



Document public



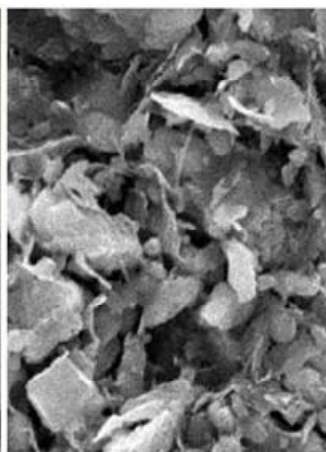
Projet ARGIC

(Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions)

Projet ANR-05-PRGCU-005

Rapport final

BRGM/RP-57011-FR
mai 2009



Projet ARGIC

(Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions)

Rapport final

BRGM/RP 57011-FR
mai 2009

Projet ANR-05-PRGCU-005

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



Mots clés : sécheresse géotechnique, retrait-gonflement, sol argileux, construction, interaction sol-structure, sinistre, tassement, essai laboratoire, essai in situ, caractérisation, bilan hydrique, sol-végétation

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Vincent M., Cojean R., Fleureau J.-M., Cui Y. J., Jacquard C., Kazmierczak J.-B., Masrouri F., Tessier D., Alimi-Ichola I., Magnan J.-P., Blanchard M., Fabre D., Pantet A., Audiguier M., Plat E., Souli H., Taibi S., Tang A.-M., Morlock C., Maison T., Mrad M., Bréda N., Djeran-Maigre I., Duc M., Soubeyroux J.-M., Denis A., Proust D., Geremew Z., Le Roy S., Dumont M., Hemmati S., Nowamooz H., Coquet Y., Pothier C., Makki L., Chrétien M., Fontaine C. (2009) – Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait-gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) – Projet ANR-05-PRGCU-005. Rapport BRGM/RP-57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers, 92 p., 29 ill., 6 tabl., 39 ann. (sur CD Rom)

Participants au projet

Le projet ARGIC (Analyse du Retrait-gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) a été mené en collaboration entre treize partenaires de statuts divers (établissements publics de recherche, laboratoire universitaires, bureaux d'étude privés, associations, etc.), intervenant dans des disciplines très variées (géologie, mécanique des sols, interaction sol-structure, minéralogie des argiles, pédologie, météorologie, écophysiologie, etc.) mais dont la complémentarité a été jugée nécessaire pour aborder un sujet complexe, à la croisée de plusieurs disciplines scientifiques, et qui suscite une forte attente de la part des pouvoirs publics, mais aussi des assureurs et des professionnels de la construction, voire de nombreux particuliers du fait du fort impact économique de la sinistralité liée au retrait-gonflement des sols argileux.

Ce programme de recherche, qui a débuté en février 2006, a duré 3 ans. Il a été élaboré en réponse à un appel à projet lancé en 2005 par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme RGPU (Réseau Génie Civil et Urbain). Il a été co-financé par l'ANR, à hauteur de 490 k€, son coût global ayant été évalué à 1834 k€, et le suivi administratif et technique du projet a été assuré par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

La coordination technique du projet ARGIC a été assurée par Marc Vincent (BRGM) et celle des trois modules qui constituent le projet, respectivement par Jean-Pierre Magnan (LCPC) pour le module A, Roger Cojean (Armines, Centre de Géosciences) pour le module B et Yu Jun Cui (École des Ponts ParisTech, CERMES) et Daniel Tessier (INRA) pour le module C. Un comité de pilotage constitué de sept personnes a suivi le bon déroulement du projet, conformément au cahier des charges et au calendrier initial.

Le présent document est un rapport collectif auquel chacun des partenaires a apporté sa contribution et dont les principales conclusions ont fait l'objet d'échanges en réunion. La liste des auteurs de ce rapport est donc celle de l'ensemble des participants au projet, à savoir (les organismes partenaires étant cités ici par ordre alphabétique) :

Armines – Centre de Géosciences (ex CGI) : Roger COJEAN, Martine AUDIGUIER, Zemeni GEREMEW, Saoussen LARIBI

BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) : Marc VINCENT, Emmanuelle PLAT, Sylvestre LE ROY, Nicolas SURDYK, Igor DUBUS

École Centrale Paris – LMSSMat (Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux) : Jean-Marie FLEUREAU, Hanène SOULI, Diep NGUYEN, Zohra GUELLATI, avec la collaboration de Matthieu DUMONT, Said TAIBI et A. SOUAB (Université du Havre)

École des Ponts ParisTech - CERMES (Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols, École des Ponts ParisTech) : Yu Jun CUI, Anh-Minh TANG, An-Ninh TA, Sahar HEMMATI, Katia-Vaness BICALHO

Fondasol : Catherine JACQUARD, Christine MORLOCK

INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) : Jean-Bernard KAZMIERCZAK

INPL (Institut National Polytechnique de Lorraine) – LAEGO (Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages) : Farimah MASROURI, Mohamad MRAD, Hossein NOWAMOOZ, Adel ABDALLAH

INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) : Daniel TESSIER (INRA Versailles), Nathalie BREDAS et Yves LEFEVRE (UMR Écologie et Écophysiologie Forestières), Yves COQUET (Agro-ParisTech)

Insavalor – LGCIE (ex URGIC) Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale : Ibrahim ALIMI-ICHOLA, Irini DJERAN-MAIGRE, Catherine POTHIER, Gérard DIDIER

LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) et laboratoires associés du Réseau de l'Équipement : Jean-Pierre MAGNAN, Myriam DUC, Lamis MAKKI, Charles KREZIAK, Sandrine ARBIZZI, Gratien VINCESLAS, Matoren KHAY, Sébastien BURLON, Grégory BIEVRES, Jean-François SERRATRICE, Gérard NORDEST, Frédéric LARRERE, Bertrand THIDET

Météo-France : Michèle BLANCHARD, Jean-Michel SOUBEYROUX, Jean-Christophe CALVET, Laurent FRANCHISTEGUY, Jean-Philippe VIDAL, Martine BAILLON, Eric MARTIN

Université de Bordeaux 1 – GHYMAC (ex CDGA) Géosciences, Hydrosiences, Matériaux de Construction : Richard FABRE, Alain DENIS, Marie CHRETIEN

Université de Poitiers – HydrASA (Hydrogéologie, Argiles, Sols, Altération) et LEA (Laboratoire d'Études Aérodynamiques) : Anne PANTET, Dominique PROUST, Claude FONTAINE, Nathalie DAUGER

Synthèse

Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, à l'origine d'une sinistralité importante et croissante en France, suscite de nombreuses questions, tant de la part de la communauté scientifique que de la part des pouvoirs publics, professionnels de la construction et assureurs. Afin de tenter d'y apporter des éléments de réponse, le projet ARGIC (Analyse du Retrait-gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) a été élaboré suite à un appel à projet lancé en 2005 par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme RGPU (Réseau Génie Civil et Urbain). Il s'est déroulé sur trois ans à partir de février 2006, sous la coordination du BRGM et en collaboration avec douze autres organismes : Armines (Centre de Géosciences), le CERMES (École des Ponts ParisTech), Fondasol, le GHYMAC (université Bordeaux 1), HydrASA-LEA (université de Poitiers), l'INERIS, l'INRA, Insavalor (LGCIE), le LAEGO (Institut National Polytechnique de Lorraine), le LCPC, le LMSSMat (École Centrale de Paris) et Météo-France.

Les objectifs opérationnels du programme consistaient pour l'essentiel à apporter des éléments de réponse concernant les trois points suivants :

- comment prévenir, de manière économique, les risques de retrait-gonflement pour les constructions individuelles existantes ou en projet ?
- comment identifier, dans le cadre d'études courantes et à l'échelle d'une parcelle, la susceptibilité d'un sol vis-à-vis de l'aléa retrait-gonflement ?
- comment, à partir d'une meilleure compréhension des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, pourrait-on identifier des périodes de sécheresses exceptionnelles justifiant la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ?

Au-delà de ces questions directement opérationnelles, le projet ARGIC s'est donné pour objectif d'apporter une contribution globale à la compréhension scientifique des mécanismes en cause dans le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et dans ses implications en termes d'endommagement du bâti individuel.

Concernant la vulnérabilité du bâti, et particulièrement des constructions de type maisons individuelles, le projet ARGIC a ainsi permis de passer en revue les techniques de prévention et de réparation disponibles, y compris dans d'autres pays également exposés à ce risque naturel. Des expérimentations originales, dont la sollicitation d'une maison en vraie grandeur soumise à des tassements différentiels sous ses fondations, ont permis de confirmer qu'une structure de ce type, construite dans le respect des règles en vigueur, résiste finalement assez bien, même en cas de perte d'appui sur la moitié de son périmètre. Ces observations, complétées par différentes approches de modélisation numérique, confirment globalement l'intérêt des mesures préventives habituellement préconisées, portant notamment sur la rigidification de la structure, en particulier au niveau des semelles de fondation, du soubassement et des chaînages tant verticaux qu'horizontaux. L'efficacité de mesures

complémentaires visant à réduire les variations hydriques près des bâtiments exposés est également confirmée, tant par l'analyse de nombreux dossiers de sinistres que par certaines modélisations numériques couplées.

Pour ce qui est de la susceptibilité des sols vis-à-vis du retrait-gonflement, le projet a conduit à caractériser de manière très fine, *in situ* et en laboratoire, une douzaine de formations géologiques réputées sujettes au phénomène. Ces investigations mettent en avant la nécessité d'une approche géologique globale pour caractériser l'aptitude au retrait-gonflement à l'échelle d'une parcelle, dans la mesure où le degré de remaniement des matériaux et la présence de circulations temporaires d'eau peuvent influencer de manière significative. Par ailleurs, il apparaît, au travers de ces observations, que certains paramètres comme la densité du sol ou son taux de carbonates, doivent être pris en compte, au même titre que sa granulométrie ou la composition minéralogique de sa phase argileuse. Les très nombreuses analyses effectuées à cette occasion ont permis d'évaluer de manière comparative la pertinence des différentes techniques de caractérisation de la susceptibilité d'un sol au retrait-gonflement ainsi que celle des nombreuses classifications proposées dans la littérature. Des propositions concrètes sont ainsi formulées à l'attention des bureaux d'études géotechniques et des experts d'assurance en vue d'optimiser les investigations géotechniques dans le cadre d'une étude avant construction ou d'un diagnostic post-sinistre.

Par ailleurs, le projet ARGIC a permis de poursuivre, sur plusieurs sites, l'acquisition de données concernant l'évolution, en fonction des conditions météorologiques, des teneurs en eau et des déformations verticales dans des sols argileux, confirmant ainsi les ordres de grandeur à attendre, tant en termes d'amplitude que de cinétique du phénomène. Ces chroniques de mesures expérimentales ont servi à caler des modélisations numériques en vue de quantifier l'impact d'une période de sécheresse sur les mouvements d'un sol argileux à proximité d'une maison en prenant en compte non seulement le rôle de l'évaporation mais aussi celui des arbres dont les racines puisent l'eau dans le sol en profondeur. Ces modélisations, qui intègrent le couplage entre comportement mécanique et hydrique du sol, donnent des éléments quantitatifs utiles quant à l'évolution des mouvements d'un sol argileux sous l'effet des conditions climatiques, même si les modèles restent à affiner et à tester dans des configurations diverses. Elles pourront servir de base à l'objectivation des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse, dont la version actuelle est jugée peu représentative de la réalité telle qu'elle peut être observée sur le terrain.

Plusieurs des actions de recherche engagées dans le cadre du projet ARGIC se poursuivent et d'autres méritent d'être développées au vu des résultats déjà acquis. Les expérimentations effectuées à partir de la maison construite sur le site du CER à Rouen par le LCPC doivent être continuées, notamment pour évaluer l'impact de cycles de tassement-gonflement et des techniques usuelles de réparation, et devront être complétées par des modélisations numériques afin de tester le rapport coût/efficacité des mesures structurelles envisagées pour réduire la vulnérabilité des futures maisons individuelles vis-à-vis des tassements différentiels attendus, y compris en cas d'aggravation de leur amplitude du fait du changement climatique global. Par ailleurs, il est recommandé de constituer une base de données nationale exhaustive

des sinistres déclarés afin de disposer des éléments d'analyse nécessaire pour identifier les mesures de prévention économiquement et techniquement justifiées, tant pour les constructions neuves que pour l'existant. Cette base de données sera aussi nécessaire pour progresser dans l'analyse des facteurs de déclenchement et valider un ajustement des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse sur une base plus objective. Pour cela, il est également recommandé de poursuivre l'identification et l'équipement de nouveaux sites expérimentaux sur lesquels seront enregistrés l'évolution des teneurs en eau et des déplacements verticaux du sol en fonction des conditions météorologiques, et ceci dans des environnements variés afin de constituer un réseau de suivi à l'échelle nationale.

Sommaire

Avant-propos.....	21
1. Introduction.....	23
2. Synthèse opérationnelle des conclusions du programme ARGIC.....	27
2.1. INTRODUCTION	27
2.2. QUELLES MESURES DE PRÉVENTION RECOMMANDER POUR LA CONSTRUCTION DE MAISONS INDIVIDUELLES SUR SOLS ARGILEUX ?	27
2.3. COMMENT RÉDUIRE LA VULNÉRABILITE DES MAISONS EXISTANTES SUR CES SOLS ARGILEUX ?	31
2.4. QUELLES SONT LES SOLUTIONS DE RÉPARATION OU DE CONFORTEMENT DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES SUR SOLS ARGILEUX SENSIBLES AU RETRAIT ET GONFLEMENT ?	33
2.5. COMMENT ORGANISER UNE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE ADAPTÉE AUX SOLS ARGILEUX SENSIBLES AU RETRAIT ET GONFLEMENT DANS LES CONDITIONS DE PROJETS DE MAISONS INDIVIDUELLES ?.....	35
2.6. QUELS ESSAIS SIMPLES ET QUELLES GRILLES DE CLASSIFICATION PERMETTENT DE RENDRE COMPTE DES PROPRIÉTÉS DE RETRAIT ET GONFLEMENT DES SOLS ?	37
2.7. COMMENT MESURER L'ÉVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES DANS LES TERRAINS NATURELS EN FONCTION DES SAISONS ?	41
2.8. COMMENT CARACTÉRISER ET PRENDRE EN COMPTE L'INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION ?	44
2.9. QUELS CRITÈRES PEUT-ON UTILISER POUR DÉFINIR LES SÉCHERESSES EXCEPTIONNELLES ?	46

2.10. DE QUELS ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES DISPOSE-T-ON SUR LES MESURES DE RÉPARATION ET DE PRÉVENTION ?	49
---	----

2.11. CONCLUSION	52
------------------------	----

3. Résultats et perspectives scientifiques..... 55

3.1. INTRODUCTION.....	55
------------------------	----

3.2. RELATIONS ENTRE L'EAU ET LES MINÉRAUX ARGILEUX.....	55
--	----

3.3. CARACTÉRISATION DE LA MICROSTRUCTURE DES SOLS ARGILEUX .	57
---	----

3.4. COMPORTEMENT THERMO-HYDRO-MÉCANIQUE DES SOLS ARGILEUX.....	60
---	----

3.4.1. Comportement thermique	60
-------------------------------------	----

3.4.2. Comportement hydraulique.....	61
--------------------------------------	----

3.4.3. Comportement mécanique.....	62
------------------------------------	----

3.5. ANALYSE DES PROFILS HYDRIQUES DES SOLS ET DE LEUR ÉVOLUTION	64
--	----

3.5.1. Origine des profils	64
----------------------------------	----

3.5.2. Principaux résultats issus de l'analyse des profils.....	65
---	----

3.5.3. Perspectives	70
---------------------------	----

3.6. TECHNOLOGIE DES MESURES DE TERRAIN : DÉFORMATIONS VERTICALES ET VARIATIONS HYDRIQUES D'UN SOL ARGILEUX	70
---	----

3.6.1. Techniques de mesure des déformations verticales	71
---	----

3.6.2. Techniques de mesure des teneurs en eau du sol : les sondes capacitatives, FDR, TDR	74
--	----

3.6.3. Conclusions : Organisation d'un site expérimental de suivi du retrait-gonflement	77
---	----

3.7. MODÉLISATION DES ÉCHANGES SOL-ATMOSPÈRE-VÉGÉTATION	77
--	----

3.8. INTERACTIONS ENTRE LE SOL, LES FONDATIONS ET LES CONSTRUCTIONS	79
3.9. TYPES DE SÉCHERESSES GÉOTECHNIQUES ET CINÉTIQUES DE LA RÉPONSE HYDRIQUE DES SOLS	80
3.10. CONCLUSION.....	84
4. Conclusion générale	87
5. Bibliographie.....	89

