin d'une visite, l'ensemble des « remises à zéro » des expériences soient réalisées en 15 minutes. Pour les expériences qui ne permettent pas de réutiliser la même matière (sable, poudre ou billes mouillées par exemple), il faut prévoir des stocks de matière et un ensemble de bacs pour la stocker, et la séparer en matière utilisable et utilisée. D'autre part, dans une opération de type « Grains d'Isère<sup>1</sup> », une partie du matériel concerne la maintenance en cas d'éventuel accident, le tamisage des grains salis après les manipulations par les groupes et le nettoyage de l'ensemble, etc. Pour une opération ponctuelle, tout ce matériel et cette matière sont superflus.

<sup>1</sup> Le festival « Grains d'Isère » explore de manière multidirectionnelle la matière Terre et la construction en pisé. Il se déroule chaque année aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau ce qui permet de présenter et surtout de réaliser sur place et à grande échelle, des prototypes, des installations, des expériences, des démonstrations, des animations et des performances, toutes ouvertes au public.

La plupart des manipulations nécessitent très peu de matériel pour être mises en œuvre. Là encore, une sélection appropriée des expériences permettrait de réduire considérablement la mallette en conservant la plus grande partie du contenu pédagogique. Ceci est d'autant plus vrai si on attache peu d'importance à la présentation et à l'ergonomie (les différents supports deviennent inutiles...). Chaque manipulation peut être repensée afin d'utiliser un minimum de matière et de matériel. A titre d'exemple, le banc de photoélasticimétrie, particulièrement lourd et encombrant, est inutile : l'expérience fonctionne autant à la lumière du soleil qu'à la lumière de la lampe à sodium. Un effort peut être fait sur l'allègement des matériaux utilisés. Enfin, les mêmes grains et le même matériel peuvent être utilisés pour réaliser plusieurs expériences différentes (les vaguelettes de poudre et la plaque vibrante, etc.). On peut imaginer une version édulcorée de « grains de bâtisseurs » qui voyage plus facilement.

## **L'exposition itinérante**

La valeur esthétique et attrayante des manipulations conduit naturellement à envisager une « version exposition » de l'atelier pédagogique.

Cette version demande la création d'un matériel plus soigné, sans toutefois tomber dans le piège des nouveaux musées où le design des objets fait oublier le phénomène observé et sépare le public du savoir et de la matière. Il n'est pas dans la philosophie du projet de limiter l'interaction avec le public au fameux bouton-presseur que l'on retrouve dans de nombreuses manipulations automatisées des musées scientifiques. Cependant, il est évident qu'en l'absence d'un manipulateur, les possibilités de contact avec la matière sont plus limitées pour des raisons pratiques.

Dans le cas d'une visite sans animateur, les manipulations doivent être sélectionnées parmi celles qui ne nécessitent pas de mises à zéro ou pour lesquelles celle-ci est particulièrement simple et évidente. Ceci est un travail particulièrement délicat. Certaines expériences doivent être repensées pour s'inscrire convenablement dans ce cadre. Un travail conséquent doit être accompli autour des textes explicatifs qui accompagnent les expériences. Ils doivent être particulièrement clairs et synthétiques. Leur importance est capitale puisqu'ils remplacent à eux seuls l'animateur, dont on a vu qu'il joue un rôle primordial dans le déroulement d'une expérience contre-intuitive.

L'idéal est donc de former des animateurs afin que, en complément de l'exposition, ils assurent des visites commentées à des horaires prévus à cet effet. La part des expériences nécessitant des mises à zéro ou des manipulations trop complexes peut être présentée lors de ces visites et rangée à part à la fin de la visite.

Au niveau du contenu, il serait utile de mettre un accent plus prononcé sur l'aspect esthétique des expériences. Les résultats d'une partie d'entre elles peuvent être exposés de manière figée, sans nécessairement faire appel à la manipulation. On peut aussi imaginer des expériences dont on augmente la taille et la durée, de sorte que le public puisse les observer, sans pour autant avoir à les manipuler.

## **La conférence itinérante**

La visite de l'atelier pédagogique ne peut se faire qu'avec de petits groupes de personnes. La mise en place d'une conférence permettrait de présenter le contenu du projet à un grand nombre de personnes. Cette version nécessite une interface vidéo de qualité qui permette de retransmettre en temps réel les manipulations sur grand écran. Cette forme, bien qu'extrêmement pratique pour une première approche ou une présentation d'ensemble du projet, reste aussi extrêmement limitée en terme d'interactivité et de contact avec la matière.

## **L'enseignement supérieur**

L'atelier pédagogique a quelque chose de frustrant. Il y a matière à approfondir énormément le contenu de « Grains de Bâisseurs », en particulier sur des questions liées à la géologie, aux problèmes industriels ou à l'architecture. D'où l'intérêt de repenser le projet en tant que cours d'enseignement supérieur, en particulier pour les étudiants en école d'architecture et pour les élèves ingénieurs en génie civil.

Là encore, il est utile de répéter qu'une expérience contre-intuitive ne constitue pas un enseignement à elle seule. Elle ne peut venir qu'en appui à des formes d'enseignement traditionnelles pour aiguïser la curiosité de l'apprenant et donner du « sens » au savoir enseigné. Le projet tel qu'il existe actuellement se marierait parfaitement à un cours magistral éventuellement illustré par un ensemble d'images et de vidéos destinées à élargir et approfondir le champ des connaissances. La forme 'Travaux Pratiques', où l'étudiant manipule seul les expériences, est à éviter en vertu de l'importance du rôle du médiateur dans ce type de présentation.

Au-delà de la transmission d'un savoir, l'accent peut être mis sur la transformation des conceptions de la science, de la matière et du monde de l'apprenant. Enormément de choses peuvent découler de cette prise de conscience.

## **Séminaires pour professionnels du BTP**

Lors de l'événement « Grains d'Isère 2005 », nous avons été surpris du retour enthousiaste de plusieurs spécialistes (enseignants et ingénieurs) du BTP. Ils semblaient impressionnés par la clarté de l'exposé et des manipulations grâce auxquels, sans utiliser une seule fois de vocabulaire technique compliqué, il était possible de mettre en lumière des mécanismes parfois difficiles à expliquer dans des formations destinées à des professionnels. L'idée d'ouvrir l'atelier pédagogique aux personnels de grandes entreprises du BTP ou du génie civil sous forme de séminaires de formation est peut-être à envisager.

### 3 – Genèse d'un grand projet

La manière dont « Grains de Bâisseurs » aborde la matière conduit naturellement à penser pouvoir reproduire l'expérience pour d'autres matériaux tels que le bois, le métal, les polymères, etc. Etrangement, la matière est aujourd'hui mal enseignée, alors même qu'elle apporte aux apprenants (quelque soit leur âge) des clés fondamentales de compréhension de notre quotidien. Face à l'originalité et aux potentialités d'une telle démarche, on peut imaginer un lieu exclusivement consacré à l'exploration de la matière s'inspirant et approfondissant le modèle que constitue « l'embryon » du projet « Grains de Bâisseurs ».

#### Brève histoire de la muséologie scientifique

Guédon 1996 [182], Raichvarg 2005 [187], Schiele 1989 [188] et 1992 [189]

La muséologie scientifique trouve ses premières racines dans les cabinets de curiosité qui se sont multipliés en Europe à partir du XVII<sup>ème</sup> siècle. En France, le cabinet du Roi, au détour de la révolution française, se transforme en Muséum National d'Histoire Naturelle. La collection passe progressivement du goût des curiosités étranges et rares à l'établissement d'ensembles logiques et cohérents avec la constitution des sciences de la nature autour de la classification systématique. Bibliothèque de spécimens naturalisés, le musée d'histoire naturelle est alors un lieu de recherche ouvert à un public éclairé, strictement organisé par les principes de l'étude scientifique.

