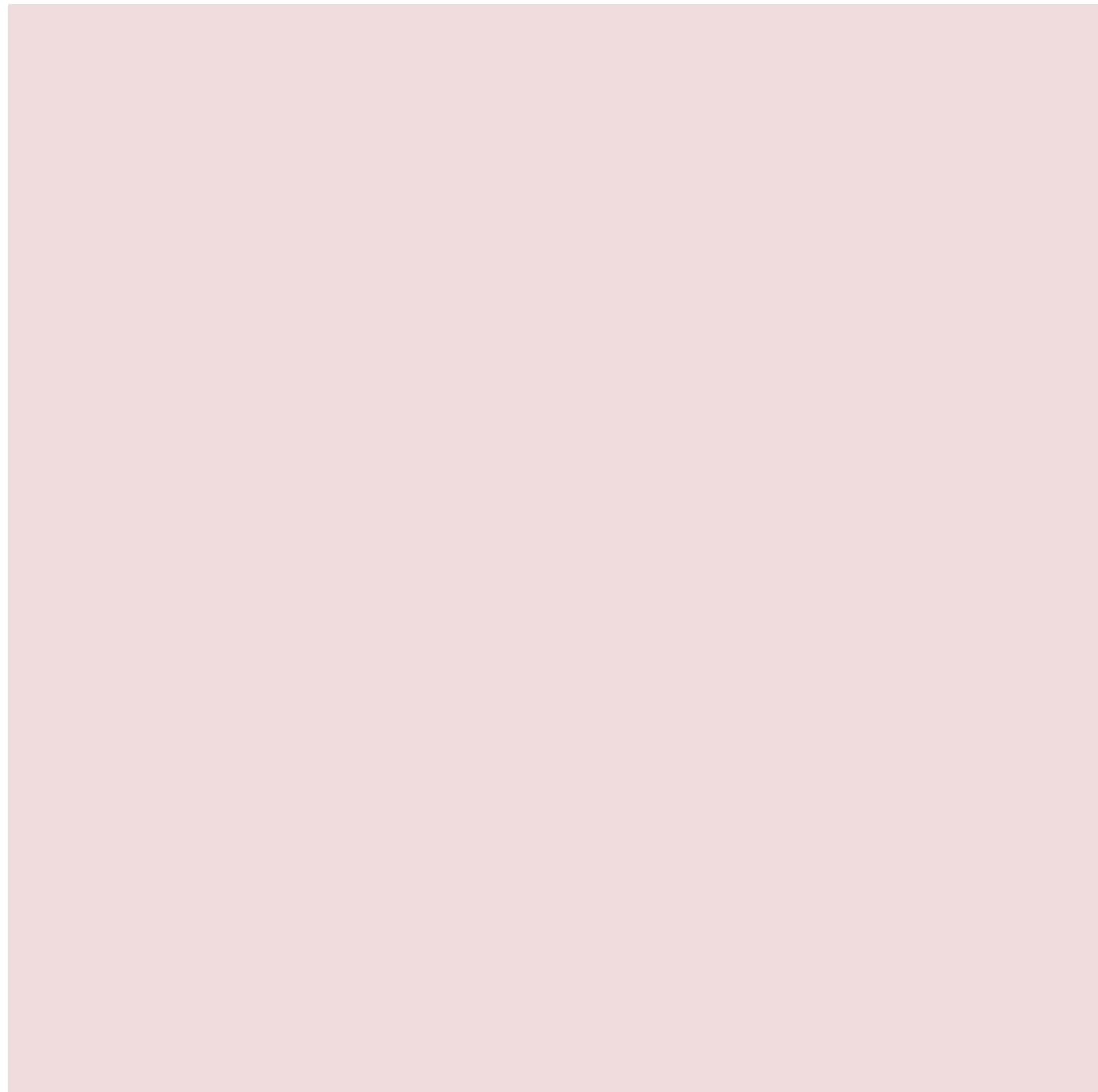


Les argiles : un nanomatériau naturel et surprenant

Auteur :

