

ETUDE GEOTECHNIQUE D'UN SOL ARGILEUX EN LABORATOIRE ET SUR SITE EXPERIMENTAL : INTERACTION AVEC LE BATI.

GEOTECHNICAL STUDY OF CLAYEY SOILS IN LABORATORY AND IN-SITU: SOIL STRUCTURE INTERACTION

Céline ANDRIEUX^(1,2), Marie CHRETIEN^(1,2), Richard FABRE⁽²⁾.

⁽¹⁾ B.E Géotechnique AIS Grand Sud, Mérignac, FRANCE

⁽²⁾ Université Bordeaux 1, Laboratoire GHYMAC, Talence, FRANCE

RÉSUMÉ – Suivant la problématique de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux, cette étude a pour objectif d'établir une corrélation entre l'évolution de la fissuration des maisons sinistrées et l'amplitude des tassements observés dans les sols argileux de Gironde. Dans ce travail, les déformations du sous-sol provenant d'un site expérimental situé sur la commune de Pessac (33) seront comparées aux déformations mesurées sur les fissuromètres des maisons sinistrées, en fonction des caractéristiques géotechniques des sols argileux.

ABSTRACT – Following the problem of swelling – shrinkage hazard of clayey soils, this study aims to establish a correlation between the evolution of cracking on individual constructions damaged on a Pessac district with the amplitude of vertical soil displacements. The geotechnical behaviour of clayey soils is analysed from geotechnical characteristics of soils studied on the experimental site located on the Pessac district (Gironde), and compared with displacements registered on damaged constructions.

1. Introduction

En Gironde, les effets négatifs des dernières périodes de sécheresses (2003, 2005) se sont traduits par d'importants tassements des sols argileux en période estivale, engendrant de nombreux sinistres sur des maisons individuelles. Ces désordres sont marqués par l'apparition d'importantes fissurations sur les façades des habitations ainsi que par des décollements de plafonds et des affaissements de planchers. Ces sinistres ont été particulièrement importants sur la commune de Pessac (33), située à quelques kilomètres à l'ouest de Bordeaux, avec une concentration de plus de 70% des sinistres dans un quartier de la commune construit sur une formation argileuse du Quaternaire dite « Formation de Brach ». La sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux de cette formation géologique, associée à des tassements différentiels, sont à l'origine des maisons sinistrées d'un quartier de la commune (Chrétien *et al.* 2009). Ceci a justifié le développement de travaux de recherche auxquels nous avons participé (Projet ANR ARGIC « *Analyse du retrait Gonflement et de ces Incidences aux Constructions* », 2006-2009), afin de comprendre les mécanismes du phénomène de retrait-gonflement à partir d'une base de données géotechniques plus importante. Ce travail a été couplé avec des mesures expérimentales en vraie grandeur des déformations d'un sous-sol argileux en fonction des variations climatiques. Suivant cet objectif, le site expérimental mis en place sur la commune de Pessac durant la thèse de Marie Chrétien (2007-2010), a été notamment équipé d'extensomètres pour mesurer les déformations des sols argileux de la « Formation de Brach ».

L'intérêt de ce site est de mener un suivi annuel en grandeur réelle et en continu du comportement mécanique et hydrique de la « Formation de Brach ». En parallèle, un suivi de l'évolution des fissures observées sur les maisons sinistrées du quartier Cap de Bos a été effectué sur une période de deux ans. L'un des objectifs de ce travail est d'établir un modèle d'évolution de l'influence du sous-sol argileux sur le bâti des maisons individuelles par l'étude

de l'impact de la variabilité géotechnique des sols en fonction des variations hydriques et climatiques. Dans cette étude, l'évaluation du retrait et du gonflement se fait à partir des paramètres géotechniques obtenus en laboratoire (essais oedométriques, essais de dessiccation) et des déformations enregistrées sur le site expérimental.