A ces thèmes fondateurs succède une première variante importante qui se caractérise par l'utilisation de collections à des fins pédagogiques. Par le biais de l'enseignement généralisé, le musée va prendre contact avec des publics plus élargis. Les écoles vont se doter de collections particulières, qui prendront dans certains cas le nom de « musée scolaire ». Les collections favorisent les sciences naturelles, la botanique, la zoologie et la minéralogie. Les sciences physiques se révèlent à travers les instruments de laboratoire dont on fait également collection.

Vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'expansion des expositions industrielles, d'abord nationales, puis internationales, place au tout premier plan la notion de spectacle. Elles influencent la présence des loisirs et du ludique au centre des musées techniques. Le Deutsches Museum de Munich se présente comme le fruit du mariage inattendu entre l'exposition internationale et la muséologie scientifique. A l'inverse des collections statiques antérieures, il montre des ensembles d'opérations ou de transformations propres à diverses activités industrielles, sortes de mini-spectacles que le visiteur déclenche en appuyant sur un bouton. L'ensemble repose sur l'utilisation de l'énergie électrique, toute récente, et du moteur électrique, encore plus récent. Désormais, une partie essentielle de l'effort muséologique va dépendre de la mise en scène technique des démonstrations scientifiques. Du même coup, la taxinomie et la typologie qui dominaient l'ordre muséologique laisse place à des présentations multiples. Le nouveau mariage démonstration-spectacle voit ses effets s'intensifier au lendemain de la deuxième guerre mondiale avec le Musée des Sciences et de l'Industrie de Chicago. Animateurs, mise en scène d'expériences particulièrement spectaculaires (électricité statique par exemple) se conjuguent pour donner au « Science Center » son allure séductrice, ludique et joyeuse où toute la famille ainsi que le touriste peuvent aller se délasser sous l'alibi d'activité culturelle.

Du même coup, au sein du dispositif muséal, figure la montée en puissance du visiteur et de l'interactivité. Avec leur ouverture en 1969, l'Exploratorium de San Francisco et le Centre des sciences de l'Ontario font du musée un lieu de médiation des connaissances sollicitant la participation active du visiteur, placé volontairement au centre du dispositif. Ce mouvement correspond à une approche constructiviste. Elle suit les besoins spontanés et les intérêts du visiteur et prend appui sur ses activités. Pour cela, elle essaie de favoriser sa libre expression, sa créativité et son savoir-être. Elle met en avant une découverte autonome par le visiteur et l'importance des tâtonnements dans un processus de construction du savoir. L'Exploratorium de San Francisco a été un modèle au point de produire des "clones" dans le monde entier. La Cité des Sciences et de l'Industrie s'en est inspirée ainsi que les CCSTI ouverts sur l'impulsion de la nouvelle politique de culture scientifique lancée dans les années 1980.

Malgré l'engouement qu'il a suscité dans les années 1980 et 1990 et qu'il suscite encore ici ou là, ce modèle muséologique est aujourd'hui remis en question. L'histoire des techniques muséologiques est profondément corrélée à l'histoire des techniques. Face à un projet muséologique, le concepteur dispose de deux routes à suivre, l'une technique, l'autre conceptuelle. Elles ne sont pas mutuellement exclusives, mais si la route technique prend le pas sur la conceptuelle, l'innovation muséale tend à se réduire à l'adjonction de techniques à la fine pointe des possibilités. Depuis une dizaine d'années, les possibilités ouvertes par l'informatique nourrissent une quête toujours plus poussée de l'interactivité que l'on a vu poindre dès le Deutsches Museum. De par sa nature informationnelle et non plus matérielle, ce nouvel ensemble technique a laissé entrevoir la possibilité de produire un véritable musée virtuel, sans mur, accessible depuis n'importe quel lieu. Le genre d'exposition interactive proposée se présente sous la forme d'un jeu. Il s'agit par exemple de faire saisir au visiteur la complexité des choix sociaux liés à des problématiques techniques. Il est invité à jouer temporairement le rôle d'un maire chargé de résoudre un problème d'eau dans une ville. Pour tout choix qu'il effectue, augmentation du prix de l'eau, rationnement, recherche de nouvelles sources d'approvisionnement, etc., des conséquences économiques, sociales, politiques interviennent (opposition de la population, mouvements d'industrie, chômage, etc.). Face à ce mode de communication fabriqué par une petite élite, le visiteur est assigné au rôle passif de l'écoute ou de l'apprentissage, mais n'a aucun moyen de contester, répondre et encore moins de polémiquer sur les messages reçus : de nouvelles barrières apparaissent dans l'impossibilité d'échange et de dialogue. C'est à cette dissymétrie que se rattachent les vrais murs du musée : le musée ne perd pas ses murs sous couvert de délocalisation.

Les rapports entre sciences et publics ne peuvent plus se satisfaire du dispositif de vulgarisation. On s'oriente vers une nouvelle génération de musée des sciences, qui ne veut plus se penser comme outil complémentaire de l'école et tend à "être appréhendé comme outil de culture". L'exposition thématique et la démarche d'interprétation sont les dispositifs phares de ce modèle muséologique : ils sont tous deux considérés comme capables de transmettre un message global et accessible au plus grand nombre et tous deux s'attachent à reconnaître et à prendre compte les expériences préalables des visiteurs. L'objet patrimonial retrouve une place, même s'il est intégré dans un ensemble de médias diversifiés. Ce ne sont plus seulement les sciences dures qui nourrissent le contenu ; les sciences humaines et sociales sont désormais convoquées. La science n'est plus seulement présentée à travers ses résultats ou ses méthodes, mais aussi dans son fonctionnement concret et dans son contexte social, économique, politique, etc. Ce musée a moins à cœur de transmettre des connaissances que d'interroger les sciences. Il veut le faire non seulement pour les publics, mais aussi avec les publics. Il veut être un "musée forum", un "musée citoyen", un "musée questionnement", qui s'impliquerait dans les débats de plus en plus nombreux sur les sciences. Il se place clairement sous la référence du musée de société ou de l'écomusée.



## Un musée vivant d'exploration de la matière

*« Nos enfants ont perdu presque toutes les occasions d'observer la nature. Voir comment vole une hirondelle, ou comment marche une chenille. Et depuis dix ans, ils sont surtout collés à des écrans. A l'Ecole [Supérieure] de Physique et de Chimie [Industrielles], nous nous donnons beaucoup de mal pour corriger cette malformation. [...] Mais nous sentons bien que l'action doit être menée à un âge beaucoup plus jeune, vers les collèges et les lycées. »<sup>1</sup>*

**Pierre-Gilles De Gennes<sup>2</sup>**

Dans la famille de la muséologie scientifique, l'Exploratorium de San Francisco est un projet hors norme. A ce titre, il constitue une source d'inspiration pour ce qui pourrait devenir une sorte de musée vivant d'exploration de la matière. L'Exploratorium se présente comme un immense hangar dans lequel les différentes manipulations sont installées dans une scénographie très ouverte avec peu de cloisonnements ou de salles distinctes. L'endroit est grand, d'aspect brut (sols en béton, poutrelles métalliques grises, préfabriqués de chantier pour l'administration, etc.), sonore, bruyant (ce qui est renforcé par la zone cafétéria, simplement séparée des installations par des cordes symboliques). Il ressemble plus à une usine qu'à un musée, contrairement à la Cité des Sciences et de l'Industrie de la Villette, d'apparence nettement plus aseptisée. Les explications textuelles sont limitées au minimum, quand il y en a. Des œuvres d'artistes, mélangées au reste des manipulations, ne sont pas identifiées en tant que telles, sauf exception.