FLAVIGNY Etienne, Ex- Maître de Conférence à l'Université Grenoble Alpes

20-08-2019



Les argiles constituent une famille de matériaux omniprésents dans notre quotidien comme dans notre environnement. Sèches, elles semblent aussi solides que des roches, boueuses, elles s'écoulent comme des huiles. Elles sont maintenant utilisées dans des constructions de très grands ouvrages et forment souvent le sous-sol des agglomérations urbaines. Comment les techniciens du génie civil parviennent-ils à tourner les difficultés qu'elles posent ?

1. Un matériau universel



Figure 1. Bisons de la grotte du Tuc d'Audoubert. [Source: Leroi-Gourhan A. voir réf. [4], (CC BY-SA 4.0)].

S'il est un matériau qui se confond avec l'histoire de l'humanité, c'est bien l'argile. Elle se trouve mentionnée dès le chapitre 1 du *Livre de la Genèse* dans la *Bible*. Selon les traductions, on y emploie les mots **argile, glaise, limon ou terre** : "Alors Yahvé Dieu modela l'homme avec la glaise du sol, insuffla dans ses narines une haleine de vie et l'homme devint un être vivant" [1].

L'argile est sans doute l'un des matériaux qui ont contribué à la **naissance de l'art** : les bisons de la grotte préhistorique du Tuc d'Audoubert (Ariège) furent façonnés dans de l'argile humide. Sans aucune cuisson, les modelages ont pu se conserver humides depuis 15 000 ans (période du Magdalénien) dans la grotte découverte par Begouën [2] en 1912. L'humidité relative de 100% [3] a permis cette conservation (avec quelques fissures) (Figure 1, [4]).

C'est aussi par l'argile que s'est développée **l'écriture en Mésopotamie** au temps d'Ur et Sumer plus de 3000 ans av J-C [5]. Les tablettes d'argiles, gravées avec des stylets par les scribes en écriture cunéiforme sont les premières traces écrites de l'histoire de l'humanité. Notamment, l'épopée de Gilgamesh raconte l'histoire du roi d'Uruk en 12 **tablettes d'argiles** écrites plus de 2000 ans avant J-C (Figure 2, tablette XI, Le Déluge).



Figure 2. Épopée de Gilgamesh, tablette XI (2000-1500 av J-C) [Source : British Museum [CC0]]

La cuisson de l'argile pour faire de la poterie et des ustensiles culinaires date du Néolithique et est apparue en Asie et dans le Croissant fertile. La maîtrise du mélange d'argile et d'eau, du séchage, du retrait sans fissuration et de la cuisson a accompagné le développement de l'humanité dans toutes les zones de peuplement. Et la résistance de l'argile cuite donne aux archéologues une lecture de l'histoire par les tessons de poteries des diverses civilisations.

L'argile est aussi un produit merveilleux utilisé depuis l'aube de l'humanité dans **la pharmacopée et la cosmétique** : par exemple, les peintures corporelles des Indiens d'Amazonie, les masques de beauté à l'argile, comme l'argile verte des magasins bio ou les bains de boues des stations thermales. Plus prosaïques sont la "terre de Sommières" utilisée comme détachant naturel ou le constituant de base du médicament anti-diarrhéique *Smecta*®. On utilise aussi l'argile dans des pâtes dentifrices, dans l'industrie papetière, comme charge dans les peintures. L'argile est partout dans notre environnement et depuis toujours très employée.