Liste des illustrations

<i>Illustration 1 – Maquette de maison en vraie grandeur construite au CER de Rouen (LCPC) ...</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 2 - Pilote permettant de tester la faisabilité et l'efficacité de l'apport d'eau sous une fondation (LGCIE – INSA de Lyon).....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 3 – Reconnaissances par sondages carottés (à gauche) et par ouverture d'une fosse à la pelle mécanique (à droite) (BRGM)</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 4 – Essai de retrait avec suivi automatisé développé par le LCPC.....</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 5 –Schéma de principe d'une canne Humitub et mise en place d'une sonde sur le site du Deffend (BRGM).....</i>	<i>42</i>
<i>Illustration 6 – Implantation des capteurs étudiés dans une fosse (Météo France)</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 7 - Atelier de mesures in situ de diagraphie nucléaire (LCPC)</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 8 - Coût des terrains en fonction de l'implantation (INERIS).....</i>	<i>50</i>
<i>Illustration 9 - Principales préconisations émises dans le cadre des PPRN (BRGM)</i>	<i>50</i>
<i>Illustration 10 – Schéma de principe d'un radier en demi-gaufre (INERIS).....</i>	<i>51</i>
<i>Illustration 11 - Images au MEB de l'Argile verte de Romainville : a) état sec, b) état naturel lyophilisé, c) après gonflement libre et lyophilisation (in Audiguier et al., 2007)</i>	<i>59</i>
<i>Illustration 12 - Courbes dérivées de distribution des pores de l'Argile verte de Romainville a) à l'état naturel pour un échantillon intact (AVR-10) et pour un échantillon de colluvion monogénique (AVR-C) ; b) pour trois états d'hydratation différents (in Audiguier et al., 2007) .</i>	<i>60</i>
<i>Illustration 13 - Conductivité thermique des sols argileux en fonction de la fraction volumique d'air (CERMES).....</i>	<i>61</i>
<i>Illustration 14 - Variation de la diffusivité hydraulique avec la teneur en eau (LAEGO).....</i>	<i>61</i>
<i>Illustration 15 - Variation de l'indice des vides avec la succion pour le sol de Mormoiron (LMSSMat).....</i>	<i>62</i>
<i>Illustration 16 - Les courbes de compression à différentes succions de l'argile verte (CERMES)</i>	<i>63</i>

<i>Illustration 17 - Évolution du profil de succion (a) et du tassement (b) sur le site de Champenoux entre le 7 mai 2003 et le 19 janvier 2004 (LAEGO)</i>	<i>63</i>
<i>Illustration 18 – Teneurs en eau massique mensualisées enregistrées sur le site de Mormoiron (BRGM).....</i>	<i>66</i>
<i>Illustration 19 – Suivi de l'humidité en prairie à 0,5 et 1 m de profondeur sur le site du Deffend (BRGM).....</i>	<i>67</i>
<i>Illustration 20 – Profils hydriques espacés de 2 mètres sur le site expérimental de Pessac montrant les valeurs moyennes mensuelles de la teneur en eau volumique sur 6 mois entre août 2008 et janvier 2009 (de 0 à 0,6 m : sol sableux organique ; de 0,6 à 3,0 m : argile bariolée) (GHYMAC).....</i>	<i>68</i>
<i>Illustration 21 - Suivi au cours du temps de la teneur en eau dans le sol par diagraphie neutron-neutron en fonction de la profondeur, dans quatre sondages du site de Mormoiron (LCPC).....</i>	<i>69</i>
<i>Illustration 22 – Suivi de l'humidité à différentes profondeurs sur le site du Deffend par sondes capacitatives (BRGM).....</i>	<i>69</i>
<i>Illustration 23 – Corrélations entre les déformations du sol entre 0,2 et 1 m et la teneur en eau massique mensualisée, mesurées in situ à Mormoiron (BRGM)</i>	<i>70</i>
<i>Illustration 26 – Exemples de déformations enregistrées par des dispositifs colocalisés (site de Pessac, dispositif TELEMAT, profondeurs de mesure de 0,50 m, 1 m, 2 m, 3 m) à gauche (GHYMAC) et par des dispositifs individuels (site de Mormoiron, profondeurs de mesure de 0,2 m, 0,5 m et 1 m) à droite (BRGM)</i>	<i>73</i>
<i>Illustration 27 - Simulation des déformations du sol de Mormoiron à l'aide du modèle θ-Stock (CERMES)</i>	<i>78</i>
<i>Illustration 28 - Déplacements et teneurs en eau enregistrés à 0,2 m, 0,5 et 1 m de profondeur sur le site de Mormoiron (BRGM).....</i>	<i>81</i>
<i>Illustration 29 – Comparaison des mesures de teneur en eau mensualisées à Mormoiron (BRGM) et de l'indice SWI à Carpentras (Météo-France).....</i>	<i>82</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Liste des moyens de prévention classés par thématique (INERIS)</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 2- Susceptibilité d'un sol argileux au retrait-gonflement déterminée à partir de V_{bs} (in Chassagneux et al., 1995).....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 3 - Activité au bleu de la fraction argileuse $A_{CB} = V_{BS}/C_2$ (norme XP P94-011, 1999) ..</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 4 - Risques associés aux types d'arbres les plus dangereux pour les constructions (Driscoll, 1983).....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 5 - Tableau comparatif des trois propositions d'amélioration visant les fondations (INERIS)</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 6 - Gonflement libre de l'Argile verte de Romainville (AVR) et des Marnes bleues d'Argenteuil (MBA), en fonction de l'état initial intact ou remanié et de la teneur en carbonates C (AVR : C = 10%, MBA1 : C = 27%, MBA2 : C = 58%) (in Audiguier et al., 2008).....</i>	<i>59</i>

Liste des annexes

Annexe A1 – Rapport final du LAEGO concernant la tâche T1 : calcul des déplacements différentiels de fondations superficielles ou des canalisations à partir d'un modèle général de calcul des variations de volumes des sols saturés et sensibles au retrait et gonflement, en fonction des cycles d'infiltration et de séchage.

Mrad M. (2007) – Modélisation numérique de l'effet des cycles d'infiltration et de séchage sur les déplacements de fondations superficielles sur sols non saturés et sensibles au retrait-gonflement. Rapport LAEGO-ENSG LG.MM.ANR.PSI.RPRE.07.0266.A, 27 p., 8 tabl., 15 fig.

Annexe A2 - Rapport final du LMSSMat concernant la tâche T2 : analyse numérique de l'impact des tassements différentiels sur des cas types de fondations.

Dumont M., Fleureau J.-M., Taibi S., Saouad A. (2009) – Projet ARGIC tâche 2 – Analyse numérique de l'impact des tassements différentiels sur des cas types de fondations. Rapport final des LMSSMat et LOMC. ECP/Rapport 09-01-20, 34 p., 50 fig.

Annexe A3 – Rapport final du GHYMAC concernant la tâche T3 : évaluation des sollicitations dans les structures simples de bâtiment dues au retrait-gonflement des sols.

Denis A. (2009) – Projet ANR ARGIC Module A tâche 3. Évaluation des ordres de grandeur des sollicitations engendrées par le retrait-gonflement des argiles dans des structures simples. Rapport GHYMAC 1/2009, 23 p., 2 tabl., 25 fig.

Annexe A4 – Rapport final de synthèse concernant la tâche T4 : comparaison des différentes approches de calcul et confrontation avec les données expérimentales.

Magnan J.-P. (2009) - Projet ARGIC, Tâche 4 : Comparaison des calculs de tassements et d'efforts dans des constructions simples et confrontation avec les données expérimentales. Rapport LCPC, projet ANR-05-PRGCU004 – ARGIC.

Annexe A5 – Rapport final de synthèse concernant la tâche T5 : revue bibliographique des méthodes de réduction de la vulnérabilité vis-à-vis du risque de retrait-gonflement et des techniques de confortement.

Kazmierczak J.-B. (2009) – Projet ANR-05-PRGCU-005 ARGIC. Tâche 5 : Revue bibliographique des méthodes de réduction de la vulnérabilité vis-à-vis du risque de retrait-gonflement et des techniques de confortement. Rapport d'étude INERIS – DRS-09-75283-06054A, 33 p., 1 tabl., 25 fig., 3 ann.

Annexe A6 – Rapport final de synthèse concernant la tâche T5 : revue bibliographique des méthodes de réduction de la vulnérabilité vis-à-vis du risque de retrait-gonflement et des techniques de confortement : exploitation des expériences étrangères.

Magnan J.-P. (2009) – Projet ANR ARGIC, rapport bibliographique LCPC, tâche 5.- Solutions constructives pour diminuer la vulnérabilité des constructions. Rapport LCPC, projet ANR-05-PRGCU-005 - ARGIC, 73 p., 8 tabl., 33 fig.

Annexe A7 – Rapport final de Fondasol concernant la tâche T6 : analyse de dossiers de sinistres dus au retrait-gonflement en vue d'établir une pathologie des désordres et d'identifier les facteurs de vulnérabilité.

Morlock C., Jacquard C. (2009) – Projet ARGIC, module A, tâche 6 – Analyse de dossiers d'études géotechniques de pathologie liée à la sécheresse et typologie des désordres – Rapport final. Rapport Fondasol n° DG-09-0001, 60 p., 46 fig.

Annexe A8 – Rapport final du LCPC concernant la tâche T6 : analyse de dossiers de sinistres dus au retrait-gonflement en vue d'établir une pathologie des désordres et d'identifier les facteurs de vulnérabilité.

Arbizzi S., Kreziak C. (LREP – DREIF), sous la coordination de Magnan J.-P. et Duc M. (2009) – Projet ANR ARGIC, rapport scientifique du LCPC, tâches 5 et 6.- Analyse de dossiers de sinistres en vue d'établir une pathologie des désordres. Analyse économique des techniques de confortements. Rapport LCPC, opération de recherche 13M06561, 65 p., 11 tabl., 35 ill., 3 ann.

Annexe A9 – Rapport final du LCPC concernant la tâche T7 : analyse du comportement d'une maison expérimentale en vraie grandeur, soumise à tassement différentiel des appuis.

Khay M., Venceslas G. et Haza-Rosier (CETE-NC/CER), Magnan J.-P. et Duc M. (2009) – Projet ANR ARGIC, rapport scientifique du CER de Rouen et du LCPC, tâche 7.- Comportement d'une maison individuelle soumise au tassement de ses appuis. Expérimentation MISS au CER. Rapport LCPC, opération de recherche 13M06561, 42 p., 3 tabl., 47 fig., 4 ann.

Annexe A10 – Rapport final de l'INERIS concernant la tâche T8 : étude d'adaptation des fondations de maisons individuelles pour résister aux effets du retrait-gonflement des argiles.

Kazmierczak J.-B. (2008) – Programme ANR ARGIC. Rapport relatif à la tâche 8. Étude d'adaptation des fondations de maisons individuelles dans les zones exposées au retrait-gonflement. Rapport d'étude INERIS – DRS-08-75283-1665A, 18 p., 1 tabl., 11 fig., 2 ann.

Annexe A11 – Rapport final du LGCIE concernant la tâche T9 : analyse comparative de différents dispositifs de maîtrise des variations de l'humidité dans les sols sous les fondations en vue de préciser leurs caractéristiques optimales, leur coût de mise en œuvre et leur domaine d'application ; étude sur modèle réduit de l'effet d'une réhumidification à la base d'une semelle de fondation.

Djeran-Maigre I., Pothier C., Didier G. (2009) – ARGIC module A - Rapport final. Rapport n° 11 915 A3, 54 p., 5 tabl., 61 fig.

Annexe A12 – Rapport final de synthèse concernant les tâches T5 à T9 : pathologie et réparation des constructions sur sols argileux et méthodes de prévention.

Magnan J.-P. (LCPC), Kazmierczak J.B. (INERIS), Morlock C., Jacquard C. (Fondasol), Djeran-Maigre I., Pothier C. (LGCIE) (2009) – Projet ARGIC, Annexe A12 : Pathologie et réparation des constructions sur sols argileux et méthodes de prévention – Synthèse des tâches T5 à T9. Rapport LCPC, opération de recherche 13M06561, 54 p., 45 fig.

Annexes concernant le module B

Annexe B1 - Rapport final de synthèse concernant la tâche T10 : revue bibliographique sur la prédisposition des sols argileux au retrait-gonflement.

Audiguier M., Cojean R., Geremew Z., Laribi S., Fleureau J.-M., Souli H., Cui Y. J., Tang A.-M., Mantho A., Masroui F., Mrad M., Djeran-Maigre I., Pothier C., Didier G., Alimi-Ichola I., Tessier D., Bréda N., Coquet Y., Vincent M. (2007) – Projet ARGIC (tâche 10) - Synthèse bibliographique sur l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement. Rapport coordonné par Armines (Centre de Géosciences), 153 p., 30 tabl., 112 fig.

Annexe B2 - Rapport final de Météo-France concernant la tâche T11 : instrumentation complémentaire pour la mesure des déformations d'un massif de sols argileux et des paramètres météorologiques.

Soubeyroux J.-M., avec la contribution de Calvet J.-C. et Fritz N. (2009) – Projet ARGIC - Instrumentation d'un site en capteurs complémentaires pour mesure des déformations et paramètres météorologiques – Rapport final module B tâche 11. Rapport DCLIM/HYDRO, 5 p., 4 fig., 1 ann.

Annexe B3 - Rapport final du BRGM concernant les tâches T11 et T14 : instrumentation complémentaire pour la mesure des déformations d'un massif de sol argileux et des paramètres météorologiques, acquisition, suivi et interprétation des mesures.

Le Roy S., Plat E., Vincent M. (2009) – Projet ARGIC (module B, tâches 11 et 14) – Suivi expérimental *in situ* de l'évolution dans le temps des teneurs en eau et des déplacements verticaux dans les sols argileux sur deux sites. Rapport BRGM/RP-56990-FR, 72 p., 67 ill.

Annexe B4 - Rapport final du LGCIE concernant les tâches T12 et T14 : mise au point d'un matériel spécifique adapté, calibrage en laboratoire et équipement d'un site en sondes TDR mises en place par fonçage, acquisition, suivi et interprétation des mesures.

Alimi Ichola I. (2009) – Projet ARGIC, rapport final T12 et T14 – Développement des sondes TDR en vue du suivi en temps réel du phénomène de retrait-gonflement : analyse et traitement des résultats. Rapport Insavalor, 40 p., 6 tabl., 39 fig.

Annexe B5 - Rapport final du LCPC concernant les tâches T13 et T14 : équipement de 2 sites en matériel de diagraphie en sondage, acquisition, suivi et interprétation des mesures.

Makki L., Maloula A., Platret G., Plantet A., Duc M. et Magnan J.-P. (LCPC Paris), Thidet B., Larrere F. Nordest G. et Corona E. (LROP – DREIF), Burlon S. (LRPC Lille – CETE Nord-Picardie), Bièvre G. (LRPC d'Autun - CETE de Lyon) (2009) – Projet ANR ARGIC, rapport scientifique du LCPC, tâches 13 et 14.- Équipement de quatre sites pour le suivi des effets de la sécheresse sur les sols. Acquisition, suivi et interprétation des mesures. Rapport LCPC, opération de recherche 13M06561, 88 p., 14 tabl., 83 fig.

Annexe B6 - Rapport final de synthèse concernant la tâche T15 : élaboration de recommandations méthodologiques pour le choix et l'équipement de sites expérimentaux de suivi et d'alerte.

Le Roy S., Vincent M. et Plat E. (BRGM), Chrétien M. et Fabre R. (GHYMAC), Soubeyroux J.-M. et Fritz (Météo-France), Magnan J.-P. et Duc M. (LCPC), Thidet B., Larrere G. et Nordest G. (LROP), Burlon S. (LRPC de Lille), Bièvres G. (LRPC d'Autun), Alimi-Ichola I. (LGCIE), Cui Y. J. (CERMES) (2009) – Projet ARGIC (module B, tâche 15) – Élaboration de recommandations méthodologiques pour l'équipement futur de sites expérimentaux de suivi ou d'alerte –Annexe B6 au rapport de synthèse. Rapport BRGM/RP-57072-FR, 110 p., 71 ill.

Annexe B7 - Rapport final du LAEGO concernant la tâche T16 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations.

