

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Malo L'Helguen, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

Certains sols argileux possèdent des propriétés hydriques qui entraînent leur modification en fonction des variations d'eau du terrain. Ainsi lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraîne un tassement irrégulier du sol en surface, c'est le retrait. À l'inverse, un nouvel apport d'eau produit un phénomène de gonflement. Les sols argileux peuvent donc absorber et relâcher de très grandes quantités d'eau, faisant inévitablement varier leurs volumes. C'est un réel problème en termes de construction, et il concerne 20% de la population mondiale aujourd'hui. Pour des pays au climat tempéré, comme la France, les argiles sont souvent saturées en eau, ce qui limite le gonflement d'un terrain. Les mouvements les plus importants sont donc observés en période sèche [16].

Ces phénomènes naturels, sans danger pour les populations, provoquent des différences de tassement du sol qui peuvent avoir des conséquences importantes sur les bâtiments à fondations superficielles. On peut le remarquer par des fissurations en façade ou encore le détachement des éléments jointifs à la construction tels que les garages, terrasses ou perrons. Ces tassements peuvent également entraîner une distorsion des portes et fenêtres, une dislocation des dallages et des cloisons et, quelques fois la rupture de canalisations enterrées [16].



Figure 1 : Exemples de dégâts dus aux retraits ou gonflements des argiles, sources [17,18,19]

Les maisons individuelles souvent construites sur des fondations superficielles sont les plus vulnérables au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et des déformations volumiques induites du sol de fondation. En premier lieu, les saisonnalités de plus en plus marquées par le changement climatique, provoquent la dessiccation et le retrait des couches superficielles du sol jusqu'à 2 m de profondeur pendant la période de sécheresse, puis une saturation marquée par le gonflement des sols argileux pendant la période de précipitations. En second lieu, la présence de la végétation près des fondations accentue la succion du sol par l'action racinaire pouvant atteindre 5 m de profondeur. Enfin, la gestion des eaux à proximité de la maison peut être dommageable, par exemple une infiltration au droit des fondations peut provoquer la plastification du sol et leur enfoncement. Ainsi, ces variations de teneur en eau dans le sol argileux peuvent compromettre ses propriétés hydromécaniques et entraîner une fissuration et même une rupture de la structure qu'il supporte [20].

Les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux sont observés depuis longtemps dans les pays au climat sec, provoquant de nombreux dommages aux bâtiments et aux voiries. En France, jusqu'à récemment les pluies étaient plus régulières et les variations de saison moins marquées, ces phénomènes sont apparus à l'occasion de sécheresses sévères comme celles des années 1976, 1989 et 1990 ou 2003. Le retrait-gonflement du sol peut provoquer des tassements différentiels, la construction ne s'enfonce pas uniformément dans le sol, des contraintes supplémentaires apparaissent alors dans les éléments porteurs de l'ouvrage. Des fissures, des distorsions de portes et fenêtres, des dislocations des dallages et des cloisons ou encore les ruptures de canalisation enterrées peuvent survenir. Les dégâts sont donc importants.

Cette ressource présente comment identifier un sol gonflant, comment construire sans risque sur des sols argileux ou encore comment réparer les sinistres causés par cet aléa de retrait-gonflement.

1 – Aspects physique du matériau argile

1.1 - Définition du matériau argile - Phénomène de retrait/gonflement

Une argile est une roche sédimentaire naturelle meuble à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaires (feuillet).

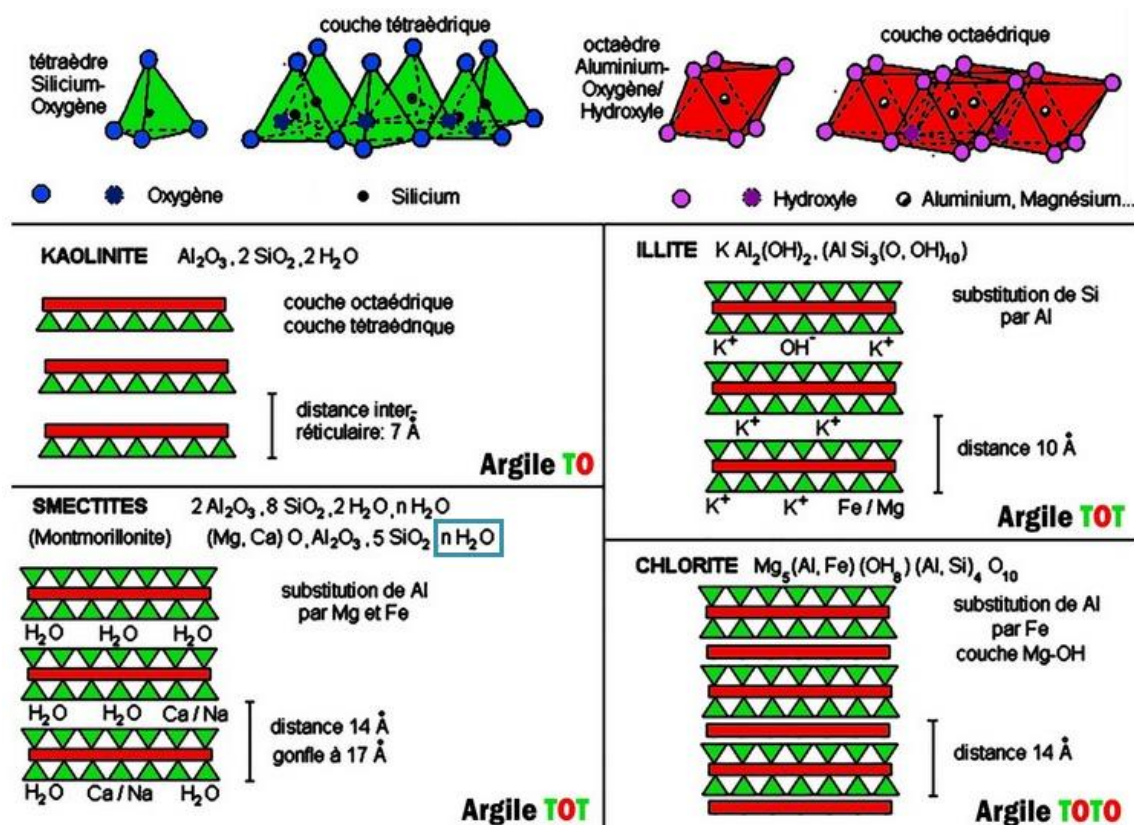


Figure 2 : Différentes familles d'argile et leur composition, source [2]

Ces schémas figure 2 nous montrent la composition de quelques familles d'argile. Les feuillets des argiles sont composés de couches tétraédriques (silicium - oxygène) et octaédriques (aluminium - oxygène). C'est entre ces feuillets que peuvent s'introduire des molécules d'eau. Le comportement vis-à-vis de l'eau n'est donc pas le même pour toutes les argiles. Les smectites peuvent absorber plus ou moins d'eau (d'où le terme $n H_2O$ dans la composition chimique). Pour certaines argiles, la distance entre les feuillets peut varier.

Voici [une courte vidéo](#) qui illustre la différence de plasticité entre une boue de smectite et une boue de kaolinite. On comprend bien la différence de capacité d'absorption entre les différentes argiles.