2. Présentation du quartier sinistré de Cap de Bos

2.1. Localisation géographique et géologique

D'après la coupe géologique du secteur d'étude (Figure 1 ; Dubreuilh *et al.*, 1995), la commune de Pessac se situe à la limite de deux domaines : à l'Est les terrasses alluviales quaternaires de la Garonne et à l'Ouest les dépôts deltaïques landais du Pléistocène (Formation de Brach et Formation de Belin). La formation de Brach est essentiellement formée de sols argileux gris-bleu à gris-noir avec des traces d'oxydation de couleur ocre lorsqu'elle est altérée. A l'inverse, la formation de Belin, qui repose sur la formation de Brach, est constituée presque uniquement de graviers blanchâtres et de sables grossiers emballés dans une matrice kaolinique (5 à 20 %) (Dubreuilh *et al.*, 1995). Le quartier sinistré est situé dans une zone classée en aléa moyen d'après la carte de l'aléa retrait-gonflement des argiles éditée par le BRGM (Figure 2).

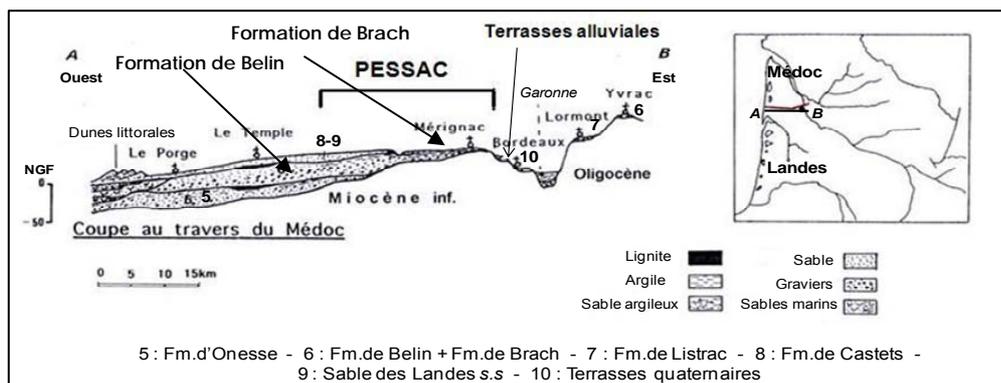


Figure 1 : Localisation de la formation de Brach sur une coupe géologique des formations au travers du Médoc. (Dubreuilh *et al.*, 1995)

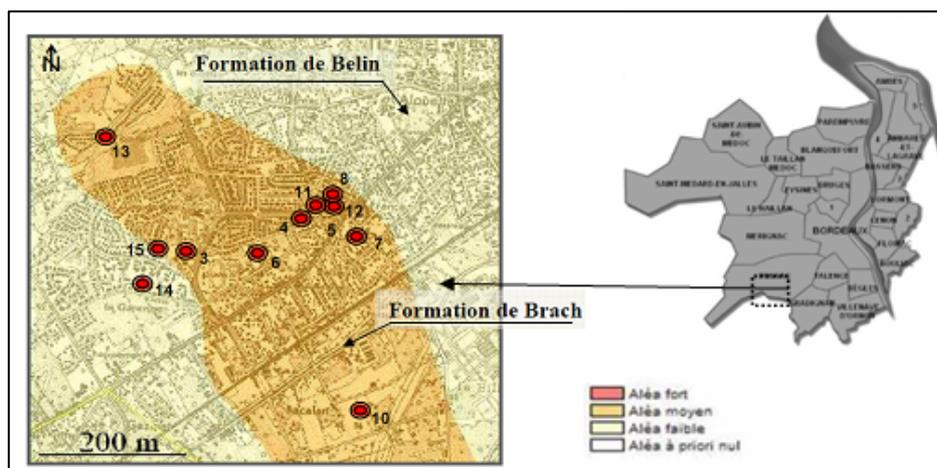


Figure 2 : Carte du BRGM de l'aléa retrait-gonflement des argiles du quartier de Cap de Bos (Commune de Pessac), avec localisation géographique des maisons sinistrées et du site expérimental (point n°10) (Chrétien *et al.*, 2008).