### Lever le voile sur la matière

Jensen 2001 [233], Paulin 2004 [237]

Le projet d' « Exploratorium de la matière » diffère de l'Exploratorium de San Francisco sur quelques points. D'abord par son thème, qui concerne exclusivement la matière pour en faire connaître la nature intrinsèque, avec une préférence pour celle qui joue un rôle dans les matériaux de structure. Actuellement, aucun musée scientifique n'est axé exclusivement sur ce thème. La façon de l'aborder, qui consiste à « lever le voile sur la matière », est, elle aussi, originale.

Pour le physicien et le chimiste, la matière est la substance des choses. Pour le constructeur, c'est la matière première non travaillée, dans l'état où elle est disponible avant d'entrer dans un cycle de fabrication de produit (ex : les roches, la terre, le pétrole, le minerai de fer, l'arbre, etc.) (Paulin 2004 [237]). Cette matière prélevée dans le milieu naturel est progressivement élaborée pour devenir un matériau destiné à la construction, puis un produit répondant à un usage dans le bâtiment. Dans un monde où nous utilisons et consommons des produits sans vraiment connaître leur nature et ce qui les a précédé, il semble judicieux de donner des éléments de compréhension de la nature intrinsèque et de l'origine de la matière.

---

<sup>1</sup> Citation tirée de la préface de *Sables émouvants : la physique du sable au quotidien* (Duran 2003 [34])

<sup>2</sup> Physicien français, Prix Nobel de Physique 1991

Nous percevons ordinairement les différences des matériaux par leurs qualités sensorielles telles que la couleur, le grain, la texture, la sonorité, la réactivité au toucher, l'odeur, etc (Paulin 2004 [237]). Pourtant, si nos sens nous permettaient de « voir au cœur de la matière », nous découvririons une diversité de formes, d'édifices, de structures internes beaucoup plus vaste que ce que nous pouvons imaginer. C'est cette pluralité « d'architecture » de la matière qu'il serait intéressant de mettre en lumière. La matière se compose d'éléments de différentes tailles, de différentes formes, de différents types qui sont liés entre eux par différents « assemblages ». Construire, c'est agréger ensemble (latin : cum-struere). La matière est donc construite (Paulin 2004 [237]).

Les diverses « stratégies » qu'elle adopte pour résister aux contraintes extérieures sont souvent très différentes. Dans les métaux, les atomes sont liés entre eux par des liaisons chimiques extrêmement fortes. Alors qu'ils étaient encore mal connus, les cristallographes prévoient des résistances à la déformation beaucoup plus élevées que celles obtenues dans la réalité. On a découvert par la suite que ces propriétés sont fortement limitées par la présence de défauts dans la matière. A l'inverse, la résistance du bois, dont les molécules sont liées entre elles par des liaisons beaucoup plus faibles, repose sur une organisation atomique très complexe. Ce matériau possède plusieurs types de structures à différentes échelles : c'est l'astuce qu'a trouvé la nature pour fabriquer un matériau qui, à poids égal, est aussi résistant que les meilleurs métaux (Jensen 2001 [233]). Par exemple, on obtient une bonne résistance à la cassure en mélangeant des fibres rigides avec une matrice plus molle. Le cas des bétons est lui aussi très étonnant : un béton est un ensemble de grains de tailles très dispersées qui ne sont pas liés entre eux par des liaisons chimiques. C'est un matériau divisé ! Pourtant, on est capable aujourd'hui d'agencer tous ces grains entre eux dans des configurations spatiales qui permettent d'approcher la résistance de l'acier.

Il s'agit donc d'une part de permettre de tisser des liens entre la microstructure de la matière et les problématiques structurelles à l'échelle d'un bâtiment et d'autre part de mettre en lumière la nature intrinsèque de la matière et de ses mécanismes internes pour comprendre clairement comment elle fonctionne. Il faut effacer les zones d'ombre vis-à-vis desquelles l'apprenant ne pense pas à se poser des questions. En donnant une vision limpide de ce qu'est la matière et des processus qui se déroulent en son sein, on permet une plus grande clarté d'esprit du futur bâtisseur. Dans le meilleur des cas, on pourrait espérer qu'elle se transforme en « clairvoyance » et lui permette d'imaginer ses propres solutions toutes les fois où ses propres connaissances sont insuffisantes.

### **Vulgarisation, enseignement, recherche et application**

Dans ce projet réside la volonté de faire plus que de la vulgarisation, en permettant l'approfondissement des connaissances afin de constituer un véritable enseignement, et ceci à plusieurs niveaux (écoles, collèges, lycées, enseignement supérieur). Le choix de l'environnement didactique mis en place est, évidemment, au centre du projet. Le thème principal (la matière) doit être mis en valeur. Une réflexion particulière doit être menée afin que le matériel, le design, l'architecture du lieu ne prenne pas le dessus sur la matière que l'on observe. Entre l'atelier (lieu de pratiques) et le musée (lieu d'informations et de connaissances), un équilibre subtil est à trouver. L'utilisateur du lieu doit alternativement être en situation d'écoute et d'expérimentation. L'interactivité est recherchée. Toutefois le mot « interactif », dans le langage de la muséologie contemporaine, désigne trop souvent une interaction avec le virtuel en plaçant le visiteur dans la sphère de l'informationnel et du communicationnel. Dans notre vision, il s'agit d'une interaction avec la matière et le réel. Un basculement doit s'opérer entre la fascination pour la machine, l'informatique, le « high-tech », le virtuel et les techniques et la fascination pour la matière, la nature et le réel dans ce qu'ils ont d'étrange, de surprenant, voire

d'incompréhensible. Tout repose sur l'art de rendre émouvant l'observation du commun et de l'ordinaire. Le musée scientifique, ainsi envisagé, se rattache quelque part à l'idée d'un renversement des valeurs.

L'édification d'un tel projet s'accompagne d'une capitalisation des connaissances autour de thématiques aussi variées que la physique des grains, la physique des colloïdes, la géologie et l'architecture. Il permet un balayage du paysage actuel de la recherche et d'identifier les problématiques communes entre le matériau terre et d'autres champs de connaissances.

Il est probable qu'un tel projet, axé sur l'émerveillement pour la matière dans ce qu'elle a de plus simple et de plus commun (l'eau, la terre, le sable, le bois, etc.), porte en lui une nouvelle conception de l'idée de progrès et de ce qui est « à la pointe ». Il serait particulièrement intéressant qu'il amène à repenser l'idée d'innovation dans un cadre où celle-ci ne repose plus sur la découverte d'un matériau de synthèse aux caractéristiques exceptionnelles, mais une innovation qui consiste en une redécouverte du fonctionnement et du génie du naturel. Ce lieu pourrait donner la possibilité aux visiteurs de mettre en réseau (à l'inverse d'un cloisonnement) des connaissances axées sur le génie de la simplicité, pour produire d'une autre façon, innovante dans sa simplicité et sa rationalité.





## Conclusion

« Grains de Bâtisseurs » est donc un projet en marche. L'atelier pédagogique tel qu'il se présente aujourd'hui n'en est que la première étape. Beaucoup de chemin reste à parcourir jusqu'à la création d'un lieu qui verra la concrétisation de cet ensemble de démarches et de connaissances où physique, géologie et architecture se rejoignent. En attendant, c'est une sphère de savoirs pluridisciplinaires corrélée à un ensemble de techniques de médiation, permettant de s'adresser à des publics variés, qui se construit aujourd'hui. Il faut encore approfondir le contenu et le décliner sous d'autres formes pour progressivement élargir l'objectif de vulgarisation scientifique à celui de l'enseignement. En parallèle, au fur et à mesure de l'édification de ce projet et de la capitalisation de savoirs qu'il implique, la démarche présentée ici est emblématique de la volonté, au niveau de la recherche, d'aborder la compréhension du matériau terre avec une approche fondamentale. De là, un rejaillissement vers de nouvelles applications est attendu. « Grains de Bâtisseurs » tend à se placer au centre de ces quatre objectifs de vulgarisation, d'enseignement, de recherche et d'application.