Mrad M., Nowamooz H. (2007) – Sous-module B3 : réalisation et analyses d'essais en laboratoire. Tâche 16 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations (Le Deffend). Rapport LAEGO-ENSG LG.MM.ANR.PSI.RPRE.07.0267.A, 36 p., 23 tabl., 23 fig., 1 ann.

Annexe B8 - Rapport final du LEA et HydrASA concernant les tâches T16 et T19 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations et étude de corrélation entre valeurs de bleu et capacité d'échange cationique pour des formations argileuses sensibles au retrait-gonflement.

Pantet A., Proust D., Fontaine C., Dauger N., en collaboration avec Thomassin J. H. et Laforest C. (2009) – ARGIC – Site du Deffend – Rapport final des travaux du groupe poitevin – Tâches 16 et 19. Rapport Université de Poitiers (ESIP – département Génie Civil) et CNRS (UMR 6609 CNRS LEA et FRE 3114 CNRS Hydrasa); 54 p., 12 tabl., 22 fig., 3 ann.

Annexe B9 - Rapport final du LMSSMat concernant les tâches T16 et T18 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations et analyse de l'influence de la densité et de la teneur en carbonate d'un sol argileux sur son aptitude au retrait-gonflement.

Fleureau J.-M., Souli H., Nguyen D., Guellati Z. (2008) – Tâches 16 et 18 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations et analyse de l'influence de la teneur en carbonate d'un sol argileux sur son aptitude au retrait-gonflement. Rapport final du LMSSMat-ECP, 31 p., 1 tabl., 25 fig.

Annexe B10 - Rapport final du CERMES concernant les tâches T16 et T17 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations et caractérisation de formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement.

Tang A.-M., Cui Y. J., Ta A.-N., Hemmati S. (2008) – Projet ARGIC module B : approches expérimentales pour la caractérisation hydro-mécanique des sols sensibles au retrait-gonflement. Rapport CERMES, 19 p., 17 fig.

Annexe B11 - Rapport final du LCPC concernant les tâches T16 et T16 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations et caractérisation de formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement.

Makki L., Maloula A., Platret G., Plantet A., Duc M. et Magnan J.-P. (LCPC Paris), Burlon S. (LRPC Lille – CETE Nord-Picardie), Bièvre G. (LRPC d'Autun - CETE de Lyon) (2009) – Projet ANR ARGIC, rapport scientifique du LCPC, tâches 16 et 17.- Caractérisation de plusieurs formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement. Rapport LCPC, opération de recherche 13M06561, 54 p., 22 tabl., 53 fig.

Annexe B12 - Rapport final du LGCIE concernant la tâche T16 et T17 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations et caractérisation de formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement.

Djeran-Maigre I., Pothier C., Didier G. (2009) – ARGIC module B - Rapport final. Rapport n° 11 915 B2, 21 p., 8 tabl., 7 fig.

Annexe B13 - Rapport final d'Armines (Centre de Géosciences) concernant les tâches T17, T18 et T19 : caractérisation de formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement et analyse de l'influence de la densité et de la teneur en carbonate d'un sol argileux sur son aptitude au retrait-gonflement.

Audiguier M., Cojean R., Geremew Z., Laribi S. (2009) – Projet ARGIC - Synthèse des résultats des caractérisations minéralogiques, géotechniques, texturales, hydriques et

mécaniques des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil Rapport final d'Armines - Centre de Géosciences. Rapport ARMINES PFGING 60296, référence R090115RCOJ, 115 p., 3 ann.

Annexe B14 - Rapport final du LAEGO concernant la tâche T17 : caractérisation de formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement.

Mrad M., Nowamooz H. (2007) – Sous-module B3 : réalisation et analyses d'essais en laboratoire. Tâche 17 : caractérisation de plusieurs formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement (Argile de Champenoux). Rapport LAEGO-ENSG LG.MM.ANR.PSI.RPRE.07.0267.A, 14 p., 4 tabl., 12 fig., 1 ann.

Annexe B15 - Rapport final du GHYMAC concernant les tâches T17 et T19 : caractérisation de formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement et étude de corrélation entre valeurs de bleu et capacité d'échange cationique pour des formations argileuses sensibles au retrait-gonflement.

Fabre R., Chrétien M. (2008) – Rapport final d'activité à 36 mois du GHYMAC (ex CDGA), Université Bordeaux 1 – Projet ANR ARGIC module B – Région Aquitaine : Rapport GHYMAC, 46 p., 7 tabl., 18 fig., 1 ann.

Annexe B16 – Rapport final de synthèse concernant les tâches T16 et T17 : complément de caractérisation des sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations et caractérisation de formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement.

Plat E., Le Roy S. et Vincent M. (BRGM), Audiguier M., Cojean R., Geremew Z. et Laribi S. (Armines), Tang A.-M., Cui Y.-J., Ta A.-N. et Hemmati S. (Cermes), Fabre R. et Chrétien M.-C. (GHYMAC), Pantet A., Proust D. et Fontaine C. (Université de Poitiers), Masrouri F., Mrad M. et Nowamooz H. (LAEGO), Magnan J.-P., Duc M. et Makki L. (LCPC), Fleureau J.-M., Guellati Z., Nguyen D. et Souli H. (LMSSMat), Djeran-Maigre I. et Pothier C. (LGCIE), avec la collaboration de Logeais P. (2009) – Projet ARGIC (module B, tâches 16 et 17) - Caractérisation des formations géologiques régionales sujettes au retrait-gonflement étudiées dans le cadre du projet. Annexe B16 au rapport de synthèse du projet ARGIC. Rapport BRGM/RP-57223-FR, 204 p., 1 ill., 12 fiches

Annexe B17 - Rapport final du LCPC concernant la tâche T18 : analyse de l'influence de la densité et de la teneur en carbonate d'un sol argileux sur son aptitude au retrait-gonflement.

Duc M., Makki L et Magnan J.-P. (LCPC Paris), Serratrice J.-F. (LRPC Aix-en-Provence – CETE Méditerranée) (2009) – Projet ANR ARGIC, rapport scientifique du LCPC, tâche 18.- Analyse de l'influence de la densité du sol et de sa teneur en carbonates sur son aptitude au retrait-gonflement. Rapport LCPC, opération de recherche 13M06561, 77 p., 11 tabl., 61 fig., 1 ann.

Annexe B18 - Rapport final de synthèse concernant la tâche T20 : recommandations d'essais de laboratoire adaptés à la caractérisation de l'aptitude d'un sol au retrait-gonflement.

Plat E., Le Roy S. et Vincent M. (BRGM), Audiguier M., Cojean R., Geremew Z. et Laribi S. (Armines), Tang A.-M., Cui Y.-J., Ta A.-N. et Hemmati S. (Cermes), Fabre R. et Chrétien M.-C. (GHYMAC), Jacquard C., Zerhouni M.I. et Morlock C. (Fondasol), Pantet A., Proust D. et Fontaine C. (Université de Poitiers), Masrouri F., Mrad M. et Nowamooz H. (LAEGO), Magnan J.-P., Duc M. et Makki L. (LCPC), Fleureau J.-M., Guellati Z., Nguyen D., Souli H. (LMSSMat), avec la collaboration de Sulcas E., Logeais P. (2009) – Recommandation d'essais de laboratoire adaptés à la caractérisation de l'aptitude d'un sol argileux au retrait-

gonflement. Annexe B18 au rapport de synthèse du projet ARGIC. Rapport BRGM/RP-57018-FR, 117 p., 40 ill., 3 ann.

Annexes concernant le module C

Annexe C1 - Rapport final de synthèse concernant la tâche T21 : revue bibliographique sur les mécanismes d'interaction sol-végétation-atmosphère et leur modélisation.

Tessier D., Coquet Y., Bréda N., Lefèvre Y., Cui Y. J., Tang A.-M., Hemmati S., Ta A.-M., Vincent M., Plat E. (2008) – Évolution des transferts hydriques dans les sols argileux sous l'influence des conditions climatiques et de la végétation. Synthèse bibliographique. Projet ARGIC module C. Rapport coordonné par Y. J. Cui (CERMES) et D. Tessier (INRA), 152 p., 8 tabl., 71 fig.

Annexe C2 - Rapport final du LAEGO concernant la tâche T22 : définition des paramètres et identification des données d'entrée pour le calage des modélisations numériques.

Mrad M. (2006) – Sous-module B2 tâche 22 : définition des paramètres et identification des données d'entrée pour le calage des modélisations numériques. Modélisation numérique d'un remblai expérimental (benchmarking). Rapport LAEGO-ENSG LG.MM.ANR.PSI.RPRE.06.0494.A, 40 p., 8 tabl., 40 fig.

Annexe C3 - Rapport final du CERMES concernant les tâches T22 et T23 : définition des paramètres et identification des données d'entrée pour le calage des modélisations numériques, simulation des teneurs en eau sur les sites expérimentaux et calage.

Cui Y. J., Bicalho K.-V. (2009) – Projet ARGIC – Étude numérique de la variation de teneur en eau dans un remblai expérimental (benchmarking) et simulation de l'interaction sol-atmosphère sur le site de Mormoiron – Rapport des tâches 22 et 23 du module C. École des Ponts ParisTech - CERMES, 11 p., 1 tabl., 8 fig.

Annexe C4 - Rapport final du BRGM concernant les tâches T22 et T23 : définition des paramètres et identification des données d'entrée pour le calage des modélisations numériques, simulation des teneurs en eau sur les sites expérimentaux et calage.

Surdyk N., Dubus I., Le Roy S., Plat E., Vincent M. (2009) – Projet ARGIC (module C, tâches 22 et 23) - Modélisation de la propagation de la sécheresse dans le sol sur sites expérimentaux et étude paramétrique avec MACRO. Rapport BRGM/RP-56989-FR, 56 p., 43 ill.

Annexe C5 - Rapport final de Météo-France concernant la tâche T23 : simulation des teneurs en eau sur les sites expérimentaux et calage.

Blanchard M., avec la contribution de Soubeyron J.-M., Franchistéguy L., Vidal P., Baillon M., Martin E. (2009) – Projet ARGIC - Perspectives d'utilisation du système Safran-Isba-Modcou pour la reconnaissance des sécheresses géotechniques – Rapport final module C tâche 23. Rapport DCLIM/HYDRO, 7 p., 1 tabl., 3 fig.

Annexe C6 - Rapport final du CERMES concernant les tâches T23, T24 et T26 : simulation des teneurs en eau sur les sites expérimentaux et calage puis modélisation numérique des teneurs en eau dans le sol dans un cas-type sans végétation et avec un arbre isolé.

Hemmati S., Cui Y. J. (2009) – Projet ARGIC - Analyse numérique bidimensionnelle par éléments finis de l'interaction sol-végétation-atmosphère – Rapport des tâches 23, 24 et 26 du module C. École des Ponts ParisTech – CERMES, 47 p., 6 tabl., 44 fig.

Annexe C7 - Rapport final du LAEGO concernant la tâche T25 : modélisation numérique des teneurs en eau dans le sol dans un cas-type sous canopée.

Abdallah A. (2009) – Sous-module C3 tâche 25 : modélisation numérique de l'évolution des teneurs en eau en profondeur dans un cas-type sous canopée homogène et analyse de différents scénarios selon la nature des arbres (Champenoux). Modélisation de l'évolution du profil hydrique sur le site de Champenoux (54) et de son effet sur les déplacements di sol du 07/05/2003 au 19/01/2004. Rapport LAEGO-ENSG, 16 p., 2 tabl., 8 fig.)

Annexe C8 - Rapport final de l'INRA Agro ParisTech concernant la tâche T26 : modélisation numérique des teneurs en eau dans le sol dans un cas-type avec un arbre isolé.

Coquet Y., Bréda N., Tessier D. (2009) – Projet de recherche ARGIC module C. Rapport final. Rapport INRA Agro ParisTech, 14 p., 3 tabl., 11 fig.

Annexe C9 - Rapport final de synthèse concernant la tâche T27 : recommandations pour les critères de reconnaissance de périodes de sécheresse exceptionnelle.

Vincent M., Plat E., Le Roy S., Blanchard M., Soubeyroux J.-M., Magnan J.-P., Masrouri F., Cui J. Y., Coquet Y., Bréda N. avec la collaboration de Hemmati S., Surdyk N., Dubus I. (2009) – Projet ARGIC. Recommandations pour le choix de critères d'identification de périodes de sécheresse exceptionnelles. Rapport de synthèse de la tâche 27 du module C. Rapport BRGM/RP-56996-FR, 58 p., 33 ill.

Avant-propos

Les enjeux économiques liés aux questions pour lesquelles le présent projet propose d'apporter des éléments de réponse sont considérables. Le coût des sinistres imputés au phénomène de retrait-gonflement est très élevé : 4,3 milliards d'euros indemnisés entre 1989 et 2006 dans le cadre du régime des catastrophes naturelles (ce qui constitue le second poste d'indemnisation, juste derrière les inondations) et plus de 8 000 communes françaises touchées pour le seul été 2003 (Vincent *et al.* , 2008).

Dans ce contexte, les attentes des pouvoirs publics vis-à-vis de la communauté scientifique et technique concernent en particulier le moyen de réduire la sinistralité des futures constructions (sachant qu'il se construit actuellement en France de l'ordre de 200 000 maisons individuelles par an) mais aussi de limiter la vulnérabilité du bâti existant. Leur attente porte également sur l'élaboration de critères fiables et objectifs afin de reconnaître l'état de catastrophe naturelle consécutif à une période de sécheresse exceptionnelle, avec là encore des enjeux économiques et politiques considérables (IGF/CGPC/IGE, 2005 ; rapport Boutin, 2007). Enfin, l'attente des professionnels de la construction et de l'assurance, et en particulier celle des bureaux d'études géotechniques, porte tout particulièrement sur la nécessité de définir des critères fiables mais de mise en œuvre aisée et peu coûteuse pour caractériser l'aptitude des sols au retrait-gonflement, sachant que le développement de la prévention de ce risque pourrait conduire à l'avenir à une généralisation des études de sols préalables à la construction de maisons sur sols argileux.

Les objectifs opérationnels du présent programme consistent donc à apporter aux pouvoirs publics et aux professionnels de la construction et de l'assurance des éléments de réponse concernant en particulier les trois points suivants :

- comment prévenir, de manière économique, les risques de retrait-gonflement pour les constructions individuelles existantes ou en projet ?
- comment identifier, dans le cadre d'études courantes et à l'échelle d'une parcelle, la susceptibilité d'un sol vis-à-vis de l'aléa retrait-gonflement ?
- comment, à partir d'une meilleure compréhension des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, pourrait-on identifier des périodes de sécheresse exceptionnelles justifiant la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ?

Au-delà de ces questions directement opérationnelles, le projet ARGIC se donne pour objectif d'apporter une contribution globale à la compréhension scientifique des mécanismes en cause dans le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Les facteurs de prédisposition et de déclenchement du phénomène sont identifiés, mais il manque un modèle global permettant de rendre compte de leur combinaison et expliquant comment, en présence de facteurs de prédisposition défavorables (caractéristiques lithologique, minéralogique et texturale du sol, présence localisée de végétation arborée ou dissymétrie dans la répartition spatiale des apports hydriques, défaut d'adéquation entre le système de fondation ou la structure du bâtiment et la

nature du sol, etc.), certaines conditions climatiques peuvent conduire à l'apparition de désordres au niveau des maisons individuelles.

Une meilleure compréhension de ces mécanismes de déclenchement et leur modélisation, calée sur des observations expérimentales et extrapolables à différents cas de figures, constituerait une aide appréciable pour identifier des situations de sécheresse exceptionnelles et pour évaluer l'impact de différentes techniques de diminution de la vulnérabilité des maisons individuelles vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Un tel objectif suppose de mettre en commun des outils et des concepts développés à la fois en météorologie, en agro-pédologie, en écophysiologie, en mécanique des sols non saturés et en ingénierie des structures, ce qui justifie le groupement des différents partenaires rassemblés autour de ce programme.

Par ailleurs, un des enjeux de ce programme est de caractériser un certain nombre de formations géologiques réputées sujettes au phénomène de retrait-gonflement, non seulement pour acquérir les paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations, mais aussi dans le but d'identifier les essais de caractérisation jugés les plus pertinents (en termes de coût, de fiabilité et de facilité de mise en œuvre) pour des analyses de sols effectuées par les bureaux d'études géotechniques à des fins préventives ou dans le cadre d'études post-sinistres.

