

Panorama des sols gonflants en géotechnique

Jean-Pierre MAGNAN
Université Paris-Est, IFSTTAR,
Marne-la-Vallée, France

■ RÉSUMÉ

Cet article passe en revue différents problèmes de construction sur les sols argileux gonflants et l'influence des variations de teneur en eau sur leurs déformations. Il couvre la localisation des sols gonflants, le comportement et la pathologie de structures typiques telles qu'un pieu, une maison sur fondations superficielles et une route, les stratégies de protection des constructions contre le gonflement et le retrait des sols, les procédures utilisées pour évaluer les risques associés à la présence de sols gonflants. Enfin, il commente les méthodes de calcul et les progrès des analyses microstructurales.

Panorama of expansive soils in geotechnical engineering

■ ABSTRACT

This paper reviews various problems of construction on expansive clayey soils and the influence of water content changes on their deformations. It covers the location of expansive soils, the behaviour and pathology of typical structures such as a pile, a house on shallow foundations, and a road, the strategies to protect constructions against expansion and shrinkage of soils, the procedures used to assess the risks associated with expansive soils. Finally, it comments on the calculations methods and the advances in microstructural analyses.

INTRODUCTION

Les sols gonflants posent des problèmes aux constructions sur tous les continents. Pour ces sols, les variations de volume sont liées à la présence de particules argileuses, mais il existe aussi des roches gonflantes, telles l'anhydrite ou les schistes carton.

Le gonflement est le terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente lorsqu'il absorbe de l'eau. Ce phénomène est au moins partiellement réversible et un sol gonflant subit un retrait (une diminution de volume) quand sa teneur en eau diminue. Dans les pays de climat sec, l'accent est mis sur le gonflement, mais dans les pays dont le climat est humide c'est sur le retrait que l'on insiste. Les études sur le gonflement ne devraient pas être séparées de celles sur le retrait.

Les sols gonflants sont étudiés depuis de nombreuses années, à trois échelles : celle des particules et assemblages ioniques, celle des éprouvettes de laboratoire et celle des massifs de sols et des ouvrages. Chaque échelle éclaire les autres, sans que l'on puisse dire que les travaux et connaissances accumulées à une échelle sont utiles aux autres.

L'échelle de la géotechnique est d'abord celle des ouvrages. Le gonflement des sols interfère avec toutes les constructions et ouvrages du génie civil : les fondations, profondes et superficielles, des bâtiments et ouvrages d'art, les ouvrages de soutènement, les remblais à usage routier ou ferroviaire. Les questions sont celles de l'existence de sols gonflants, de l'amplitude de leurs déformations et de l'énergie associée, du fonctionnement des ouvrages sous l'effet du gonflement et du retrait de tout ou partie du sol, de la façon dont on peut lutter contre le gonflement ou contre ses effets. Cette liste montre la diversité et la complexité des questions posées.

La gestion des problèmes posés par les sols gonflants au niveau des ouvrages s'appuie sur l'expérience et la créativité des ingénieurs autant que sur le calcul. Le calcul a besoin des propriétés des sols et d'un modèle géotechnique du site. Les propriétés des sols proviennent des éprouvettes de laboratoire. De très nombreux travaux ont été consacrés au comportement des sols gonflants en laboratoire, mais il n'y a d'accord ni sur la façon de déterminer les paramètres, ni sur la classification des sols gonflants en fonction de leur dangerosité pour les ouvrages. Le calcul géotechnique pour les sols gonflants souffre aussi des maux communs à la mécanique des sols en laboratoire : les essais testent environ un cent-millionième du volume du massif de sols en place et l'on n'est jamais certain de la qualité des éprouvettes sur lesquelles sont réalisés les essais. Néanmoins, certaines procédures d'essai peuvent être préférées à d'autres, pour un problème donné.

Les chercheurs rêvent de trouver dans les phénomènes étudiés à l'échelle microscopique, voire celle des atomes, une explication et peut-être même une base de calcul qui pourrait relier l'échelle microscopique à celle des essais de laboratoire. Si l'on ne peut guère espérer des relations quantitatives, la réflexion sur les comportements élémentaires éclaire les travaux réalisés à l'échelle des ouvrages.

Cet article traite de tous ces problèmes de sols gonflants du point de vue du génie civil.

Comme cela a été noté, les travaux et publications consacrés aux sols gonflants sont multiples et les premières réunions internationales thématiques datent de 1965 (Conférence internationale sur les sols gonflants à College Station, Texas), mais le sujet était déjà abordé dans les conférences routières et de mécanique des sols des années 1950.

Des ouvrages entiers ont été consacrés à ce thème au cours de cette période. On peut citer ceux de Kassif et al. (1969), Chen (1975), Mouroux et al. (1988), Mustafaev (1989), Sorochan (1991), Freeman et al. (1994), Wray (1995), Nelson et Miller (1997), Steinberg et Steinberg (1998), Katti et al. (2002), Al-Rawas et Goosen (2006), et Driscoll et Skinner (2007).

1. CARTOGRAPHIE DES SOLS GONFLANTS

Les sols gonflants sont présents sur tous les continents et ce sont pour l'essentiel des sols argileux, mais on les connaît souvent sous des noms locaux tels que « black cotton soils » ou « regurs » en Inde, argiles d'Aral, de Maïkop, de Sarmat ou du kimmeridjien en Russie, au Kazakhstan ou en Ukraine, « badole » au Japon, « pampus » en Argentine, « margilatic » en Indonésie, Terres noires en Australie, « hamra » en Israël, « tirs » au Maroc, « karal » au Cameroun. Les sols gonflants ont été cartographiés dans plusieurs pays. Les figures 1 et 2 présentent les cartes établies pour les États-Unis d'Amérique et le Maroc (Ejjaaouani, 2008).

On estime que les sols gonflants représentent 10% des sols de l'Afrique.

figure 1
Les sols gonflants aux USA
(au sens du génie civil).

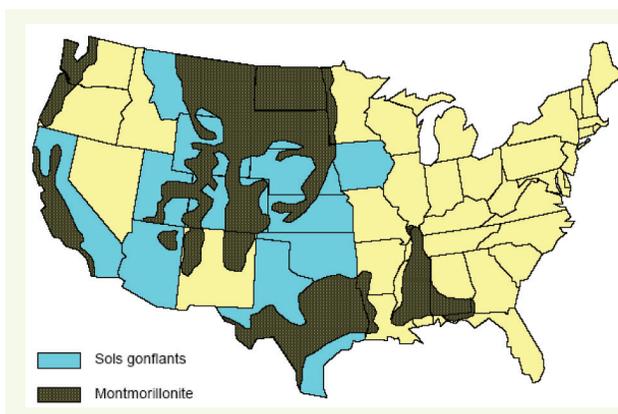
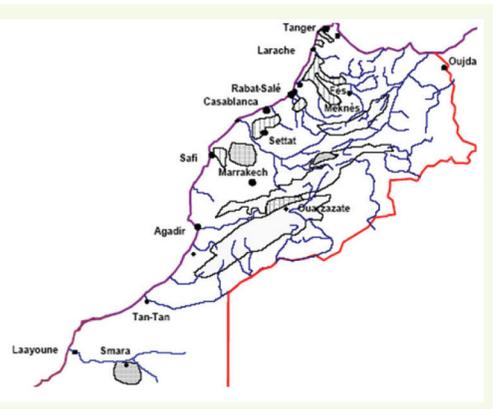


figure 2
Principaux gisements
d'argiles gonflantes
au Maroc.



La répartition des sols gonflants varie fortement selon les critères et les disciplines. Le cas des États-Unis d'Amérique, qui ont été analysés de points de vue variés, illustre cette diversité. La **figure 3** montre la carte géotechnique établie pour ce pays. On observe que la répartition géographique des sols les plus actifs est beaucoup plus précise que celle de la carte de la **figure 1**. La précision augmente quand on passe à l'échelle des comtés, qui sont l'échelle à laquelle les problèmes de construction sont traités dans les divers états des USA.