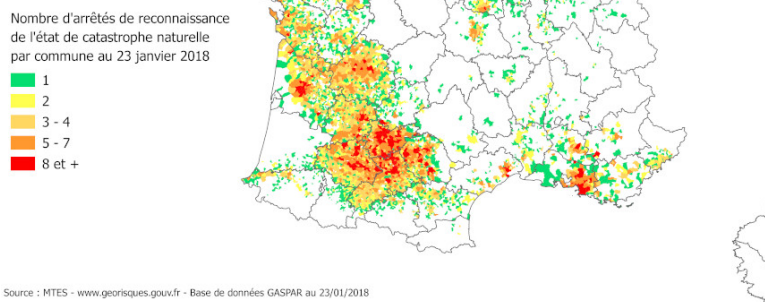


Figure 3. Carte des communes ayant été déclarées en catastrophe naturelle due à la sécheresse (23 Janvier 2018), voir réf. [7] [Source: © BRGM].

Enfin, l'argile est un **matériau de construction** et constitue le support de beaucoup d'édifices. Les constructions en terre, que ce soient le pisé, le torchis ou les briques crues sont répandues de par le monde et sous toutes les latitudes. Des constructions importantes comme les **ziggourats d'Irak**, incluaient d'ailleurs des renforcements en paille de roseau (lire [Le renforcement des sols : des techniques devenues indispensables](#)). Mais comme support de construction, l'argile pose de nombreux problèmes. En fonction des conditions climatiques ou hydrauliques, son volume peut varier en absorbant de l'eau ou en se rétractant lors du séchage : c'est le phénomène appelé **retrait-gonflement**. En France, les épisodes de sécheresse depuis 2003 ont entraîné des dommages énormes dans des maisons individuelles et d'autres constructions : plus de **8500 communes ont été reconnues en état de catastrophe naturelle**, ouvrant pour les propriétaires la possibilité d'indemnisation par les assurances. Ces dommages ne sont ni spectaculaires ni "médiatiques", ils ne causent pas d'accident de personne mais seulement des **fissurations** importantes compromettant la sécurité du bâti. Le coût global sur les dernières années est important : il est de l'ordre de 8,5 milliards d'euros sur la période 1990-2013 [6]. La carte de la Figure 3 montre les communes concernées où plus de **23000 arrêtés de catastrophe naturelle** ont été publiés [7]. Et le réchauffement climatique actuel n'améliorera pas cet effet : selon les modèles d'évolution du climat d'ici 2100, le coût du retrait-gonflement pourrait se situer entre 50 et 100 milliards d'euros pour la période 2020-2100.

2. Un nanomatériau naturel

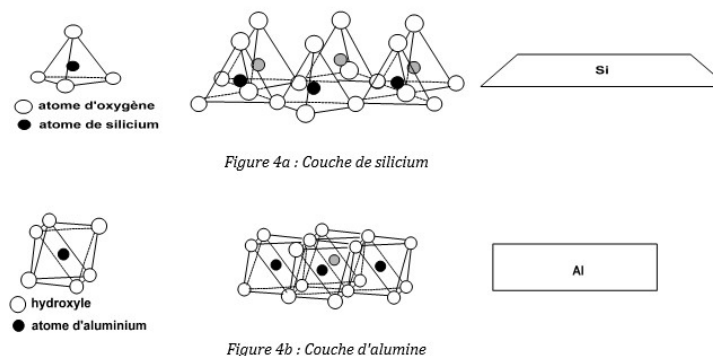


Figure 4. Structure des unités de base de silicium (a) et d'alumine (b) constitutifs des argiles. [Source : Philippe REIFFSTECK]

Les argiles proviennent de l'altération physicochimique des roches siliceuses notamment granitiques. Au cours de leur décomposition par les agents climatiques, ces roches donnent des particules très fines d'argiles de différentes natures. Celles-ci peuvent ensuite être lessivées et transportées avant de se déposer par sédimentation. Les argiles sont constituées de **silicium Si**, d'**aluminium Al** et d'**hydroxyle OH** organisés en couches qui s'empilent en **feuillet**. Sur la Figure 4a, les tétraèdres SiO_4 s'assemblent en couche représentée par un trapèze. Des octaèdres sont formés par un atome d'aluminium entouré de six hydroxyles OH et s'associent en une couche symbolisée par un rectangle (Figure 4b) [8].