Ce programme ARGIC s'inscrit dans la continuité d'un effort général de recherche appliquée initié par la communauté scientifique française depuis plusieurs années et qui a connu un très net regain d'activité suite à la récente vague de sécheresse de l'été 2003. Une revue récente des différentes actions de recherche menées depuis cette date sur cette thématique (Cojean, 2008) a ainsi recensé une dizaine d'opérations dont plusieurs menées également en collaboration entre différents acteurs publics et privés, soit à l'initiative du ministère en charge de l'environnement (Tessier *et al.*, 2006 ; Vincent *et al.*, 2006a), soit sur financement propre des organismes de recherche, soit dans le cadre de programmes cofinancés notamment par la Fondation MAIF mais aussi dans le cadre d'un précédent appel à projet du Réseau Génie Civil et Urbain (Vincent *et al.*, 2006b).

1. Introduction

Les sols argileux présentent des variations de volume parfois importantes lorsque leur teneur en eau varie en réponse aux conditions climatiques et à l'action de la végétation. Ces variations de volume affectent le fonctionnement des fondations et des constructions en contact avec le sol et sont la cause de dommages particulièrement intenses dans les périodes de sécheresse.

Pour mieux comprendre ces phénomènes, il a paru opportun d'analyser séparément six points principaux qui sont les suivants :

- l'identification des sols et des structures de terrains les plus sensibles aux variations de teneur en eau et la prévision de l'amplitude de leurs déformations de retrait ou gonflement,
- l'analyse de l'effet des variations de volume des sols argileux sur les mouvements des fondations et les déformations des constructions,
- l'étude des solutions de fondations et des renforcements de structures qui permettent de limiter directement les effets du retrait et gonflement des sols ;
- l'analyse des variations des profils hydriques en réponse aux sollicitations climatiques en tenant compte de l'influence de la végétation et de l'interface sol-atmosphère ;
- l'étude de solutions pour limiter les variations de teneur en eau sous les constructions et dans leur voisinage ;
- l'élaboration de recommandations qui tiennent compte de tous ces phénomènes et des moyens d'en contrôler les effets.

Les travaux réalisés dans le cadre du projet ARGIC avaient deux finalités : d'une part, apporter des réponses aux questions posées dans le dossier établi au début du projet et, d'autre part, augmenter les connaissances fondamentales et développer les outils d'étude des sols et de leur retrait et gonflement.

La première partie du rapport présente les conclusions opérationnelles du projet ARGIC et apporte des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quelles mesures de prévention recommander pour la construction de maisons individuelles sur sols argileux ?
- Comment réduire la vulnérabilité des maisons existantes sur ces sols argileux ?
- Quelles sont les solutions de réparation ou de confortement des constructions existantes sur sols argileux sensibles au retrait et gonflement ?
- Comment organiser une reconnaissance géotechnique adaptée aux sols argileux sensibles au retrait et gonflement dans les conditions de projets de maisons individuelles ?
- Quels essais simples et quelles grilles de classification permettent de rendre compte des propriétés de retrait et gonflement des sols ?

- Comment mesurer l'évolution des profils hydriques dans les terrains naturels en fonction des saisons ?
- Comment caractériser et prendre en compte l'influence de la végétation ?
- Quels critères peut-on utiliser pour définir les sécheresses exceptionnelles ?
- De quels éléments économiques dispose-t-on sur les mesures de réparation et de prévention ?

La deuxième partie du rapport présente les développements scientifiques et techniques effectués dans le cadre du projet ARGIC, sur les thèmes suivants :

- relations entre l'eau et les minéraux argileux,
- caractérisation de la microstructure des sols argileux,
- comportement thermo-hydro-mécanique des sols argileux,
- analyse des profils hydriques des sols et de leur évolution,
- technologie des mesures de terrain : déformations verticales et variations hydriques d'un sol argileux,
- modélisation des échanges sol-atmosphère-végétation,
- interactions entre le sol, les fondations et les constructions,
- types de sécheresses géotechniques et cinétiques de la réponse hydrique des sols.

Pour l'exécution des travaux du projet ARGIC, une organisation en « modules » et « tâches » a été adoptée selon l'architecture suivante :

Module A : Effets de la sécheresse sur les constructions : interaction sol-structure, pathologie, prévention et réparation des désordres

Sous-module A1- Modélisation des interactions entre les sols sensibles au retrait-gonflement et les structures des maisons individuelles

Tâche 1- Calcul des déplacements différentiels de fondations superficielles de bâtiments ou de canalisations à partir d'un modèle général de calcul des variations de volume des sols non saturés et sensibles au retrait et gonflement, en fonction des cycles d'infiltration et séchage ;

Tâche 2- Analyse numérique de l'impact des tassements différentiels sur des cas-types de fondations ;

Tâche 3- Évaluation par des méthodes simplifiées de l'ordre de grandeur des sollicitations engendrées par les processus de retrait et gonflement dans des structures simples de bâtiments ;

Tâche 4- Comparaison des différentes approches entre elles et avec les observations expérimentales.

Sous-module A2- Pathologie, prévention et réparation des désordres

Tâche 5- Revue bibliographique sur les méthodes de réduction de la vulnérabilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement et sur les techniques de confortement ;

Tâche 6- Analyse de dossiers de sinistres en vue d'établir une pathologie des désordres ;

Tâche 7- Détermination de l'augmentation de la résistance de constructions (non endommagée ou renforcées après endommagement) sur des modèles en vraie grandeur, dont les appuis seront soumis à des tassements ou soulèvements différentiels - analyse coût-efficacité des résultats en fonction du type de renforcement ;

Tâche 8- Étude d'adaptation des fondations de constructions individuelles en fonction des résultats des modélisations ;

Tâche 9- Analyse comparative de différents dispositifs de maîtrise des variations de l'humidité dans les sols sous les fondations en vue de préciser leurs caractéristiques optimales, leur coût de mise en œuvre et leur domaine d'application ;

Module B : Approches expérimentales (sites expérimentaux et essais de laboratoire) pour la caractérisation hydro-mécanique des sols sensibles au retrait-gonflement

Sous-module B1- Synthèse bibliographique

Tâche 10- Synthèse actualisée sur les paramètres potentiellement capables de rendre compte de l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement ;

Sous-module B2- Suivi d'instrumentation in situ

Tâche 11- Instrumentation d'un site en capteurs complémentaires pour mesure des déformations et paramètres météorologiques ;

Tâche 12- Mise au point d'un matériel spécifique adapté, calibrage en laboratoire et équipement d'un site en sondes TDR mise en place par fonçage ;

Tâche 13- Équipement de deux sites pour diagraphie en sondage ;

Tâche 14- Acquisition, suivi et interprétation des mesures ;

Tâche 15- Élaboration de recommandations méthodologiques pour l'équipement futur de sites expérimentaux de suivi ou d'alerte ;

Sous-module B3- Réalisation et analyse d'essais de laboratoire

Tâche 16- Complément de caractérisation des deux sites instrumentés en vue de l'acquisition de paramètres hydro-thermo-mécaniques nécessaires au calage des modélisations ;

Tâche 17- Caractérisation de plusieurs formations géologiques régionales sujettes au phénomène de retrait-gonflement des argiles ;

Tâche 18- Analyse, à partir de différentes formations argileuses sensibles, de l'influence de la densité du sol et de sa teneur en carbonates sur son aptitude au retrait-gonflement ;

Tâche 19- Étude de corrélation entre valeurs de bleu et capacité d'échange cationique pour des formations argileuses sensibles au retrait-gonflement ;

Tâche 20- Recommandation d'essais de laboratoire adaptés à la caractérisation de l'aptitude d'un sol argileux au retrait-gonflement ;

Module C : Mécanismes de propagation de la sécheresse dans le sol et modélisation

Sous-module C1- Synthèse bibliographique

Tâche 21- Synthèse actualisée sur les mécanismes d'interaction sol-végétation-atmosphère et leur modélisation ;

Sous-module C2- Acquisition, analyse et sélection de critères pertinents en vue de la modélisation

Tâche 22- Définition des paramètres et identification des données d'entrées pour le calage des modélisations numériques ;

Tâche 23- Simulation numérique des variations de teneurs en eau en profondeur sur les sites expérimentaux et calage avec les données expérimentales ;

Sous-module C3- Modélisation numérique

Tâche 24- Modélisation numérique de l'évolution des teneurs en eau en profondeur dans un cas-type, sans végétation (développement module dans Marthe) ;

Tâche 25- Modélisation numérique de l'évolution des teneurs en eaux en profondeur dans un cas-type sous canopée homogène et analyse de différents scénarios selon la nature des arbres ;

Tâche 26- Modélisation numérique de l'évolution des teneurs en eaux en profondeur dans un cas-type avec un arbre isolé, étude des besoins en eau de différentes espèces d'arbres et de leur comportement en état de stress hydrique, élaboration de scénarios en tenant compte du développement de l'arbre ;

Sous-module C4- Analyse des répercussions de la dessiccation générale et localisée

Tâche 27- Extrapolation en termes de recommandation pour les critères de reconnaissance de périodes de sécheresse exceptionnelle.

Les trois modules ont fourni les différentes productions mentionnées dans ce rapport et cette organisation a conduit au découpage des différentes annexes fournies sur CD-Rom en complément de ce document.

2. Synthèse opérationnelle des conclusions du programme ARGIC

2.1. INTRODUCTION

Cette partie a pour ambition d'apporter, au vu des observations et réflexions effectuées dans le cadre du projet ARGIC, quelques éléments de réponses à une série de questions que se posaient, lors du lancement du projet, non seulement les scientifiques impliqués dans cette thématique, mais surtout les pouvoirs publics, les professionnels de la construction et les assureurs, confrontés à un problème complexe, à la croisée de plusieurs disciplines, et ayant des répercussions économiques importantes en termes de coût pour la collectivité.

Les questions retenues ici ne sont naturellement pas exhaustives et ne prétendent pas couvrir la totalité du sujet. Elles ne reprennent pas la totalité des résultats issus des recherches menées au titre du projet ARGIC, lesquels sont détaillés dans les annexes techniques jointes au présent rapport. Il ne s'agit pas non plus d'un état des connaissances disponibles sur le sujet, ce qui est plutôt l'objet des différentes synthèses bibliographiques effectuées dans le cadre du projet et présentées dans les annexes A5, A6, B1 et C1. Les questions sélectionnées dans les paragraphes suivants et pour lesquelles sont apportés des éléments de réponse, sont celles autour desquelles avait été structuré le projet ARGIC lors de son montage car elles reflétaient les préoccupations principales des différents partenaires consultés. Les réponses apportées sont issues des investigations menées par les participants au projet ARGIC, au cours des trois années qu'a duré ce programme, et sont le fruit d'une réflexion commune, au vu des connaissances actuellement disponibles sur le sujet. La plupart de ces réponses restent partielles et les paragraphes suivants mettent également l'accent sur les besoins en recherche complémentaires pour continuer à progresser sur cette thématique.

2.2. QUELLES MESURES DE PRÉVENTION RECOMMANDER POUR LA CONSTRUCTION DE MAISONS INDIVIDUELLES SUR SOLS ARGILEUX ?

Les conséquences mécaniques des effets de la sécheresse sur les structures (bâtiments, ouvrages d'art, etc.) sont conditionnées par un ensemble de facteurs de différentes natures, sur lesquels il est possible d'agir pour en prévenir les conséquences. Il s'agit principalement :

- des facteurs liés au contexte géologique ou à la configuration locale, tels que la topographie du site, le mode de collecte et d'évacuation des eaux de ruissellement et des eaux de toiture, la présence de nappes et/ou de système de drainage, la pluviométrie et la végétation environnante ;

- de la typologie des bâtiments susceptibles de subir des dommages (type de structure, nombre de niveaux, présence ou non de sous-sol, existence d'ossature, type et nature des fondations) ;
- et, principalement, de la nature et des propriétés mécaniques du sol sur lequel sont fondées ces différentes structures.

Des préconisations destinées aux constructeurs et aux particuliers ont été formulées suite aux différentes périodes de sécheresse qui ont affecté la France ces dernières années. Ces prescriptions concernent en général les habitations de type « maisons individuelles » à construire, de manière à réduire l'ampleur ou le degré de la sinistralité.

À ce titre, dans le cadre des Plans de prévention des risques naturels (PPRN) spécifiques au retrait-gonflement des sols argileux, déjà adoptés dans plus de 950 communes en France, le règlement élaboré à l'initiative du ministère en charge de l'environnement (actuel MEEDDM) rend obligatoire le recours à une étude géotechnique préalable en zone réglementée afin d'adapter au mieux le projet de construction à la nature du sol. Toutefois, pour les projets de maisons individuelles (hors permis groupés), une alternative est proposée qui consiste à adopter une série de mesures constructives forfaitaires qui concernent principalement les fondations (qui doivent être armées, bétonnées à pleine fouille, et ancrées de manière homogène à une profondeur minimale comprise entre 0,80 et 1,20 m selon le niveau d'aléa identifié), la structure (avec chaînages et joints de rupture obligatoires) et la maîtrise des eaux dans le sol (mise en place d'un système périphérique anti-évaporation, éloignement des rejets d'eaux pluviales et usées, des drains, des puits et des arbres, etc.).

La question qui se pose est de savoir si ces dispositions seront suffisantes à l'horizon 2050 ou 2100, dans un contexte de changement climatique probablement engagé, notamment en ce qui concerne la profondeur d'ancrage des fondations.

Aussi, les différents moyens de prévention décrits dans cette partie du document s'appuient non seulement sur l'expérience communautaire passée en matière de retrait/gonflement des argiles mais également sur celle émanant de l'expérience acquise dans le domaine minier. En effet, la présence de vides souterrains liés à d'anciennes mines ou carrières peut générer en surface des phénomènes d'affaissement dont la variation spatiale des amplitudes conduit à des tassements différentiels sur les ouvrages comparables à ceux engendrés par les phénomènes de sécheresse. Les dispositions techniques applicables au contexte minier ont ainsi pu être extrapolées à la problématique du retrait/gonflement des argiles.

Une revue bibliographique internationale, menée dans le cadre du présent programme (annexes A5 et A6), permet ainsi de structurer la prévention des effets du retrait et du gonflement des argiles selon quatre thématiques, répondant chacune à un objectif particulier :

- thématique 1 : reconnaître et caractériser le sol de fondation ;
- thématique 2 : limiter/réduire l'amplitude du retrait/gonflement dans le sol ;

- thématique 3 : limiter/réduire la transmission du retrait/gonflement vers la structure, en lien avec l'interaction sol/structure ;
- thématique 4 : augmenter/améliorer la résistance des structures pour s'opposer aux différents mécanismes de rupture impactant la structure.

Le Tableau 1 regroupe les principaux moyens de prévention applicables à ce jour, qui peuvent être associés les uns aux autres pour en maximiser l'efficacité. Ces moyens sont explicités en annexe A5.

Tableau 1 : Liste des moyens de prévention classés par thématique (INERIS)

Intitulé du moyen de prévention	Thématiques			
	1 : Reconnaître et caractériser le sol de fondation	2 : Limiter/Réduire l'amplitude du retrait/gonflement dans le sol	3 : Limiter/Réduire l'effet du retrait/gonflement sur la structure, en lien avec l'interaction sol/structure	4 : Augmenter/Améliorer la résistance des structures pour s'opposer aux différents mécanismes de rupture susceptibles de les endommager
1 - Reconnaître et caractériser le sol de fondation	X			
2 - Gérer les plantations d'arbres		X		
3 - Gérer les eaux météoriques		X		
4 - Maîtriser les variations hydriques du sous-sol		X		
5 - Choisir la localisation			X	
6 - Définir l'architecture d'ensemble			X	
7 - Définir les dimensions des structures			X	
8 - Augmenter la profondeur d'appui des fondations via un sous-sol total ou des semelles filantes approfondies			X	
9 - Utiliser des fondations profondes ou semi-profondes			X	
10 - Réaliser des joints verticaux			X	
11 - Choisir le type de structure d'ouvrage				X
12 - Dispositions communes à l'ensemble des fondations			X	X
13 - Améliorer les fondations superficielles (radier en demi-gauffre)			X	X

Dans le cadre du projet ARGIC, le LCPC a mis en œuvre une expérience originale visant à observer le comportement d'une maison individuelle en vraie grandeur soumise à un tassement différentiel de ses appuis (annexe A9). Cette maison a été construite dans un hall couvert du Centre d'expérimentations routières (CER) à Rouen, par une entreprise de maçonnerie traditionnelle, dans le respect des normes en vigueur. Il s'agit d'une maison de plain-pied, de surface au sol 8 x 10 m, munie d'un

demi-plancher et dont la toiture est remplacée par un chargement de poids équivalent. Les semelles de fondations reposent sur un support par l'intermédiaire d'appuis mécaniques que l'on vient substituer, en cours d'essai, par des vérins hydrauliques qui simulent le tassement du sol (Illustration 1).