# Bibliographie

## Le matériau terre

- [1] **Bonneau M., Souchier B.,** *Pédologie, 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, **1979**
- [2] **Coussy O., Fleureau J.M.,** *Mécanique des sols non saturés*, Hermès, **2002**
- [3] **Fontaine L.,** *Cohésion et comportement mécanique de la terre comme matériau de construction*, Mémoire de DPEA, **2004**
- [4] **Gelard D.,** *Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation*, Thèse, LTHE, directeurs de thèse : Laurent J-P., Van Damme H., **2005**
- [5] **Gelard D., Zabat M., Van Damme H., Laurent J-P., Dudoignon P., Pantet A., Houben H.,** *Nature and Distribution of Cohesion Forces in Earth-based Building Materials*
- [6] **Houben H., Guillaud H.,** *Traité de construction en terre*, Ed. Parenthèses, **1995**
- [7] **Houben H., Van Damme H.,** *The cohesion of earth : a multifactorial property*, **2004**
- [8] **Houben H., Balderrama A. A., Simon S.,** *Our earthen architectural heritage: materials research and conservation*, MRS Bulletin, **2004**
- [9] **Inglès G.,** *Bonding forces in soils*, Proceedings of the first conference of the Australian road research board, **1962**
- [10] **Soltner D.,** *Les bases de la production végétale, Tome I, le sol*, 7<sup>ème</sup> édition, Sciences et techniques agricoles, **1978**
- [11] **Van Damme H.,** *L'eau et sa représentation*, dans *Mécanique des sols non saturés*, Fleureau J.M., Coussy O., eds. Hermès, p. 23-68, **2001**

## Le béton

- [12] **Acker P., Baroghel-Bouny V., Garcia S.,** *Can water be the glue?*, Hydration and setting, why does cement set? An interdisciplinary approach, Proceedings of the 2nd international RILEM Symposium, A. Nonat, **1997**
- [13] **Baron J.,** *Concrete: the new frontier is at the molecular level*, Hydration and setting, why does cement set? An interdisciplinary approach, Proceedings of the 2nd international RILEM Symposium, A. Nonat, **1997**
- [14] **De Larrard F., Sedran T.,** *Une nouvelle approche de la formulation des bétons*, LPCP Nantes
- [15] **Flatt R.J., Martys N., Bergström L.,** *The Rheology of Cementitious Materials*, MRS Bulletin, **2004**
- [16] **Holland T.C.,** *Silica fume user's manual*, Technical report, Silica Fume Association, Federal Highway Administration, **2005**
- [17] **Lecomte A., De Larrard F., Mechling J-M.,** *Résistance à la compression de bétons hydrauliques au squelette granulaire non optimisé*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, **2001**
- [18] **Pellenq R., Van Damme H.,** *Why does concrete set? The nature of cohesion Forces in hardened cement-based materials*, MRS Bulletin, **2004**
- [19] **Pellenq R., Delville A., Van Damme H.,** *Cohesive and swelling behaviour of charged interfaces : a (NVT) Monte-Carlo study*, Characterisation of Porous Solids IV, p° 596-603, **1997**



- [20] **Scrivener K., Van Damme H.,** *Construction Materials: From Innovation to Conservation*, MRS Bulletin, **2004**
- [21] **Van Damme H., Pellenq R., Delville A.,** *La physique des liaisons entre hydrates et les moyens d'agir au niveau moléculaire*, Revue française de génie civil, Vol. 2, n°7, **1998**
- [22] **Vernet C. P.,** *Ultra-durable concretes: structure at the micro- and nanoscale*, MRS Bulletin, **2004**
- [23] **Viallis-Terrisse H.,** *Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles*, Thèse, UFR des sciences et techniques, université de Bourgogne, Directeur de thèse : Nonat A., **2000**

## Matière en grain

### Vulgarisation

- [24] **Auroux D.,** *Tas d'oranges, cristaux et empilements de sphères*, CNRS – Ecole Polytechnique
- [25] **Ayer J., Bonifazi M., Lapaire J.,** *Le sable – Secrets et beautés d'un monde minéral*, Muséum d'histoire naturelle de Neuchâtel, **2003**
- [26] **Bak P.,** *Quand la nature s'organise, avalanches, tremblements de terre et autres cataclysmes*, Flammarion, **1996**
- [27] **Bourdet J.,** *Les ambiguïtés des solides liquides*, Le journal du CNRS, **2005**
- [28] **Brumfiel G.,** *Swirling Sand Mimics Liquid and Gas*, Physical Review, Lett. 86, 5886, **2001**
- [29] **Cardon F.,** *La matière dans tous ses états*, Galilée, CNDP, **2000**
- [30] **Claudin P.,** *La physique des tas de sable*, annales de physique, EDP sciences
- [31] **Claudin P.,** *Les tas de sable*, la Recherche –
- [32] **Constans N.,** *Physique des grains : la science sur le tas*, Science & Vie HS, n°228, **2004**
- [33] **Constans N.,** *Quand la ségrégation fausse la mesure*, Science & Vie HS, n°228, **2004**
- [34] **Duran J.,** *Sables émouvants : la physique du sable au quotidien*, Belin « Pour la Science », **2003**
- [35] **Duran J.,** *Sables, poudres et grains*, Eyrolles Sciences, Paris, **1997**
- [36] **Duran J.,** *De la physique des poudres fines aux volcans*, Pour la Science, **2001**
- [37] **Duran J.,** « Rose des sables », « poudre magique » et... « grains de riz », CNRS Info, **2001**
- [38] **Duran J.,** *L'étonnante matière en grains*, Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, **2005**
- [39] **Guyon E. et Troadec J. P.,** *Du sac de billes au tas de sable*, Editions Odile Jacob, Paris, **1994**
- [40] **Iss R.,** *Forme des dunes et géométrie des tas de sable*, L'empreinte du temps, pour la science, dossier n°44, **2004**
- [41] **Losert W.,** *Granular materials –*
- [42] **Prost A.,** *La terre, 50 expériences pour découvrir notre planète*, Belin, pour la science, **1999**
- [43] **Richter J-L.,** *Solide et liquide à la fois*, Galilée, CNDP, **1998**
- [44] **Jeux de grains,** Exposition interactive, équipe des médiateurs scientifiques de l'Espace des sciences, **2004**

