
Méthodologie d'étude pathologique des constructions vis-à-vis des problèmes de retrait et gonflement des sols

Moulay-Idriss Zerhouni* — **Catherine Jacquard**** — **Leila Ghozali***

* *FONDASOL, 21 rue Jean Poulmarch, 95100 Argenteuil, France, moulay.zerhouni@fondasol.fr, leila.ghozali@fondasol.fr*

** *FONDASOL, BP 767, 84035 Avignon Cedex 3, France, catherine.jacquard@fondasol.fr*

RÉSUMÉ. L'expérience acquise à partir d'études de diagnostic menées en France sur des maisons sinistrées par les effets de la sécheresse sur les constructions, nous a amené à proposer une méthodologie de diagnostic et d'analyse géotechnique adaptée à la réparation de maisons individuelles.

Après un rappel des principaux phénomènes régissant les variations volumiques des sols, l'article présente une démarche méthodologique pratique, faisant appel à des moyens classiques de bureaux d'études géotechniques, pour l'étude pathologique des constructions.

ABSTRACT. The experience acquired through numerous assessments and diagnosis of damaged buildings resulting from droughts, leads us to propose a geotechnical assessment and study methodology adapted to the repair of such constructions. After a brief description of the phenomena governing volume changes of soils, the paper presents a practical approach for a geotechnical assessment of light buildings using classical means and methods available to the geotechnical engineer.

MOTS-CLÉS: diagnostic, retrait, gonflement, sols non saturés, argiles, reprises en sous-œuvre, fondations.

KEYWORDS: assessment, shrinkage, swelling, unsaturated soils, clays, underpinning, foundations.

1. Introduction

Depuis la sécheresse exceptionnelle de 1976, un grand nombre de maisons individuelles a subi les effets pathologiques de périodes de sécheresses successives, qui ont provoqué sur ces ouvrages des désordres et des fissurations dus à des variations volumiques, conséquences d'un retrait ou d'un gonflement des sols de fondation. Le traitement de ces effets se révèle onéreux aussi bien en termes de réparation qu'en termes de gestion du sinistre.

Les sols fins sont fréquemment mis en cause dans ce type de sinistre. L'une des principales raisons réside dans leur aptitude à une forte variation de volume dès que les conditions d'équilibre, notamment de teneur en eau, sont modifiées. Il importe alors au géotechnicien d'identifier les sols susceptibles de telles variations de volume et d'en déterminer les conséquences prévisibles sur les constructions en menant un diagnostic adapté à ce type de problème.

En se basant sur notre expérience de géotechnicien, il nous est apparu utile de proposer une méthodologie d'étude et de diagnostic relative à ces pathologies.

2. Les phénomènes en jeu : Retrait et Gonflement

Dans les sols fins, les variations de volume sont le plus souvent associées aux variations de la quantité d'eau interstitielle absorbée ou expulsée. Ceci est notamment valable lorsque ces sols sont saturés ou proches de la saturation. Un départ d'eau interstitielle se traduira par une réduction du volume du sol, donc un retrait. Cette variation de volume sera d'autant plus grande que la quantité d'eau contenue dans le sol à un instant donné est grande. A l'inverse un apport d'eau conduira à une augmentation du volume du sol ou gonflement. Ce gonflement sera alors d'autant plus important que la capacité du sol à absorber de l'eau est grande.

La fraction argileuse (particules $< 2\mu\text{m}$) des sols fins joue un rôle prépondérant dans l'amplitude de ces phénomènes, notamment lorsqu'elle est présente en grande quantité. En outre, en fonction de la structure cristalline des particules d'argile, la capacité à emmagasiner et retenir l'eau interstitielle sera plus ou moins grande.