On dispose aussi au niveau mondial de nombreuses cartes pédologiques, dont l'objectif principal est l'agriculture. Les sols sont divisés en douze groupes, dont l'un (les vertisols) est destiné à rassembler les sols riches en argiles et doués de retrait et gonflement, qui se fissurent pendant les périodes sèches puis gonflent. Mais les vertisols, en bleu foncé sur la carte, ne représentent que 2% des sols mondiaux, et la répartition des vertisols aux États-Unis d'Amérique (**figure 5**) n'a aucun rapport avec celle des sols gonflants au plan géotechnique (**figure 3**). Les classifications agronomiques privilégient d'autres caractères que le caractère gonflant. Les zones de sols gonflants géotechniques correspondent plutôt à la répartition des mollisols aux USA (**figure 6**). Les mollisols

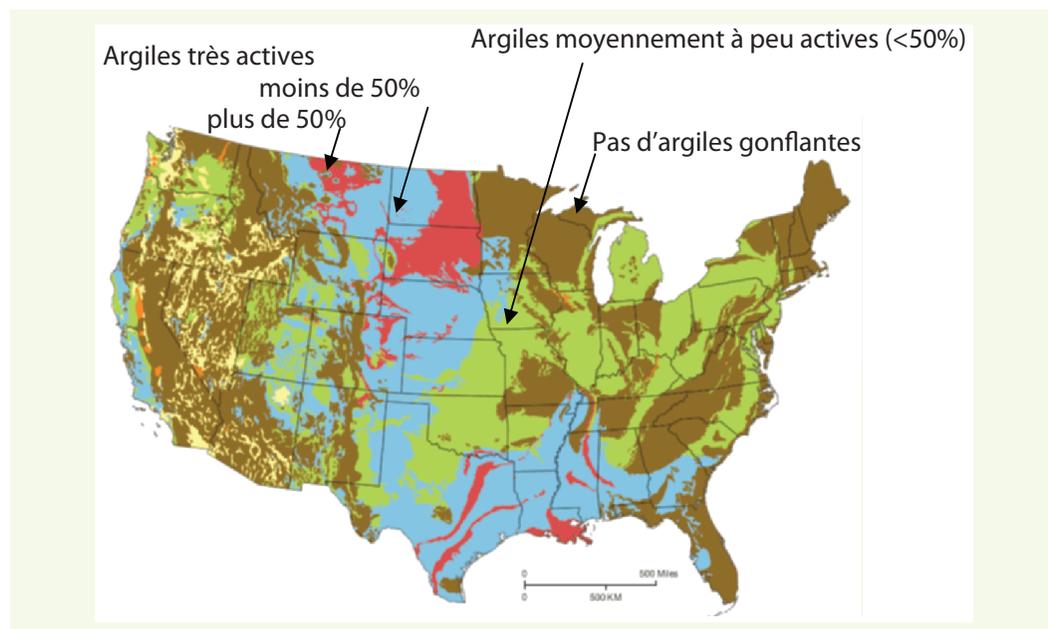


figure 3
Carte géotechnique des États-Unis d'Amérique indiquant la répartition globale des argiles plus ou moins gonflantes (Expansive-soils-map-900-USA-1989, Geology.com). Cette carte est fondée sur le travail d'Olive et al. (1989).

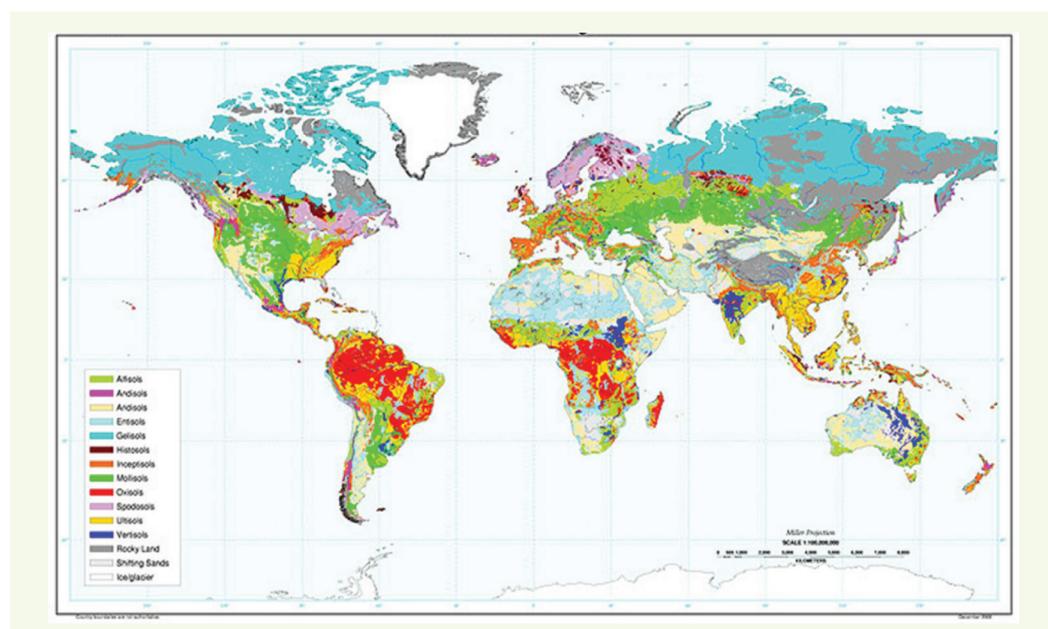


figure 4
Répartition des douze groupes de sols dans le monde (US Department of Agriculture).

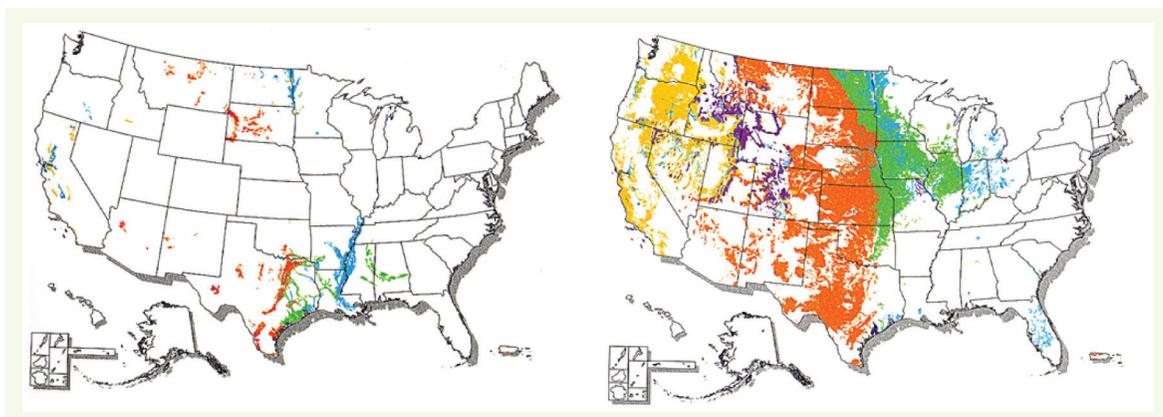


figure 5
Les vertisols aux USA
(US Department
of Agriculture).

figure 6
Les mollisols aux USA
(US Department
of Agriculture).

sont caractérisés par un horizon de surface épais et sombre. Ils résultent de l'accumulation sur de longues périodes de matières organiques provenant des racines des plantes. On les trouve principalement aux latitudes moyennes.

La cartographie des sols gonflants doit donc être faite directement sur les caractéristiques de retrait et gonflement des argiles et sols argileux. Dans la pratique française, la cartographie des argiles réalisée par le BRGM répond à cet objectif, du niveau national au niveau communal, en passant par l'échelle du département. Sa précision n'est pas suffisante à l'échelle des constructions, à cause de l'échelle de la cartographie, mais elle offre une première approche du risque lié aux sols gonflants sous la forme de cartes d'aléas (**figure 7**).

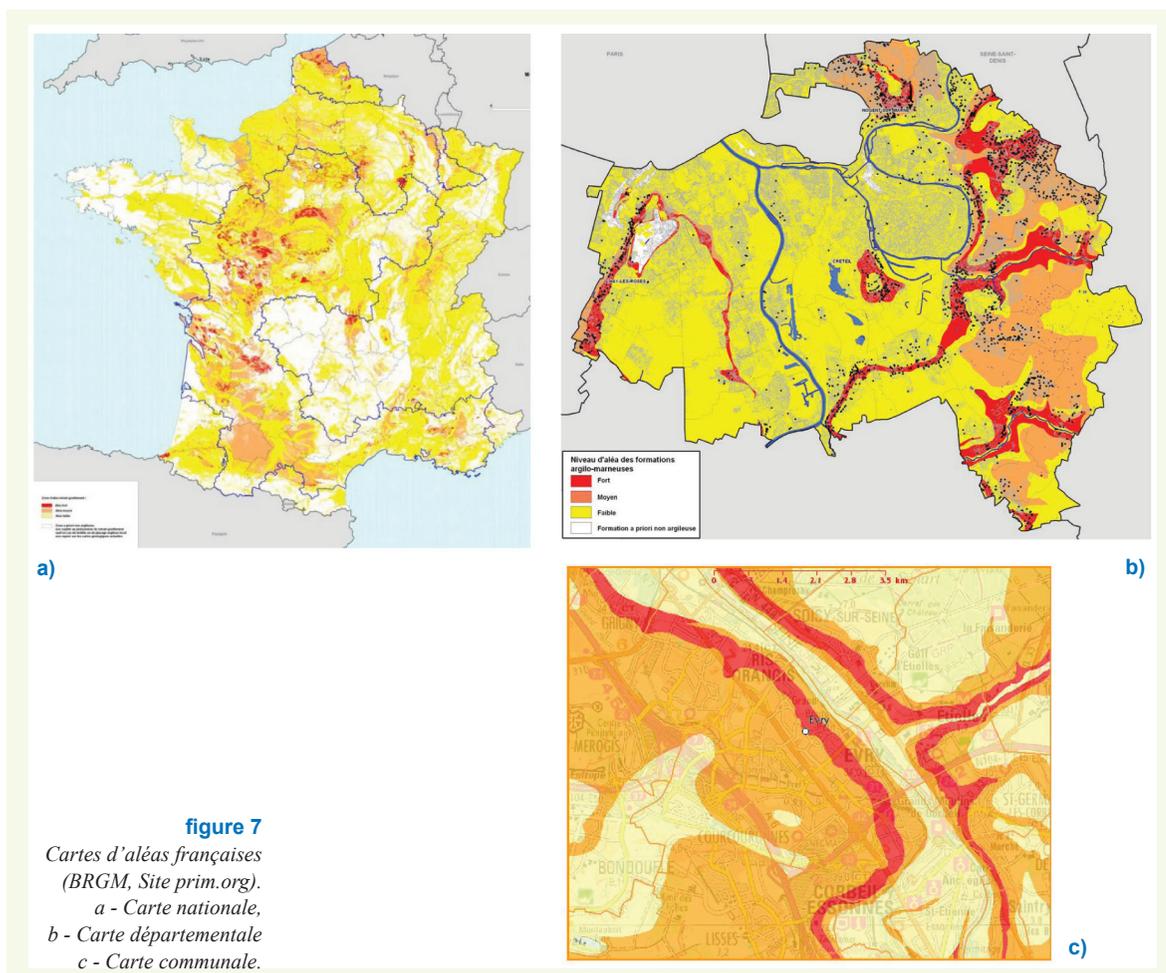


figure 7
Cartes d'aléas françaises
(BRGM, Site prim.org).
a - Carte nationale,
b - Carte départementale,
c - Carte communale.