Illustration 1 – Maquette de maison en vraie grandeur construite au CER de Rouen (LCPC)

Un premier essai, effectué fin 2008, a consisté à abaisser progressivement les vérins situés sous un angle de la maison dépourvu de plancher bas. L'abaissement du vérin situé à l'angle est porté progressivement à 8 mm, les vérins voisins étant également manœuvrés par paliers de manière à créer un profil régulier sous un quart de la maison, sans qu'aucun désordre ne soit observé. Un second essai a été conduit début 2009, consistant cette fois à mettre progressivement en porte-à-faux la moitié de la maison (l'autre moitié étant chargée sur le plancher pour éviter son basculement). Les deux vérins situés aux angles ont été abaissés par palier jusqu'à 20,5 mm, leurs voisins les suivant graduellement. Les semelles ont commencé à se déformer lorsque les tassements différentiels ont atteint une valeur proche de $1/300$ mais la maison n'a présenté aucun désordre jusqu'à se trouver sans plus aucun support sur la moitié de son périmètre. La rupture ne s'est produite que quelques jours plus tard, avec l'apparition de fissures traversantes au niveau du soubassement et à la base du mur, dans un seul angle de la maison. Suite à ce mouvement, la base du soubassement s'est retrouvée de nouveau en appui sur certains vérins et l'expérience a été provisoirement arrêtée dans cet état, en attendant une poursuite ultérieure des observations.

Les conclusions de cette première série d'expériences restent à préciser et à compléter, notamment en observant l'effet éventuel de cycles successifs de chargement-déchargement, mais confirment d'ores et déjà le bon comportement d'une maison individuelle soumise à tassements différentiels lorsque la structure a été construite dans les règles de l'art.

2.3. COMMENT RÉDUIRE LA VULNÉRABILITÉ DES MAISONS EXISTANTES SUR CES SOLS ARGILEUX ?

Les maisons existantes sont souvent mal caractérisées. On connaît rarement leur mode de fondation (géométrie et profondeur des semelles, nature et état des sols en dessous) et pas toujours leur structure. La diminution de leur vulnérabilité vis-à-vis du risque de retrait-gonflement nécessite donc des études détaillées. L'utilité de ces études est plus claire quand des désordres se sont déjà produits, mais on se trouve alors dans le cas de la réparation et du confortement, traité dans la section suivante.

Les causes des dégradations subies par les constructions sur sols sujets aux phénomènes de retrait-gonflement sont connues et ont été analysées dans tous les rapports du programme ARGIC. Si nous éliminons les défauts structurels de la construction et les insuffisances des fondations, il reste des moyens d'action qui ne touchent pas directement la maison mais jouent sur son environnement et qui ont été évoqués pour la prévention des dégradations des maisons neuves (section précédente). Ces dispositions visent à maintenir la teneur en eau des sols sous les fondations aussi constante que possible et ainsi à éviter ou limiter les mouvements de retrait ou de gonflement qui provoquent la dégradation de la structure de la maison.

Les variations de la teneur en eau des sols argileux trouvent leur origine dans l'évaporation directe de l'eau à partir des surfaces libres du sol (à l'extérieur des constructions), mais aussi dans les prélèvements effectués à des profondeurs variées par les racines des plantes, et notamment des arbustes et des arbres. Pour ces derniers, l'aspiration de l'eau par les racines dépend directement de la nature et de la taille du sujet, mais en moyenne ces racines s'éloignent du tronc jusqu'à une distance sensiblement égale à la hauteur de l'arbre.

Il existe pour cette raison deux façons de contrôler les variations de teneur en eau :

- la maîtrise de l'infiltration et de l'évaporation de l'eau autour des maisons,
- la gestion de la végétation.

Pour limiter l'évaporation de l'eau du sol, l'installation d'un trottoir ou d'une nappe de géosynthétique étanche tout autour de la construction (de manière symétrique) peut être appropriée. Des retours verticaux sous forme de bèches d'ancrage sur 1 à 2 m de profondeur (qui peuvent aussi faire office d'écrans anti-racines) sont dans ce cas utiles pour limiter les circulations latérales d'eau dans le proche sous-sol, ce qui renforce considérablement l'efficacité du dispositif. La mise en place d'une couche de gravier ou de sable grossier qui supprime les remontées capillaires entre le sol argileux et la surface, tout en accumulant l'eau dans les périodes de pluie, offre une solution alternative pour maintenir la teneur en eau du sol constante (en l'absence d'arbres). Il

faut toutefois garder à l'esprit que certains travaux à proximité d'une construction existante (modifications structurelles ou excavations) peuvent modifier sa sensibilité aux dommages et que l'installation de voies ou de sentiers peut modifier la dessiccation et réduire l'alimentation du sol en eau de pluie.

Dans le cadre du projet ARGIC, des techniques de réhumidification par injection d'eau à la base des fondations ont été testées sur modèles réduits en laboratoire au LGCIE. L'étude comparative de semelles posées sur sols argileux soumis à dessiccation montre effectivement l'intérêt d'un tel dispositif, mais la faisabilité pratique de ce type d'approche n'a pas été vérifiée.



Illustration 2 - Pilote permettant de tester la faisabilité et l'efficacité de l'apport d'eau sous une fondation (LGCIE – INSA de Lyon)

La gestion de la végétation est la technique la plus efficace si l'on a pu vérifier que les fondations de la construction sont adaptées à la profondeur usuelle de pénétration de la sécheresse dans la région considérée. Il faut d'abord veiller à limiter à un niveau raisonnable la dimension de certains arbres connus pour provoquer des dommages, quand ils sont proches de la construction. Les arbres plus jeunes que la construction devraient être enlevés s'ils sont considérés comme la cause possible de désordres. Si l'arbre est plus vieux que la construction ou que les constructions adjacentes, il ne faut pas l'enlever sans une étude détaillée. Dans de tels cas, il est probable que l'élagage sera une solution optimale (par réduction de la cime plutôt que par éêtage). Lorsque l'on plante de nouveaux arbres à proximité d'une construction, on peut recommander de placer les arbres les plus endommageant à une distance des bâtiments au moins égale à une ou deux fois leur hauteur adulte.

Il est difficile d'aller plus loin dans les solutions destinées à limiter les effets de la sécheresse sur les constructions existantes sans toucher à leur structure. L'aggravation possible des sécheresses du fait des changements climatiques attendus

aura des effets sur la teneur en eau des sols de fondation et sur la végétation, mais l'augmentation simultanée de l'intensité des pluies et du ruissellement devrait conduire à favoriser l'infiltration de l'eau pour la retenir dans les sols et donc à maintenir leur humidité à des niveaux élevés.

La vulnérabilité des maisons existantes peut être diminuée par le renforcement des fondations ou le chaînage de la construction. Cette approche est bien sûr efficace, mais elle est onéreuse et il ne paraît pas réaliste de préconiser systématiquement de tels études et travaux sur le parc des maisons existantes avant que des désordres ne se produisent, sauf pour celles qui ont une sensibilité ou une importante particulière ou bien un coût de réparations élevé en cas de sinistre.

Enfin, lorsque l'extension d'une construction est envisagée, certaines dispositions préventives peuvent être appliquées pour ne pas accroître le risque de désordres. Ces dispositions pourront concerner les dimensions de l'ouvrage, son type de structure et de fondation, ainsi que sa liaison avec l'ouvrage existant via des joints verticaux, par exemple.

2.4. QUELLES SONT LES SOLUTIONS DE RÉPARATION OU DE CONFORTEMENT DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES SUR SOLS ARGILEUX SENSIBLES AU RETRAIT ET GONFLEMENT ?

Les dégradations des constructions sur sols argileux en cas de sécheresse sont le plus souvent des fissures (horizontales, verticales, obliques, en marche d'escalier,...) dans les murs extérieurs, les refends, les cloisons et les doubles cloisons, mais aussi des fissures dans les plafonds, dans les dallages, voire des affaissements ou des gonflements, et des déformations des huisseries. Ces désordres sont la réponse de la structure de la construction aux tassements ou soulèvements des fondations. Leur localisation et leur ouverture correspondent aux mouvements localisés de retrait ou de gonflement du sol sous ces fondations. Les techniques de réparation ou confortement sont mises en œuvre en réponse à ces déformations sur sol, qu'elles aient été observées ou que l'on considère qu'elles puissent se produire sous le bâtiment. Le choix d'une technique suppose donc que l'on ait observé, analysé et compris les mécanismes de déformation du sol et que l'on ait estimé les amplitudes maximales possibles de ces tassements ou soulèvements ou déplacements horizontaux des sols en contact avec les fondations ou la structure.

Les techniques de réparation généralement mises en œuvre sur les constructions légères endommagées par les effets de la sécheresse et de la réhydratation des sols peuvent être rattachées à quatre familles :

- reprise en sous-œuvre de la construction, avec intervention sur le système de fondation et/ou sur le dallage ;
- action sur la structure (rigidification ou réalisation de joints pour localiser les déformations) ;
- intervention sur l'environnement pour limiter l'amplitude des variations de l'humidité du sol sous les fondations ;

- pas de renforcement, mais un simple rebouchage des fissures quand on considère que les mouvements sont stabilisés.

La **modification des fondations** est l'intervention la plus radicale et la plus onéreuse pour réparer les dommages subis par les constructions : l'objectif est de transférer les charges en profondeur jusqu'à un niveau peu ou pas sensible au retrait-gonflement. Le choix de la technique dépend de la géologie du site, des caractéristiques de la structure et de son aptitude à répartir les efforts, mais aussi de l'accessibilité du site et de la facilité d'intervenir sur les murs porteurs depuis l'intérieur ou l'extérieur de la construction.

Deux techniques sont utilisées pour modifier les fondations : la réalisation de plots continus ou discontinus et la réalisation de micropieux. La répartition entre les plots et les micropieux varie en fonction des régions : les travaux réalisés dans le cadre d'ARGIC ont montré que les plots sont plus souvent conseillés dans les régions Bourgogne et PACA, les micropieux dans la région Midi-Pyrénées. Le choix dépend de la construction (des plots seront plus facilement réalisables sur des maisons anciennes avec des fondations peu résistantes que des micropieux), de la géologie du site (les plots ne peuvent être réalisés que si un horizon résistant et moins sensible aux variations hydriques est présent à moins de 3 m de profondeur).

Les travaux de confortement au niveau des dallages prennent la forme d'injections sous dallage ou de la démolition du dallage et de la réalisation d'un plancher porté. L'injection sous dallage peut être mise en œuvre à condition que le sol de fondation ne présente pas de risque de gonflement, ce qui est rarement le cas dans les sinistres qui ont été étudiés. La démolition du dallage et la réalisation d'un plancher porté est préconisée dans des cas extrêmes où les désordres et/ou l'activité des sols sont trop importants pour que l'on puisse stabiliser la construction en limitant seulement les variations hydriques des sols sous le dallage.

Les travaux de **confortement de la structure** consistent à la rigidifier globalement ou bien à la découper en blocs par l'installation de joints. La rigidification est le plus souvent obtenue par chaînage dans les directions où la structure cherche à se dilater. On peut également renforcer superficiellement les panneaux de murs. L'installation de joints verticaux permet à la structure de mieux s'adapter aux mouvements de ses fondations.

La rigidification est rarement conseillée (moins de 10 % des cas), probablement par manque d'information sur la structure initiale. En effet, les investigations réalisées par le bureau d'études géotechniques dans le cadre du diagnostic post-sinistre ne donnent généralement aucune d'information sur la rigidité de la structure comme les chaînages verticaux et horizontaux. Des études spécifiques sur les structures devraient être réalisées pour fournir une information plus précise quant à la rigidité de la structure afin de pouvoir conseiller des améliorations pertinentes.

Le joint de rupture est conseillé de façon assez disparate selon les régions étudiées dans le cadre du projet ARGIC : 17 % en région PACA, 8 % en région Bourgogne et seulement 4 % en région Midi-Pyrénées. Il est souvent conseillé dans le cas de

sinistres comportant différents corps de bâtiments de structures différentes ou lorsqu'on souhaite réaliser des reprises partielles, pour dissocier les structures fondées différemment du fait d'une reprise en sous-œuvre.

Les **interventions sur l'environnement** sont pour partie analogues à celles qui ont été citées dans les deux sections précédentes et consistent principalement en :

- la mise en place de polyane sur le sol dans le vide sanitaire, en vue de limiter les variations hydriques des sols soumis à dessiccation par les courants d'air circulant dans les vides sanitaires,
- la création, l'inspection ou la réparation des réseaux d'eaux pluviales,
- la réalisation ou la modification de systèmes de drainage,
- l'élagage voire l'abattage de la végétation arborée ou la mise en place de dispositif anti-racines,
- la mise en place de géomembranes ou de trottoirs périphériques.

Les confortements les plus souvent préconisés sont les trottoirs, l'abattage de la végétation et la mise en place de dispositif anti-racines. La création de systèmes d'évacuation des eaux pluviales est habituellement préconisée pour les constructions qui ne disposent pas d'un tel système et dont les eaux de toiture s'écoulent directement au pied des façades.

2.5. COMMENT ORGANISER UNE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE ADAPTÉE AUX SOLS ARGILEUX SENSIBLES AU RETRAIT ET GONFLEMENT DANS LES CONDITIONS DE PROJETS DE MAISONS INDIVIDUELLES ?

Une reconnaissance géotechnique préalable à un projet de construction de bâtiment a pour but d'identifier l'ensemble des caractéristiques physiques, mécaniques, hydriques et éventuellement chimiques des terrains en place afin d'adapter au mieux la structure projetée à son environnement et notamment d'en dimensionner les fondations. Dans le cas particulier des constructions de maisons individuelles, ces études, mises en œuvre par les bureaux d'études géotechniques, se caractérisent le plus souvent par des délais de réalisation assez courts (souvent de l'ordre de quelques semaines) et des budgets relativement limités (généralement inférieurs à 5 000 € et le plus souvent compris dans une fourchette de 1 000 à 3 000 €, pour rester dans des proportions acceptables pour un projet de construction de ce type).

En matière de prévention du phénomène de retrait-gonflement, ces études géotechniques préalables doivent s'intéresser à :

- reconnaître et identifier les sols présents au droit de la construction,
- caractériser leur répartition spatiale et repérer d'éventuelles hétérogénéités verticales et horizontales,
- identifier la présence éventuelle d'argiles gonflantes et en déterminer le potentiel de retrait et de gonflement en cas de variation des conditions hydriques,
- repérer l'existence d'éventuels facteurs d'aggravation susceptibles de modifier localement la teneur en eau dans le sol sur la parcelle.

Avant toute étude de sol, une première étape doit consister à réaliser une synthèse des données existantes disponibles notamment au travers de l'examen des cartes géologiques, de la carte départementale d'aléa retrait-gonflement, et de sondages réalisés à proximité (accessibles notamment via la Banque des données du Sous-Sol ou par d'autres moyens). Ces éléments préliminaires seront complétés par les observations effectuées *in situ* et une enquête de voisinage, mais permettent déjà d'appréhender sommairement la connaissance du contexte local et d'orienter le programme de reconnaissance. La compréhension du contexte géologique global dans lequel se situe la parcelle constitue en effet un élément indispensable qui permettra notamment de déterminer si l'on a affaire à des formations sédimentaires en place, à des recouvrements liés à l'altération du substratum ou à des matériaux colluvionnés et remaniés. De forts contrastes de perméabilités entre couches superposées ou l'existence de biseaux de stratifications sont aussi des éléments d'analyse à prendre en compte pour identifier d'éventuelles circulations temporaires d'eau souterraine à faible profondeur.

Une deuxième étape doit permettre d'identifier la lithologie du sol et ses variations latérales et horizontales sous l'emprise de la construction, et de définir l'épaisseur d'éventuelles formations argileuses susceptibles de produire du retrait-gonflement. Elle peut être réalisée à l'aide de sondages destructifs à la tarière, de l'ouverture de puits à la pelle mécanique (en dehors de l'emprise de la construction pour ne pas affecter la qualité du sol de fondation), et éventuellement au moyen d'essais mécaniques (essais pressiométriques, voire essais pénétrométriques) ou encore de reconnaissance géophysique). En outre, les essais mécaniques (pressiomètre ou pénétromètre) permettent de caractériser la portance des sols, indépendamment de l'aléa retrait-gonflement, et sont donc nécessaires vis-à-vis de l'étude du projet de construction.