En effet, ces particules sont constituées de feuillets élémentaires dont les faces, chargées négativement, ont la propriété d'attirer les particules d'eau (voir Figure 1). L'empilement de plusieurs centaines de feuillets élémentaires forme les plaquettes d'argile. Selon la structure cristalline de l'argile, l'épaisseur des feuillets est variable (7 à 14 angströms) et l'aptitude à attirer l'eau et certains ions est variable selon les forces électriques qui lient les feuillets entre eux. Ainsi par exemple, les feuillets de montmorillonite (famille des smectites) qui ont entre eux un lien faible, peuvent attirer des particules d'eau en grande quantité et doubler d'épaisseur.

Certaines argiles présentent un lien fort entre feuillets, à l'intérieur desquels peu d'eau peut pénétrer, comme les kaolinites.

La capacité d'une argile à attirer l'eau est donc proportionnelle à ce qu'on appelle sa surface spécifique, qui correspond à la surface cumulée des feuillets d'argile pour une masse donnée. Le tableau 1 résume ces propriétés caractéristiques pour les principales familles d'argile.

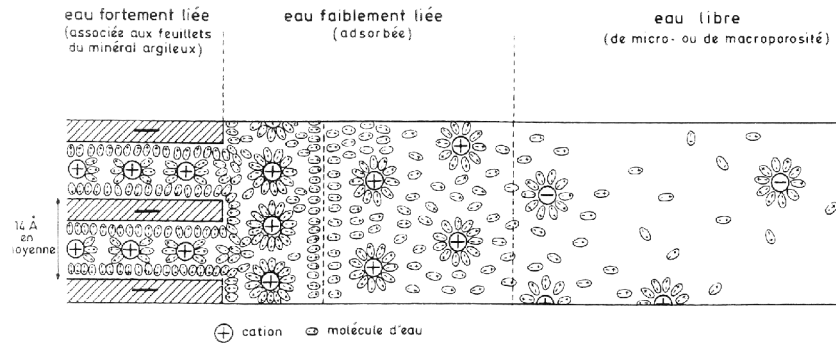


Figure 1. Structure foliaire et différents types d'eau en relation avec les minéraux argileux (Sergeev, 1971)

Famille d'argile	Surface spécifique (m ² /g)	Diamètre D des plaquettes (μm)	Epaisseur des plaquettes	Epaisseur des feuillets (Å)
Kaolinite	10 à 20	0,3 à 3	D/3 à D/10	7
Illite	80 à 100	0,1 à 2	D/10	10
Montmorillonite	800	0,1 à 1	D/100	10

Tableau 1. Propriétés caractéristiques des principales familles d'argile

Après avoir rappelé les mécanismes à l'échelle des particules constituantes, il est à présent intéressant de décrire le comportement du sol à l'échelle macroscopique, en fonction de la variation de son état hydrique provoquée soit par une dessiccation du sol, soit par une humidification. Biarez *et al.* (1988), ont étudié les variations de volume de différents sols argileux sous l'effet de cycles contrôlés de dessiccation – humidification. Cette étude a montré que le comportement est régi principalement par la variation de pression interstitielle négative (tension) qui constitue la succion du sol, celle-ci étant plus ou moins forte en fonction de l'état de teneur en eau initiale. Elle montre également l'équivalence entre l'action d'une contrainte mécanique et celle d'une contrainte hydrique (succion) dans le domaine où le sol reste saturé ainsi que la validité du principe de contrainte effective dans ce domaine.

Ce domaine où le sol reste saturé peut être très étendu et correspondre parfois à une variation de succion équivalente à une pression de plusieurs centaines, voire milliers de kPa. Une autre conclusion intéressante de cette étude est que pendant un

cycle de dessiccation-humidification et pour un état initial donné, la relation entre l'indice des vides et la teneur en eau est biunivoque, même s'il y a eu désaturation du sol lors de ce cycle.