2. COMPORTEMENT DES SOLS ARGILEUX GONFLANTS

Le gonflement des sols (augmentation de volume) doit être associé à leur retrait (diminution de volume), si l'on veut comprendre l'évolution du terrain lors des cycles d'humidification et de séchage. Ces variations de volume, provoquées par l'interaction des molécules d'eau avec les particules d'argile, dépendent de l'état initial du sol entre les états extrêmes que sont l'état sec caractérisé par la limite de retrait et l'état d'humidité maximale (limite d'absorption du sol). La **figure 8** montre trois états d'un même sol, état sec, état initial et état gonflé. La diminution de la teneur en eau provoque une diminution de volume, un durcissement (évolution de la consistance vers l'état solide sans retrait) et une fissuration (visible sur la photo). Il existe un volume minimal. L'augmentation de la teneur en eau à partir du même état initial produit une augmentation de volume et un ramollissement du sol (évolution de la consistance vers l'état liquide). Il existe un volume maximal. Ces évolutions sont influencées par les charges appliquées aux éprouvettes soumises aux essais en laboratoire, plus pour le gonflement que pour le retrait, de façon générale. Dans les sites naturels, les pressions existant dans les massifs de sol sont complexes et les charges appliquées en surface ne permettent pas de contrôler les amplitudes de gonflement.

Comme les états limites dépendent de la constitution minéralogique du sol, l'état initial sert simplement à définir la part des variations de volume nécessaires pour atteindre les limites inférieure (retrait) et supérieure (gonflement maximal). Selon l'état initial et le sens de variation de la teneur en eau, on peut donc voir du retrait ou du gonflement, mais la somme des déformations de retrait et gonflement est constante (**figure 9**). En fait, cette somme évolue un peu lors des cycles de retrait et gonflement, mais elle se stabilise au bout de quelques cycles.

Dans les pays tempérés, on s'intéresse d'abord au retrait. Dans les pays secs, on voit plutôt le gonflement. Mais dans les deux cas il faut revenir à l'état initial.

Le gonflement comme le retrait ne sont pas uniformes dans les massifs de sols et leur évolution dépend beaucoup de l'état hydrique du massif, alimenté par des pluies, la remontée de nappes ou



figure 8

Trois états d'un même sol
(sec, initial, saturé d'eau)
(Photos Lamis Makki).

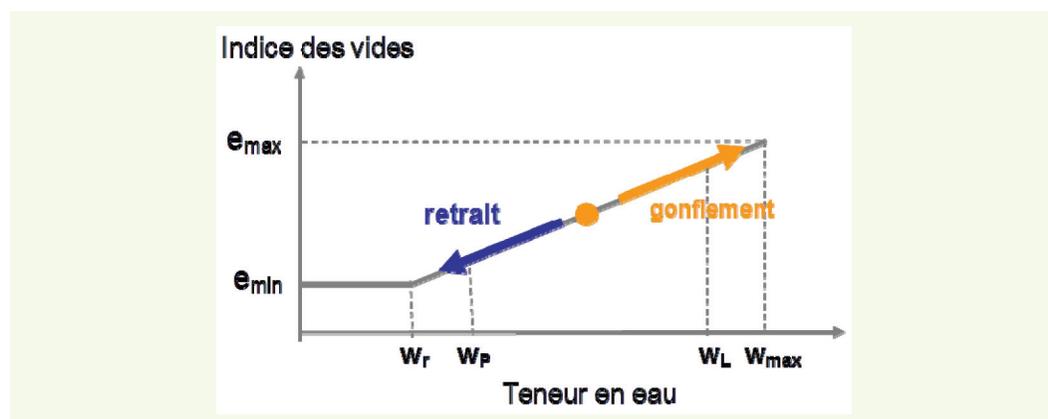


figure 9

Retrait et gonflement
sont complémentaires et
dépendent de l'état initial.

abaissé par l'évaporation, les prélèvements de la végétation, etc. De ce fait, il n'existe pas un seul modèle d'interaction des constructions avec les sols gonflants, mais des situations variées auxquelles il faut adapter l'analyse pour comprendre les observations et la pathologie et pour définir des mesures adaptées pour préserver les nouvelles constructions et réparer les anciennes.

3. COMPORTEMENT ET PATHOLOGIE DES OUVRAGES SUR SOLS GONFLANTS

Pour comprendre les interactions possibles des sols gonflants avec les ouvrages de génie civil, on peut partir de quelques situations « d'école ».

■ 3.1. Un pieu dans une couche de sol gonflant

Un pieu flottant installé dans une couche d'argile atteint son équilibre lorsque la charge appliquée en tête et le poids propre du pieu sont équilibrés par le frottement latéral et la résistance de pointe. Lorsque le terrain est humidifié à partir de la surface, après l'installation du pieu et de la construction qu'il porte, l'argile gonfle jusqu'à une profondeur croissante. Le mouvement relatif de l'argile par rapport au pieu est dirigé vers le haut dans cette couche. Le frottement mobilisé ne peut être plus important que le frottement de calcul, dont on admet qu'il est déjà maximal. Mais l'humidification du sol est associée à une variation de sa consistance, une diminution de sa résistance et éventuellement l'apparition de pressions interstitielles. Tous ces facteurs font diminuer le frottement latéral. Si l'humidification dépasse la pointe du pieu, la résistance de pointe diminue aussi de façon importante et le pieu n'a plus la portance suffisante. La pathologie prend dans ce cas la forme d'un défaut de portance du pieu.

L'étude expérimentale présentée par Magnan et al. (1995) montre, sur quatre pieux forés de 30 cm de diamètre installés dans une couche d'argile gonflante, l'effet de l'humidification progressive du sol sur le soulèvement du sol et du pieu et la diminution de la capacité portante, mesurée avant, pendant et après l'humidification. Les pieux ne sont pas chargés lors de l'humidification du sol, de sorte qu'ils peuvent se soulever lors du gonflement, sous l'effet du soulèvement progressif du sol.

Les sols du site sont des argiles quaternaires brunes, de poids volumique $\gamma = 20,6 \text{ kN/m}^3$, d'indice des vides $e = 0,61$, de teneur en eau $w = 17\%$, de limite de plasticité $w_p = 28$, de limite de liquidité $w_L = 50$ et d'indice de plasticité $I_p = 22$. Le sol comprend 45% de particules de dimension inférieure à $5 \mu\text{m}$. Sa déformation maximale de gonflement libre vaut $\varepsilon_g = 0,06$ et sa pression de gonflement $\sigma_g = 300 \text{ kPa}$.

La **figure 10** montre la géométrie des pieux et de la couche d'argile gonflante (**fig. 10.a**), l'évolution du soulèvement du sol au cours du temps (compté en mois à partir du début de l'humidification) pour les pieux et pour des repères situés tous les mètres en profondeur (**fig. 10.b**). Jusqu'à 4,5 m de profondeur, le sol se soulève plus que le pieu et entraîne le pieu vers le haut. Au-delà, c'est le pieu qui se soulève par rapport au sol et mobilise un frottement qui le retient.

Les courbes de chargement de pieux présentées sur la **figure 11** correspondent à l'enfoncement de la tête du pieu en fonction de la charge appliquée. Le pieu A a été chargé avant le début de l'humidification, le pieu C deux mois après le début de l'humidification, le pieu D au bout de cinq mois et le pieu B au bout de sept mois, lorsque l'humidification a été considérée comme achevée. Si l'on retient un critère de $B/10$ pour la « rupture » du pieu, on voit que la charge pour un enfoncement de 3 cm vaut respectivement : 1000 kN, 650 kN, 420 kN et 250 kN. L'humidification de l'argile produit une diminution de la charge limite d'un facteur 4. La diminution de la résistance des sols argileux lors de leur gonflement est donc un facteur important à prendre en compte lors de la conception des projets.

Les courbes 1 à 4 correspondent aux temps 0 – 2 – 5 – 7 mois après l'humidification

figure 10
Essais d'humidification
du sol argileux gonflant
autour de pieux
(Magnan et al., 1995)
a. Géométrie du pieu et
du sol ;
b. Courbes de soulèvement
du sol et du pieu.