2.2. Etude des sites et instrumentation des habitations sinistrées

Dans le cadre des sinistres sur habitations, les caractéristiques géotechniques des sols sur les trois premiers mètres ont été étudiées pour caractériser leur sensibilité sous une fondation superficielle. Les sites, localisés sur la figure 2, ont fait l'objet d'une étude géotechnique à l'aide de sondages mécaniques afin de prélever des échantillons de sols intacts et remaniés. Les coupes lithologiques montrent des argiles bariolées dominantes sur 1,50 à 2,00 m d'épaisseur, en alternant avec des passées sablo-argileuses ou des argiles sableuses de 0,5 à 1 m d'épaisseur. Les essais géotechniques indiquent que les couches les plus argileuses se situent entre 1,00 et 3,00 m de profondeur. Après un recensement des habitations sinistrées (Figure 2), certaines d'entre elles ont été instrumentées à l'aide de fissuromètres pour suivre l'évolution des fissures sur un cycle annuel. Les principaux désordres observés sur les habitations sinistrées (Figure 3) sont typiques de tassements différentiels de fondations (Mouroux *et al*, 1988) avec :

- des fissures horizontales de traction au niveau du soubassement, résultant des tassements différentiels d'un pignon par rapport au reste de la maison (Figure 3-a)
- des fissures de décollement d'une extension (garage) suite à des tassements différentiels par rapport à la maison initiale (Figure 3-b).
- des fissures en diagonale dites en marche-d'escalier, du type cisaillement (Figure 3-c, d, e). Ce genre de fissuration est dû, la plupart du temps, à un tassement différentiel à l'angle de l'ouvrage. Le pignon du pavillon subit les gonflements et les tassements du sol argileux selon les saisons (fermeture des fissures à la saison des pluies).
- des fissures horizontales et verticales sur les cloisons intérieures souvent dues à un tassement du dallage.



Figure 3 : Type de fissures observées sur les habitations sinistrées du quartier Cap de Bos (M. Chrétien, 2010)

3. Présentation du site expérimental

3.1. Localisation géographique et géologique

Le site expérimental se situe au Nord-Ouest de la commune de Pessac sur la formation géologique des argiles de Brach (site n° 10 sur la Figure 2), (Platel et Astruc, 2000). Le terrain, d'environ 5000 m², est un pré herbacé horizontal recouvert de quelques arbustes et de ronces. Les terrains rencontrés sont composés d'argiles bariolées gris-bleues à marbrures ocre (faciès

A/BOG), témoin d'une oxydation plus ou moins importante, avec localement des argiles bariolées devenant noirâtres en profondeur (faciès A/N) (Figure 4).

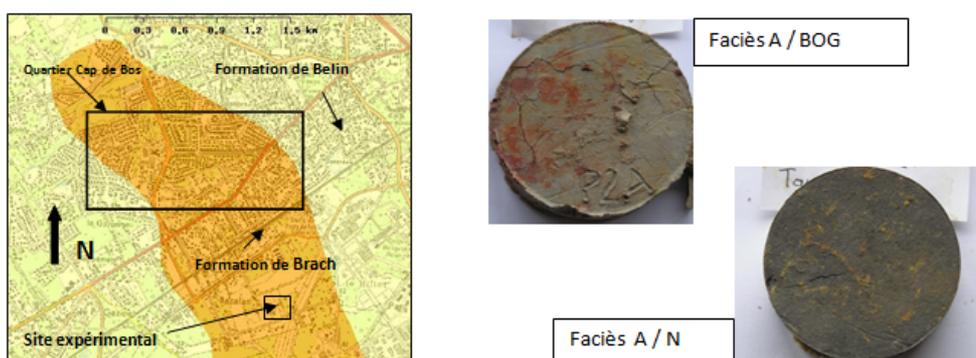


Figure 4 : Localisation du quartier de Cap de Bos et du site expérimental sur la carte d'aléa retrait-gonflement édité par le BRGM, et illustration de deux faciès argileux de la formation de Brach.

3.2. Dispositif de mesure du site expérimental

Le dispositif a été mis en place par Marie Chrétien entre 2007 et 2008. Il comprend :

- trois systèmes d'extensomètres de forage avec des capteurs placés à 0,50 m, 1 m, 2 m, 3 m par rapport à des ancrages fixes à 10 m ou 15 m de profondeur, permettant de mesurer les déplacements verticaux du sol.
- trois types d'humidimètres permettant de réaliser des profils hydriques jusqu'à 3 m de profondeur, à l'aide de sondes placées à 0,50 m, 1 m, 2 m et 3 m.
- deux panneaux électriques permettant un suivi géophysique temporel de la résistivité du sol en fonction de sa teneur en eau (article aux JNGG 2010, Chrétien *et al*).