1.2 - Smectites

Ce sont les smectites qui posent particulièrement problème en construction. Elles sont appelées argiles gonflantes. La distance entre les feuillets peut beaucoup varier et accueillir plus ou moins de molécules d'eau. Voici quelques argiles dans la famille des smectites : la montmorillonite, bentonite, la beidellite, la nontronite ou encore l'hectorite. La montmorillonite est la smectite la plus courante et la plus connue.

2 – Quelques valeurs utiles en géotechnique

Afin de comprendre le fonctionnement de l'argile, quelques notions de géotechniques sont nécessaires.

2.1 - Propriétés physiques des sols

Un sol est composé de trois phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. Voici quelques grandeurs intéressantes lors de l'étude d'un sol :

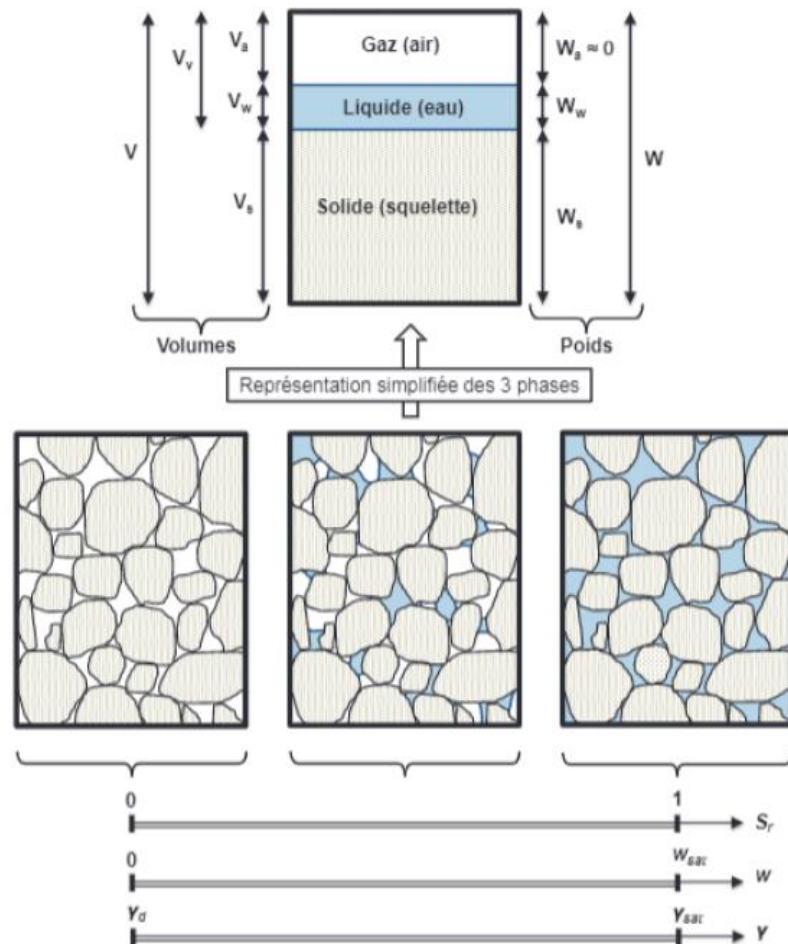


Figure 3 : Les différentes phases dans un sol et les grandeurs physiques associées, source [24]

Cela permet d'introduire :

- L'indice des vides $e = \frac{V_v}{V_s}$
- La porosité $n = \frac{V_v}{V}$
- Le degré de saturation $S_r = \frac{V_w}{V_v}$
- La masse volumique apparente ou masse volumique humide $\rho = \frac{m}{V}$

- La teneur en eau $w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{\gamma_s}$
- La masse volumique sèche $\rho_d = \frac{m_s}{V}$

2.2 - Essais de laboratoire

Voici les principaux essais de laboratoire qui permettent de déterminer certaines caractéristiques d'un sol.

a) Limites d'Atterberg

En fonction de la teneur en eau, les argiles ont une consistance variable un changement de consistance. Pour préciser les états, on observe à teneur en eau croissante (figure 4) :

- État solide sans retrait : sol très peu déformable, son volume est indépendant de la teneur en eau si celle-ci reste inférieure à la limite de retrait w_R ;
- État solide avec retrait : sol est très peu déformable, mais son volume change avec la teneur en eau si celle-ci varie entre la limite de retrait et la limite de plasticité w_P ;
- État plastique : sol à cohésion notable mais se déforme sous l'effet de charges assez faibles pour une teneur en eau comprise entre la limite de plasticité et la limite de liquidité w_L ;
- État liquide : sol à cohésion très faible et à aspect d'un liquide.

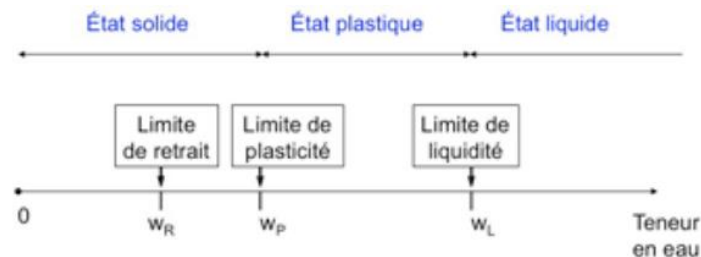


Figure 4 : Limites d'Atterberg, source [26]

Essai de limite de liquidité (Coupelle de Casagrande)

L'essai permet de déterminer la limite de liquidité w_L d'un sol.

Déroulement de l'essai :

On place dans la coupelle le sol à une teneur en eau w . On effectue dans le sol (au centre de la coupelle) une rainure de 2 mm de large. On applique des chocs à un rythme régulier jusqu'à ce que les deux lèvres de la rainure se rejoignent sur 1 cm de longueur. On appelle N le nombre de chocs nécessaires. Par définition, lorsque $N=25$, $w = w_L$.



Figure 5 : Essai de limite de liquidité à l'aide de la coupelle de Casagrande, image extraite de la vidéo « [Limites d'Atterberg](#) »

La limite de liquidité w_L s'obtient par la formule empirique suivante : $w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$

La teneur en eau est souvent déterminée après l'essai, en prélevant directement le sol de la coupelle, en faisant une différence de masse avant et après passage à l'étuve.

NB : Cet essai n'est valable que pour des sols dont la granulométrie est inférieure à 400 μm , ce qui est le cas des argiles.

Essai de limite de plasticité

Déroulement de l'essai :

Des rouleaux de sols sont progressivement formés jusqu'à un diamètre 3 mm. Lorsque le rouleau se brise lorsqu'il atteint ce diamètre, l'échantillon est pesé puis placé dans une étuve à 110°C, et repesé. La sensibilité de l'essai et la forte influence de l'opérateur sur le résultat font qu'il faut répéter l'essai plusieurs fois pour obtenir un résultat fiable.