L'analyse d'essais de retrait reliant la variation de volume en fonction de la diminution de la teneur en eau, met en évidence les principales phases du comportement d'un sol (voir Figure 2). Lorsque la teneur en eau d'un sol argileux saturé décroît, le sol commence par réduire son volume en restant saturé jusqu'à un seuil de début de désaturation (entrée d'air). Dans cet intervalle (phase 1), la réduction de volume ou retrait équivaut à la quantité d'eau extraite du sol, ce dernier restant saturé. Dans ce cas, l'indice des vides étant proportionnel à la teneur en eau, l'amplitude des variations de volume peut être déduite directement des variations de teneur en eau.

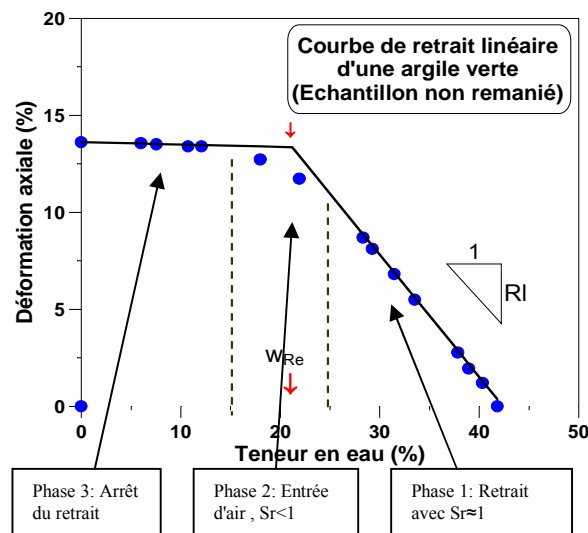


Figure 2. Exemple de courbe de retrait obtenue par dessiccation

Si la teneur en eau continue de décroître, la diminution du volume se poursuit (phase 2) avec une amplitude qui devient de plus en plus faible et qui n'est plus proportionnelle à la variation de teneur en eau, jusqu'à devenir quasiment nulle (phase 3). Dans ces phases 2 et 3, le sol n'est plus saturé. La limite de retrait effective w_{Re} sépare le comportement avec variation importante de volume (phase 1), du comportement où la variation de volume est quasiment nulle (phase 3).

Dans l'étude du gonflement d'un sol suite à un apport d'eau, l'état initial va largement conditionner son comportement. En effet, pour un même sol, le gonflement sera d'autant plus grand que le sol est initialement plus sec. Ce gonflement sera accentué par la présence de minéraux argileux actifs. En outre, il sera plus ou moins important selon la valeur de la contrainte mécanique appliquée

sur ce sol. Pour caractériser le potentiel de gonflement d'un sol, différents essais existent (Soyez *et al.*, 1996). Les caractéristiques du gonflement en sont déduites, soit en mesurant l'effort nécessaire pour s'opposer au gonflement, soit en permettant le gonflement d'éprouvettes chargées et en mesurant l'amplitude de soulèvement.

3. Démarche du diagnostic et méthodologie

Il est essentiel que le diagnostic se fasse au départ sans idée préconçue de la cause des désordres, de façon à lister puis analyser l'ensemble des facteurs qui ont pu être à l'origine des mouvements du sol et à pouvoir indiquer que la nature du sol et sa sensibilité au retrait-gonflement sont bien à l'origine des désordres. La démarche doit donc s'organiser dans cet ordre :

- Caractérisation de l'environnement de la construction et de son historique
- Description de la construction et de sa structure
- Description des désordres observés, tassements, fissures et de leur localisation
- Reconnaissance des fondations existantes
- Reconnaissance des sols et programme d'essais à envisager
- Analyse, synthèse des informations et diagnostic
- Analyse sur l'évolutivité et sur les potentiels restants de retrait et de gonflement
- Définition des méthodes de réparation et des actions correctives envisageables.