Ce dispositif permet d'enregistrer en continu les données de déformations des sols et de teneurs en eau volumiques depuis mars 2008. Il est associé à une station météorologique relevant les conditions climatiques au droit du site (pluviométrie notamment ; voir figure 6).

4. Relation entre la variabilité géotechnique des sols en laboratoire et sur site.

Dans ce paragraphe, nous présentons dans un premier temps les résultats des essais géotechniques en laboratoire sur les différents faciès argileux de la « Formation de Brach », puis dans un deuxième temps, les déformations mesurées sur le site expérimental dans le faciès argileux (A/BOG). Ces deux types de résultats seront comparés aux valeurs des déformations enregistrées sur les façades des maisons sinistrées du quartier Cap de Bos.

4.1. Potentiel de gonflement des différents faciès argileux et estimation théorique de leur amplitude de gonflement.

Les résultats des essais oedométriques portent sur les différents faciès argileux reconnus dans la « Formation de Brach » (Chrétien *et al.*, 2008 ; 2009). Pour chacun de ces faciès des essais oedométriques classiques (norme XP P 94-090-1) et des essais de pression de gonflement (norme XP P 94-091) ont été réalisés. Nous ne présentons ici que les résultats des essais relatifs aux paramètres de gonflement des faciès argileux étudiés : le coefficient de gonflement en décharge C_g (-) et le gonflement libre sans charge ε_s (%). Ces résultats indiquent une hiérarchisation des faciès d'argileux de la « Formation de Brach » (Figure 5) et montrent que le faciès d'argile bariolée gris-bleue à marbrures ocre (A/BOG) présente un comportement moins gonflant (C_g) par rapport aux faciès d'argile noire (A/N) et d'argile bleutée

(A/B) qui sont les plus gonflants ($C_g > 0,1$). Ces derniers (faciès A/N et A/B) sont aussi les plus fortement compressibles ($0,20 < C_c < 0,30$) (Figure 5). En parallèle à ces essais, des essais de gonflement libre (indice ϵ_s défini par Seed *et al* (1962) ; Tableau 1) montrent que l'argile noire (A/N) n'est pas réactive au gonflement sans charge ($\epsilon_s < 0,1 \%$), mais réactive après surcharge avec un gonflement important ($C_g > 0,1$). Au contraire, les argiles bleues (A/B) ont à la fois un gonflement libre très élevé ($\epsilon_s > 8,2 \%$) et un coefficient de gonflement élevé ($C_g > 0,1$). Les valeurs de gonflement libre permettent de calculer (Bigot et Zerhouni, 2000) le gonflement théorique d'une couche argileuse de 1 et 2 m d'épaisseur pour les différents faciès (Tableau I).

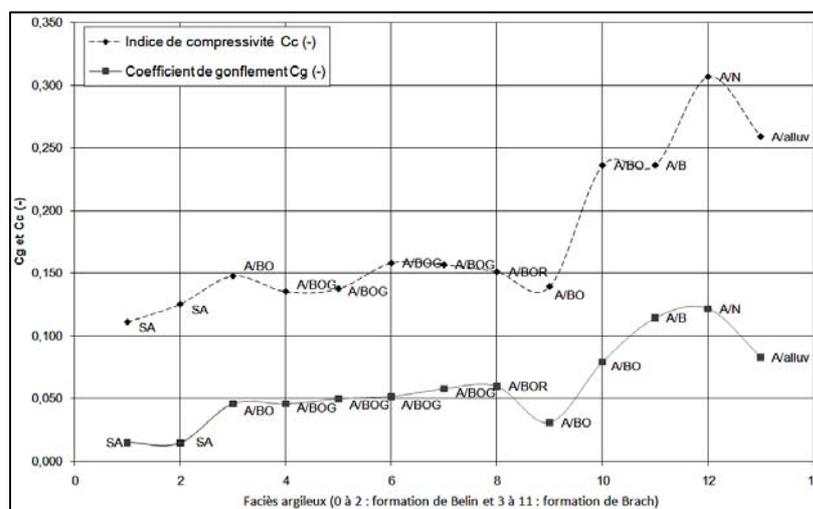


Figure 5 : Valeurs du coefficient de gonflement (C_g) et de l'indice de compressibilité (C_c) pour les différents faciès argileux de la "Formation de Brach" avec : A/BOG : argile bariolée grise à passées ocres, A/BO et A/BOR : argile bariolée ocre et bariolée ocre rouille, A/B : argile bleutée, A/N : argile noire, SA : sable argileux)