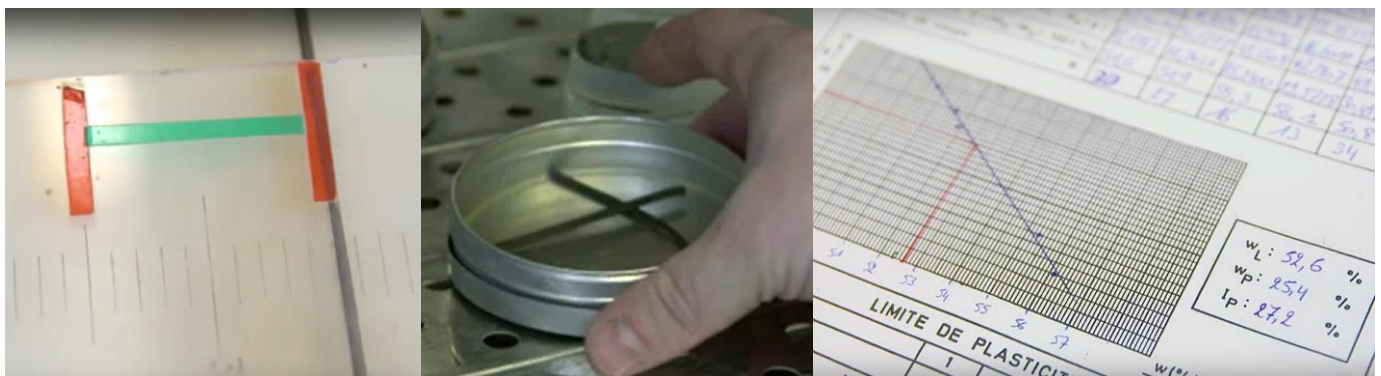


Figure 6 : Essai de limite de plasticité, images extraites de la vidéo « [Limites d'Attenberg](#) »

Cet essai permet de déterminer la teneur en eau du sol que l'on appelle limite de plasticité w_P d'un sol. w_P est la teneur en eau du sol pour laquelle le rouleau de 3 mm de diamètre se brise lors d'un soulèvement de 1 à 2 cm au centre.

NB : On appelle I_P l'indice de plasticité, tel que $I_P = w_L - w_P$

L'indice de plasticité permet de déterminer le degré de plasticité du sol selon la classification en tableau 1. La figure 7 montre la relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité de plusieurs sols types. Il traduit bien le caractère très gonflant de l'argile volcanique de Mexico, exemple que nous verrons section 6.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Sol non plastique
$5 < I_p < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_p < 50$	Sol plastique
$I_p > 50$	Sol très plastique

Tableau 1 : Degré de plasticité des sols

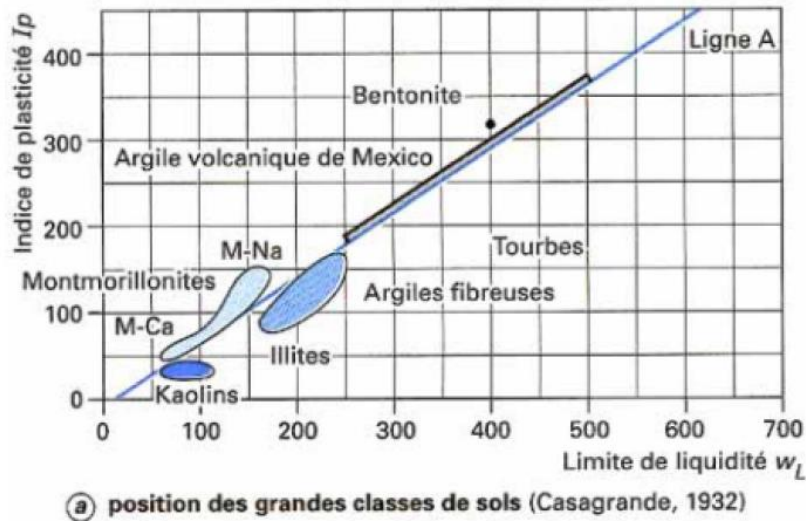


Figure 7 : Relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour des sols types, source [13]

b) Essai œdométrique

L'essai œdométrique permet de déterminer plusieurs caractéristiques du sol liées au tassement et à son comportement en compression.

Déroulement de l'essai :

On place une éprouvette de sol saturée en eau entre 2 pierres poreuses verticales, et entre un système de bagues qui empêche tout déplacement horizontal de l'éprouvette (figure 8). Puis on vient charger verticalement l'éprouvette par le dessus avec une charge Q pendant généralement 24h. On augmente ensuite la charge et on répète l'opération. Un comparateur permet de relever la différence de hauteur de l'éprouvette au cours de l'essai. L'échantillon reste saturé pendant toute la durée de l'essai.

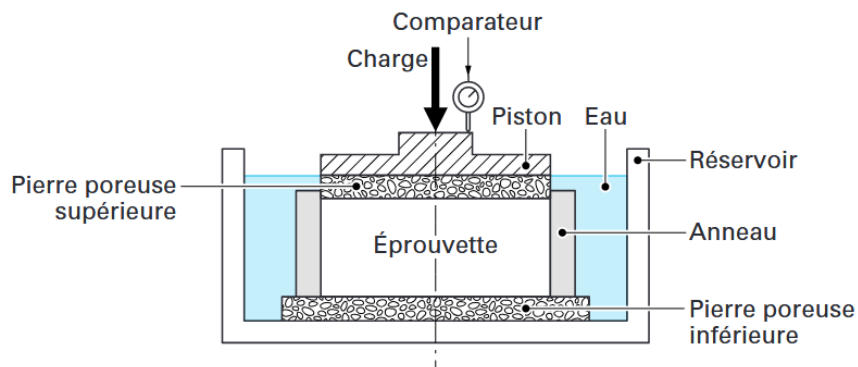


Figure 8 : Schématisation d'une cellule œdométrique dite ouverte, source [8]

À l'issue de l'essai, deux courbes sont tracées :

- La courbe de consolidation, qui représente l'évolution de la différence de hauteur Δh en fonction du temps (échelle logarithmique en abscisse), avec un chargement constant ;
 - La courbe de compressibilité dans le plan, qui représente l'évolution de l'indice des vides e en fonction de la contrainte appliquée (échelle logarithmique en abscisse).
- Notons que les variations de e et de h sont reliées puisque la variation de volume n'est due qu'à la variation de hauteur.

On peut identifier grâce aux courbes de consolidation (exemple figure 9) la phase de consolidation primaire et la phase de consolidation secondaire. La limite entre les phases est le point d'intersection entre les tangentes des deux pentes.

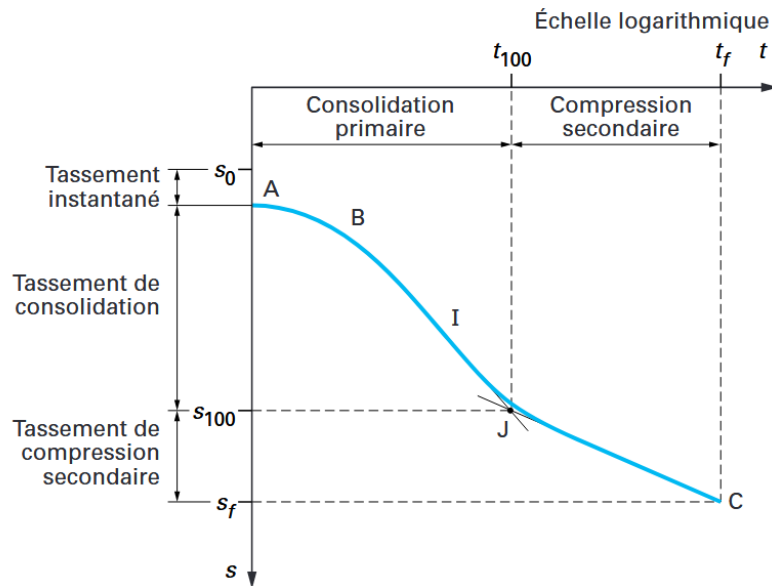


Figure 9 : Exemple d'une courbe de consolidation sur un sol fin, source [8]

On compare à présent des courbes de compressibilité entre plusieurs échantillons, kaolinite (courbe violette figure 10), montmorillonite (courbe rouge), et un mélange des deux en proportion 65% K - 35% M pour la courbe orange, et 35% K - 65% M courbe bleu.