3.1. Caractériser l'environnement de la construction et son historique

Cet aspect est à aborder aussi bien lors de la visite de la construction et du site où elle se trouve que préalablement sur la base d'une enquête documentaire. Il vise à décrire la configuration de l'environnement de la construction et plus particulièrement :

- La topographie du site et l'intégration de la construction dans cette topographie. Les évolutions de cette topographie au cours du temps seront également à examiner. Cet examen peut orienter l'analyse et permettre d'identifier, entre autres, les cas de terrains en pente favorisant l'orientation des eaux de ruissellement vers la construction et son accumulation au voisinage de cette construction. Les profondeurs d'encastrement de la construction par rapport au niveau du terrain extérieur peuvent s'avérer très différentes et conduire à une protection hétérogène des sols d'assise vis-à-vis de la dessiccation. Une configuration type fréquemment rencontrée, qui peut poser problème, est celle des constructions établies sur des plateformes en déblai-remblai, avec en général une qualité mécanique plus faible des terrains côté remblai.

– La présence d’arbres et de végétaux à proximité de la construction qui en fonction de l’espèce, de leur taille et de la distance à laquelle ils se trouvent peuvent engendrer une modification locale de la teneur en eau du sol.

– La protection ou non du pourtour de la construction, vis-à-vis de l’évaporation et vis-à-vis des infiltrations d’eau pouvant conduire à des modifications de l’équilibre de teneur en eau des sols. On relèvera en particulier, la position des mitoyens, la présence ou non des zones revêtues (terrasses extérieures, dallages, allées...), ainsi que les dispositifs de collecte des eaux de pluie (descentes d’eaux, drain périphérique, regards...) et leur état de fonctionnement. L’orientation de la construction par rapport au nord permet de localiser les zones soumises à fort ensoleillement.

Outre la consultation de la carte géologique et des éventuelles études géotechniques disponibles dans le secteur de la construction, l’enquête documentaire doit comprendre la consultation d’un certain nombre de bases de données accessibles via des sites internet comme *infoterre.brgm.fr*, *www.argiles.fr* et le site *www.prim.net*. La consultation des avis et arrêtés de catastrophe naturelle concernant la commune où se trouve la construction est également à réaliser.

3.2. Description de la structure de la construction et des fissures

Cette étape consiste à établir comment est conçue la structure des constructions et à établir à partir des observations faites sur les bâtiments concernés, le lien entre les désordres et l’effet des variations hydriques sur le sol de fondation.

Les deux formes principales de fissuration rencontrées sont des déformations de flexion et de cisaillement.

Il est parfois difficile de distinguer les désordres dus aux phénomènes de retrait/gonflement avec ceux provenant de tassements de consolidation ou de mouvements de grande ampleur comme les glissements ou les fluages. De même, certaines fissures de structure (retrait, thermique) peuvent se confondre avec celles provoquées par des mouvements de fondation.

En tout état de cause, une description de la structure du bâtiment, permettant de connaître au moins les murs porteurs, le sens de portée des planchers, l’existence de murs de refends, la présence ou non de chaînage, etc.... permet de comprendre comment fonctionne la structure et à quels mouvements différentiels peuvent être rattachées les fissures et leurs orientations. La connaissance de la structure de la dalle du niveau bas du bâtiment (dallage sur terre-plein, plancher porté) est aussi une donnée importante pour le diagnostic et pour les réparations à envisager.

Le relevé des fissures (orientation et ouverture) et l’existence d’un éventuel comportement alternatif (ouverture et fermeture des fissures entre l’été et l’hiver) renseignent aussi sur le potentiel de gonflement.

3.3. Reconnaître le mode de fondation de la construction

Cette étape consiste à établir comment est fondée la construction, en vue de comprendre et d'analyser l'interaction sol-structure. Elle consiste le plus souvent à réaliser des fouilles ponctuelles sous les éléments porteurs afin de reconnaître précisément la fondation. Parmi les éléments essentiels figurent : le type et la géométrie de la fondation, la profondeur d'assise par rapport au niveau fini extérieur, la nature et l'état des sols traversés et du sol d'assise et l'ancrage de la fondation dans ce sol.