## Recherche

- [45] **Alisan R.**, *Approche de la cohésion de systèmes granulaires compactés*, Thèse pharmacie, Paris 11, Couarraze G., Directeur de thèse, **1998**
- [46] **Biben T., Bocquet L., Castaing B., Ciliberto S., Coste C., Crassous J., Falcon E., Gayvallet H., Géminard J.-C., Gilles B., Laroche C., Lévêque E., Restagno F.**, *Statique et dynamique des milieux granulaires secs ou humides*, extrait du rapport d'activité 1998 – 2000 du Laboratoire de Physique de l'ENS Lyon
- [47] **Bideau D., Dodds J.**, *Physics of granular media*, Nova Science Publishers, Commack, N.Y., **1991**
- [48] **Brown R.L. and Richards J.C.**, *Principles of powder mechanics*, Pergamon Press, Oxford, **1970**
- [49] **Caillerie D.**, *Évolution quasi-statique d'un milieu granulaire*, loi incrémentale par homogénéisation.
- [50] **Cambou B.**, *Behaviour of granular materials*, Centre international des sciences mécaniques. Éditeur scientifique, Editeur(s) : Wien ; New York : Springer, **1998**
- [51] **Cambou B.**, *From global to local variables in granular materials*, In Thornton C., editor, Powders and Grains 93, Rotterdam, A.A. Balkema, p. 73-86, **1993**
- [52] **Cambou B., Dubujet P., Emeriault F., Sidoroff. F.**, *Homogenization for granular materials*, European Journal of Mechanics. A/Solids, 14(2):255-276, **1995**
- [53] **Cambou B., Jean M.**, *Micromécanique des matériaux granulaires*, Hermes Science Publications, **2001**
- [54] **De Gennes P.G.**, *Reflections on the mechanics of granular matter*, Physica A, 261, 267-293, **1998**
- [55] **Duran J., Bouchaud J.P.**, *Physique de la matière en grains*, Ed. Paris, Comptes rendus. Physique, Tome 3, n. 2, **2002**
- [56] **Herrmann H.J.**, *Granular Matter*, Elsevier Preprint, **2001**
- [57] **Herrmann H.J., Luding S.**, *Modeling granular media on the computer*. Review article, Continuum Mech. Thermodyn., **1998**
- [58] **Herrmann H.J., Hovi J.P., Luding S.**, *Physics of dry granular media*, Balkema, Kluwer, Dordrecht, **1998**
- [59] **Kishino Y.**, *Powders and grains*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, the netherlands, **2001**
- [60] **Lanier J.**, *Mécanique des milieux granulaires*, Ed. Paris : Hermes Science, Coll. MIM, Série Géomatériaux, **2001**
- [61] **Oda M. , Iwashita K.**, *Mechanics of granular materials, an introduction*, Ed. Rotterdam : Balkema, **1999**
- [62] **Ovarlez G.**, *Statique et rhéologie d'un milieu granulaire confiné*, Thèse, Univ. Paris XI Orsay, Directeur de thèse : Clement E., **2002**
- [63] **Preehawuttipong L.**, *Modélisation du comportement mécanique des matériaux granulaires cohésifs*, Thèse, Univ. Montpellier II, Directeurs de thèse: Peyroux R., Radjai F., **2002**
- [64] **Quintanilla M., Castellanos A., Valverde J.**, *Correlation between bulk and interparticle contact forces for fine powders*, Phys. Rev. E 64, 031301, **2001**

### Milieux granulaires humides

- [65] **Albert-László Réka Albert, Peter Schiffer**, *Physics of Sandcastles: Effects of Controlled Wetness on the Angle of Maximum Stability of Granular Materials*, Physica A 266, 340-345, **1999**
- [66] **Bocquet L., Charlaix E., Restagno F.**, *Physics of humid granular media*, C.R. Physique 3, 207-215, **2002**

- [67] **Bocquet L., Charlaix E., Crassous J., Ciliberto S.,** *Moisture induced ageing in granular media and the kinetics of capillary condensation*, Nature, 396, 735-737, **1998**
- [68] **Bocquet L., Restagno F., Charlaix E.,** *Where does a cohesive granular heap break ?*, Eur Phys J E Soft Matter, 14(2):177-83, **2004**
- [69] **Fraysse N., Thomé H., Petit L.,** *Humidity effects on the stability of a sandpile*, Eur. Phys. J. B 11, 615-619, **1999**
- [70] **Géminard J.-C., Losert W., Gollub J. P.,** *Frictionnal mechanics of wet granular material*, **1999**
- [71] **Gioia G., Cuitino A.M., Zheng S., Uribe T.,** *Two-Phase Densification of Cohesive Granular Aggregates*, 88, 20, Physical Review Letters, **2002**
- [72] **Gröger T., Tüzün U., Heyes D.M.,** *Modelling and measuring of cohesion in wet granular materials*, Powder technology 133, 203-215, **2003**
- [73] **Halsey T.C., Levine A.J.,** *How sandcastles fall*, Physical Review Letters 80, 3141, **1998**
- [74] **Hornbaker D., Albert R., Albert I., Barabási A.L., Schiffer P.,** *What keeps sand-castles up*, Nature 387, No 6635, **1997**
- [75] **Restagno F.,** *Interactions entre contacts solides et cinétique de la condensation capillaire. Aspects macroscopiques et aspects microscopiques*, Thèse, ENS Lyon, Directeur de thèse : Charlaix E., **2000**
- [76] **Restagno F., Gayvallet H., Bocquet L., Charlaix E.,** *Humidity effects and aging behavior in granular media*, Dynamics in small confining systems IV. Mater. Res. Soc., Warrendale, PA, USA, **1999**
- [77] **Soulié F., Cherblanc F., El youssoufi M. S., Saix C.,** *Mécanisme de cohésion par capillarité dans les milieux poreux de type granulaire*, 6<sup>ème</sup> journées Milieux Poreux, Toulouse, **2003**

#### Écoulements

- [78] **Bocquet L., Losert W., Schalk D., Lubensky T.C., Gollub J.P.,** *Granular shear flow dynamics and forces : experiment and continuum theory*, Laboratoire de physique de l'ENS Lyon, **2000**
- [79] **Evesque P.,** *Quelques aspects de la dynamique des milieux granulaires*, poudres&grains, 13 (4), 40-73, **2002**
- [80] **Hinrichsen H., Jimenez-Dalmaroni A., Rozov Y., Domany E.,** *Flowing Sand – a physical realization of directed percolation*, **1999**
- [81] **Jain N., Ottino J. M., Lueptow R.M.,** *Effects of interstitial fluid on a granular flowing layer*, Cambridge University Press, **2004**
- [82] **Losert W., Kwon G.,** *Transient and steady-state dynamics of granular shear flows*, WSPC, 169-ACS, **2001**
- [83] **Losert W., Bocquet L., Lubensky T.C., Gollub J.P.,** *Particle dynamics in sheared granular matter*, Laboratoire de physique de l'ENS Lyon, **2000**
- [84] **Pouliquen O.,** *Écoulements granulaires sur plan incliné -*
- [85] **Tsai J.-C., Voth G. A., Gollub J. P.,** *Internal granular dynamics. Shear-induced chystallization and compaction steps*, **2003**
- [86] **Tsai J.-C., Gollub J. P.,** *Slowly sheared dense granular flows : crystallization and nonunique final states*, Physical review E 70, 031303, **2004**
- [87] **Toiya M., Stambaugh J., Losert W.,** *Transient and oscillatory granular shear flow*, Physical review letters, vol. 93, n°8, **2004**

### Angle de repos et angle d'avalanche

- [88] **Albert R., Albert I., Hornbaker D., Schiffer P., Barabási A.L.,** *The maximum angle of stability in wet and dry spherical granular media*, *Phy. Rev. E* 56, 627, **1997**
- [89] **Bagnold R. A.,** *The Physics of Blown Sand and Desert Dune*, Methuen, Londres, **1954**
- [90] **Duran J.,** *Ripples in tapped or blown powder*, LMDH, PRL, **1999**