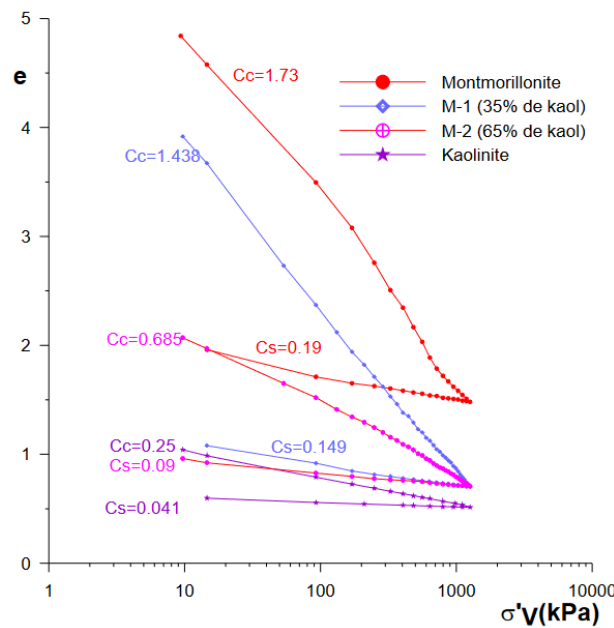


Figure 10 : Essais œdométriques sur la kaolinite (K), montmorillonite (M), M-1 (35%K-65%M), et M-2(65%K-35%M), source [14]

La montmorillonite est très plastique. On remarque sur les courbes figure 10, que la montmorillonite est beaucoup plus compressible pour des niveaux de contrainte équivalente. On voit également que lors du déchargement, les pentes sont plus grandes que dans la phase élastique (première phase de chargement). C_c est l'indice de gonflement (première phase de chargement), C_s est l'indice de gonflement lors du déchargement.

Grâce aux courbes de compressibilité, on peut identifier la contrainte de préconsolidation σ'_p qui correspond à la plus forte contrainte à laquelle a été soumis le sol dans sa vie, l'indice de compression C_c (sans dimension) utilisé pour calculer le tassement de la couche de sol lorsque celui-ci est soumis à une contrainte supérieure à σ'_p et l'indice de gonflement C_s (sans dimension) utilisé pour calculer

le tassement de la couche de sol lorsque celui-ci est soumis à une contrainte inférieure à σ'_p ou sur des cycles de déchargement-rechargement.

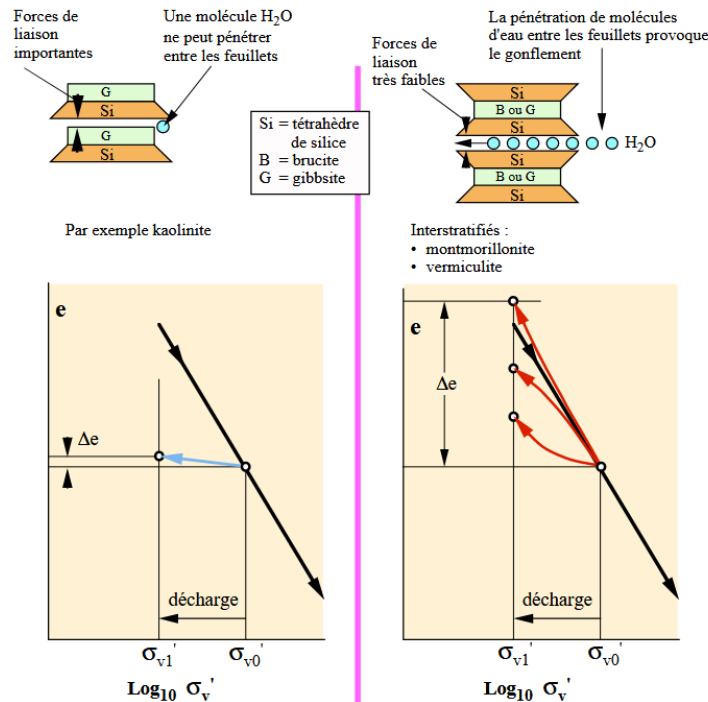


Figure 11 : Exemple d'une courbe de compressibilité, source [1]

c) Essai au bleu de méthylène

Cet essai permet de déterminer la quantité d'argile sensible dans un sol, en d'autres termes d'évaluer sa surface spécifique.

La surface spécifique est le rapport entre la surface réelle d'un objet et sa masse (m^2/kg en unité SI). Plus l'objet est élancé et fin, plus sa surface spécifique est importante. Voici deux schémas (figure 12) qui expliquent cette grandeur : l'image de gauche insiste sur le fait que la présence de sillon augmente la surface spécifique pour une même surface apparente, et l'image de droite montre les arrangements qui augmentent la surface spécifique. Plus la surface spécifique est grande, plus la surface en contact avec l'extérieur est importante.

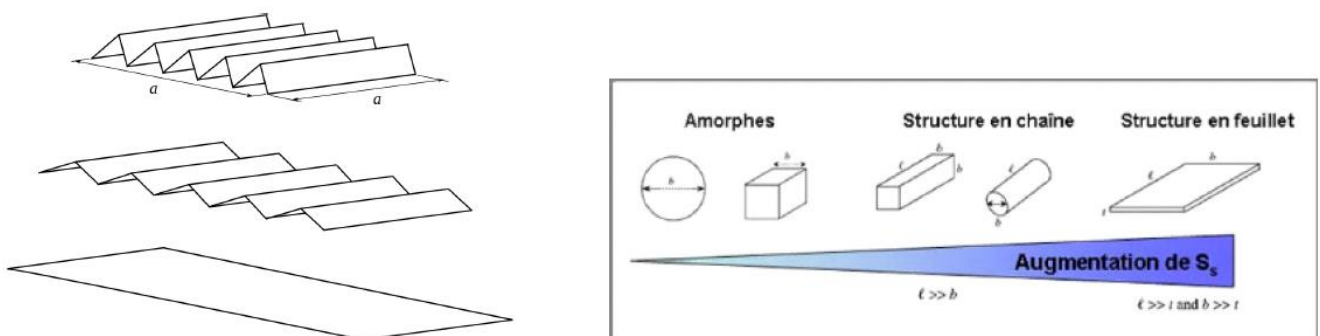


Figure 12 : Schémas explicatifs de la surface spécifique, source [10]

Déroulement de l'essai :

On tamise une masse m_0 de sol sec à 2 mm tel que $C = \text{tamisat}/m_0$. On mélange cette masse tamisée dans de l'eau distillée. On ajoute ensuite une solution de bleu de méthylène tout en gardant le mélange en agitation. On dépose à l'aide d'une baguette en verre une goutte de la solution sur du papier filtre. Si le test est négatif (l'auréole humide est incolore), on rajoute du bleu au mélange. Si le test est positif (l'auréole humide devient bleue), on le recommence 5 fois de suite par espacement

d'une minute (la solution est toujours en agitation). Si le test est toujours positif au bout de 5 minutes, on relève la masse B totale de bleu introduite dans le mélange.