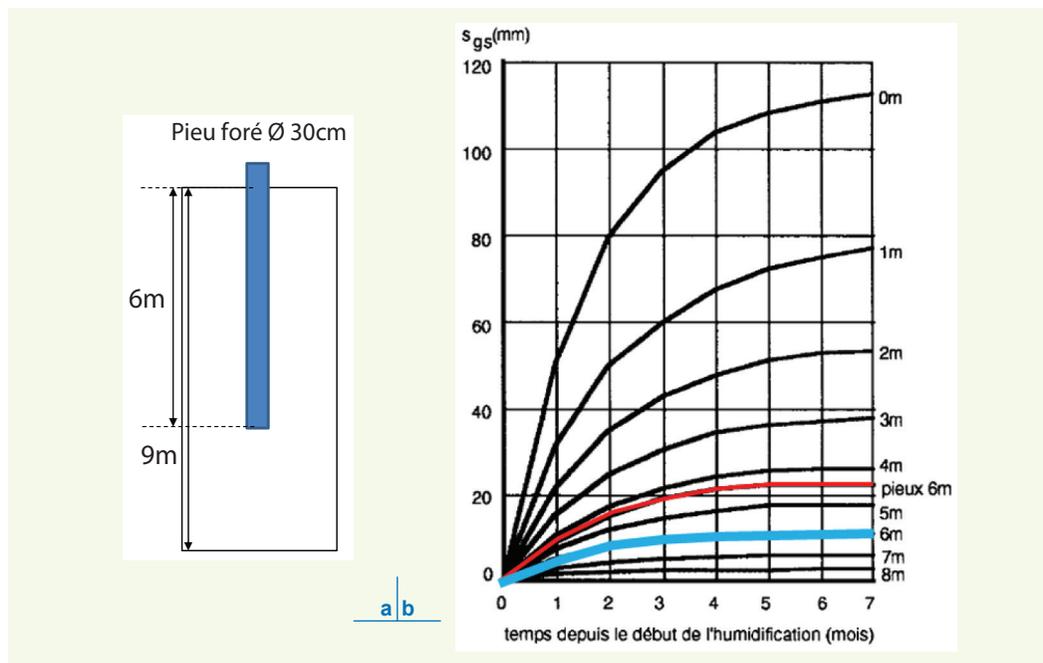
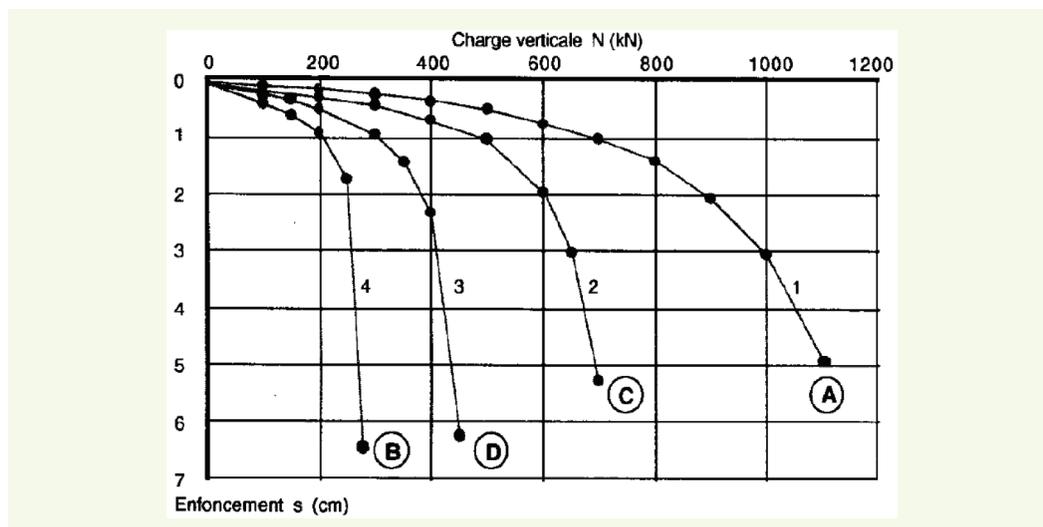


figure 11
Courbes de chargement
de quatre pieux
dans un sol argileux
gonflant, au cours de
l'humidification du massif
(Magnan et al., 1995).



■ 3.2. Une maison sur sol gonflant (fondations superficielles)

Les maisons courantes reposent le plus souvent sur des fondations superficielles, qui transmettent au sol les charges des murs porteurs. Si le sol est une argile gonflante sous l'ensemble de la construction, l'arrivée d'eau provoquant le gonflement ne peut être simultanée sous toutes les fondations. Il se produira donc un soulèvement différentiel des fondations, capable de fissurer les murs et de disloquer la structure de la maison. Les fondations externes et internes (figure 12) seront soumises à des sollicitations différentes selon que l'eau provient de fuites à l'intérieur de la maison ou de précipitations qui font gonfler le sol à partir de la surface extérieure du terrain. Selon les cas, le gonflement peut attaquer simultanément le côté de la fondation sur toute la longueur d'un mur ou commencer par un angle ou par le milieu d'un mur.

L'effet de ce soulèvement sur un mur peut prendre les formes représentées sur la figure 13 (a et b) : fissure oblique dans un mur sans ouverture ou fissures traversant les ouvertures. Les chaînages ont pour fonction de rendre ces fissures impossibles en augmentant la résistance à la traction des murs (figure 13.c).

figure 12
 Vue et schéma
 d'une maison à murs
 porteurs sur fondations
 superficielles.

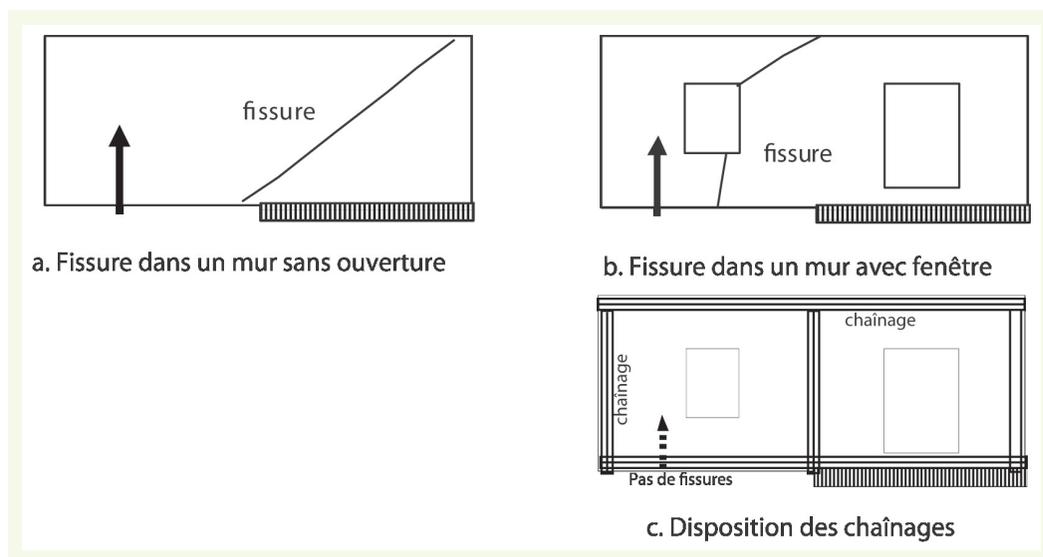


figure 13
 Développement
 de fissures provoquées
 par le soulèvement d'une
 partie de la fondation.

Le calcul des contraintes provoquées dans la semelle de fondation par le soulèvement du sol doit tenir compte de plusieurs facteurs :

- à l'état initial, le poids de la construction se répartit sur toute la surface de contact des semelles avec le sol ;
- l'humidification du sol provoque un gonflement, qui peut être nul si la pression due à la construction est supérieure à la pression de gonflement. Mais cette condition ne concerne pas tout le massif, puisque la diffusion des charges s'accompagne d'une diminution forte des contraintes avec la profondeur. Il y aura donc toujours un certain gonflement sous les fondations ;
- le gonflement provoque un soulèvement de la semelle de fondation, qui peut être limité si la flexibilité de la semelle et du mur porté est suffisante. Sinon, la semelle subira un pivotement de corps rigide ;
- une fois le sol gonflé, la pression de gonflement diminue, voire disparaît. Il reste sur le sol la pression initiale, mais répartie de façon inégale si la semelle s'est fléchie. La répartition des pressions de contact finale dépend de la rigidité relative du sol et de la construction ;
- l'extension progressive de la zone humidifiée dans le massif de sol conduit à l'égalisation du gonflement, donc des pressions de contact, qui redeviennent égales aux pressions initiales, si la construction se comporte de façon réversible (sans fissures ni déformations permanentes) ;
- lors du retrait, un cheminement inverse est suivi dans le sol et la construction.

Les **figures 14 à 16** montrent des exemples de désordres observés au Maroc par suite du gonflement ou du retrait de sols argileux (Ejjaouani, 2008).

figure 14
Fissures dans un mur
(Ejjaouani, 2008).



figure 15
Fissures dans une dalle
(Ejjaouani, 2008).



figure 16
Fissuration d'un mur
et d'un bâtiment
à Ouarzazate
(Ejjaouani, 2008).



■ 3.3. Une route sur sol gonflant

La **figure 17** représente les stades successifs d'évolution d'une route construite sur des sols argileux soumis à des phénomènes de retrait et gonflement (a). La sécheresse produit un retrait du sol à partir des accotements, vers le centre de la chaussée. La surface du terrain se fissure et le retrait du sol sous la chaussée peut aussi créer des fissures dans le revêtement (b). À la saison des pluies suivante, le sol se réhumidifie et regonfle, mais il devient plus mou et le trafic peut déformer et fissurer encore plus la chaussée (c). La sécheresse suivante réactive tassement et fissures, ce qui dégrade progressivement la route (d). Ce processus se produit dans les régions argileuses de beaucoup de pays, notamment en Afrique.