A ces données géotechniques, qui montrent une forte variabilité du comportement mécanique des échantillons testés de sols argileux à l'échelle de la cellule oedométrique (diamètre 70 mm) s'ajoute une forte variabilité lithologique à l'échelle métrique entre les niveaux argileux typiques de la « Formation de Brach » et les passées silto-sableuses à graveleuses intercalées. Cette forte hétérogénéité lithologique des sols est responsable d'importants tassements différentiels, aggravant le potentiel rétractant et gonflant avéré des différents faciès argileux (Chrétien *et al.*, 2009). Ainsi, les observations géologiques des différents sites sinistrés montrent qu'à l'échelle de l'emprise d'un projet, d'une parcelle et sur l'ensemble du quartier sinistré, on retrouve en permanence, sur au moins 4 m de profondeur, cette variabilité lithologique au sein de la même formation géologique

Tableau I. Valeurs du gonflement libre (ϵ_s) des différents faciès argileux de la « Formation de Brach » et calcul théorique du gonflement pour une couche homogène de 1 et 2 mètres d'épaisseur (d'après Chrétien *et al.*, 2009)

Faciès argileux	Profondeur Prélèvement (m)	RI (-)	dH/H (%)	dH couche de 1. m (W = WRe) (cm)	dH couche de 2. m (W = WRe) (cm)	dH couche de 2. m (perte de 3%) (cm)
Argile A / N	2,6	0,47	9,5	9,5	19,0	2,8
Argile A / BOG	1,0	0,17 - 0,41	2,1 - 6,3	2,1 - 6,3	4,2 - 12,6	1,0 - 2,4
Argile A / BOG	1,2 - 1,5	0,58 - 0,90	10,0 - 11,2	10,0 - 11,2	20,0 - 22,4	3,4 - 5,4

4.2. Potentiel de retrait de certains faciès argileux et estimation théorique de leur tassement.

L'essai de dessiccation en laboratoire sur les différents faciès argileux de la « Formation de Brach » donne les paramètres de retrait tels que la limite de retrait linéaire effective (W_{Re})(%) et le facteur de retrait linéaire (RI)(-) (essai de dessiccation NF P 94-060-2). Les valeurs du facteur RI indiquent une forte variabilité des faciès argileux de la « Formation de Brach » ($0,17 < RI < 0,9$; Tableau II). En faisant l'hypothèse que le sol se déshydrate jusqu'à la valeur de W_{Re} , ces données permettent de calculer pour chaque faciès le retrait maximum théorique et le potentiel de retrait dH pour une couche homogène de 1 et 2 m, et pour une perte en eau de 3%. Ici, les calculs de tassements (dH) sont faits à partir de la relation : $dH/H = RI (W_n - W_{Re})$ ou $dH/H = RI (W_n - W_{perte\ de\ 3\ \%})$ (Bigot et Zerhouni, 2000). Ils montrent des valeurs de tassements (dH) variant, pour le faciès argileux le plus répandu, de 1,0 à 5,4 cm pour une couche de 2 m d'épaisseur et une perte d'eau de 3% (Tableau II), cas le plus proche de la réalité du terrain.

Tableau II : Calcul théorique du potentiel de retrait des sols argileux de la « Formation de Brach » à partir des paramètres de retrait (RI) et de gonflement libre (ϵ_s) (Chrétien *et al.*, 2009).

Faciès argileux	Profondeur Prélèvement (m)	RI (-)	dH/H (%)	dH couche de 1 m (W = W _{Re}) (cm)	dH couche de 2 m (W = W _{Re}) (cm)	dH couche de 2 m (perte de 3%) (cm)
Argile A / N	2,6	0,47	9,5	9,5	19,0	2,8
Argile A / BOG	1,0	0,17 - 0,41	2,1 - 6,3	2,1 - 6,3	4,2 - 12,6	1,0 - 2,4
Argile A / BOG	1,2 - 1,5	0,58 - 0,90	10,0 - 11,2	10,0 - 11,2	20,0 - 22,4	3,4 - 5,4

4.3. Analyse comparative des amplitudes de gonflement et de tassement entre les calculs théoriques et les mesures sur site.