On introduit la *VBS* (Valeur de Bleu du Sol) :

$$VBS = \frac{B}{m_0} C \cdot 100$$

Avec :

- *B* : masse de bleu
- *m₀* : masse de sol sec initiale
- *C* : fraction massique des grains au diamètre inférieur à 2mm dans l'échantillon de masse *m₀*

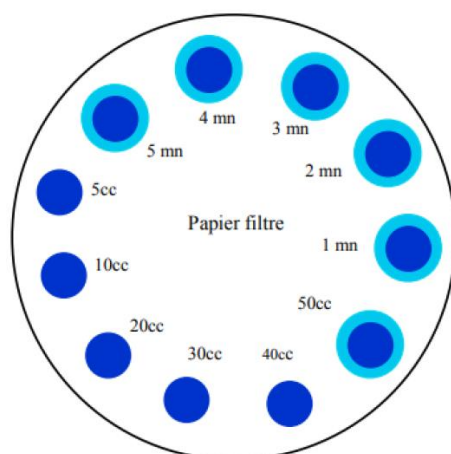


Figure 13 : Exemple de résultats obtenus pendant une manipulation, source [3]

Le bleu se fixe donc sur les particules de sol jusqu'à ce que celui-ci soit saturé en bleu, et la grandeur VBS rend compte de la surface spécifique du sol. On peut alors déterminer la nature du sol grâce à sa valeur au bleu (tableau 2).

Valeur VBS	Classification
0 < VBS < 0,2	Sable
0,2 < VBS < 2,5	Sol limoneux
2,5 < VBS < 6	Sol limoneux - argileux
6 < VBS < 8	Sol argileux
VBS > 8	Sol très argileux

Tableau 2 : Classification des sols en fonction de leurs valeurs au bleu de méthylène

Le tableau 3 montre les écarts de certaines grandeurs qui traduisent un comportement gonflant du matériau, d'une montmorillonite, d'un kaolin (famille des kaolinites), d'une illite et d'un sol fin de nature limono-argileuse. On note que la montmorillonite possède une très grande surface spécifique et des limites d'Atterberg élevées.

	Montmorillonite	Kaolin	Illite
w _p [%]	160	30	35
w _L [%]	450	50	70
Surface spécifique [m ² /g]	700-800	10-20	110
VBS	20	2	5

Tableau 3 : Comparaison de quelques ordres de grandeur de caractéristiques physiques et hydriques de plusieurs argiles

3 – Aspects géotechniques et aléas

Une étude géotechnique est effectuée en amont de chaque projet de construction. Des forages sont effectués in situ afin de connaître la composition du sol sur une épaisseur voulue. La présence d'argile peut alors être détectée. De plus, le BRGM (Bureau des Recherches Géologiques et Minières) donne accès à ses cartes géologiques numériques nationales et l'une d'entre elles est consacrée aux aléas de retrait-gonflement.

On retrouve trois intensités d'aléas :



Figure 14 : Légende de la carte d'aléa retrait-gonflement du BRGM, source [4]

L'intensité de l'aléa est déterminée grâce à plusieurs critères. D'abord, il y a le critère lithologique qui permet de distinguer les terrains essentiellement argileux de ceux où l'argile est minoritaire. Il prend en compte l'hétérogénéité des formations et leurs épaisseurs comme détaillé tableau 4.

Type de formation	Susceptibilité	Note lithologique
Formation non argileuse mais contenant localement des passées ou des poches argileuses (ex : alluvions avec lentilles argileuses, calcaire avec poches karstiques, ...)	faible	1
Formation présentant un terme argileux non prédominant de type calcaire argileux ou sable argileux	moyenne	2
Formation à dominante argileuse, présentant un terme ou une passée non argileuse (ex : alternance marno-calcaire ou sablo-argileuse) ou très mince (moins de 3 m)	forte	3
Formation essentiellement argileuse ou marneuse, d'épaisseur supérieure à 3 m et continue	très forte	4

Tableau 4 : Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argilo-marneuse en fonction du critère lithologique, source [5]

Ensuite, le critère minéralogique se base sur le pourcentage moyen de minéraux gonflants dans le sol.

% moyen de minéraux gonflants	Susceptibilité	Note minéralogique
< 25 %	faible	1
25 à 50 %	moyenne	2
50 à 80 %	forte	3
> 80 %	très forte	4

Tableau 5 : Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argilo-marneuse en fonction du critère minéralogique, source [5]

Enfin, le critère géotechnique fixe la note géotechnique du sol en fonction de sa valeur au bleu, de son retrait linéaire et de sa limite de plasticité w_p . Le retrait linéaire indique l'importance de retrait volumique d'un sol lors de son assèchement.

Valeur de bleu	Retrait linéaire	Indice de plasticité	Susceptibilité	Note géotechnique
< 2,5	< 0,4	< 12	Faible	1
2,5 à 6	0,4 à 0,65	12 à 25	Moyenne	2
6 à 8	0,65 à 0,75	25 à 40	Forte	3
> 8	≥ 0,75	≥ 40	Très forte	4

Tableau 6 : Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argilo-marneuse en fonction du critère géotechnique, source [5]

On voit par exemple que la localisation de l'ENS Paris-Saclay, sur le plateau du Moulon dans le département de l'Essonne, est sur un site potentiellement dangereux. On retrouve de l'argile à Meulière de Montmorency entre 2,50 m et 4,35 mètres de profondeur et entre 11,50 et 13,80 mètres de profondeur.

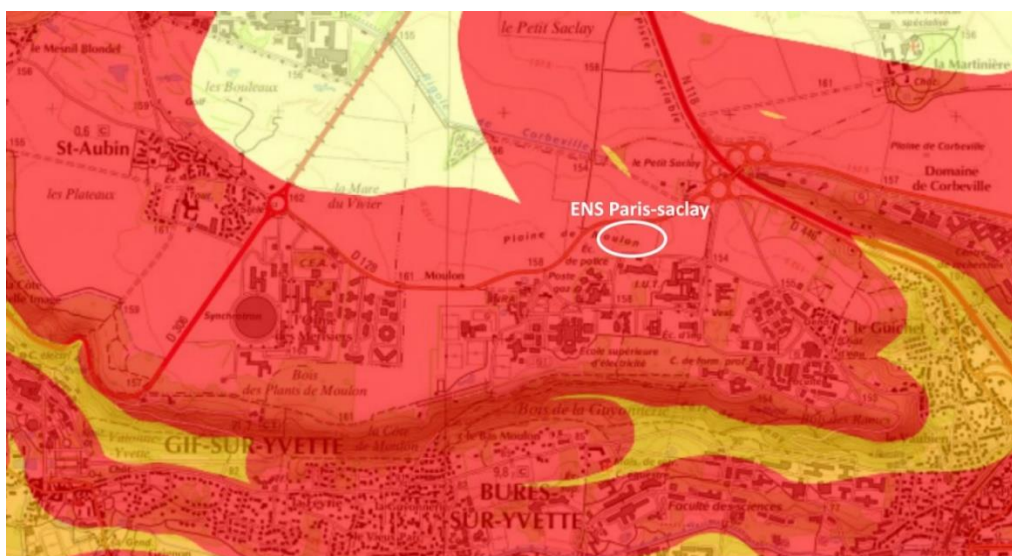


Figure 15 : Carte des aléas retrait-gonflement sur le plateau du Moulon, source [4]

4 – Aspects techniques des solutions vis-à-vis d'un sol argileux dans le monde de la construction neuve

Si la présence d'argile a été détectée grâce aux études géotechniques effectuées en amont, et que le terrain est sujet à un risque de retrait-gonflement, certaines règles de construction sont à appliquer pour limiter au maximum les risques liés à l'aléa. Voici un récapitulatif de ces principales règles.