Si la présence de sols argileux est avérée, cette étape doit également conduire au prélèvement d'échantillons intacts, nécessaires à la réalisation d'essais en laboratoire pertinents. Pour cela, la réalisation de sondages ponctuels à la pelle mécanique autour du projet de construction (ou de la construction sinistrée dans le cas d'une expertise post-sinistre) est une solution économique qui fournit une reconnaissance précise de la lithologie et de ses variations, ainsi que des faciès rencontrés. Ils permettent d'effectuer des prélèvements d'échantillons pour essais d'identification et mesure de teneur en eau, éléments indispensables à une description et une classification objectives des sols.

De plus, le prélèvement d'échantillons intacts est indispensable, pour pouvoir réaliser des essais mécaniques au laboratoire, seuls pertinents pour quantifier le risque de retrait-gonflement (appréciation des amplitudes) : ce prélèvement d'échantillon non remanié pourra être fait à la boîte ou au carottier perdu, dans des sondages à la pelle mécanique réalisés en dehors de l'emprise du bâtiment dans le cas des projets de construction (pour éviter les risques de décompression et de remaniement des sols de fondation). Sinon on peut recourir au sondage carotté (Illustration 3). qui permet de réaliser en principe de bons prélèvements d'échantillons intacts et à une plus grande profondeur.

À l'issue de cette phase, si le sol identifié ne présente pas de variations lithologiques latérales et verticales, l'analyse d'un seul échantillon intact au niveau de la base des fondations pourra s'avérer suffisant. En revanche, si le sol présente de fortes variations lithologiques, plusieurs échantillons intacts prélevés devront être analysés en laboratoire ou, si cela s'avère trop onéreux on s'attachera à mesurer le comportement de l'échantillon le plus argileux et le plus plastique.

Enfin, une observation de l'environnement du terrain doit permettre d'identifier d'éventuels éléments favorisant des variations saisonnières et/ou localisées de la teneur en eau du sol. Cette phase comprend notamment un examen de la végétation arborée éventuellement présente à proximité de la future construction (ou de la maison sinistrée) ou ayant été récemment supprimée par dessouchage. Elle comprend également une analyse des circulations d'eaux, superficielles et souterraines, et de l'adéquation des aménagements prévus (future surface imperméabilisée, pente des talus, systèmes de drainage, fossés, réseaux d'évacuation des eaux pluviales et des eaux usées, etc.). Cette analyse doit déborder des limites de la parcelle, si celle-ci est exiguë par rapport à l'emprise de la construction, et s'intéresser aussi aux éventuels éléments aggravants situés sur les parcelles voisines et sur le domaine public proche.



Illustration 3 – Reconnaissances par sondages carottés (à gauche) et par ouverture d'une fosse à la pelle mécanique (à droite) (BRGM)

2.6. QUELS ESSAIS SIMPLES ET QUELLES GRILLES DE CLASSIFICATION PERMETTENT DE RENDRE COMPTE DES PROPRIÉTÉS DE RETRAIT ET GONFLEMENT DES SOLS ?

Afin d'évaluer la susceptibilité d'un matériau au retrait-gonflement, une première approche simple consiste à réaliser des essais d'identification du sol. Les différentes observations issues de la bibliographie ou des études effectuées dans le cadre du projet ARGIC montrent que les corrélations entre les différents paramètres d'identification classiques et le potentiel de retrait ou de gonflement d'un sol argileux ne sont pas systématiques (annexe B18).

Néanmoins, on peut raisonnablement considérer en première approche que la prise en compte de quelques paramètres d'identification simples à déterminer fournit déjà une

appréciation relativement fiable du degré de susceptibilité du matériau vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Au moins pour une approche sommaire de l'aléa, la caractérisation de la granulométrie du matériau et de sa réactivité au travers de la valeur de bleu, semblent être les mesures minimales à mettre en œuvre.

Concernant la granulométrie, une analyse par tamisage est indispensable, au moins pour déterminer le passant à 80 μm . Elle doit de préférence être complétée par une sédimentométrie permettant d'appréhender le pourcentage d'argile (via le passant à 2 μm , également appelé C_2). Des mesures de la valeur de bleu de méthylène (V_{Bs}) fournissent, quant à elles, une première idée de l'argilosité du matériau et de la nature des argiles, via la surface spécifique des argiles. L'évaluation de la susceptibilité du sol au retrait-gonflement en cas de variation hydrique peut alors être établie en première approche à partir d'une méthode de classification (Tableau 2) comme celle décrite par Chassagneux *et al.* (1995), qui est notamment utilisée pour l'élaboration des cartes départementales d'aléa et qui semble présenter une corrélation très satisfaisante avec le potentiel de gonflement, pour les différentes formations analysées dans le cadre du projet ARGIC.

Tableau 2- Susceptibilité d'un sol argileux au retrait-gonflement déterminée à partir de V_{Bs} (in Chassagneux *et al.*, 1995)

V_{Bs}	Susceptibilité
< 2,5	Faible
2,5 à 6	Moyenne
6 à 8	Forte
> 8	Très forte

On peut également citer la norme expérimentale XP P94-011 (1999), qui propose la classification suivante (Tableau 3) à partir de l'activité de bleu de la fraction argileuse du sol, établie initialement par Lautrin (1989) :

Tableau 3 - Activité au bleu de la fraction argileuse $A_{CB} = V_{Bs}/C_2$ (norme XP P94-011, 1999)

Activité de la fraction argileuse du sol	Qualificatif
$A_{CB} \leq 3$	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

Une telle approche demandera, dans un certain nombre de cas, à être complétée par d'autres essais. Une caractérisation semi-quantitative de la composition minéralogique de la phase argileuse, par diffractométrie aux rayons X, peut s'avérer utile pour

identifier les minéraux gonflants, mais ce type d'essai est relativement lourd à mettre en œuvre et ne peut être envisagé en routine pour des reconnaissances avant construction.

En revanche, des mesures de la teneur en carbonates pourront être utilement réalisées, en particulier dans le cas de sols marneux, car les études menées dans le cadre du projet ARGIC ont clairement mis en évidence l'importance de ce paramètre, même si la forme selon laquelle se trouvent ces carbonates paraît également importante (annexes B14 et B17).

Il est conseillé par ailleurs de procéder à des mesures de la densité sèche du matériau car l'état de compacité d'un sol influe sur l'amplitude de ses déformations de retrait et de gonflement (annexe B17) : un sol lâche sera particulièrement sensible au retrait en cas de dessiccation, tandis qu'un sol plus compact présentera surtout de fortes amplitudes de déformation sous l'effet du gonflement.

La mesure de la teneur en eau et sa comparaison avec la limite de retrait mesurée sur échantillon intact, est un élément utile pour caractériser l'état hydrique du sol, mais sa représentativité est limitée à la date du prélèvement. Il convient donc plutôt de réaliser des profils hydriques (mesure de teneur en eau à différentes profondeurs) dans des situations hydrologiques contrastées (fin de l'été et fin de la période humide), afin d'apprécier les amplitudes saisonnières de variations de teneurs en eau, ainsi que les profondeurs atteintes tant par la dessiccation que par la réhumidification, à condition que l'année de mesure soit un tant soit peu représentative.

Lorsque la fraction argileuse du sol présente une susceptibilité avérée au retrait-gonflement (moyenne à très forte), des études complémentaires permettant de prévoir les déformations du sol sont indispensables, bien que trop rarement pratiquées. Deux types d'essais complémentaires doivent alors être envisagés : il s'agit de l'essai de dessiccation, qui vise à connaître le retrait-linéaire R_l et la limite de retrait effective w_{Re} , et de l'essai de gonflement, dont il existe plusieurs variantes et qui permet, selon le type d'essai, d'obtenir une valeur du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement.

Actuellement, la démarche la plus couramment mise en œuvre par les bureaux d'étude (Jacquard et Zerhouni, 2008) consiste à réaliser un essai de dessiccation sur échantillon intact et une mesure de la teneur en eau. Si la teneur en eau est proche de la limite de retrait, très peu de tassement sont attendus sur l'échantillon ; un essai de gonflement est alors généralement envisagé. Le type d'essai est alors choisi en fonction du problème posé et de manière à reproduire en laboratoire les conditions les plus proches du cas réel mais on effectue le plus souvent un essai de gonflement à déformation totalement empêchée, nommé aussi essai à volume constant (norme XP94-090-1) ou un essai de gonflement selon la norme XP94-091. L'inconvénient de ces essais de gonflement est que la pression de gonflement obtenue dépend fortement de la teneur en eau initiale de l'échantillon. De plus, l'essai à gonflement empêché ne permet pas de connaître la déformation maximale du sol en gonflement ; en revanche on peut lire l'amplitude prévisionnelle du gonflement sur le graphique déformation-pression de la norme XP P94-091, pour un état hydrique de départ donné.

Une démarche alternative consisterait à réaliser, en plus de l'essai de dessiccation sur un échantillon intact et une mesure de teneur en eau, un essai de gonflement libre pour connaître également le potentiel de gonflement du sol. Il s'agit dans ce cas de partir d'un échantillon de sol intact, prélevé et conservé de manière soignée, qui est ensuite découpé en deux tronçons, servant l'un pour l'essai de retrait et l'autre pour l'essai de gonflement. Avec cette méthode, les potentiels de gonflement et de retrait sont tous deux connus à partir de la teneur en eau initiale de l'échantillon. C'est la démarche qui est préconisée par le LCPC (annexe B17) à l'issue des travaux engagés dans le cadre du projet ARGIC et qui vont se poursuivre au-delà.

Pour cela, il est proposé d'améliorer l'essai de retrait en mesurant en continu et de manière automatisée la déformation volumique de l'échantillon de sol (et pas uniquement sa déformation axiale) ainsi que sa variation de teneur en eau au cours du séchage (Illustration 4). Un essai de retrait durant de 8 à 10 jours, le fait de pouvoir enregistrer de manière automatique les déformations et le poids de l'éprouvette et de tracer directement la courbe résultante, permet un gain significatif dans la précision de l'interprétation et dans la productivité de l'essai (Makki *et al.*, 2008). Enfin, il est envisagé de proposer également une méthode de détermination du retrait sous charge (avec un niveau de chargement équivalent à celui d'une fondation de maison individuelle, soit de l'ordre de 50 à 100 kPa, les premiers essais effectués par le LCPC paraissant assez encourageants.

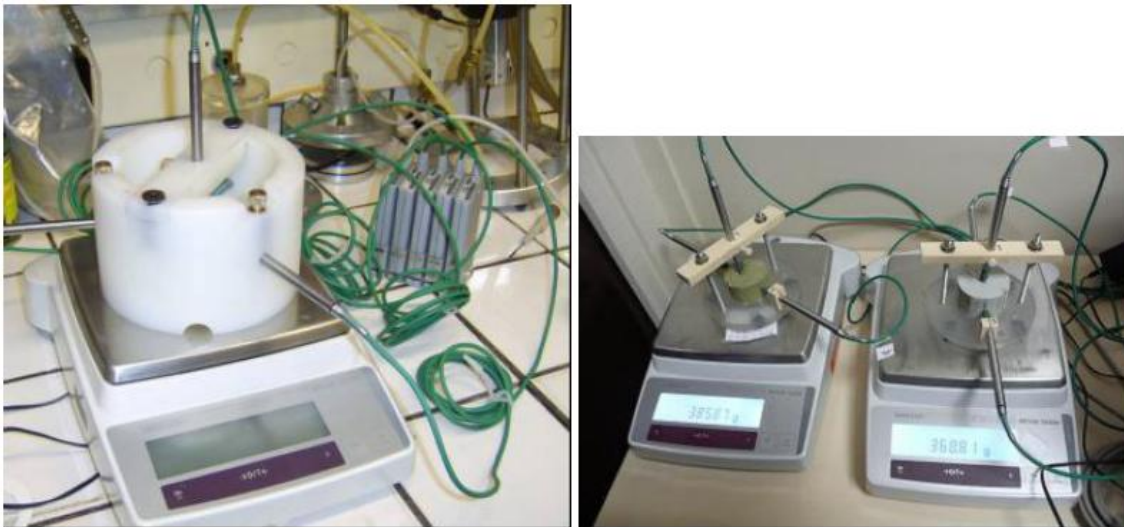


Illustration 4 – Essai de retrait avec suivi automatisé développé par le LCPC

Concernant le choix de la méthodologie utilisée pour déterminer le potentiel de gonflement, il semble acquis (annexe B1) que les essais de gonflement selon la norme XP 94-091 sous-estiment en général la pression de gonflement, contrairement aux essais de gonflement libre qui ont plutôt tendance à les surestimer, tandis que les essais de compressibilité à gonflement initial empêché fournissent généralement des pressions de gonflement intermédiaires. Dans tous les cas, la pression de gonflement dépend fortement de la teneur en eau initiale de l'échantillon. L'intérêt de procéder en parallèle à un essai de retrait et un essai de gonflement à partir d'un échantillon

prélevé à la teneur en eau naturelle, est que cela fournit à la fois le potentiel de retrait et le potentiel de gonflement à partir de l'état actuel du matériau. Une autre approche pourrait consister à réaliser l'essai de retrait à partir d'un échantillon initialement humidifié et/ou l'essai de gonflement à partir d'un échantillon desséché jusqu'à la limite de retrait, ce qui fournirait une gamme plus complète du comportement possible du sol en fonction des variations hydriques potentielles, mais cette voie reste largement à explorer.

2.7. COMMENT MESURER L'ÉVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES DANS LES TERRAINS NATURELS EN FONCTION DES SAISONS ?

Un des objectifs du projet ARGIC était d'apporter des éléments de connaissance complémentaires quant à la manière dont un sol argileux se dessèche et se réhumidifie en profondeur sous l'effet des conditions météorologiques (et de la végétation). Plusieurs sites expérimentaux ont été instrumentés à cette fin et différents systèmes d'évaluation de l'humidité dans le sol ont été testés, sur des périodes plus ou moins longues.

Dans le cadre du projet ARGIC, le but recherché était d'acquérir des données expérimentales sur l'évolution saisonnière des profils hydriques dans un sol argileux afin de caler les modélisations effectuées, destinées à relier de manière déterministe les conditions météorologiques locales avec l'évolution des teneurs en eau dans le sol à différentes profondeurs, en particulier pour aider à mieux caractériser les périodes de sécheresse exceptionnelle. L'expérience ainsi acquise pourra servir pour équiper un réseau de sites de suivi et d'alerte vis-à-vis du phénomène, afin de suivre en différents points du territoire national et dans différentes configurations climatiques et géologique l'évolution des teneurs en eau dans le sol en fonction des conditions météorologiques. Cette expérience peut aussi être utile pour procéder à des suivis sur de plus courtes périodes dans le cadre de diagnostics post-sinistres par exemple, afin de suivre la réhumidification du sol à proximité d'une maison, après mise en place de mesures de maîtrise des variations hydriques.

Les investigations menées dans le cadre du projet ARGIC et d'autres programmes de recherche connexes ont mis en évidence de nombreuses difficultés liées au suivi en continu des teneurs en eau dans les sols argileux.

Les sondes capacitatives (Illustration 5) mises en œuvre par le BRGM (annexe B3) sont robustes, de mise en œuvre relativement aisée et permettent une acquisition automatisée à pas de temps réglable avec possibilité de télétransmission.