### Vibrations

- [91] **Falcon E., Kumar K., Bajaj K. M. S., Bhattacharjee J. K.,** *Heap corrugation and hexagon formation of powder under vertical vibrations*, *Physical Review E*, Vol. 59, n°5, **1999**
- [92] **Falcon E., Wunenburger R., Evesque P., Fauve S., Chabot C., Garrabos Y., Beysens D.,** *Cluster formation in a granular medium fluidized by vibrations in low gravity*, *Physical Review letters*, Vol. 83, n°2, **1999**
- [93] **King P. J., Swift M. R., Benedict K. A., Routledge A.,** *Surface stability of granular systems under horizontal and vertical vibration : the applicability of a coefficient of friction*, *Physical Review E*, Vol. 62, n°5, **2000**
- [94] **Kumar K., Falcon E., Bajaj K. M. S., Fauve S.,** *Shape of convective cell in Faraday experiment with fine granular materials*, *Physica A* 270, **1999**
- [95] **Losert W., Cooper D. G. W., Delour J., Kudrolli A., Gollub J. P.,** *Velocity statistics in excited granular media*, *Chaos*, **1999**
- [96] **Losert W., Cooper D. G. W., Gollub J. P.,** *Propagating front in an excited granular layer*, **2004**
- [97] **Losert W.,** *Pattern formation –*
- [98] **Milburn R. J., Naylor M. A., Smith A. J., Leaper M. C., Good K., Swift M. R., King P. J.,** *Faraday tilting of water-immersed granular beds*, *Physical Review E* 71, 011308, **2005**
- [99] **Shinbort T., Lomelo L., Muzzio F. J.,** *Harmonic patterns in fine granular vibrated beds –*
- [100] **Shinbrot T.,** *Granular Coarsening –*
- [101] **Umbanhowar P. B.,** *Pattern Formation in Vibrated Granular Layers*, APS March meeting, **1996**
- [102] **Voth G. A., Bigger B., Buckley M. R., Losert W., Brenner M. P., Stone H. A., Gollub J. P.,** *Ordered clusters and dynamical states of particles in a vibrated fluid*, **2002**

### Ségrégation

- [103] **Choo K., Baker M. W., Molteno T. C. A., Morris S. W.,** *The dynamics of granular segregation patterns in a long drum mixer*, submitted to *Phys. Rev.*, **2004**
- [104] **Fiedor S.J., Ottino J.M.,** *Dynamics of axial segregation and coarsening of dry granular materials and slurries in circular and square tubes*, *Physical Review Letters*, Vol. 91, n°24, **2003**
- [105] **Friedmann S. J.,** *Granular memory and its effect on the triggering and distribution of rock avalanche events*, *Journal of geophysical research*, vol. 108, **2003**
- [106] **Gallas J., Herrmann H. J., Pöschel T., Sokolowski S.,** *Molecular Dynamics Simulation of Size Segregation in three dimensions*, *Journal of Statistical Physics*, Vol. 82, N°1 et 2, **1996**
- [107] **Hill K. M., Caprihan A., Kakalios J.,** *Bulk Segregation in Rotated Granular Material Measured by Magnetic Resonance Imaging*, *Physical Review Letters*, Vol. 78, n°1, **1997**

- [108] **Hill K. M., Kakalios J.,** *Reversible axial segregation of binary mixtures of granular materials*, Physical Review Letters, Vol. 49, n°5, **1994**
- [109] **Hill K. M., Kakalios J.,** *Reversible axial segregation of rotating granular media*, Physical Review Letters, Vol. 52, n°4, **1995**
- [110] **Hong D.C., Quinn P.V.,** *Reverse brazil nut problem: competition between percolation and condensation*, Physical Review Letters, Vol. 86, n°15, **2001**
- [111] **Khakhar D. V., McCarthy J. J., Ottino J. M.,** *Mixing and segregation of granular materials in chute flows*, American institute of Physics, **1999**
- [112] **Metcalfe G., Shinbrot T., McCarthy J. J., Ottino J. M.,** *Avalanche mixing of granular solids*, Nature, **2001**
- [113] **Naylor M. A., Swift M. R., King P. J.,** *Air-driven brazil nut effect*, Physical Review E 68, 012301, **2003**
- [114] **Newey M., Ozik J., Van der Meer S. M., Ott E., Losert W.,** *Band-in-band segregation of multiphase granular mixtures*, Europhysics Letters, **2004**
- [115] **Ottino J.M., Khakhar D.V.,** *Fundamental research in heaping, mixing, and segregation of granular materials: challenges and perspectives*, Powder technology, 121, 117-122, **2001**
- [116] **Reis P. M., Mullin T.,** *Granular segregation in granular segregation as a critical phenomenon*, **2004**
- [117] **Sanchez P., Swift M. R., King P. J.,** *Stripe formation in granular mixtures due to the differential influence of drag*, Physical Review Letters, Vol. 93, n°18, **2004**
- [118] **Sanders D. A., Swift M. R., Bowley R. M., King P. J.,** *Are brazil nuts attractive?*, Physical Review Letters, Vol. 93, n°20, **2004**
- [119] **Shinbrot T., Muzzio F. J.,** *Antigravity in a sandbox*, Physical Review Lett. 81, 4365, **1998**
- [120] **Shinbrot T., Muzzio F. J.,** *Nonequilibrium patterns in granular mixing and segregation*, Physics Today, **2000**
- [121] **Trujillo L., Herrmann H. J.,** *Hydrodynamic model for particle size segregation in granular media*, submitted to Physica A, **2003**
- [122] **Trujillo L.,** *Comment la noix du Brésil monte ou descend ? Le problème de la ségrégation des milieux granulaires vibrés*, Séminaire LML, **2004**

Chaînes de forces

- [123] **Blair D.L., Mueggenburg N.W., Marshall A.H., Jaeger H.M., Nagel S.R.,** *Force distributions in three-dimensional granular assemblies : effects of packing order and interparticle friction*, Phys. Rev. E, 63, 041304, **2001**
- [124] **Erikson J.M., Mueggenburg N.W., Jaeger H.M., Nagel S.R.,** *Force distributions in three-dimensional compressible granular packs*, Phys. Rev. E, 66, 040301, **2002**
- [125] **Luding S.,** *Stress distribution in static two dimensional granular model media in the absence of friction*, Physical Review E, 55:4720-4729, **1997**
- [126] **Radjai F., Jean M., Moreau J-J, Roux D.,** *Force distributions in dense two-dimensional granular systems*, Phys. Rev. Lett., 77(2), 274, **1996**
- [127] **Schäfer S., Dippel S., Wolf D.E.,** *Forces schemes in simulations of granular materials*, Journal de physique I, 6(1):5-20, **1996**
- [128] **Walker W.J.,** *Persistence of granular structure during compaction processes*, Kona N°21, **2003**

### Divers

- [129] **Borkovec M., De Paris W.,** *The fractal dimension of the apollonian sphere packing*, Fractals, Vol. 2, n°4, **1994**
- [130] **Dauchot O., Lechénault F., Gasquet C.,** « *Barchan* » *dunes in the lab*, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 329, Série II b, **2001**
- [131] **Losert W., Géminard J.-C., Nasuno S., Gollub J.P.,** *Mechanisms for slow strengthening in granular materials*, **2004**
- [132] **Makse H.A., Johnson D.L., Schwartz L.M.,** *Packing of compressible granular materials*, Physical Review Letters, 84(18):4160-4163, **2000**

### **Liquides**

- [133] **Cabane B., Hénon S.,** *Liquides : Solutions, dispersions, émulsions, gels*, Belin, **2003**
- [134] **De Gennes P.-G., Brochard-Wyart F., Quéré D.,** *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, **2002**
- [135] **Guazzelli E.,** *Rhéologie des fluides complexes*, **2001**

### Vulgarisation

- [136] **Armand D.,** *Découvrir l'eau*, Dossier scientifique, Sagascience, CNRS, <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/>, **2000**
- [137] **Bourdet J.,** *Les mystères de l'eau*, Le journal du CNRS, **2005**
- [138] **Rey K.,** *Les mots clés de l'eau*, PEMF, **1998**
- [139] **Vandewalle N., Caps H., Lecocq N.,** *Physique et chimie de l'eau, « La peau de l'eau »*, Printemps des sciences à l'Université de Liège, **2001**
- [140] *Cas d'eau, exposition d'Agora des Sciences, CCSTI de Marseille*, Dossier pédagogique galerie Eurêka, **2003**