Il est essentiel de réaliser ces relevés aussi bien dans les zones où les désordres sont observés mais aussi en plusieurs autres points si l'on suspecte une hétérogénéité de nature de fondation ou de sol support. La description et la qualité des éléments constitutifs de la fondation sont des données utiles si l'on envisage une reprise en sous-œuvre.

3.4. Reconnaître les sols – programme d'essais géotechniques

La reconnaissance des sols se doit d'être aussi complète que possible afin d'une part reconnaître les sols et leur répartition spatiale et d'autre part en mesurer les paramètres d'état actuel et d'en prévoir l'évolution à partir des propriétés de comportement déduites des essais mécaniques.

La démarche proposée fait appel à des moyens de reconnaissance et d'essais classiques des bureaux d'études géotechniques. Ils font, pour la plupart, l'objet de normes françaises ou européennes dont les références sont citées dans le texte.

On a vu que la fraction argileuse d'un sol joue un rôle important et peut amplifier les variations volumiques. Il convient donc de réaliser des prélèvements dans les sols constituant l'assise des fondations et d'en caractériser la composition granulométrique (NF P94-056) accompagnée d'une analyse sédimentométrique (NF P94-057) qui permet de connaître le pourcentage C_2 d'argile dans le sol (passant à 2 μm). Il est intéressant ensuite d'identifier la nature minéralogique de cette fraction argileuse. L'identification de cette fraction au microscope électronique à balayage n'étant pas un moyen classique pour le géotechnicien, on recourt plus aisément à une détermination de la surface spécifique des argiles, à partir de la mesure de la valeur de bleu de méthylène VBs (NF P94-068).

Une classification du sol et de sa nocivité potentielle en cas de variations hydriques peut alors être établie à partir des classifications proposées par Magnan *et al.* (1989) et par Lautrin (1989).

Lorsque la fraction argileuse des sols est classée en activité moyenne à très active au sens de la norme XP P94-011 (voir tableau 2), il est nécessaire de quantifier la sensibilité du sol au retrait, en effectuant un essai de retrait linéaire sur échantillon intact (XP P94-060-2).

Cet essai de retrait linéaire, réalisé sur échantillon intact, permet de définir d'une part l'importance du phénomène de retrait (R_l) de cet échantillon, mais aussi la limite de teneur en eau en deçà de laquelle les variations de volume, et donc le retrait seront négligeables. En effet, le retrait ne peut se produire qu'entre la teneur en eau naturelle du sol et sa limite de retrait effective (w_{Re}).

Activité de la fraction argileuse du sol $A_{CB} = 100.VBs/C_2$	Qualificatif
$0 \leq A_{CB} \leq 3$	Inactive
$3 < A_{cb} \leq 5$	Peu active
$5 < A_{cb} \leq 13$	Moyenne
$13 < A_{cb} \leq 18$	Active
$18 < A_{cb}$	Très active

Tableau 2. Qualificatif de la fraction argileuse à partir du paramètre d'activité A_{CB}

Il est donc indispensable de connaître l'état hydrique du sol en établissant des profils de teneur en eau, représentatifs de l'état du sol au moment du prélèvement. Si la teneur en eau du sol est proche ou inférieure à la limite de retrait, il ne devrait pas produire de tassement supplémentaire notable dû au retrait.

En revanche, il est légitime de penser qu'il risque de se produire un gonflement si ce sol subit une humidification. Il est alors recommandé de réaliser une mesure du potentiel de gonflement sur un échantillon intact de ce sol.

La caractérisation du potentiel de gonflement d'un sol provoqué par une imbibition à l'eau peut être obtenue soit en mesurant l'effort nécessaire pour s'opposer au gonflement (norme XP P94-090-1), soit en permettant le gonflement d'éprouvettes chargées et en mesurant l'amplitude de soulèvement (norme XP P94-091). Le choix de l'une ou l'autre méthode devra être fait en fonction du problème posé et de manière à reproduire en laboratoire les conditions les plus proches du cas réel. En particulier, le choix des valeurs des contraintes d'essai devra prendre en compte ces conditions.