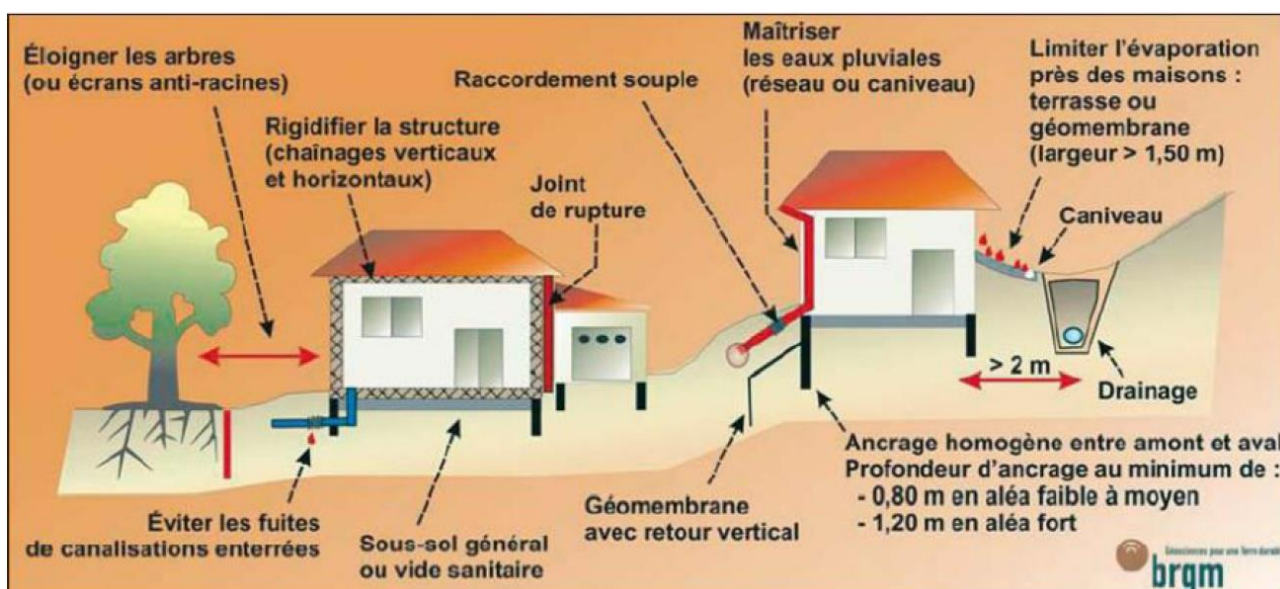


Figure 16 : Principales règles de construction dans les sols argileux soumis au retrait-gonflement, source [6]

La structure peut être rigidifiée à l'aide de chaînages verticaux et horizontaux dans les constructions en maçonnerie. On va aussi désolidariser certaines parties de l'ouvrage grâce à des joints de rupture (même principe que des joints de dilatation). La mise en place d'un « trottoir périphérique » est recommandée pour limiter l'évaporation de l'eau dans le sol aux abords de l'ouvrage. On peut donc prévoir des terrasses ou une géomembrane sur au moins 1,5 m de large.

On privilégie les fondations sur semelles continues, et la longueur d'ancrage est plus importante en aval qu'en amont si le terrain est en pente tout en prenant soin d'être en profondeur hors-gel. La présence d'un vide sanitaire est importante pour éviter tout effort sur la dalle au-dessus des fondations superficielles. Un radier est aussi une solution envisageable car il rigidifie la structure. On place aussi un système de drainage en amont pour limiter l'apport d'eau dans le sol sous l'ouvrage.

Si l'étude géotechnique montre des couches de sol non sujettes au retrait-gonflement sous la couche d'argile, il peut être intéressant de considérer une solution à base de fondations profondes ou semi-profondes afin d'ancrer le bâtiment dans ces autres couches et s'affranchir des risques liés à l'aléa. On peut par exemple utiliser des systèmes de pieux ou micropieux (section 5.2). C'est aussi une solution employée lorsque la mise en place des fondations superficielles doit se faire à une profondeur supérieure à 1,5 m car le coût de l'excavation devient trop important. Pour les fondations profondes comme superficielles en béton armé, une attention particulière est portée sur les ferrillages (recouvrement, aciers de liaison ou encore enrobage) [21].

Les canalisations doivent aussi résister à l'aléa. Celles-ci peuvent être souples pour éviter qu'elles ne cassent lorsque le sol gonfle. La gestion de l'eau de pluie est à réfléchir, afin de ne pas rejeter les eaux collectées en toiture aux abords immédiats de la construction.

Enfin, les arbres pompant l'eau du sol sont éloignés ou des écrans anti-racines sont placés pour que les arbres ne soient pas responsables de la variation de teneur en eau du sol. Ces écrans peuvent être faits de membranes géotextiles, de béton et voire même d'un rideau de palplanche [25].

Toutes ces dispositions permettent donc de limiter la variation de la teneur en eau du sol argileux sous l'ouvrage. Elles sont spécifiées dans les DTU (DTU 13-11, 13-12 et 20-1 notamment), notamment pour les règles liées aux chaînages. Cependant, les constructions plus anciennes ont été construites sans ces règles et subissent des sinistres.

5 – Réparation des ouvrages sur sols gonflants

5.1 - Suivi des déformations

Un suivi des fissures est indicateur de la gravité. Ainsi une fissure de 0,2 mm mesurée en hiver peut être aussi inquiétante qu'une fissure de 2 mm mesurée en été. En effet, sur des constructions en sols argileux, les fissures s'agrandissent lors des périodes sèches et se referment lors des périodes humides (figure 17) [21].



Figure 17 : Une même fissure, ouverte de 2 mm en fin d'été et de 0,5 mm en fin d'hiver, source [21]

Lors de la survenue de dommage, un relevé des fissures (localisation, direction, longueur, largeur, traversante ou non, etc.), et éventuellement la mise en place de témoin en plâtre par exemple ou encore de jauges à vernier (figure 18), permet de suivre les déformations dans le temps. Des travaux pourront ensuite être envisagés, en effet il est possible de rénover l'ouvrage, notamment au niveau de ses fondations.