### **Argiles**

- [141] **Bouchet A., Meunier A., Sardini P.,** *Minéraux argileux*, Elf Exploration Production, **2000**
- [142] **Caillière S., Hémin S., Rautureau,** *Minéralogie des argiles*, Masson, **1982**
- [143] **Delville A.,** *Structure and properties of confined liquids : a molecular model of the clay-water interface*, J. Phys. Chem., 97, 9703-9712, **1993**
- [144] **Meunier A.,** *Argiles*, CPI, GB sciences Publisher, **2003**
- [145] **Rautureau M., Caillière S., Hémin S.,** *Les argiles*, Edition Septima, seconde édition, **2004**
- [146] **Tessier D.,** *Propriétés des argiles : hydratation, gonflement en relation avec leur texture, importance pour les sols*, Paris, **1992**
- [147] **Trizac E., Bocquet L., Agra R., Weis J.-J., Aubouy M.,** *Effective interactions and phase behaviour for a model clay suspension in an electrolyte*, Institute of Physics Publishing, Journal of Physics : Condensed Matter 14, **2002**
- [148] **Van Olphen H.,** *An introduction to clay colloid chemistry*, Ed. Inter science New York, **1963**
- [149] **Velde B.,** *Introduction to clay minerals*, Chapman and Hall, **1992**
- [150] **Velde B.,** *Origin and mineralogy of clays*, Clays and the environment, Springer, **1995**

## Boues et fluides complexes

- [151] Aubry T., Moan M., *The rheology of swelling clay dispersions*, IFP, 1997
- [152] Besq A., *La boue : un mélange complexe d'argile et d'eau*, 2000
- [153] Cartalos U., Bayloq P., Lecourtier J., Piau J.-M., *Caractérisation rhéologique et modélisation structurelle des systèmes argile-polymère, application aux fluides de forage*, Revue de l'institut français du pétrole, Vol. 52, n°3, 1997
- [154] Coussot P., Bertrand F., Herzhaft B., *Rheological behavior of drilling muds, characterization using MRI visualisation*, vol. 59, n°1, 2004
- [155] Lootens D., Hébraud P., Lécolier E., Van Damme H., *Gelation, shear-thinning and shear-thickening in cement slurries*, vol. 59, n°1, 2004
- [156] Peysson Y., *Solid/Liquid dispersions in drilling and production*, Revue IFP, vol. 59, n°1, 2004
- [157] Yong R.N., Sethi A.J., Ludwig H.P., Jorgensen M.A., *Interparticle action and rheology of dispersive clays*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105(GT10), 1193-1209, 1979

## Matière colloïdale

- [158] Bocquet L., Trizac E., Aubouy M., *Effective charge saturation in colloidal suspensions*, Journal of chemical physics, volume 117, Number 17, 2002
- [159] Daniel J.C., Audebert R., *Petits volumes et grandes surfaces : l'univers des colloïdes*, La juste argile, les éditions de la physique, 1995
- [160] Israelachvili J., *Intermolecular and surface forces*, 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, London, 1992

### Vulgarisation

- [161] Lassagne F., *L'insoutenable légèreté des colloïdes*, Science & Vie HS, n°228, 2004
- [162] Lassagne F., *Le bestiaire des colloïdes*, Science & Vie HS, n°228, 2004

## Aspect pédagogique

- [163] *Apprendre autrement aujourd'hui ?*, 10<sup>e</sup> Entretiens de la Villette, Cité des Sciences et de l'Industrie, <http://desette.free.fr/pmevtxt/Apprendre%20autrement%20aujourd'hui%20Sommaire%20complet.htm>, 1999
- [164] Alain Lieury A., Fenouillet F., *Motivation et réussite scolaire*, Scolaire Dunod
- [165] Biais J.-M., Saubaber D., *Comment on apprend*, Express du 30/08/2004, 2004
- [166] Buonarroti M., *L'intelligence au bout des doigts (« Penso con le mani »)*, <http://ottawa.blog.lemonde.fr/ottawa/2005/04/>, Le Monde 02/04/05, 2005
- [167] Caro P., *Les enjeux culturels de la vulgarisation scientifique*, La science en scène, Presses de l'ENS et palais de la découverte, 1996
- [168] Catheline N., Bedin V., *Les Années collège, le grand malentendu*, Albin Michel
- [169] Davallon J., *Le public au centre de l'évolution du musée*, Publics et Musées, 2, 1991
- [170] Delacôte G., *Savoir apprendre, les nouvelles méthodes*, Odile JACOB, 1996

- [171] **Dumont L., Maillard E., *Maîtres, redevenez des élèves***, Interview de Delacôte G., *L'expansion*, n°646, **2001**
- [172] **Eastes R-E., *De l'utilisation de l'expérience contre-intuitive***, *Lettre des sciences chimiques* n°78, **2002**
- [173] **Eastes R-E., Pellaud F., *Un outil pour apprendre : l'expérience contre-intuitive***, bulletin de l'union des physiciens, **2004**
- [174] **Giordan A., *Apprendre !***, Belin
- [175] **Giordan A., *Apprendre : une alchimie complexe***, 10<sup>e</sup> Entretiens de la Villette, Cité des Sciences et de l'Industrie, **1999**
- [176] **Giordan A., Girault Y., Clément P., *Conceptions et connaissance***, Peter Lang, **1994**
- [177] **Giordan A., de Vecchi G., *L'enseignement scientifique : comment faire pour que « ça marche » ?***, Z'édicions, Nice, **1994**
- [178] **Giordan A., de Vecchi G., *Les origines du savoir***, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, **1987**
- [179] **Giordan A., *An allosteric learning model***, Actes IUBS-CBE, Sydney meeting, **1988**
- [180] **Giordan A., *An allosteric learning model***, Actes IUBS-CBE, Moscow meeting, **1989**
- [181] **Giordan A., *Repenser la conception muséale et la place du musée à travers les nouvelles idées sur comprendre et apprendre***, LDES Université de Genève
- [182] **Guédon J-C., *Les musées sans murs***, La science en scène, Presses de l'ENS et palais de la découverte, **1996**
- [183] **Hamelin E., *Développement et diffusion de la culture scientifique et technique, un enjeu national***, Rapport établi à la demande du Premier Ministre, **2003**
- [184] **Houdé O., *La Psychologie de l'enfant***, PUF
- [185] **Laurillard D., *Rethinking university teaching***, 2<sup>nd</sup> edition, Routledge Farmer, **2002**
- [186] **Mathieu H., *La Réussite scolaire***, Solar
- [187] **Raichvarg D., *Sciences pour tous ?***, Découvertes Gallimard Sciences et Techniques, **2005**
- [188] **Schiele B., *Le musée des sciences est-il un genre à part ?***, dans Schiele B., *Faire voir, faire savoir, La muséologie scientifique au présent*, **1989**
- [189] **Schiele B., *L'invention simultanée du visiteur et de l'exposition***, Publics et Musées, 2, **1992**
- [190] **This H., *Faisons des expériences simples, la culture scientifique, un enjeu de la Gastronomie moléculaire***, <http://cru.chateau.free.fr/this.htm>, Cercle de Réflexion Universitaire du Lycée Chateaubriand (le CRU de Chateau), **2001**
- [191] **Toczek M-C., Martinot D., *Le Défi éducatif***, Armand Colin