La comparaison des potentiels de gonflement et de retrait (Tableaux 1 et 2) dans les conditions optimales de saturation en eau (Tableau 1) ou de dessiccation (Tableau 2) des sols argileux de la « Formation de Brach », montrent que les faciès argileux sont plus rétractant que gonflants. Les estimations théoriques d'amplitude de déplacement donnent des valeurs d'ordre centimétrique pour les tassements (Tableau 2) et d'ordre millimétrique pour le gonflement (Tableau 1).

Les mesures des déplacements sur site du sous-sol indiquent que les tassements et les gonflements relatifs aux mêmes profondeurs sont respectivement d'ordre millimétrique (-2,2 et 3 mm Figure 6a). Ainsi l'estimation théorique des tassements à partir des essais de dessiccation en laboratoire surestime l'amplitude du phénomène. Cela provient en partie de la variabilité lithologique existante dans la formation de Brach à diverses échelles. On remarquera dans le tableau 2 que les argiles ayant le pouvoir rétractant le plus important sont celles du faciès A / BOG, caractéristique de la « Formation de Brach ».

Après avoir déterminé les tassements théoriques à partir des données obtenues en laboratoire sur les échantillons prélevés au droit des maisons sinistrées et avoir porté une analyse critique par rapport au résultats obtenus in situ sur la période 2008-2009 (site expérimental n° 10 ; Figure 2), nous allons procéder à une analyse comparative par rapport aux déplacements mesurés des fissures de certaines habitations sinistrées sur la période 2007-2008.

4.4. Analyse comparative des déplacements mesurés sur site en fonction de l'évolution des fissures du bâti.

La figure 6a montre l'amplitude relative des déplacements mesurés (extensomètres) dans le sous-sol argileux du site expérimental de Pessac entre 0,5 et 10 mètres de profondeur (site n° 10 ; figure 2). Ces déplacements couvrent une période annuelle allant de mars 2008 à mars 2009. On note, sur la figure 6a, une période de tassement du sol argileux qui s'amorce au début de l'été 2008 (juin) et atteint son maximum au début du mois de novembre 2008, avec une valeur maximale de -2,2 mm le 21/10/2008. C'est à partir de la fin novembre 2008 et

jusqu'en décembre 2008 que reprend le régime pluvieux avec un pic de gonflement optimal des argiles de 3 mm le 17/01/2009. Par comparaison, la figure 6b montre la variation de l'ouverture des fissures horizontales sur deux maisons sinistrées et instrumentées avec des fissuromètres (Site 3 : jauges 1, 2 et 3 et site 8 ; figure 2) pour une période différente, mais comparable, allant de mai 2007 à octobre 2008. Malgré des périodes de mesures différentes et pour des années de pluviométrie très similaires (950 à 1000 mm/an de pluie), la comparaison permet de mesurer l'amplitude de la variation d'ouverture et de fermeture des fissures des maisons sinistrées, et de la comparer aux déformations du sol argileux obtenues sur le site (Figure 6) et par le calcul théorique sur le faciès A/BOG (Tableaux I et II)