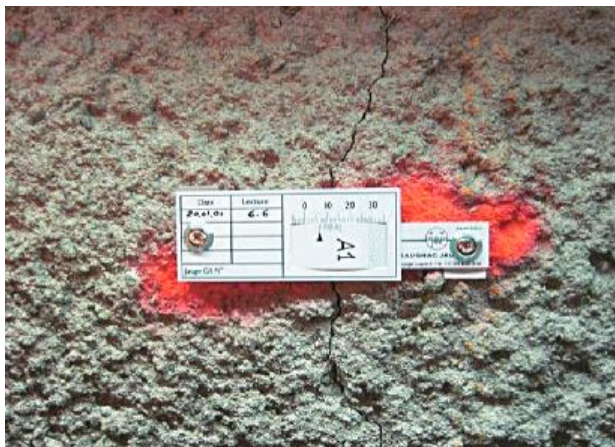


Figure 18 : Jauge à vernier mesurant l'évolution de l'ouverture d'une fissure, source [21]

5.2 - Reprise en sous-œuvre

Injection de micro-pieux

L'objectif de la reprise en sous-œuvre par micro-pieux est d'atteindre des couches plus profondes dans le sol qui ont une meilleure portance. Les micro-pieux, d'un diamètre généralement maximum de 25 cm, vont aider les fondations superficielles déjà existantes à reprendre le poids de l'ouvrage. Pour cela, on perce les fondations en prolongeant le forage plus en profondeur, on place des armatures métalliques puis on coule un coulis de ciment à haute résistance. Cette [vidéo](#) [7] illustre la mise en place de cette solution. Le forage rend cette méthode compliquée dans les zones d'habitat denses car il émet d'importantes vibrations et beaucoup de bruit. Aussi, cette solution impose un relogement temporaire des occupants de la maison, ce qui peut s'avérer problématique, en plus du coût important de l'opération.

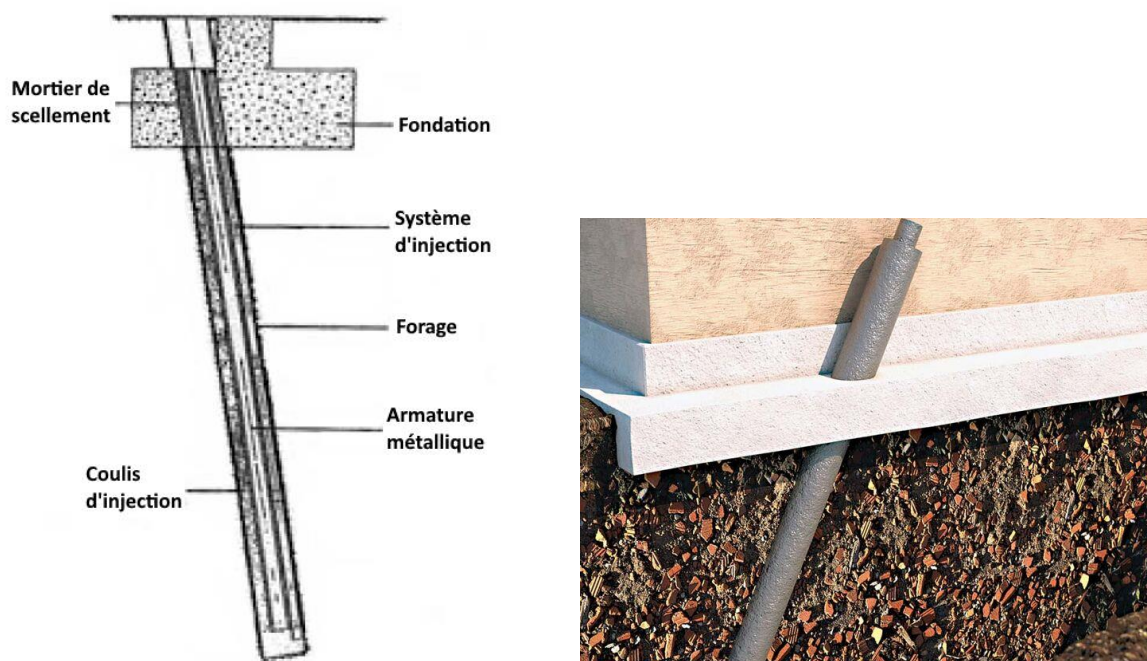


Figure 19 : Illustration de l'installation d'un micro-pieu, sources [11,22]

Injection de résine

Il est possible d'injecter des résines expansives de polyuréthane sous les fondations afin d'améliorer l'interaction sol/fondations. Ces résines permettent d'imperméabiliser l'interface sous les fondations, de combler les vides présents sous les fondations, voire de relever l'ouvrage grâce à leurs pressions d'expansion. L'ouvrage est ainsi stabilisé et consolidé. C'est une solution plus rapide, moins chère et plus adaptée à des chantiers dont l'accessibilité est réduite. De plus, la solution est viable pour des édifices de surface et de taille importantes.

Lors de la sécheresse de 2003, de nombreux édifices mal conçus vis-à-vis du risque de retrait-gonflement se sont retrouvés sinistrés. Ces deux solutions ont été les principales mises en œuvre.

5.3 - Installation de tirants

Il est possible de réaliser un renforcement horizontal des murs en installant des tirants et des croix de chaînage (figure 20), rigidifiant ainsi la construction.



Figure 20 : Exemple de renforcement des constructions par des tirants visibles sur les façades par les croix de chaînage, sources [21,23]

6 – Mexico : une ville qui s'enfonce

Certaines villes du Monde ont été construites sur des zones peu stables. La ville de Mexico, capitale du Mexique, a été construite sur une couche d'argile de plus de 100 mètres d'épaisseur à certains endroits, lit d'un ancien lac. Cette argile s'appelle l'argile de Mexico et possède des propriétés très gonflantes. L'eau potable de la ville est en grande partie issue d'extraction souterraine, ainsi le niveau de la nappe phréatique a déjà considérablement baissé. Le sol se draine, et l'argile se compacte peu à peu. Le tassement annuel est de l'ordre de 50 cm (30 m de tassement sont encore estimés), certains habitants voient littéralement leur habitation s'enfoncer dans le sol.

Étude de la construction du nouvel aéroport de Mexico

Contexte

Le projet consiste à agrandir l'aéroport de Mexico, en construisant un nouveau terminal ainsi que deux pistes qui représentent une surface totale de 4600 hectares. Voici une idée du projet :



Figure 21 : Projet du Nouvel Aéroport International de Mexico, source [ERSIGROUP](#)

Cependant, étant à proximité de la ville, la situation géotechnique est la même, et on notera particulièrement les hautes teneurs en eau [w] (de 165 à 300%) et les indices de vides [e_0] (de 3,3 à 12,8) de ces sols en place (cf tableau 7).

Désignation	Z_{sup}	Z_{inf}	H	w	γ	E_{oed}	e_0
	m	m	m	%	kN/m ³	MPa	
Croûte peu profonde	0	-1	1	-	14.5	4.50	-
	-1	-5	4	165	13.7	0.94	3.28
	-5	-8	3	300	12.7	0.15	10.54
	-8	-11	3	250	11.2	0.44	12.84
Argile très compressible	-11	-16	5	230	12.2	0.41	6.22
	-16	-20	4	200	12.3	1.54	8.65
	-20	-27	7	225	12.2	1.44	7.74
	-27	-30	3	230	12.0	1.23	8.45
Substratum	-30	-32	2	-	19.0	30.00	-

Tableau 7 : Composition du sol et caractéristiques des couches, source [15]

Deux solutions ont été mises en œuvre pour consolider ce sol. En effet, avant de commencer la construction, un gros travail est nécessaire pour atteindre la consolidation secondaire du sol. Le but est d'acquérir la totalité du tassement dû à la consolidation primaire rapidement pour le stabiliser.