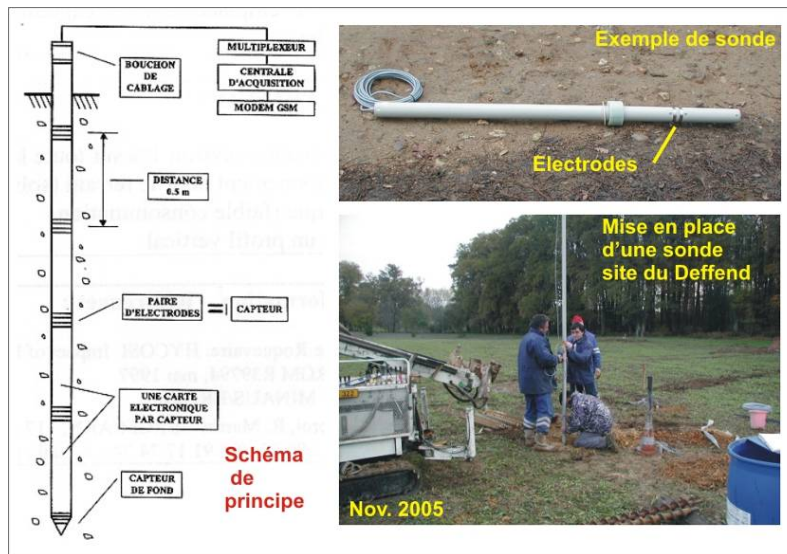


Illustration 5 – Schéma de principe d'une canne Humitub et mise en place d'une sonde sur le site du Deffend (BRGM)

Elles présentent toutefois de nombreux inconvénients qui devraient conduire à les abandonner pour ce type de sol. La fréquence trop faible du générateur de fréquence (40 MHz) pourrait notamment expliquer certaines difficultés liées à l'étalonnage de ces capteurs dans des terrains riches en argiles. Par ailleurs, le diamètre des sondes ayant été augmenté par rapport au modèle initial, afin de l'ajuster au mieux au diamètre des sondages, la sensibilité des capteurs s'avère inadaptée pour mesurer les permittivités au-delà d'une certaine teneur en eau du sol, ce qui se traduit par des fluctuations inexploitablement lorsque le sol est très humide (Plat *et al.*, 2008). Enfin, il semble que des défauts de contacts entre les électrodes et le sol apparaissent lorsque le sol se rétracte en période très sèche, ce qui se traduit par une perte temporaire de signal.

Malgré ces défauts et malgré quelques défaillances liées à l'électronique du système d'acquisition, ces capteurs ont néanmoins permis de suivre l'évolution des teneurs en eau pendant plusieurs années sur les sites de Mormoiron et du Deffend, montrant des corrélations très étroites, au moins jusqu'à 1 m de profondeur, avec les conditions météorologiques de surface, ce qui confirme qu'un sol argileux se réhumidifie assez rapidement après une forte pluie (sauf lors des orages d'été qui ont peu d'impact en profondeur) et met ainsi en évidence le rôle des écoulements préférentiels par la macroporosité.

Les autres dispositifs de suivi en continu de la permittivité du sol (et donc de manière indirecte de sa teneur en eau) qui ont été testés sont d'autres types de sondes capacitatives et des sondes TDR. Les développements menés par le LGCIE (annexe B4) de sondes TDR mises en place par fonçage sont prometteurs et ont montré une bonne pertinence lors des calibrages en laboratoire, mais l'interprétation des résultats acquis *in situ* s'avère délicate et ne semble pas permettre une utilisation opérationnelle dans l'immédiat.

En revanche, l'étude comparative réalisée par Météo-France (annexe B2) sur différentes sondes capacitatives ou TDR mises en place dans un terrain il est vrai peu argileux et à faible profondeur (Illustration 6) met clairement en évidence que plusieurs types de capteurs disponibles sur le marché sont *a priori* adaptés pour le suivi en continu des teneurs en eau dans le sol. Certains de ces capteurs ont déjà été mis en œuvre par le GHYMAC sur le site expérimental de Pessac (annexe B6) et semblent effectivement donner plutôt satisfaction.



Illustration 6 – Implantation des capteurs étudiés dans une fosse (Météo France)

Les sondes nucléaires neutron-neutron (Illustration 7) mise en œuvre par diagraphie en sondage par le LCPC (annexe B5), malgré quelques défaillances initiales et au prix d'un étalonnage soigné, se montrent très fiables pour l'acquisition de profils hydriques avec un pas de mesure particulièrement fin, de l'ordre de 10 cm. Il s'agit manifestement d'un procédé efficace pour réaliser des contrôles périodiques de profils hydriques, en particulier au moment des pics annuels de sécheresse et d'humidité afin de recalibrer les systèmes mis en place à demeure. Toutefois, ce type d'appareillage, qui exige le respect de consignes de sécurité strictes pour le transport et la manipulation des sondes radioactives, n'autorise pas une acquisition en continu ni une automatisation des mesures.



Illustration 7 - Atelier de mesures in situ de diagraphie nucléaire (LCPC)

D'autres techniques qui nécessitent aussi une intervention ponctuelle pour l'acquisition des mesures peuvent être envisagées et ont été testées dans le cadre du projet ARGIC. La plus classique consiste à réaliser des sondages avec prélèvements d'échantillons pour mesures gravitaires en laboratoire, ce qui conduit à des résultats très fiables (d'ailleurs nécessaires pour caler d'autres mesures indirectes de la teneur en eau) mais ponctuels, tant spatialement que temporellement, car la technique est destructive et relativement coûteuse.

Une autre approche (annexe B6) est la réalisation à intervalles réguliers de tomographies électriques à partir d'une série d'électrodes implantées à demeure. Les résultats de ce type d'investigation sont également prometteurs mais demandent un calage soigné par mesures directes et ne permettent pas non plus une acquisition en continu.

Il est à noter enfin que les expérimentations menées notamment dans le cadre du projet ARGIC ont montré que les mesures directes des déplacements verticaux du sol sont finalement plutôt plus faciles à mesurer et à suivre en continu sur une longue durée que les profils hydriques eux-mêmes, même si d'autres investigations restent à prévoir pour comparer l'efficacité des différents systèmes mis en œuvre (annexe B6), ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour le suivi direct du phénomène de retrait-gonflement *in situ*.

2.8. COMMENT CARACTÉRISER ET PRENDRE EN COMPTE L'INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION ?

La revue bibliographique sur les mécanismes d'interaction sol – végétation – atmosphère (annexe C1) a permis de rappeler les grands flux d'eau (précipitations, évapotranspiration, interception, absorption, évaporation), leur déterminisme climatique et leur dépendance vis-à-vis de la végétation. Ce travail de synthèse, impliquant pour la première fois des écophysiologistes spécialistes du fonctionnement hydrique des arbres, a proposé des éléments de prise en compte de la végétation plus mécanistes que les listes d'espèces dont l'agressivité pour le bâti est connue par l'empirisme et non par la physiologie.

Les observations réalisées dans différents pays ont montré que, dans les zones couvertes d'herbe, l'effet de l'évaporation dans les argiles sensibles au retrait est en général limité à la couche supérieure du sol (de 1 à 1,5 m de profondeur). La présence d'arbres et, dans une moindre mesure, de haies ou de buissons augmente sensiblement la profondeur atteinte par l'assèchement du sol, qui peut dépasser six mètres, et les racines des grands arbres sont souvent entourées d'un volume de sol desséché en permanence. La croissance d'un arbre peut donc provoquer un retrait et un tassement durables du sol. Inversement, quand un arbre est enlevé, l'annulation progressive de la dessiccation peut provoquer un soulèvement différé.

Certains arbres sont connus pour leurs effets défavorables sur les constructions. Le Tableau 4 (Driscoll, 1983) donne des indications sur les risques de dommages dus à différentes variétés d'arbres. Il a été établi en Angleterre sur la base d'une étude

purement empirique et est déduit de l'observation statistique d'un échantillon de maisons sinistrées bâties à proximité d'arbres.

Tableau 4 - Risques associés aux types d'arbres les plus dangereux pour les constructions (Driscoll, 1983)

Espèce	Hauteur maximale H (m)	Distance minimale recommandée entre l'arbre et la construction (par rapport à H)
Chêne	16-23	1 H
Peuplier	24	1 H
Tilleul	16-24	0,5 H
Frêne commun	23	0,5 H
Platane	25-30	0,5 H
Saule	15	1 H
Orme	20-25	0,5 H
Aubépine	10	0,5 H
Érable/sycomore	17-24	0,5 H
Cerisier/prunier	8	1 H
Hêtre	20	0,5 H
Bouleau	12-14	0,5 H
Cyprès	18-25	0,5 H

Ces valeurs sont empiriques en ce sens que, plus que la hauteur de l'arbre, c'est sa surface foliaire qui entre en compte pour ses besoins en eau, et donc son impact sur le dessèchement du sol. Ainsi un arbre court mais à houppier très développé peut consommer autant, voire plus d'eau qu'un arbre haut et comprimé le long d'une façade par exemple.

La contribution au projet ARGIC des écophysiologistes des arbres a notamment permis de rappeler les points suivants :

- les différences de profondeur d'enracinement entre un gazon et un arbre,
- la capacité d'extraction de très nombreux arbres à des potentiels hydriques très négatifs (en dessous du point de flétrissement permanent),
- les différences de volume global et de dynamique saisonnière de consommation en eau entre une végétation herbacée et les arbres.

La phénologie de l'espèce, en particulier la persistance (résineux notamment, ou espèce sempervirente) ou non (espèces décidues) de son feuillage et sa surface projetée de feuilles (appelée indice foliaire), sont les deux déterminants majeurs de la consommation en eau de la végétation. De plus, il a été établi que les propriétés physiques et hydrodynamiques du sol constituent, avant l'espèce d'arbre considéré, le facteur principal qui détermine la distribution des racines et leur accès aux couches argileuses. Ainsi, aucune démonstration d'une relation entre hauteur de l'appareil

aérien et profondeur ou extension latérale de l'enracinement n'est établie. En effet, la brutalité de la transition entre couches de sols non argileuse et argileuse, l'aptitude de la couche argileuse à provoquer une nappe temporaire, sa masse volumique apparente sont des éléments rédhibitoires pour l'enracinement de certains arbres (Zapater *et al.*, 2008) : dans ce cas, leur impact sur la propagation de la sécheresse à la couche d'intérêt géotechnique est faible. La présence de quelques 5 à 10 % des racines fines d'un arbre dans la couche argileuse suffit à extraire de l'eau en période estivale et à amplifier voire déclencher les phénomènes de retrait-gonflement des argiles.

En résumé, les recommandations suivantes en termes de choix de verdissement peuvent être formulées, afin d'éviter de dessécher durablement, profondément et intensément un sol à proximité d'un bâti :

- préférer une végétation herbacée ou arbustive à une végétation arborescente,
- préférer une espèce à feuillage caduque plutôt qu'une espèce résineuse,
- parmi les résineux, préférer des pins aux autres résineux (sapin, épicéa, douglas, thuya),
- préférer des espèces sensibles à la sécheresse, dont la consommation en eau sera limitée en cas de sécheresse intense et prolongée (soit par régulation stomatique, soit par chute anticipée des feuilles),
- limiter le développement de la surface foliaire des arbres par une taille régulière,
- éviter les couverts continus qui interceptent fortement les pluies et donc amplifient l'intensité de la sécheresse du sol et retardent sa réhydratation.

2.9. QUELS CRITÈRES PEUT-ON UTILISER POUR DÉFINIR LES SÉCHERESSES EXCEPTIONNELLES ?

En France, l'indemnisation des sinistres liés au retrait-gonflement et intervenant au-delà de la période de garantie décennale relève quasi exclusivement du régime des catastrophes naturelles, qui exige la reconnaissance préalable, par les pouvoirs publics, de conditions climatiques exceptionnelles. Or les critères qui fondent cette reconnaissance ont fortement évolué depuis 1989, sans être jusqu'à présent solidement étayés (annexe C9). Les observations effectuées dans le cadre du projet ARGIC conduisent certes à valider globalement la démarche actuelle, qui permet de reconnaître l'état de catastrophe naturelle sécheresse à partir de la vérification de la présence de sols argileux sur la commune (au travers des cartes d'aléa établies à l'échelle départementale, éventuellement complétées par des observations ponctuelles à base de sondages) et de l'identification d'un l'état hydrique anormalement sec du sol, en fonction des conditions météorologiques. Plusieurs autres approches (dont l'interférométrie radar, qui pourrait permettre de suivre directement les mouvements saisonniers de tassement et de gonflement du sol et de certains bâtiments) ont été évoquées et font l'objet de développements méthodologiques mais ne semblent pas de nature à pouvoir être utilisées de manière opérationnelle et à l'échelle nationale à brève échéance.

Néanmoins, au vu de l'état actuel des connaissances sur le déclenchement du phénomène, les critères en vigueur depuis janvier 2008 souffrent de trois défauts principaux :

- l'état de déficit hydrique du sol est évalué à partir d'un modèle à double réservoir qui prend en compte les données météorologiques acquises dans un réseau constitué seulement d'une centaine de stations relativement espacées les unes des autres et intègre une profondeur de sol probablement trop superficielle,
- les périodes reconnues par les deux critères actuellement en vigueur (janvier à mars ou juillet à septembre) sont trop courtes et ne correspondent pas à la réalité du phénomène qui est fortement évolutif avec parfois un décalage important entre l'apparition de conditions météorologiques défavorables et la fissuration du bâtiment (Gouvenot et Modaresi, 2007),
- le critère de déficit hydrique hivernal ne paraît pas pertinent car, en climat tempéré, il semble que la plupart des sinistres se produisent en période sèche (par suite d'une perte d'appui sous une partie des semelles de fondation, sous l'effet du tassement différentiel du sol d'assise) alors que l'hiver est la période où l'humidité du sol est maximale, même les années sèches.

Concernant le premier point, plusieurs améliorations ont été proposées dans le cadre du projet ARGIC, afin de mieux rendre compte de la propagation en profondeur du front de dessiccation et de la réhumidification en fonction des conditions météorologiques. Cependant, et au moins en première approche, on peut considérer que ce point devrait être au moins partiellement réglé par la mise en œuvre prochaine, par Météo-France, de la chaîne de calcul Safran-ISBA-Modcou (Soubeyroux et Blanchard, 2008) afin de calculer un indice d'humidité du sol (SWI¹) sur la base d'un maillage régulier et relativement fin (8 km x 8 km) du territoire national, en supposant des conditions uniformes de couvert végétal (engazonné).

Bien qu'encore en cours de validation par Météo-France, cette démarche devrait permettre de répondre en partie à certaines des insuffisances de la méthode actuellement en vigueur, quitte à améliorer progressivement cette évaluation spatialisée du déficit hydrique des sols, soit en la simplifiant (pour la rendre plus intuitivement compréhensible, en particulier par les sinistrés), soit au contraire en intégrant d'autres facteurs considérés comme prépondérant dans le processus, parmi lesquels le ruissellement, la présence de macroporosité dans le sol (notamment au travers des fentes de retrait apparues en période sèche) et surtout l'impact des arbres.

Concernant les autres points qui suscitent la critique des critères actuellement utilisés pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse, la question est plus délicate et mérite des évolutions sensibles. Ces critères devront de toute façon nécessairement être ajustés lorsque la détermination du déficit hydrique des sols se

¹ SWI : Soil Wetness Index, rapport de la différence entre l'humidité instantanée intégrée des 3 couches du sol et les valeurs du point de flétrissement et de la capacité au champ : lorsque le SWI est voisin de 1, voire supérieur à 1, le sol est humide et tend vers la saturation ; lorsqu'il tend vers 0, voire passe en dessous de 0, le sol est très sec et en état de stress hydrique

fera à partir de l'indice SWI uniforme calculé par Météo-France et non plus en partant du bilan hydrique actuel sur la base d'un modèle simplifié à double réservoir. Il est donc proposé de mettre à profit le laps de temps disponible avant l'entrée en application de ce nouveau modèle pour redéfinir des critères plus adaptés à la réalité de la sinistralité.

Deux voies sont envisageables pour caractériser des critères de reconnaissance à la fois objectifs et représentatifs. La première est basée sur l'analyse statistique des dates de survenance des sinistres, la seconde sur la modélisation des déformations verticales de tassement et de gonflement des sols argileux sous l'effet de leurs variations de teneur en eau. Les deux voies paraissent complémentaires et méritent d'être menées de front en vue d'une validation réciproque.

L'analyse statistique des dates de survenance des sinistres et leur corrélation avec les conditions météorologiques a déjà été explorée mais bute sur l'absence de bases de données fiables et exhaustives. Pourtant, si l'on se fie aux évaluations effectuées par les professionnels de l'assurance et relayées tant par la FFSA (Fédération française des sociétés d'assurance) que par la CCR (Caisse centrale de réassurance), le nombre de maisons individuelles sinistrées en France par l'effet du retrait-gonflement atteint plusieurs centaines de milliers depuis 1989, ce qui devrait être suffisant pour établir des corrélations statistiques.