Pour compléter l'étude du point de vue géotechnique, il convient de réaliser des investigations et sondages permettant de connaître la lithologie, et en particulier de définir l'épaisseur des formations argileuses susceptibles de produire du retrait-gonflement. La réalisation de sondages carottés permet une définition précise de la lithologie tout en permettant le prélèvement d'échantillons intacts. La réalisation de sondages à la tarière permet d'obtenir des échantillons remaniés en vue de décrire la lithologie et réaliser un profil hydrique. En effet, la mesure de la teneur en eau (norme NF P94-050) constitue pour les sols fins un des moyens simples pour caractériser le comportement et l'état des sols. La réalisation de plusieurs profils hydriques permet d'identifier et de caractériser les éventuels différentiels de comportement; d'où l'intérêt de réaliser un profil hydrique. Un profil hydrique est en

général établi à partir d'échantillons prélevés tous les 30 à 50 cm, jusqu'à au moins 5m de profondeur sous le niveau d'assise des fondations.

En confrontant les profils de teneur en eau mesurés avec les paramètres de retrait (w_{Re} , R_I), les paramètres de gonflement (σ_g , R_g , C_g) et les limites d'Atterberg (w_L , w_P), il devient possible de prévoir le comportement volumique du sol aussi bien en cas de dessiccation prolongée, qu'en cas d'humidification, et d'en évaluer les possibles conséquences sur les structures. Une fois ces conséquences évaluées, il convient de définir des modalités adaptées de confortement en fonction des paramètres de résistance et de portance des sols, notamment au-delà des épaisseurs de sol sujettes à variations hydriques importantes. La réalisation de sondages pressiométriques (NF P94-110-1) permet d'obtenir des paramètres de portance et de tassement, y compris lorsque le recours à une reprise en sous-œuvre par micropieux est à envisager. La reconnaissance doit dans ce cas au moins atteindre 5m sous la profondeur envisagée des micropieux.

3.5. Solutions de réparation envisageables

Sur la base des informations acquises lors des étapes précédentes, un diagnostic définissant les causes des mouvements de sol et des désordres associés est établi. Celui-ci doit intégrer les facteurs aggravants qui ont pu intervenir dans l'apparition des désordres et leur gravité. On peut citer à titre d'exemple : l'influence de l'environnement (actions de végétaux, protections vis-à-vis de l'évapotranspiration, déséquilibres de teneur en eau, accumulation localisée d'eau,...), l'implication de l'ouvrage (hétérogénéité d'assise, présence d'un vide sanitaire, niveaux décalés, sous-sol partiel,...) ainsi que des facteurs liés à la structure (déficiences de la structure, insuffisance de chaînage,...). Un point important à faire ressortir lors du diagnostic concerne l'évolutivité des désordres et l'appréciation des potentiels restants de retrait ou de gonflement des sols.

A partir de ce diagnostic, des principes d'adaptation peuvent être proposés. Ils peuvent combiner différentes solutions visant tout d'abord à limiter ou éliminer les sources conduisant aux variations volumiques des sols, notamment en stabilisant la teneur en eau du sol, à adapter le mode constructif des fondations et du soubassement des constructions en fonction du potentiel restant de retrait-gonflement des sols et à préciser les actions préventives et de maintenance à adopter pour assurer la pérennité de ces solutions.

Les caractéristiques de la structure de la construction jouent un rôle essentiel dans le ou les modes de réparation envisageables. Certaines habitations ne présentent aucune rigidité, et une reprise en sous-œuvre des fondations, pour être efficace doit alors s'accompagner d'une rigidification de la structure : chaînage du niveau haut, chaînage au niveau des fondations, tirants pour renforcer la structure,... La présence de niveaux de sous-sols partiels, de niveaux décalés, de refends intérieurs, de plancher chauffant, etc... conditionnent aussi le choix du mode de réparation.