NB : pour permettre aux engins de chantier de se déplacer sans problème sur le site, la mise en place d'une plate-forme de travail est nécessaire. Une couche d'un mètre de tezontle (roche volcanique présente à proximité du site) a donc été ajoutée.

Première solution : le drainage vertical

Une des solutions employées a été le drainage vertical avec pré-chargement. Des drains verticaux sont mis en place sur la hauteur de sol à drainer. On charge ensuite le sol, l'eau contenue dans le sol passe dans les drains, est évacuée (à la surface ou dans des couches de sol plus profondes), ce qui permet au sol de se tasser.

Pour placer des drains verticaux, on fore verticalement le sol et on remplit ces forages par un matériau plus perméable que l'argile (matériau granulaire plus grossier par exemple). Cela peut être un drain vertical préfabriqué comme utilisé sur ce projet. Ce sont de longues bandes d'un matériau

plastique entouré d'un géotextile filtrant pour éviter le colmatage du drain par les particules fines. Le drain est ancré en profondeur et remonte jusqu'à 50 cm au-dessus du sol à consolider.

Seconde solution : la consolidation atmosphérique

Cette technique n'a pas été réalisée sur tout le site, mais a été testée sur une surface de 70x50 m², et de nombreux capteurs ont été placés pour l'étudier.



Figure 22 : Vue aérienne du site lors de l'essai, source [9]

Cela consiste à placer la zone à compacter sous une membrane étanche, puis de placer des pompes à vides de part et d'autre du site pour évacuer l'eau et l'air présents dans le sol et ainsi diminuer au maximum l'indice des vides. Ici, l'étude a duré 180 jours et la dépression moyenne générée par le pompage à vide a été de 60 kPa. Pour avoir des résultats similaires avec un chargement, cela revient à mettre en place une couche de 3 mètres d'épaisseur d'un sol dont la masse volumique vaut 20 kN/m³ (sable par exemple). On comprend donc l'intérêt d'utiliser une telle méthode, même si sa durée semble plutôt longue. Des drains verticaux ont bien sûr été mis en place au préalable. Il est intéressant de noter qu'une fois le pompage arrêté, l'eau a continué de s'évacuer grâce au vide maintenu par la membrane étanche.

Un des inconvénients est que le tassement enregistré entre les pompes n'est pas homogène. Il est logiquement presque nul au niveau des pompes, et maximal au loin de celles-ci (cf figure 23).

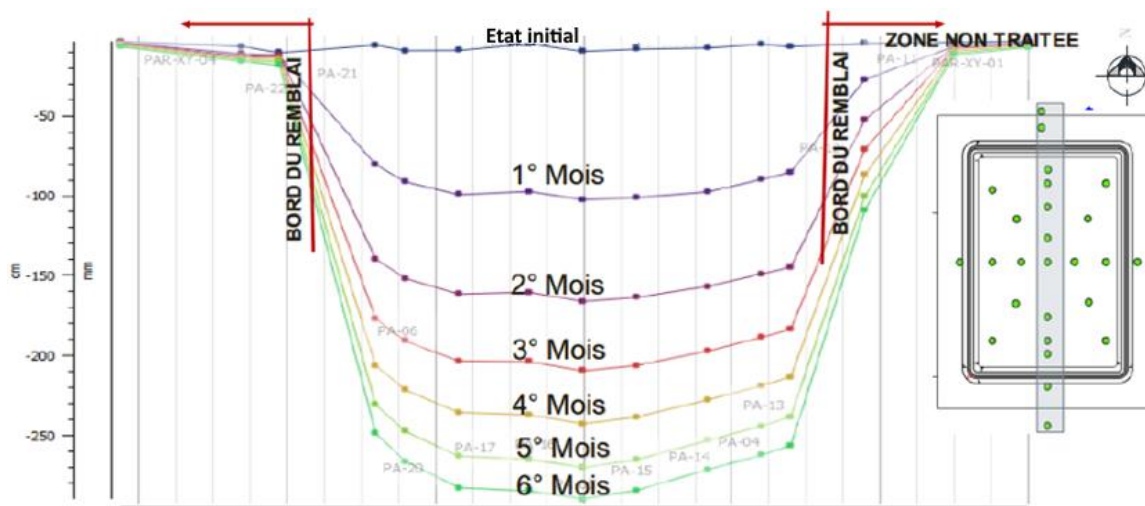


Figure 23 : Progression du tassement au cours des mois, source [9]

- [11]: Micropieux et reprise en sous-œuvre des fondations, É. Ligneau
- [12]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Surface_spécifique
- [13]: Techniques de l'ingénieur : Compressibilité. Consolidation. Tassement, J.-P. Magnan, B. Soyez
- [14]: Comportement de mélange montmorillonite-kaolinite sur chemins œdométriques et triaxiaux, H. Tammam, M. Hattab, juin 2008, <https://www.cfmr-roches.org/sites/default/files/jnng/JNNG%202008%20pp%20627-634%20Hammad.pdf>
- [15]: Application de la consolidation atmosphérique dans la volle de Mexico, H. Menaceur, J. Racinais, C. Plomteux, Menard Group, <https://www.geotechnique.org/jnng2020/files/297912.pdf>
- [16]: Sols argileux, sécheresse et construction, Prévention des risques domestiques, sanitaires et naturels, Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, mars 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/sols-argileux-secheresse-construction>
- [17]: Fissures dues au retrait gonflement des argiles en Maine-et-Loire, <https://expert-batiment-conseil-49.fr/fissures-retrait-gonflement-argiles-maine-et-loire/>
- [18]: 10,5 millions de maisons risquent des fissures, Mon quotidien autrement, <https://www.monquotidienautrement.com/maison-durable/maisons-fissures/>
- [19]: Tassement dus aux mouvements différentiels du sol argileux, AQC, <https://qualiteconstruction.com/ressource/batiment/tassements-mouvements-differentiels-sol-argileux/>
- [20]: Mieux prévenir le risque de retrait-gonflement des sols argileux : le Cerema déploie une station d'instrumentation dans le Loir-et-Cher, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/mieux-prevenir-risque-retrait-gonflement-sols-argileux-rga>
- [21]: Retrait et gonflement des argiles- Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse, Techniques et méthodes, Ifsttar, https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/ifsttar/guidetechnique/2017-GTI4.3-guidetechnique-lfsttar.pdf
- [22]: Ma maison de A à Z, Gedimat, <https://mamaisondeaaz.gedimat.fr/article/804/1-renforcer-une-maison-construite-sur-de-l-argile.htm>
- [23]: Tirants d'ancrage, Pb Construction, <http://www.pbconstruction.fr/nos-realizations/forage/tirants-ancrage.wee>
- [24]: Géotechnique, Exercices et problèmes corrigés de mécanique des sols, avec rappels de cours, C. Desodt, P. Reiffsteck, Dunod
- [25]: Retrait et gonflement des argiles, Protéger sa maison de la sécheresse, Conseils aux constructeurs de maisons neuves, Guide 2, Ifsttar, <https://collections.univ-gustave-eiffel.fr/ouvrages/ifsttar/guidestechniques/2017-GTI4.2-guidetechnique-lfsttar.pdf>
- [26]: Propriétés Mécaniques et Physiques des Sols - Consistance, limites d'Atterberg, inpl, <https://rpn.univ-lorraine.fr/UL/Proprietes-Meca-Sols/chap2/consistance.html>