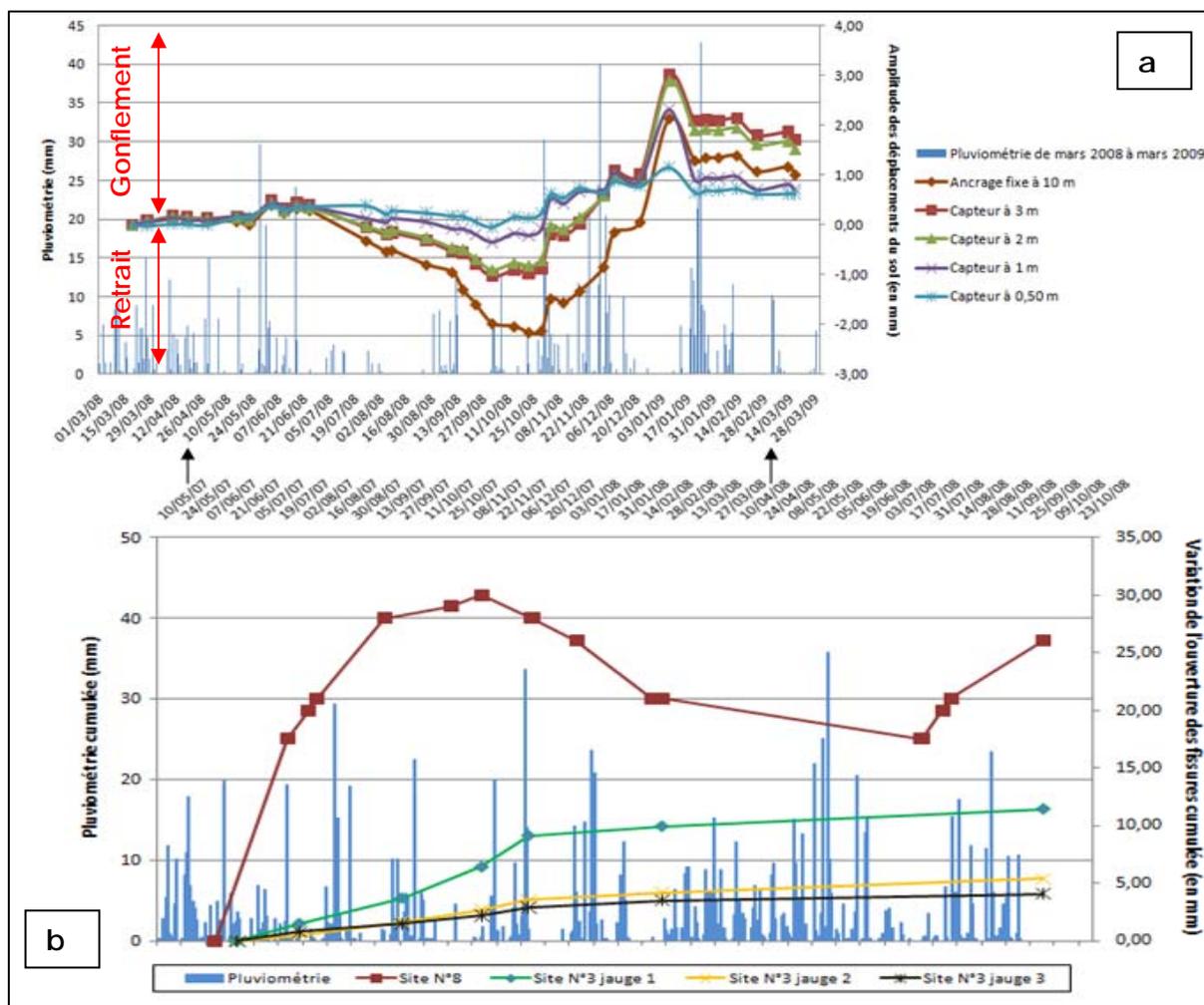


Figure 6 : Evolution, en fonction de la pluviométrie, de la déformation cumulée à 1, 2, 3 et 10 mètres de profondeur des argiles bariolées de la « Formation de Brach » et des fissuromètres des sites 3 et 8 (Figure 2).

On constate que l'amplitude d'ouverture ou de fermeture des fissures varie de +15 à - 5 mm pour la maison la plus sinistrée (site n°8, cf. figure 2), respectivement entre la période estivale (juin 2007) et la période hivernale (décembre 2007). L'amplitude importante vient du fait que la maison sinistrée se situe sur un niveau d'argiles exceptionnellement riches en smectites (Chrétien *et al.*, 2008), et pour une variabilité importante de la lithologie des terrains sous-jacents (tassement différentiel). Sur l'autre maison sinistrée l'amplitude d'ouverture et de fermeture des fissures reste faible et essentiellement marqué par un pic d'ouverture (tassement) de + 2,5 mm (site n° 3 ; Figure 2 et Figure 6) et comparable à l'amplitude des déplacements mesurés sur le site (-2,2 mm). Les déplacements cumulés des fissures (Figure 6b) indiquent que l'élargissement de la fissuration est progressive pour les deux sites jusqu'en