Deux ou trois de ces unités de base forment un feuillet élémentaire (Figure 5). Le **kaolin** (utilisé en porcelaine) est l'empilement d'une couche Si et d'une couche Al tandis que les **smectites** comportent une couche Al entre deux couches Si.

Différentes substitutions de cations peuvent aussi se produire, conduisant à des minéraux argileux différents.

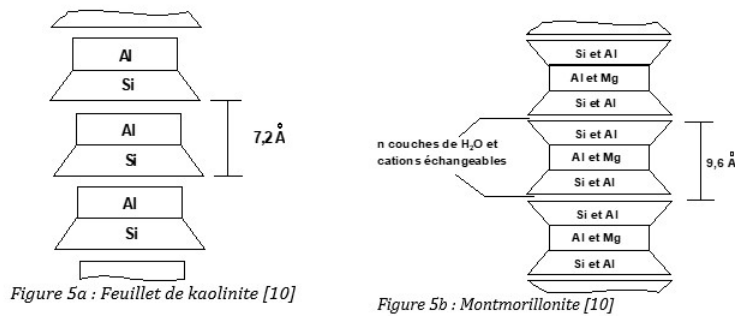


Figure 5. Structure des feuillets de kaolinite (a) et de Montmorillonite (b). [Source : Philippe REIFFSTECK]

Ainsi des cations Mg^{++} , K^+ , Fe^{++} peuvent se substituer aux cations Al^{+++} en fonction des conditions d'altération ou lors des transports sédimentaires subis par les particules argileuses et former des minéraux argileux tels que la montmorillonite.

Ces feuillets, de taille **nanométrique** ($10 \text{ \AA} = 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), s'empilent pour donner des agrégats argileux et la structure des argiles soit dispersée soit floculée avec des liaisons face-face ou bord-face. Les empilements peuvent comporter de 1 à 100 feuillets élémentaires. A la surface des feuillets et entre les feuillets, des particules d'eau peuvent être adsorbées selon la nature des argiles par effet électrochimique. C'est particulièrement le cas pour les smectites où les liaisons entre feuillets sont plus faibles : ces propriétés électrochimiques engendrent le **rôle majeur de l'eau** dans le comportement des argiles, notamment le **retrait-gonflement** : l'adsorption d'eau entraîne un écartement des feuillets et un gonflement.

Cette interaction entre l'eau et l'argile trouve sa source dans la surface spécifique des particules argileuses : si l'on déployait la surface de tout les feuillets élémentaires d'un gramme [9] de montmorillonite, on obtiendrait 600 m^2 (et 50 m^2 pour une kaolinite) !

On définit la **teneur en eau** d'une argile de la façon suivante : c'est le rapport entre la masse d'eau et la masse d'argile après un séchage à 105°C . Elle varie de 0% pour une poudre sèche à des valeurs de plus de 300 ou 500% pour des montmorillonites. Les dépôts d'argiles sur lesquels est construite la ville de Mexico [10] ont une teneur en eau de plus de 300% (variant de 150 à 600%).

En fonction de sa teneur en eau, une **argile voit sa consistance** varier, ce qui amène à définir des "limites d'état" ou limites d'Atterberg [11] : **limite de liquidité** et **limite de plasticité**. Elles sont fonction de la nature minéralogique et servent à caractériser les argiles en géotechnique. Au-dessus de la limite de liquidité, l'argile a un comportement s'apparentant à un liquide très visqueux (Lire [Comment la matière se déforme : des fluides et des solides](#)) tandis qu'en dessous de la limite de plasticité l'argile ne peut être modelée sans se fissurer. Ces variations de teneur en eau s'accompagnent de variations de volume.

Les sols naturels alluvionnaires sont constitués d'un mélange de particules de sable, de limon et d'argile. La teneur en argile d'un sol est définie comme le pourcentage massique de particules inférieures à $0,002 \text{ mm}$.