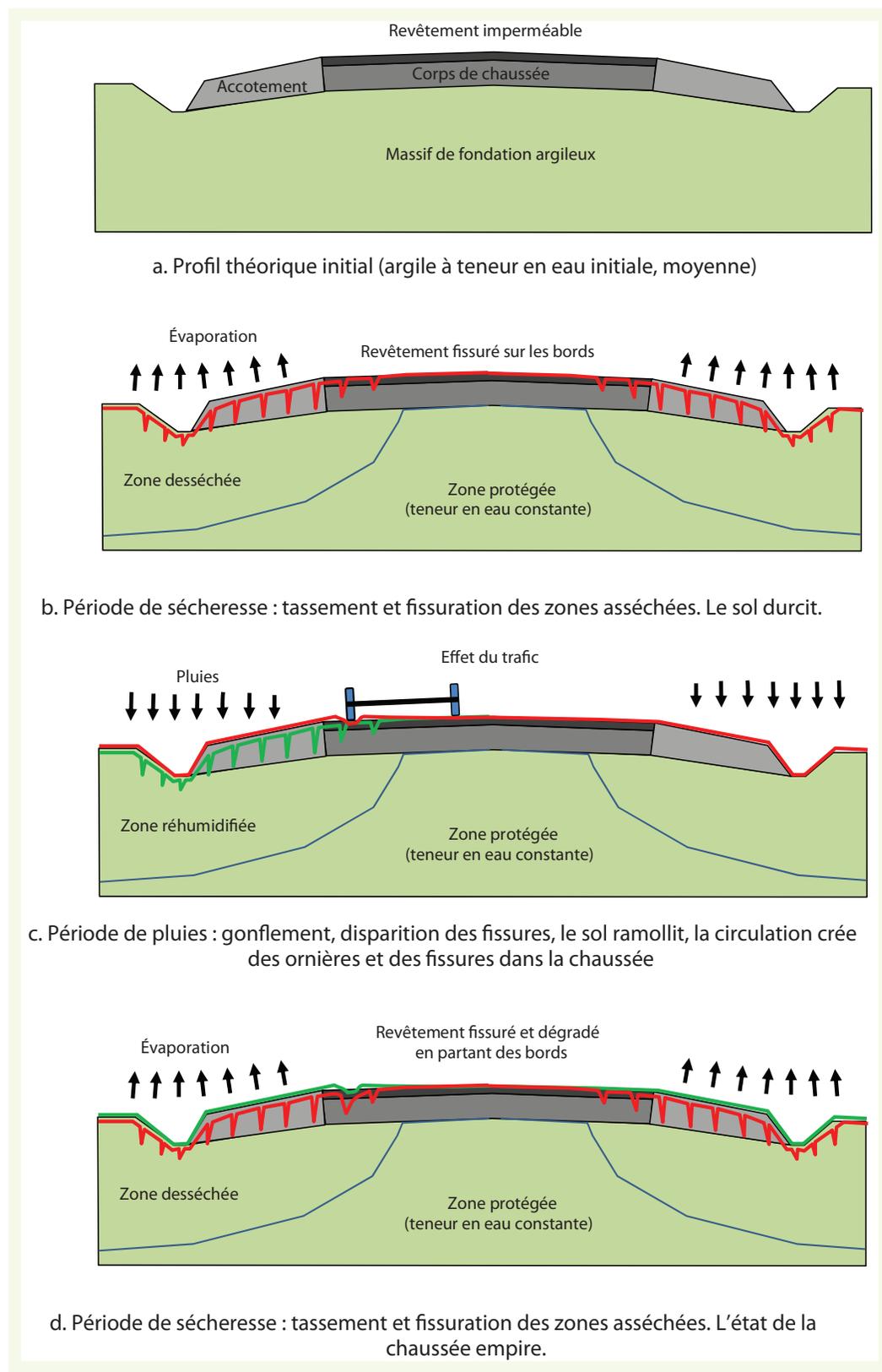


figure 17
*Mécanisme d'évolution
d'une route sur sol
argileux gonflant.*

La **figure 18** montre deux exemples de routes fissurées par l'effet du retrait et gonflement du sol de fondation argileux. La position des fissures dépend de l'étendue de la zone atteinte par les variations de teneur en eau lors des cycles de sécheresse et d'humidification.



figure 18
*Fissuration longitudinale
 de routes due au retrait
 et gonflement des sols
 (gauche : en France,
 droite : à Madagascar).*

4. PROTECTION DES OUVRAGES SUR SOLS GONFLANTS

La protection des constructions contre les effets du gonflement et retrait des sols s'appuie sur deux stratégies :

- empêcher les variations de volume du sol ;
- limiter ou supprimer les effets du gonflement ou du retrait.

Pour empêcher le gonflement ou retrait du sol, on peut :

- modifier le sol ou le remplacer ;
- maintenir constante la teneur en eau du sol existant.

Pour limiter les effets du gonflement ou du retrait du sol, on peut :

- adapter la géométrie de l'ouvrage pour que le sol puisse se déformer librement,
- modifier la rigidité et la résistance de la construction.

■ 4.1. Empêcher le gonflement et le retrait, en modifiant ou remplaçant le sol

Les solutions pour lesquelles existe une expérience satisfaisante s'appuient sur :

- le traitement des sols argileux à la chaux,
- leur traitement au ciment,
- leur traitement avec d'autres liants hydrauliques,
- le remplacement des sols argileux par des sols moins sensibles à l'eau,
- le mélange du sol argileux avec des sables ou graviers.

Ces techniques nécessitent une étude préalable pour définir les dosages en liant ou en sols granulaires, mais aussi de définir jusqu'à quelle profondeur il faut traiter le terrain pour éloigner la zone des gonflements de la structure à protéger.

D'autres techniques ont été proposées (hydrophobants, liants organiques), mais elles ne font pas partie des techniques utilisées à grande échelle.

■ 4.2. Empêcher le gonflement et le retrait, en maintenant constante la teneur en eau

Les solutions doivent être adaptées au cas étudié :

- géométrie de l'ouvrage,
- topographie,
- écoulements d'eau naturels dans le sol ou en surface,

- origine des écoulements accidentels,
- présence d'arbres, arbustes ou autres plantes,
- possibilité d'intervenir autour de l'ouvrage à protéger,
- importance de l'ouvrage (coût et importance stratégique).

Pour empêcher les variations de teneur en eau, on peut

- utiliser des géomembranes,
- concevoir des systèmes de drainage et évacuation des eaux adaptés,
- éloigner la végétation,
- recouvrir la surface du sol sur une certaine distance,
- créer des tranchées imperméables...

Si l'on veut maintenir le sol dans un état humide, on peut aussi le recouvrir de matériau grossier, permettant d'accumuler l'eau de pluie et de limiter son évaporation.

■ 4.3. Limiter les effets du gonflement ou du retrait en adaptant la géométrie de l'ouvrage pour que le sol se déforme librement

Cette solution, largement appliquée au Maroc (Mariotti, 1976, Mouroux et al., 1988), suppose qu'on crée des volumes vides sous les constructions entre les fondations, pour que le gonflement du sol ne soulève pas les planchers.

Elle implique aussi de placer les fondations à un niveau assez bas pour que le gonflement du sol sous la fondation soit acceptable :

- fondations superficielles à une profondeur compatible avec la pénétration de l'assèchement ou de l'humidification dans le sol, souvent plus d'un mètre de profondeur. Dans le cas de terrains en pente, ces fondations doivent être encastrées à la même profondeur par rapport à la surface du terrain ;
- fondations profondes flottantes dans la couche d'argile gonflante ou appuyées sur une couche stable sous-jacente.

■ 4.4. Limiter les effets du gonflement ou du retrait en modifiant la rigidité et la résistance de la construction

La stratégie générale est de fabriquer des blocs rigides qui puissent bouger les uns par rapport aux autres, avec des liens qui s'adaptent aux mouvements différentiels.

Un cas extrême est la gestion de gonflements localisés sous une chaussée en intercalant une couche de polystyrène expansé.

Les solutions doivent être recherchées au cas par cas.

Pour les maisons, la rigidité est apportée par des chaînages dans les constructions en maçonnerie.

Pour les constructions à structure porteuse de poteaux, poutres et dalles, avec remplissage en briques ou parpaings, la résistance et les déformations doivent être maîtrisées par la structure, c'est-à-dire aussi par les armatures du béton armé qui jouent un rôle similaire à celui des chaînages.

■ 4.5. Recommandations pratiques

En plus des ouvrages cités plus haut, la gestion pratique des problèmes de retrait et gonflement des sols est traitée dans quelques ouvrages de langue française, dont les plus récents sont le livre de Mouroux et al. (1988) sur la construction économique sur les sols gonflants et les recommandations en cours de publication à la demande du ministère français de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE, 2014), trois guides intitulés :

Guide 1 : Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse

Guide 2 : Protéger sa maison de la sécheresse - Conseils aux constructeurs de maisons neuves

Guide 3 : Retrait et gonflement des argiles - Caractériser un site pour la construction.