novembre. La pluviométrie devenant plus intense au mois de novembre, c'est à partir de cette période que la tendance s'inverse et que les fissures se referment avec un gonflement des sols argileux. Le site n°8 montre bien cette tendance du fait de la présence d'argile à fort pourcentage de smectites, engendrant un gonflement plus important que pour les argiles présentes sur le site 3. Ce fait traduit encore une fois la forte hétérogénéité et variabilité des sols argileux de la « Formation de Brach ». Enfin, en comparant la pluviométrie des deux graphiques de la figure 6, on remarque que l'été 2007 a été légèrement plus pluvieux que celui de l'année 2008. Dans ces conditions on peut supposer que le retrait des sols argileux a été moins important pour la période 2007-2008. De même, on peut conclure qu'une période plus sèche, comme l'été 2008, peut engendrer une ouverture optimale des fissures (15 mm). Enfin, comme l'été 2009 a été encore plus sec, il implique une amplification des phénomènes de retrait et donc de fissuration, ce que confirment les mesures (Chrétien, 2010).

4. Conclusion

Ce travail de recherche a permis de quantifier en vraie grandeur le comportement d'un sol argileux typique de la région bordelaise et responsable de nombreux sinistres sur un quartier de la commune de Pessac. Il montre que l'amplitude des tassements obtenues à partir des essais en laboratoire (1 à 5 cm, Tableau II) est surestimée par rapport à celle mesurée sur le site expérimental (2 à 6 mm, Figure 6a). A contrario les valeurs obtenues en laboratoire sur le gonflement du sol argileux s'approchent plus de celles mesurées en grandeur réelle sur le site. Ces écarts peuvent s'expliquer par l'effet d'échelle (représentativité de l'échantillon), mais surtout par la forte variabilité lithologique de la formation argileuse étudiée où de nombreuses passées sableuses ne sont pas prises en compte à l'échelle de l'échantillon (cellule oedométrique). Par ailleurs, l'amplitude des déplacements mesurée sur le site expérimental est comparable à celle des fissures horizontales apparues sur les murs des habitations. Nous avons pu ainsi observer que les périodes de retrait du sol argileux étaient surtout associées à une amplitude équivalente du mouvement des fissures horizontales (2-2,5 mm), mais que des tassements plus importants étaient possibles (15 mm) lorsque le sol argileux devenait plus riche en smectite à la limite d'une zone d'hétérogénéité lithologique. Dans ce cas, toutes les conditions sont réunies pour obtenir un tassement différentiel, principale cause des sinistres du quartier étudié. La poursuite des travaux de recherche devrait permettre de prendre en compte les hétérogénéités du sous-sol (facteur aléatoire) dans les calculs de tassements en affectant aux paramètres géotechniques le bon « facteur pondérateur d'hétérogénéité ».

5. Références bibliographiques

- Bigot, G. & Zerhouni, M-I. (2000). Retrait, gonflement et tassement des sols fins, Bulletin du Laboratoire des Ponts et Chaussées n°229 : 105-114.
- Chrétien, M. & Marache, A. & Fabre, R. (2008). Shrinkage-swelling behaviour and variability of clayey soils of Plio- quaternary geological formations in the suburbs of Bordeaux (France). International Symposium SEC 2008. Drought and construction, LCPC, France: 63-73.
- Chrétien, M. & Fabre, R. (2009). An overview of soil heterogeneity: geotechnical implications in ground movements (France). 2nd International Conference on New Developments in Soil mechanics and Geotechnical Engineering, 28-30 May 2009, Near East University, Nicosia, North Cyprus
- Dubreuilh J.P et al (1995), Dynamique d'un comblement continental néogène et quaternaire : l'exemple du bassin d'Aquitaine, Géologie de la France n°4, pp. 3-26
- Mouroux P, Margron P, Pinte JC (1988), La construction économique sur sols gonflants, Manuels et Méthodes n°14, éd. BRGM, 125 p.
- Platel J.P, Astruc J.G et al (2000), Cartographie des principales formations argileuses et marneuses affleurantes dans la région Aquitaine, BRGM RP-50181, 108 pages
- Seed et al. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays, J.Soil Mech.and Found.Eng.Div.ASCE n°88, pp. 107-131.