3. Argile et perméabilité

Les argiles et les matériaux argileux sont extrêmement utilisés dans les ouvrages de génie civil. L'une des propriétés des argiles très intéressante est leur faible perméabilité, jusqu'à un million de fois plus faible que celle des sables (Lire [Diffusion et percolation dans les sols](#)). Les centres de stockage de déchets utilisent des couches d'**argiles compactées** pour obtenir une étanchéité isolant les dépôts de l'environnement extérieur. Certains produits associent une couche centimétrique de bentonite [12] à une géomembrane. Une autre application concerne les barrages et les digues. Les grands barrages en remblai (par exemple ceux de Serre-Ponçon et de Grand'Maison ; lire [Les sols pour l'ingénieur](#)) sont constitués de différentes zones et la fonction d'étanchéité est assurée par un noyau en argile compactée ou constitué d'un matériau contenant suffisamment de particules argileuses. Les digues, les petits barrages à vocation agricole, les retenues d'eau collinaires et d'autres retenues sont souvent formées de levées de terre en argile compactée.

Le stockage de déchets nucléaires est prévu dans une couche épaisse d'**argilites** dans l'Est de la France : ce sont des argiles

4. La consolidation et les tassements



Figure 6. Pressoir à raisin : dans ce cas, l'expulsion du fluide se fait radialement : on parle de consolidation radiale. [Source : © Etienne Flavigny]

Les villes et les mégapoles se sont pour beaucoup développées dans les vallées, les estuaires, en bordure de lacs ou sur les façades maritimes. Le sous-sol de ces zones est constitué de matériaux alluvionnaires, limons, argiles et vases. Ces matériaux sont souvent à forte teneur en eau et se sont **consolidés** sous le poids des couches sédimentaires déposées successivement au cours des ères géologiques. Cette consolidation correspond **l'expulsion de l'eau interstitielle** sous l'effet de la contrainte (Lire [Comment la matière se déforme : des fluides et des solides](#)) appliquée par les couches supérieures.

Toute construction en surface apporte un surcroît de contrainte et provoque alors un **tassement** supplémentaire, à l'échelle du bâtiment construit, d'un remblai ou d'une zone urbaine. Une analogie que l'on peut faire de ce processus est celui d'un pressoir à fruits (Figure 6) où le jus est expulsé sous l'effet la contrainte appliquée [14] par la vis agissant sur le plateau.

En raison de la perméabilité faible des argiles, le tassement se développe pendant des temps allant de **quelques jours à plusieurs siècles**. Plusieurs exemples sont célèbres. La **cathédrale de Mexico** a été construite à partir de 1560 et recouvre certains temples aztèques démolis pour sa construction. Les tassements atteignent plus de 2,5 m avec des tassements différentiels [15] de 1,25 m entre les tours Ouest et Est. Plusieurs travaux de préservation ont été entrepris dont ceux de **sous-excavation** : ils consistent à excaver à partir de puits pour créer un tassement du côté où le tassement est moindre (Figure 7).



Figure 7. Vue de la cathédrale de Mexico [Source : Arian Zwegers, (CC BY 2.0), via Flickr]

Cette technique a aussi été utilisée avec succès pour diminuer le tassement différentiel de la **Tour de Pise** : Burland *et al.* [16] ont ainsi pu "rajeunir" l'inclinaison : celle-ci est revenue à la valeur qu'elle avait il y a 300 ans.



Figure 8. Plate-forme aéroportuaire d'Osaka [Source Thorfinn Stainforth (CC BY-SA 3.0), via Wikimedia commons]

Un exemple actuel est celui de la plate-forme aéroportuaire d'Osaka [17] (Kansai International Airport) (Figure 8). Celle-ci est une île artificielle 1,25 x 4 km construite par 18 m de profondeur d'eau. Les **tassements prévus étaient de l'ordre de 11 m** et permettaient un niveau fini de 4 m au dessus du niveau de la mer. Les tassement observés ont été plus forts que prévu (environ 14,3 m) et ont conduit à des travaux importants d'élévation des murs périphériques anti-vagues et aussi à des travaux sur les bâtiments.