5. ÉVALUATION DES PROBLÈMES POTENTIELS

■ 5.1. Généralités

Pour définir l'ampleur des déformations des sols gonflants ou des pressions qu'ils peuvent exercer sur les constructions, il faut déterminer la géométrie des couches de terrains gonflants (profondeur et épaisseur) et les propriétés de ces sols.

Les terrains gonflants sont usuellement de nature argileuse ou marneuse et leur caractérisation est d'abord un problème de géologue. L'étude géologique s'appuie sur la documentation existante, mais doit comprendre une visite du site, pour en avoir une vision générale, caractériser l'environnement autour de la construction et guider l'élaboration d'une campagne de sondages et d'essais de laboratoire.

Une fois établie la présence de sols gonflants dans la zone en interaction avec la construction, leur caractérisation mécanique peut être effectuée :

- en utilisant l'expérience locale,
- en réalisant des prélèvements intacts et des essais de retrait et de gonflement,
- en utilisant des corrélations entre les propriétés mécaniques et des propriétés d'identification, comme les paramètres de consistance (Atterberg), la valeur de bleu, la courbe granulométrique, la porosité ou la densité et la nature minéralogique.

L'autre facteur essentiel pour l'analyse du retrait et du phénomène est la teneur en eau, dont les fluctuations sont directement liées à l'évaporation et l'infiltration de l'eau à la surface du sol, mais aussi aux prélèvements effectués par les racines des végétaux (arbres et arbustes, notamment) et aux alimentations accidentelles par les fuites d'eau dans les canalisations ou les systèmes de drainage extérieurs.

■ 5.2. Caractérisation directe du retrait et gonflement des sols

L'état du sol lors de la construction exerce une influence notable sur son comportement lors de l'humidification ou du séchage. Un sol qui a déjà gonflé ne peut que diminuer de volume (avant de regonfler à la prochaine pluie ou inondation). Un sol gonflant initialement à l'état sec ne peut que gonfler (avant de revenir à son état initial). Le comportement du sol dépend donc de ses propriétés mais aussi de son état initial. Les essais de retrait et de gonflement sont utilisés pour caractériser chacune de ces parties du comportement du sol.

Les essais de retrait mesurent la déformation d'une éprouvette de sol lors de l'évaporation de sa phase liquide. On suit l'évolution simultanée de la masse de l'éprouvette (qui donne l'évolution de la teneur en eau) et de sa hauteur ou de son volume. L'essai de retrait linéaire fournit le volume stabilisé du sol sec et la teneur en eau pour laquelle il entre dans l'état de consistance dit « solide sans retrait ».

Les essais de gonflement mesurent la déformation d'une éprouvette de sol lorsqu'elle s'imbibe en contact avec de l'eau. L'éprouvette est placée dans un cylindre métallique qui n'autorise que des déformations axiales. La déformation axiale est mesurée en continu. La masse de l'éprouvette est mesurée en début et en fin d'essai et après passage à l'étuve. Différents types d'essais de gonflement existent (Serratrice et Soyez, 1996), notamment :

- l'essai de gonflement libre ;
- l'essai de gonflement à volume constant ;
- l'essai de gonflement en parallèle ;
- l'essai de gonflement d'Huder-Amberg.

Ces essais fournissent une estimation de la déformation de gonflement ε_g en fonction de la charge appliquée au sol. Dans certains calculs, on s'intéresse à la pression maximale que le gonflement du sol peut exercer sur la construction. Cette pression de gonflement σ_g dépend de l'état initial du sol et correspond à une déformation nulle. Au fur et à mesure de la déformation de gonflement, la pression de contact tend vers zéro (quand la paroi de l'ouvrage peut se déplacer suffisamment) (figure 19). Il faut donc choisir un type d'essai de gonflement qui correspond à la déformabilité de la structure dans la situation étudiée.

Selon leur nature minéralogique, les sols argileux ont des comportements différents : certains ont une faible pression de gonflement mais une forte amplitude de gonflement. D'autres ont des pressions de gonflement élevées mais des amplitudes de gonflement faibles (Magnan et al., 2013).

Pour les phases préliminaires d'étude où l'on cherche à déterminer l'ampleur potentielle des problèmes de retrait et gonflement, la procédure recommandée par l'IFSTAR (2013), qui correspond à celle décrite dans les normes australiennes (AS, 1992), demande de découper deux éprouvettes dans une carotte de sol intact (figure 20) et de soumettre la première à un essai de retrait et la seconde à un essai de gonflement.

La somme de la déformation de retrait et de la déformation de gonflement est la déformation maximale potentielle du sol (figure 21). Selon son importance, on peut décider de négliger ou non les phénomènes de retrait et gonflement.

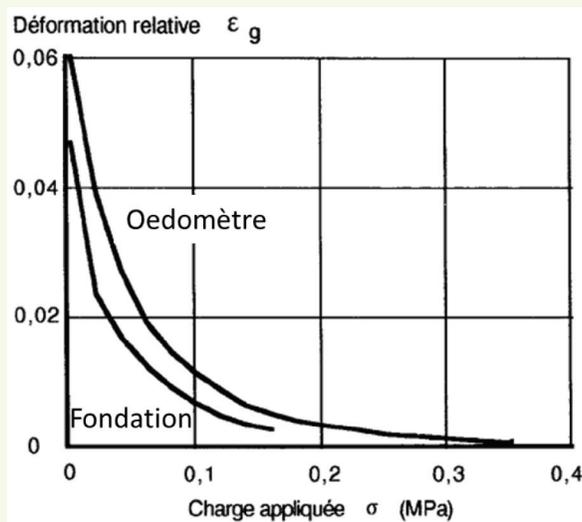


figure 19
Relation entre déformation et pression (œdomètre et sous une fondation).

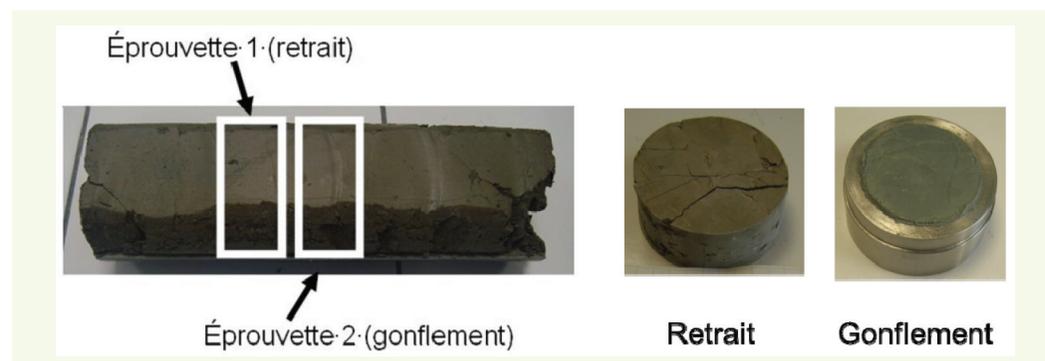
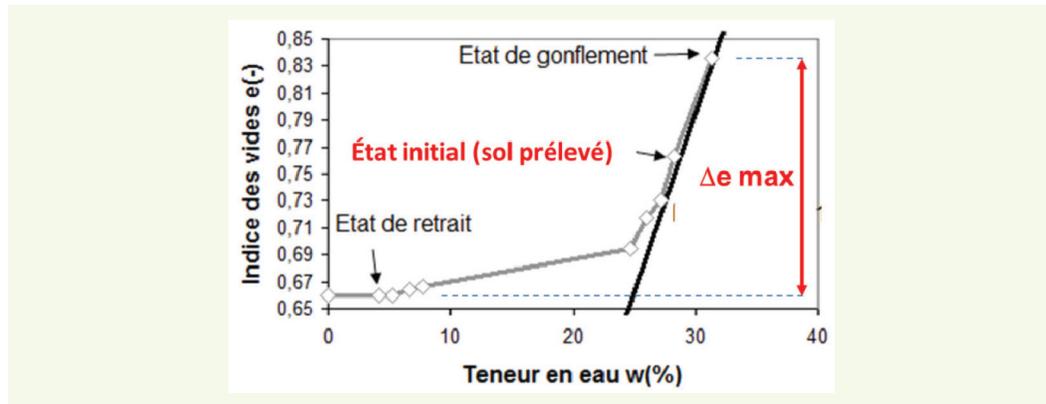


figure 20
Découpage des éprouvettes pour l'essai simplifié de retrait et gonflement.

figure 21
Déformations de retrait et gonflement cumulées (en termes d'indice des vides).



■ 5.3. Caractérisation indirecte du retrait et gonflement des sols

La représentation des déformations des sols pendant leur retrait ou gonflement comme variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau permet de différencier la sensibilité de différents sols argileux aux variations de leur teneur en eau. La **figure 22** compare les courbes de déformation volumique d'une bentonite et d'une kaolinite. La bentonite a un plus grand intervalle de variation de la teneur en eau, qui est liée à la déformation par la condition de saturation (droite $e = 2,7 w$ sur la figure). La borne inférieure (limite de retrait) est proche de la limite de plasticité. La borne supérieure est plus grande que la limite de liquidité, d'une quantité variable selon les sols.