Le fait que seule une partie de la construction est affectée par des désordres, peut inciter à ne conforter que la partie endommagée. Cette solution est souvent la source de nombreux désordres de seconde génération, la partie confortée ne subissant plus de mouvement, alors que celle restée en l'état continue à subir les mouvements du sol. Si une telle solution est adoptée, elle doit impérativement être accompagnée d'une désolidarisation complète par un joint de séparation à créer entre les deux parties confortée et non confortée.

Selon la gravité des désordres, la réalisation d'une protection périphérique, par exemple au moyen de trottoir étanche, permet de limiter les variations de teneur en eau au niveau des fondations et donc limiter les déformations du sol et stabiliser les mouvements. Ce type de solution fonctionne mais la décision de la mettre en œuvre doit être clairement comprise et acceptée par les différents intervenants, en raison des contraintes de maintenance et de servitude pour garantir sa pérennité. Dans le cas où cette garantie n'est pas acquise, il faudra recourir à une solution lourde de reprise en sous-œuvre.

Une réparation par reprise en sous-œuvre peut consister soit à réaliser :

- Des plots de fondation de façon à asseoir la construction sur un sol non sensible aux variations hydriques, c'est-à-dire, soit de nature non argileuse, soit à une profondeur suffisante pour ne plus avoir de variations hydriques. Le choix entre plots jointifs ou plots ponctuels, dépend de la capacité de la structure existante à reporter les charges sur les plots et de la capacité portante du sol.
- Des fondations par micropieux : il faut alors avoir un horizon porteur suffisamment résistant en deçà de 10/15m de profondeur pour que cette solution soit acceptable économiquement. Elle nécessite très souvent la réalisation de massifs ou de longrines de répartition au niveau des fondations existantes.
- Dans certains cas, d'autres techniques sont utilisées, notamment celles consistant à conforter les sols d'assise et à combler les espaces vides par une injection de produits expansifs à base de résines spéciales. Ces techniques, rapides et ne nécessitant pas de travaux préparatoires lourds, requièrent une étude spécifique. Elles peuvent parfois s'avérer nocives pour le traitement des dallages sur sol fin, en raison d'une possible augmentation de teneur en eau qui peut se produire.

4. Conclusions

La démarche proposée ici, établie à partir de l'expérience acquise, a pour objectif d'optimiser et de pérenniser les réparations des constructions ayant subi les effets de la sécheresse. En effet, l'efficacité du traitement n'est pas nécessairement proportionnelle au coût des réparations mais est en premier lieu liée à la justesse du diagnostic et à sa pertinence. L'observation de l'existant, l'identification du sol et de son état hydrique suivant cette démarche forment la base pour décider de travaux confortatifs adaptés, et pérennes.

La méthodologie décrite peut également constituer un guide pour mener les études géotechniques pour des constructions individuelles neuves dans les zones à risque vis-à-vis de cet aléa naturel de mouvements de sols liés à la sécheresse.

5. Bibliographie

- Biarez J., Fleureau J.M., Zerhouni M.I., Soepandji B.S., « Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification », *Revue Française de Géotechnique*, n° 41, 1988, p. 63-71.
- Bigot G., Zerhouni M.I., « Retrait, gonflement et tassement des sols fins », *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, n° 229, 2000, p. 105-115.
- Bigot G., Zerhouni M.I., Philipponnat G. « Les essais normalisés de dessiccation et de gonflement des sols argileux », *Colloque MAGI 50*, Nancy, 21-22 sept. 1998, Nancy.
- Jacquard C. « Pathologie des fondations superficielles sur sols argileux. Retour d'expérience en Midi-Pyrénées ». *Revue Française de Géotechnique*, n° 120-121, 2007, p.155-164.
- Lautrin D. « Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les problèmes de génie civil », *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, n° 160, 1989.
- Magnan J.P., Youssefian G. D. « Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols », *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, n° 159, 1989.
- Soyez B., Serratrice J.F. « Les essais de gonflement », *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, n° 204, p. 65-85, 1996.