Une autre cause de tassement du sous-sol des grandes métropoles est l'abaissement des nappes phréatiques : les besoins en eau nécessitent des pompages dans le sous-sol. L'effet induit est de baisser le niveau des nappes. Les couches de sols qui étaient soumises à la poussée d'Archimède ne le sont plus et leur poids apparent augmente. Ceci crée une surcharge et donc un tassement se développant sur l'ensemble de la zone. On parle alors de la **subsidence du site**. Ce phénomène affecte notamment Bangkok [18], Shanghai ou Venise. Ce tassement s'additionne à l'élévation du niveau des mers, rendant ces métropoles vulnérables aux inondations.

En ingénierie géotechnique, l'évaluation des tassements de construction est un point important du projet : de combien tassera le bâtiment et en combien de temps sera-t-il atteint ?

5. La résistance des argiles

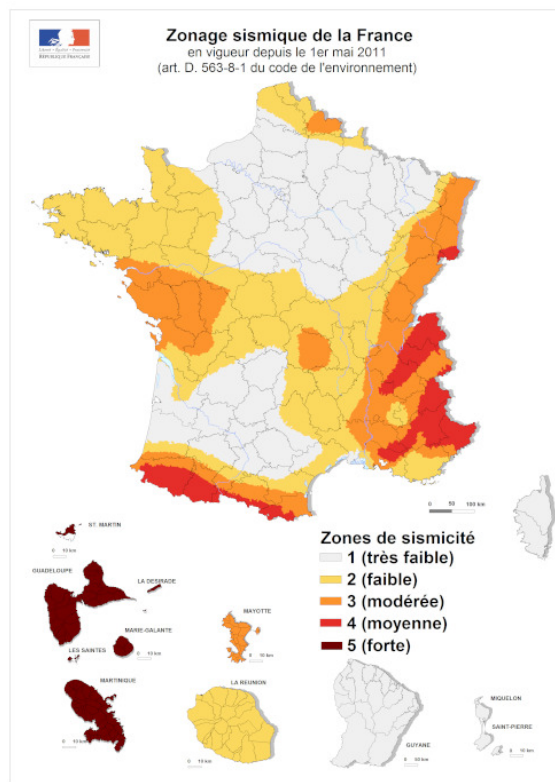


Figure 9. Zonage sismique de la France. Voir réf. [20] [Source BRGM]

Un autre aspect de l'ingénierie géotechnique est de se protéger de la rupture. Pour cela, il faut connaître la résistance des argiles. Celles-ci sont des matériaux qui présentent **une cohésion et un angle de frottement** (Lire [Comment la matière se déforme : des fluides et des solides](#)). Leur cohésion, phénomène analogue à une sorte de colle entre les feuillets élémentaires, dépend de la teneur en eau et de l'histoire des dépôts argileux, tandis que l'angle de frottement est lié à la minéralogie. Ces deux paramètres sont utilisés dans les **calculs de stabilité des fondations d'ouvrages**, de barrages, de digues et d'excavations. Lorsque les charges appliquées deviennent plus fortes que la résistance de l'argile, il y a rupture. Cette rupture peut survenir à court terme, notamment en fin de construction, ou à long terme. Les glissements de terrains fournissent un exemple où la résistance des argiles est le paramètre important contrôlant la stabilité d'une pente ou naturelle ou anthropique (Lire [Les glissements de terrain](#)). Construire sur des sols argileux de mauvaises qualités ou de résistance insuffisante a conduit au développement des techniques d'amélioration de sol (lire [Le renforcement des sols : des techniques devenues indispensables](#)) pour augmenter la résistance et aussi diminuer les tassements.