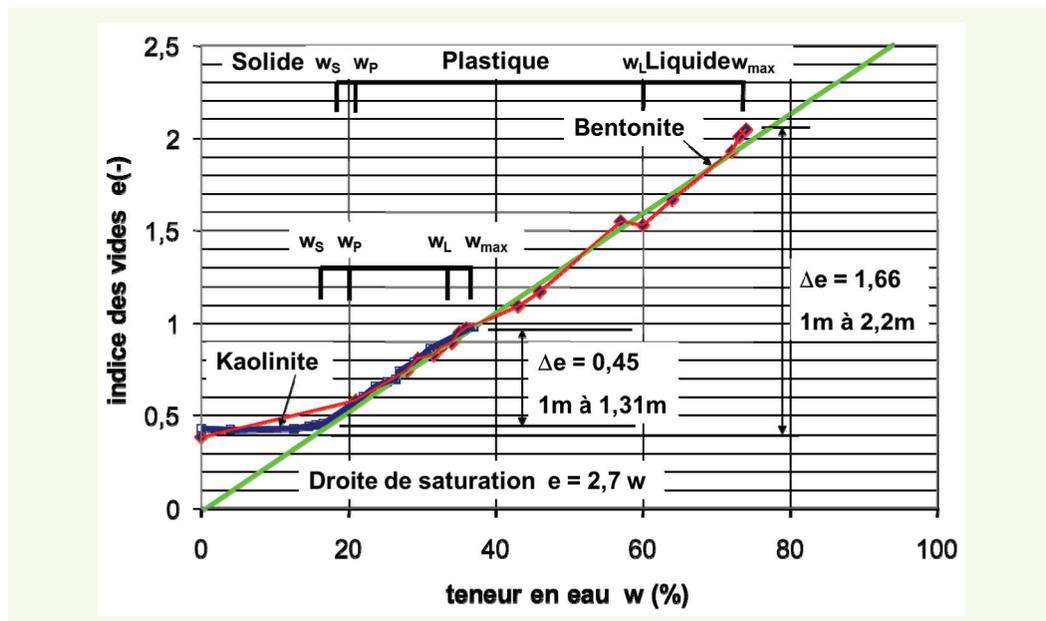
On en déduit que l'indice de plasticité ($I_p = w_L - w_p$) varie comme l'amplitude de la déformation maximale de retrait et gonflement, mais pas de façon proportionnelle. L'analyse de l'indice de plasticité ne peut donc suffire à caractériser les sols gonflants et il est probable que les autres paramètres cités pour les corrélations ne sont pas directement liés au gonflement non plus.

Les corrélations ne peuvent donc pas être efficaces sans expérience locale.

■ 5.4. Variations de la teneur en eau dans les massifs de sol

Les propriétés des particules argileuses ne suffisent pas à provoquer le retrait ou le gonflement du sol. Le facteur déclenchant est la variation de teneur en eau. Cette variation n'est ni instantanée ni

figure 22
Courbes de variation de volume et paramètres de consistance de deux sols.



homogène et elle a une composante horizontale marquée, d'une part parce que les sols sont souvent anisotropes et d'autre part parce que, dans les cas courants, on s'intéresse à la pénétration de l'eau ou à son départ sous une surface imperméable, comme une route ou un bâtiment.

L'arrivée de l'eau est due à la pluie, qui alimente le sol par sa surface ou par les bords des fossés ou tranchées de drainage, ou à des fuites de canalisations, qui peuvent avoir un effet ponctuel mais aussi un effet réparti le long des tuyaux, qui sont souvent remblayés en sable ou matériau perméable. La pénétration de l'eau dans le sol atteint une profondeur croissante, proportionnelle à la racine carrée du temps dans les milieux homogènes. L'exemple de la **figure 10** suggère que les temps d'humidification peuvent se compter en semaines ou en mois selon l'épaisseur des couches.

Le départ de l'eau est dû à son évaporation en surface ou à son absorption par les racines des arbres et plantes. L'évaporation directe dans l'air est influencée par l'humidité de l'air, sa température et son renouvellement (le vent). Elle dépend aussi de la capacité du sol à amener l'eau à évaporer jusqu'à la surface. La barrière capillaire constituée par quelques dizaines de centimètres de gravier peut pratiquement arrêter l'évaporation. Pour les prélèvements d'eau par la végétation, les zones concernées dépendent de la longueur des racines, qui peut être supérieure à la hauteur des arbres, selon les espèces, ce qui explique les distances d'éloignement préconisées en général. La capacité d'absorption d'eau par les racines a une limite physique, qui est le point de flétrissement, pression de succion ou teneur en eau en dessous de laquelle les plantes flétrissent parce que leurs racines ne peuvent continuer de prendre de l'eau dans le sol. Ce point de flétrissement est en général en dessous de la limite de retrait. Fityus et al. (2005) indiquent que des valeurs de la succion au point de flétrissement de 930 à 2600 kPa ont été rapportées.

Comme la durée de pénétration de l'humidification ou de la sécheresse dans le sol à partir de la surface est assez longue, les conditions en surface ont le temps de changer avant qu'un état d'équilibre soit atteint. Comme les transferts d'eau sont contrôlés par la perméabilité locale et le gradient des pressions, on peut avoir simultanément dans le sol des zones en cours d'assèchement et d'autres en cours d'humidification, comme illustré par la **figure 23**. La prévision des variations de la teneur en eau à partir de sa valeur initiale d'équilibre, supposée homogène sur la figure (ligne rouge), est donc complexe.

6. CAPACITÉS ET LIMITES DES CALCULS

Tous les types de structure peuvent être concernés par des sols gonflants : fondation superficielle, radier, dallage, pieu, soutènement, chaussée. Chacune de ces structures a des méthodes de calcul spécifiques, qui n'ont pas été prévues pour gérer les variations de teneur en eau. Dans la pratique,

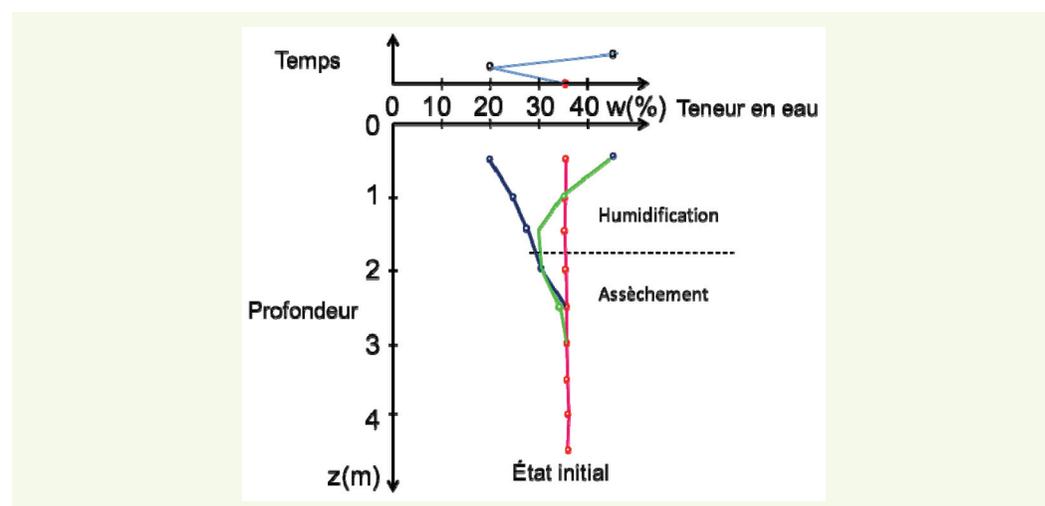


figure 23
Variations de la teneur en eau dans un profil vertical en fonction de la valeur imposée par les conditions climatiques en surface.

on introduit les effets du retrait ou gonflement dans les calculs classiques sous la forme de forces ou déplacements imposés qui perturbent les équilibres usuels. Ces forces (pressions) et déplacements dépendent du sol, de la façon dont l'eau pénètre et de l'interaction avec la structure.

L'exemple présenté par Ejjaouani (2008) illustre l'évolution des sollicitations appliquées à une poutre reposant sur une couche homogène et soumise au gonflement progressif du sol à partir des deux extrémités (figure 24). La pression de contact qui équilibre le chargement est perturbée par la pression de gonflement, qui soulève les extrémités et décharge le milieu de la poutre, créant un moment de flexion qui n'existait pas initialement. Quand le gonflement s'est propagé sous toute la poutre, la pression sous la poutre redevient uniforme et le moment de flexion s'annule. Le soulèvement du sol est contrôlé par l'équilibre entre la déformation et la pression, qui dépend de la nature minéralogique du sol (fig. 19).

Ce type de calcul est typique du calcul des structures et il n'a pas de relation directe avec le calcul du comportement du sol, qui peut relier la circulation de l'eau avec les déformations et les pressions sous la structure.

Le calcul de l'évolution des sols argileux non saturés quand l'eau pénètre dans le massif de sol par la surface ou quand elle s'évapore ou est absorbée par des racines nécessite d'autres outils. Les équations de la mécanique des sols non saturés sont résolues par la méthode des éléments finis mais elles nécessitent de nombreuses informations sur les lois de comportement des particules de sols, de l'air et de l'eau et ne peuvent être considérées comme validées à l'heure actuelle. La modélisation est compliquée par la stratification du sol et l'ouverture de fissures pendant les périodes de sécheresse (Argic, 2008).

Les tentatives de modélisation simultanée des déformations du sol et des constructions n'ont pas encore produit les résultats escomptés.