### **Caractérisation thermophysique du matériau terre**

- [192] **Actes de colloques, *Modernité de la construction en terre***, **1984**
- [193] **Adam E.A., Jones P.J., *Thermophysical properties of stabilized soil building blocks***, *Building and Environment*, 30, 2, 245-253, **1995**
- [194] **Beas G.M.I., *Traditional Architectural renders on earthen surfaces***, Thèse, University of Pennsylvania, **1991**
- [195] **Boussaid S., El Bakkouri A., Ezbakhe H., Ajzoul T., El Bouardi A., *Comportement thermique de la terre stabilisée au ciment***, *Revue française de génie civil*. Volume 5 - n°4, 505-515, **2001**
- [196] **Byrne S.M., *Fire-resistance test on a loadbearing masonry wall of 250-mm-thick adobe blockwork***, Technical Record 490, E.B.S. (Experimental Building Station), Département of Transport and Construction, **1982**



- [197] **Fadli A.**, *Protection de murs en terre non stabilisée*, Mémoire C.E.A.A., Ecole d'architecture de Grenoble, **1995**
- [198] **Hakimi A., Fassi-Fehri O., Bouabid H., Charif D'Ouazzane S., El Kortbi M.**, *Comportement mécanique non linéaire du bloc de terre comprimée par couplage élasticité endommagement*, Materials and Structures, Vol. 32, p. 539-545, **1999**
- [199] **Hall M., Djerbib Y.**, *Rammed earth sample production : context, recommendations and consistency*, Construction and Building Materials 18, 281-286, **2004**
- [200] **Hall M., Djerbib Y.**, *Moisture ingress in rammed earth : Part I, the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction*, Construction and Building Materials 18, 269-280, **2004**
- [201] **Herbert L. Whittemore, Ambrose H. Stang, Elbert Hubbel, Richard S. Dill**, *Heat-Transfer and Water-Permeability Properties of Five Earth-Wall Constructions*, Building Materials and structures, report BMS 78, Structural, United States Government Printing Office, Washington, **1941**
- [202] **Jeannot J., Pollet G.**, *Cours de construction "Thermique située"*, 2ème Année, Pisé, terre d'avenir, **1984**
- [203] **Kapfinger O., Rauch M.**, *Rammed Earth, Lehm und Architektur, Terra cruda*, Birkhäuser, Basel, 2001
- [204] **Kleespies T., Huber A.-L.**, *Wärmeschutz und feuchteverhalten von lehmstoffen*, Forschungsgruppe Lehm, Solararchitektur, **1994**
- [205] **Laurent J.-P.**, *Rapport de synthèse, La durabilité des protections sur terre stabilisée: l'expérience des 'murets Dreyfus' de Dakar*, CSTB, Programme interministériel Rexcoop, **1985**
- [206] **Laurent J.-P.**, *Propriétés thermiques du matériau terre*, Cahiers du CSTB, 279, 2156, **1987**
- [207] **Middleton G.F., Schneider L.M.**, *Earth-wall construction*, 4th ed., National Building Technology Centre, **1987**
- [208] **Morel J.-C., P'kla A., Di Benedetto H.**, *Essai in situ sur blocs de terre comprimée. Interprétation en compression ou traction de l'essai de flexion en trois points ?*, Revue française de génie civil, 7, (2), 221-237, **2003**
- [209] **Narang P.P., Demos C.**, *Airbone-sound-transmission loss of an adobe wall 250mm thick*, Technical Record 492, E.B.S. (Experimental Building Station), Departement of Transport and Construction, **1983**
- [210] **Olivier M.**, *Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre*, Thèse, INSA Lyon, **1994**
- [211] **Olivier M., Mesbah A.**, *Le matériau terre, essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées*, Bull. liaison Labo P. et Ch., 146, p. 37-43, **1986**
- [212] **Pisé, terre d'avenir**, *Comportement thermique de la terre crue*, climats chauds, 1984
- [213] **P'kla A.**, *Caractéristiques en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries 'BTC-Mortier de terre'*, Thèse, INSA Lyon, **2002**
- [214] **Pkla A., Mesbah A., Rigassi V., Morel J.C.**, *Comparaison de méthodes d'essais de mesures des caractéristiques mécaniques des mortiers de terre*, Materials and Structures, Vol. 36, p. 108-117, **2003**
- [215] **Volhard F., Röhlen U.**, *Lehm, Regeln*, Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.), Vieweg, Weimar, **1998**
- [216] **Walker P., Stace T.**, *Propriétés de mortiers et de blocs de terre comprimés et stabilisés au moyen de ciment*, Matériaux et Constructions, 30 (203) 545-551, **1997**
- [217] **Wolde-Mariam A.**, *Utilisation des matériaux locaux pour l'habitat éthiopien*, Thèse ENTPE, **1996**

### Textes normatifs

- [218] **NF B40-322 - *Essai de résistance à l'écrasement***
- [219] **XP P13-901 - *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications – Méthodes d'essais - Conditions de réception. 35p., 2001***
- [220] **New Zealand Standard NZS 4297, *Engineering design of earth buildings, 1998***
- [221] **New Zealand Standard NZS 4298, *Materials and workmanship for earth buildings, 1998***
- [222] **S.I.A. (Société suisse des ingénieurs et des architectes), *Regeln zum Bauen mit Lehm, D 0111, SIA Zurich, 1994***
- [223] **CYTED, *Recomendaciones para la elaboración de normas técnicas de edificaciones de adobe tapial ladrillos y bloques de suelo-cemento, 1995***
- [224] **ININVI (Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda), *Construcción con tapial, 1989***

### **Divers**

- [225] **Allègre C., *De la pierre à l'étoile*, Fayard, 1985**
- [226] **Beauchamp J., *Propriété des sols*, cours de l'Université de Picardie Jules Verne, 2003**
- [227] **Boulvain F., *Une introduction aux processus sédimentaires*, Cours de l'Université de Liège, Faculté des Sciences, Département de Géologie, 2004**
- [228] **Bourque P-A., *Planète Terre*, Département de géologie et de Génie Géologique de l'Université de Laval (Québec), [http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html), 1997**
- [229] **Chapman J., *Microbes at work : a new agent in clay transformations*, Biogeosciences, <http://www.biogeosciences.org/highlights/articles/0403microbes.htm>, 2005**
- [230] **Dayre M., *Brève histoire géologique de la région*, <http://terre.grenoble.archi.fr/index1024.htm>, CRATerre, 2004**
- [231] **Degoutte G., Royet P., *Aide mémoire de mécanique des sols*, les publications de l'ENGREF, [www.engref.fr/coursenligne/Mecasol/Mecasol.pdf](http://www.engref.fr/coursenligne/Mecasol/Mecasol.pdf), 2005**
- [232] **Di Meglio J-M., *Les Etats de la Matière, de la molécule au matériau*, Dunod, 2001**
- [233] **Jensen P., *Entrer en matière, les atomes expliquent-ils le monde?*, Seuil, 2001**
- [234] **Jensen P., *Quelles sciences (de la matière) pour demain ?*, Document de prospective pour le Grand Lyon, 2005**
- [235] **Kubat I., Sayed M., Savage S.B., *Carrieres, An Operational Model of Iceberg Drift*, International Journal of Offshore and Polar Engineering, ISSN 1053-5381, Vol. 15, N°2, 2005**
- [236] **OKHRA, *Couleur métal*, les livrets du conservatoire, Edisud, 2004**
- [237] **Paulin M., *Les matériaux de construction*, Cours 2<sup>ème</sup> année de l'Ecole d'Architecture de Lyon, 2004**
- [238] **Perrier E., *Structure géométrique et fonctionnement hydrique des sols, simulations exploratoires*, Orstom, 1995**
- [239] **Scherer G. W., *Theory of drying*, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 73, n°1, 1990**
- [240] **Shorlin K. A., Bruyn R., *Development and geometry of isotropic and directional shrinkage of crack patterns*, 2000**