Pour les villes comportant dans leur sous-sol des couches alluvionnaires argileuses, les séismes peuvent avoir des effets induits considérables : on parle d'"**effet de site**" [19]. Les **ondes sismiques** peuvent être piégées dans les couches argileuses et se trouvent **amplifiées**. Un exemple en est donné par le séisme destructeur qui a frappé Mexico en 1985 : bien que l'épicentre de ce séisme soit lointain, les sollicitations sismiques ont été amplifiées dans le centre de Mexico, ville construite sur des dépôts argileux de très forte teneur en eau et de faible cohésion. La prise en compte de ce phénomène a été intégrée dans le zonage sismique de la France ; la zone du sillon alpin Genève-Annecy-Grenoble-Valence est en zone de sismicité 4, la plus forte du territoire métropolitain [20] (Figure 9) : la présence d'épaisseurs importantes d'alluvions fines argileuses explique ce zonage.

6. Messages à retenir

Les argiles sont présentes partout dans la nature.

Elles sont à la croisée de nombreuses sciences et techniques.

Leurs propriétés découlent de leur structure en feuillets.

Présentes dans le sous-sol des sites alluvionnaires, leur comportement génère des difficultés pour les ouvrages de génie civil.

Notes et références

Image de couverture. La Tour de Pise. [Source : Kiste11 (CC BY-SA 4.0)]

[1] *La Sainte Bible* (1965) École biblique de Jérusalem, Desclée de Brouwer.

[2] Bégouën H. (1912) *Les statues d'argile préhistoriques de la caverne du Tuc d'Audoubert (Ariège)*, Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Volume 56, [Numéro 7](#), pp. 532-538 ,
http://www.persee.fr/doc/crai_00650536_1912_num_56_7_73103

[3] L'humidité relative est la valeur du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir. Elle varie de 0% pour un air complètement sec et au-delà de 100% l'eau se forme en gouttelettes.

[4] Leroi-Gourhan A. (1984) *L'Art des cavernes : Atlas des grottes ornées paléolithiques françaises*.

[5] Kramer S.N. (2017) *L'histoire commence à Sumer*, Flammarion.

[6] Gourdier S., Plat E. (2018) *Impact du changement climatique sur la sinistralité due au retrait-gonflement des argiles*, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, ENPC, Marne-la-Vallée,
<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01768395>

[7] <http://infoterre.brgm.fr/page/alea-retrait-gonflement>.

[8] Reiffsteck P., Zerhouni M., Averlan J-L (2018), *Essais de laboratoire pour la mécanique des sols et la géotechnique*, Presses de l'ENPC, Paris.

[9] Un gramme correspond environ la masse contenue dans une petite cuillère d'argile verte.

[10] Ovando E. (2011), *Some geotechnical properties to characterize Mexico City Clay*,
<http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper889.pdf>

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Atterberg

[12] La bentonite est une montmorillonite très utilisée en génie civil ou génie pétrolier pour les forages.

[13] www.andra.fr

[14] La contrainte est ici la force appliquée divisée par la section du pressoir.

[15] Le tassement différentiel est la différence de tassement entre deux fondations d'un bâtiment et entraîne des fissurations.

[16] Burland, J.B., Jamiolkowski, M., Viggiani C. (1998), *Stabilizing the leaning tower of Pisa*, Bulletin of Engineering Geology and Environment, n°57 pp.91-99.

[17] Puzrin, A.M., Alonso E.E., Pinyol N.M. (2010), *Geomechanics of failures*, Springer.

[18] Phien-wej N., Giao P.H., Nutalaya P. (2006), *Land subsidence in Bangkok, Thailand*, In Engineering Geology, Volume 82, Issue 4, Pages 187-201, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.004>.(
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795205002693>

[19] Bard, P.-Y. (2002), *Les effets de site et la cuvette grenobloise*, Risques-Infos n°13, IRMA Grenoble, Mai 2002

[20] Zonage sismique de la France. <http://www.planseisme.fr/Zonage-sismique-de-la-France.html>

Pour citer cet article: **Auteur** : FLAVIGNY Etienne (2019), Les argiles : un nanomatériau naturel et surprenant, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=9430>

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