7. LES CONNAISSANCES AU NIVEAU DES PARTICULES ET IONS

L'amélioration des outils d'investigation de laboratoire permet d'approfondir l'examen des sols argileux à l'échelle microscopique. La structure fine des argiles, pour laquelle on distingue des types de structures élémentaires caractéristiques de la kaolinite, de l'illite et de la montmorillonite, reste la toile de fond des recherches.

Des progrès ont été faits dans l'analyse de la réversibilité des déformations de gonflement et de retrait, et aussi des mécanismes d'interaction des molécules d'eau avec les particules argileuses ou d'interaction des argiles avec la chaux. On connaît l'influence des ions présents dans la structure élémentaire des argiles et dans l'eau interstitielle, on a remarqué que la présence de particules calcaires modifie le comportement des argiles pures (Makki, 2009). On sait aussi que la densité du sol est un paramètre important et que les liaisons entre particules sont différentes quand l'argile est très dense (indices des vides de l'ordre de 0,1 ou 0,2) et quand le sol est plus lâche.

Mais la représentativité des particules et des sols reconstitués en laboratoire par rapport au comportement des sols intacts présents dans la nature reste une question d'actualité.

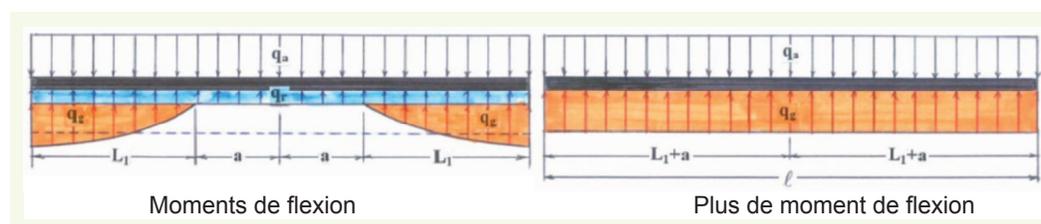


figure 24
Équilibre des charges
et pressions du sol
sur une poutre horizontale.

Malgré ces progrès, les capacités de l'analyse microscopique des sols argileux restent loin des besoins de la pratique. Cette frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle des ouvrages n'est pas spécifique aux sols gonflants : elle concerne toute la mécanique des sols car il n'y a pas de techniques de passage entre le niveau des particules et celui des massifs de sols. Les propriétés des sols à l'échelle des massifs sont déterminées sur des éprouvettes de laboratoire de dimensions centimétriques qui contiennent des milliards de particules d'argile. Dans un tel contexte, la connaissance de lois au niveau des particules permet seulement d'imaginer pourquoi les éprouvettes ont des comportements différents selon les minéraux, leur empilement et la composition ionique de l'eau.

CONCLUSION

Sous le nom de sols gonflants, on regroupe des sols comportant des argiles dont la réaction « spontanée » aux variations de teneur en eau a des conséquences visibles sur le comportement des constructions. Toutes les argiles réagissent aux variations de l'eau, mais certaines ont une structure plus sensible, même quand elles sont mélangées à d'autres minéraux, comme le calcaire dans les sols marneux. La sensibilité des sols argileux aux variations de teneur en eau est un facteur majeur pour le dimensionnement géotechnique des constructions.

Les différentes parties de cet article suggèrent que l'on peut résoudre la plupart des problèmes rencontrés dans la pratique, sur la base d'une analyse « saine et réaliste » des problèmes. Cette analyse suppose que la reconnaissance géotechnique du site ait détecté tous les paramètres influant sur le comportement du sol et son traitement.

Les problèmes de sols gonflants ont le plus souvent une importance régionale et doivent être traités à cette échelle. Les solutions peuvent être pour cette raison fondées sur l'innovation et l'expérience régionale, en complément des principes généraux rappelés dans cet exposé.

REMERCIEMENTS

Cet article est issu de conférences présentées à la 2^{ème} Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique (Rabat, décembre 2011), aux 4^{èmes} Journées Africaines de Géotechnique (Kribi, Cameroun, juin 2012) et aux 5^{èmes} Journées Africaines de Géotechnique (Brazzaville, Congo, mai 2013). Ces conférences s'appuyaient elles-mêmes sur les travaux menés au Laboratoire central des ponts et chaussées devenu IFSTTAR et dans les Laboratoires régionaux des ponts et chaussées, d'abord sur le thème des sols gonflants, puis à partir de 2003 sur le thème de la sécheresse. Notre collaboration avec le LPEE à Casablanca, en particulier avec H. Ejjaouani et V. Shakhirev, a alimenté beaucoup de recherches, de réflexions et de synthèses, comme les travaux menés par J.F. Serratrice au Laboratoire régional d'Aix-en-Provence et C. Mieussens au Laboratoire régional de Toulouse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AL-RAWAS A.A., GOOSEN M.F.A. (ED.) (2006).** Expansive soils: Recent advances in characterization and treatment. Taylor and Francis, 544 pages.
- ARGIC (2009).** Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions. Projet ANR-05-PRGCU-005, coordonné par le BRGM, avec la participation des organismes suivants : Armines-Centre de Géosciences, BRGM, ECP – LMSSMat, ENPC - CERMES, Fondasol, INERIS, INPL - LAEGO, INRA, Insavalor-LGCIE, LCPC, Météo-France, Université Bordeaux 1 – GHYMAC, Université de Poitiers – HydrASA et LEA. Rapport final : BRGM/RP-57011-FR, mai 2009, 92 pages et 39 annexes.
- AS (1992).** Methods for testing soils for engineering purposes: Method 7.1.1: Determination of the shrinkage index of a soil; shrink swell index. Australian Standard AS1289-7.1.1-1992
- CHEN F.H. (1975).** Foundations on expansive soils. Elsevier Scientific Publishing Co., 282 pages.
- DRISCOLL R.M.C., SKINNER H. (2007).** Subsidence damage to domestic buildings: A guide to good technical practice. BRE Trust, 66 pages.
- EJJAOUANI H. (2008).** Interactions des fondations et des sols gonflants : pathologie, calculs et études expérimentales. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 243 pages.
- FREEMAN T.J., LITTLEJOHN G.S., DRISCOLL R.M.C. (1994).** Has your house cracks? A guide to subsidence and heave of buildings on clay. Thomas Telford, 114 pages.
- FITYUS S.G., CAMERON D.A., WALSH P.F. (2005).** The shrink-swell test. Geotechnical Testing Journal, vol. 28, N°1, 10 pages.

- IFSTTAR (2013).** Détermination rapide de l'amplitude totale des déformations de retrait et gonflement des sols sur un prélèvement non remanié (essai rapide de retrait-gonflement). Méthode d'essai ME 81.
- KASSIF G., LIVNEH M., WISEMAN G. (1969).** Pavements on expansive clays. Jerusalem Academy Press, Jerusalem, Israël.
- KATTI R.K., KATTI D.R., KATTI A.R. (2002).** Behaviour of saturated expansive clays. Taylor and Francis, rev. edition, 1270 pages.
- MAGNAN J.P., EJJAOUANI H., SHAKHIREV V., BENSALLAM S. (2013).** Étude du gonflement et du retrait d'une argile. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 280-281.
- MAGNAN J.P., SHAKHIREV V., EJJAOUANI H., EL GAMALI H. (1995).** Étude expérimentale du comportement des pieux forés dans les sols gonflants. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 198, pp. 29-38.
- MAKKI L. (2009).** Comportement de retrait-gonflement des sols en période de sécheresse. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 266 pages.
- MARIOTTI M. (1976).** Le gonflement des sols argileux surconsolidés. Aspects du phénomène. Influence sur les structures. Précautions à envisager. *Mines et Géologie*, Rabat, **39**, pp. 13-28.
- MEDDE (2014).** Trois guides pratiques sur le thème : Sécheresse et construction. Guide 1 – Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse. Guide 2 - Protéger sa maison de la sécheresse, conseils aux constructeurs de maisons neuves. Guide 3 - Retrait et gonflement des argiles. Caractériser un site pour la construction. Projet ARGIC2, coordonné par l'IFSTTAR. À paraître.
- MOUROUX P., MARGRON P., PINTÉ J.C. (1988).** La construction économique sur sols gonflants. BRGM, Manuels et méthodes N°14, Rexcoop (Plan construction), 126 pages.
- MUSTAFAEV A.A. (1989).** Les fondations sur sols affaissables et gonflants (En russe : Fundamenty na prosadochnykh i nabukhayushchikh gruntakh). Vyshchaya Shkola, Moscou, 578 pages.
- NELSON J., MILLER D. (1997).** Expansive soils. Problems and practice in foundation and pavement engineering. Wiley-Interscience, 288 pages.
- OLIVE W., CHLEBORAD A., FRAHME C., SHLOCKER J., SCHNEIDER R., SCHUSTER R. (1989).** Swelling clays map of the conterminous United States. USGS Miscellaneous Investigations Series, Map I-1940.
- SERRATRICE J.F., SOYEZ B. (1996).** Les essais de gonflement. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, N°204, pp. 65-85.
- SOROCHAN E.A. (1991).** Construction of buildings on expansive soils (translated from Russian). Geotechnika 5, A.A. Balkema, 306 pages.
- STEINBERG M., STEINBERG M.L. (1998).** Geomembranes and the control of expansive soils in construction. McGraw-Hill, 222 pages.
- WRAY W.K. (1995).** So your home is built on expansive clays: a discussion of how expansive soils affect buildings. ASCE Publications, 59 pages.