Malheureusement, la localisation et la date de survenance de ces sinistres, ainsi que les éléments permettant d'évaluer les conditions locales de vulnérabilité de la construction et de réactivité du sol d'assise, sont rarement connus. Dans le cadre de l'établissement des cartes d'aléa retrait-gonflement des sols argileux, le BRGM a recensé et géoréférencé plus de 96 000 sinistres, mais la plupart d'entre eux ne sont pas datés avec précision et sont mal caractérisés. Pour progresser dans une telle approche statistique, il est indispensable d'élaborer, à l'échelle nationale, une base de données actualisée de tous les sinistres retrait-gonflement déclarés, qu'ils fassent ou non l'objet d'une indemnisation, avec renseignement de la date d'apparition et d'aggravation des désordres mais aussi caractérisation du sol, du bâti et de l'environnement proche. Cette nécessité est d'autant plus urgente que les critères actuels de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse, en réduisant considérablement les périodes éligibles à indemnisation, pourraient conduire à introduire des biais systématiques dans les déclarations de sinistres.

Concernant la modélisation des déformations des sols argileux en fonction des conditions météorologiques locales, des avancées significatives ont été effectuées dans le cadre du projet ARGIC avec la mise en œuvre de logiciels couplés thermo-hydro-mécaniques (annexes C6 et C7). Au moins à l'échelle locale et sous réserve d'une caractérisation adéquate des paramètres hydriques et mécaniques du sol, ces modèles permettent de rendre compte de manière relativement satisfaisante des mouvements du sol sous l'effet des conditions météorologiques.

Avant de les utiliser pour une évaluation globale de ces mouvements du sol sur l'ensemble du territoire national et pour des longues durées, des études paramétriques approfondies seront nécessaires en vue d'une part de simplifier ces approches

déterministes et d'autre part d'en extrapoler les résultats au-delà des sites expérimentaux ayant servi à leur validation. Pour cela, il est indispensable d'avoir accès à des données expérimentales complémentaires afin de poursuivre le calage de ces modèles dans différents cas de figures et sur des durées plus longues. C'est pourquoi il est préconisé de multiplier les observations *in situ* en équipant une quarantaine de sites judicieusement répartis sur le territoire national pour intégrer des situations géologiques, climatiques et de couvert végétal variées. Une dizaine de tels sites a d'ores et déjà été identifiée mais seule une minorité est équipée. L'instrumentation de ces sites doit permettre l'acquisition de données météorologiques locales ainsi que le suivi périodique des teneurs en eau et déplacement verticaux du sol à différentes profondeurs dans les 3 à 5 premiers mètres. L'acquisition doit se poursuivre sur une durée minimale de 5 ans pour obtenir les données nécessaires pour valider les modélisations, mais il est recommandé un équipement durable pour certains de ces sites afin de constituer un réseau permanent d'alerte et de calage.

2.10. DE QUELS ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES DISPOSE-T-ON SUR LES MESURES DE RÉPARATION ET DE PRÉVENTION ?

De manière à pouvoir évaluer le coût absolu et relatif des mesures de prévention et de réparation applicables aux maisons individuelles, il convient de définir le coût d'un bien standard.

Celui-ci comporte deux composantes principales :

- le coût de la construction de l'habitation² qui varie peu en fonction de la région d'implantation : 100 k€ environ, incluant les frais divers (étude, raccordement, frais de mutation, etc.) ;
- le coût du terrain³ (Illustration 8) qui s'étale de 12 à 150 k€ en fonction de l'implantation et pour lequel de fortes variations existent au sein d'une même région.

² Description de l'habitation considérée : Construction de plain pied - Façade droite - Architecture simple - Tuiles normales 10/m² - Pas de sous-sol - Mur enduit - Combles perdus - 100 à 110 m² habitables - 3 chambres, une salle de bain, 1 WC - Finition normale avec carrelage - Chauffage électrique par convecteurs - Pas de cheminée, pas de cuisine équipée - Pas d'équipement domotique

³ Il s'agit d'un terrain de surface moyenne 800 à 900 m², correspondant à la moyenne nationale.

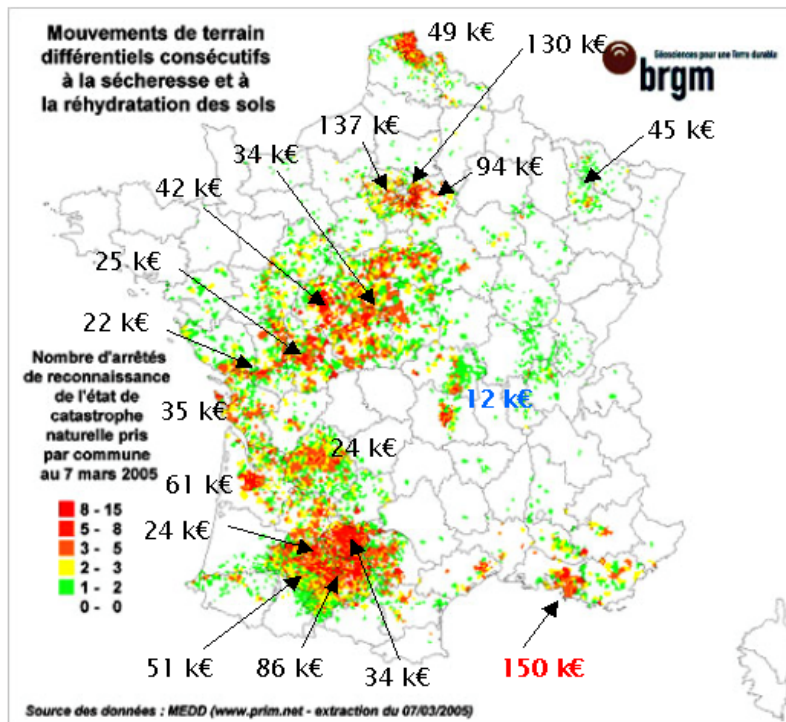


Illustration 8 - Coût des terrains en fonction de l'implantation (INERIS)

Sur cette base, il est possible d'évaluer tout d'abord le coût des mesures constructives forfaitaires (Illustration 9) définies dans le cadre des PPRN. On rappelle qu'elles concernent principalement les fondations (qui doivent être armées, bétonnées à pleine fouille, et ancrées de manière homogène à une profondeur minimale comprise entre 0,80 et 1,20 m selon le niveau d'aléa identifié), la structure (avec chaînages et joints de rupture obligatoires) et la maîtrise des eaux dans le sol (mise en place d'un système périphérique anti-évaporation, éloignement des rejets d'eaux pluviales et usées, des drains, des puits et des arbres, etc.).

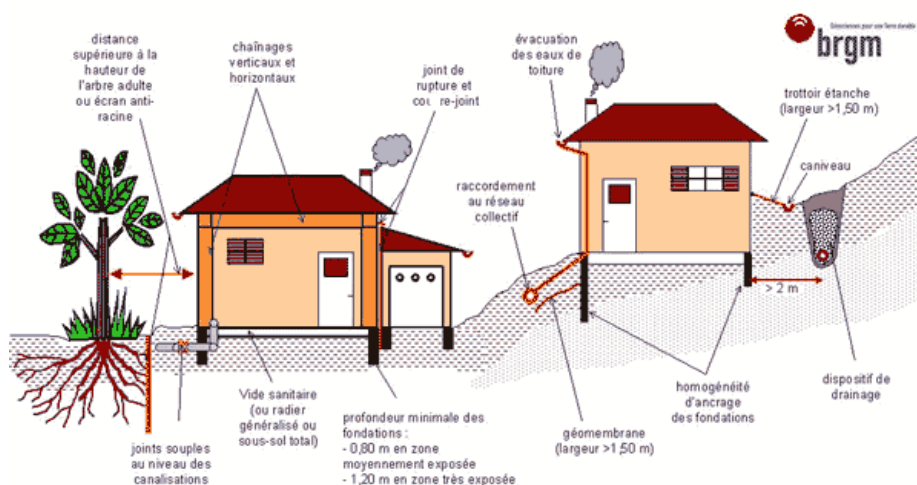


Illustration 9 - Principales préconisations émises dans le cadre des PPRN (BRGM)

Ainsi, le surcoût occasionné par le respect de ces prescriptions forfaitaires a été évalué dans le cadre d'une étude menée à la demande du ministère en charge de l'environnement (Exbrayat, 2001) à environ 5 à 8 % du coût de la construction de l'habitation seule, soit 5 à 8 k€ environ, l'élément le plus coûteux étant le dispositif périphérique anti-évaporation.

Il a également été possible d'évaluer le coût des trois solutions techniques, dont la réalisation de radiers en demi-gaufre (Illustration 10), relatives aux améliorations des fondations de l'habitation (Tableau 5).

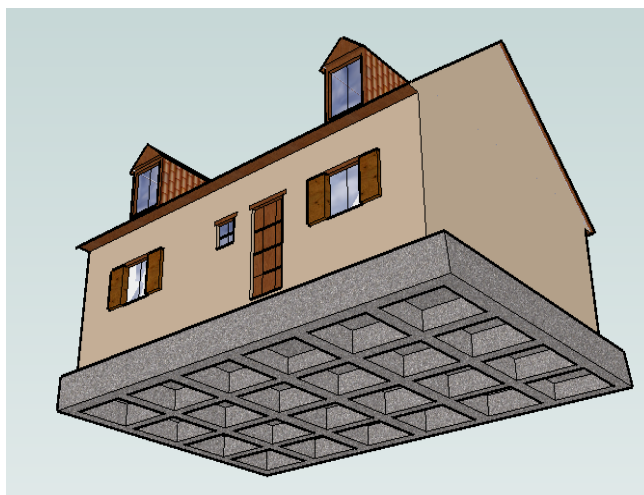


Illustration 10 – Schéma de principe d'un radier en demi-gaufre (INERIS)

Tableau 5 - Tableau comparatif des trois propositions d'amélioration visant les fondations (INERIS)

Solutions	Avantages	Inconvénients	Coût par m ² (€/m ²)	Coût relatif (k€)	% du bien Min	% du bien Max
Radier en demi-gaufre	• Limiter la déformation localisée de l'habitation ; • Quantité de béton inférieure à un radier classique « plan » de même efficacité ; • Existence de noyaux préfabriqués ou de coffrages biodégradables.	• Mise en œuvre peu courante en France. • Quantité d'acier importante ; • Utilisation d'un béton non « standard » ; • N'empêche pas l'habitation de subir un mouvement d'ensemble ; • Chainage complet renforcé de la structure • Garantie constructeur ?	250	25 k€ -10 k€ = ~15 k€	6%	13%
Sous-sol complet	• Extraire sur une épaisseur pluri-métrique le matériau argileux à l'origine des désordres ; • Transférer les fondations de l'habitation vers une zone moins impactée par les phénomènes de retrait-gonflement ; • Disposer d'un volume utile supplémentaire.	• Solution non recommandée dans les zones soumises à des mouvements de terrain de type affaissement minier ; • Nécessite de réaliser une fondation liaisonnée sous le sous-sol (ou un système poutre-voile).	150	15 k€	6%	13%
Fondation profonde	• Transmission très réduite de la déformation du sol vers la maison ; • Impact limité d'un approfondissement de l'effet de la sécheresse.	• Nécessite des moyens de mise en œuvre plus conséquents ; • Etude de sol jusqu'à une profondeur plus importante ; • Prévoir un réseau de longrines dimensionnées en fonction de l'espacement des pieux.	250	25 k€	10%	22%

-10 k€ = coût de la fondation classique déjà intégré dans le prix du bien

Les avantages, inconvénients et coûts de ces trois propositions sont également précisés dans ce tableau dont les deux dernières colonnes représentent le coût en pourcentage de la valeur du bien.

On constate ainsi que ces solutions techniques peuvent augmenter le coût du bien de 6 à plus de 20 % selon les cas.

Le coût réel des réparations effectuées sur des maisons endommagées par les effets du retrait et du gonflement des argiles est, quant à lui, difficile à évaluer, faute de données fiables. Les sociétés d'assurance indiquent que la valeur moyenne des sinistres indemnisés dans le cadre de la procédure de catastrophe naturelle est légèrement supérieure à 10 k€ (11,5 k€ en intégrant le montant de la franchise restée à la charge de l'assuré). Dans le cadre de la procédure exceptionnelle mise en place au titre de la Loi de finance 2006 pour indemniser les cas les plus graves de désordres survenus au cours de l'été 2003 dans des communes qui n'ont pu bénéficier de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse, le rapport au gouvernement (Boutin, 2007) fait quant à lui état d'un montant global de 338 millions d'euros demandés par les préfectures concernées, pour un total de 12 079 dossiers reconnus éligibles, ce qui, en intégrant l'abattement de 1 500 € resté à la charge du sinistré, représente un montant moyen de 29,5 k€ par dossier. Enfin, les données recueillies par l'Agence Qualité Construction (base 2007) indiquent un coût moyen de sinistre de l'ordre de 35 k€.

Les analyses effectuées par les LRPC d'Angers et de l'Ouest Parisien sur les dossiers de demande d'indemnisation spéciale pour la sécheresse de 2003 et pour les demandes de déclaration de catastrophe naturelle de la sécheresse de 1990 n'ont pas donné de valeurs cohérentes du coût des travaux de réparation mais indiquent que le coût moyen d'une reprise en sous-œuvre serait de l'ordre de 75 k€. La connaissance des enjeux économiques de la prévention et de la réparation des dégradations dues aux sécheresses ne pourra progresser que si l'on met en place un système national exhaustif de collecte des données techniques et économiques relatives aux sols et aux constructions ainsi qu'aux travaux de confortement réalisés.

2.11. CONCLUSION

Sur un plan strictement opérationnel, les travaux de recherche appliquée menés pendant trois ans par l'ensemble des partenaires du projet ARGIC ne permettent pas de répondre à l'ensemble des questions que se posaient tant les pouvoirs publics que les professionnels de la construction et les assureurs. Néanmoins, ce programme a permis d'apporter des éléments de réponse sur plusieurs points et d'identifier des pistes d'action prioritaires à mettre en œuvre.

Concernant la vulnérabilité des maisons individuelles vis-à-vis du risque de retrait-gonflement des sols argileux, les observations (encore partielles) effectuées sur maquette en vraie grandeur confirment qu'un bâtiment construit selon les règles de l'art présente un comportement satisfaisant en cas de tassement différentiel, même sévère, sur la moitié de son périmètre, l'expérimentation devant cependant se poursuivre avant

d'en tirer plus ample conclusion. L'analyse de nombreux dossiers de sinistres et l'examen des expériences étrangères confirme globalement la pertinence des mesures constructives préventives habituellement préconisées, notamment au travers des Plans de prévention des risques qui couvrent déjà près de 1 000 communes, même si un effort de recherche reste nécessaire pour hiérarchiser ces mesures en termes de rapport coût/efficacité. Se fait jour en particulier la nécessité de constituer une base de données exhaustive et documentée des sinistres recensés, car les éléments actuellement disponibles restent trop fragmentaires pour évaluer la pertinence économique et technique de certaines mesures préventives. Quant aux solutions éventuelles pour diminuer la vulnérabilité des constructions existantes, les recommandations issues du projet ARGIC portent surtout sur l'intérêt de mesures visant à limiter les variations de l'état hydrique du sol près des maisons.

Concernant la prédisposition des sols au retrait-gonflement, le projet a conduit à caractériser de manière très fine, in situ et en laboratoire, une douzaine de formations géologiques réputées sujettes au phénomène. Les très nombreuses analyses effectuées à cette occasion ont permis d'évaluer de manière comparative la pertinence des différentes techniques de caractérisation de la susceptibilité d'un sol au retrait-gonflement ainsi que celle des nombreuses classifications proposées dans la littérature. Des propositions concrètes sont ainsi formulées pour optimiser les investigations géotechniques dans le cadre d'une étude avant construction ou d'un diagnostic post-sinistre. Par ailleurs, le projet ARGIC a permis de poursuivre, sur plusieurs sites, l'acquisition de données concernant l'évolution, en fonction des conditions météorologiques, des teneurs en eau et des déformations verticales dans des sols argileux, confirmant ainsi les ordres de grandeur à attendre et fournissant des éléments de calage pour des modélisations numériques. Ce programme, grâce à la synergie entre organismes de recherche, a permis de tester différentes approches et de faire des propositions en vue d'équiper un réseau de sites de mesures et d'alerte.

Ces observations expérimentales in situ, qui restent donc à poursuivre et à généraliser, ont d'ores et déjà permis d'apporter des éléments utiles quant à la compréhension des mécanismes de déclenchement du retrait-gonflement. Pour ce qui est de la question toujours en suspens d'une objectivation des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse, l'association de météorologues, de géotechniciens et de spécialistes du comportement des arbres a permis de mettre en œuvre des modélisations numériques qui prennent véritablement en compte l'interface sol-air-végétation. Ces travaux demandent à être poursuivis et calés par la poursuite en parallèle de l'acquisition de données expérimentales in situ, mais les outils utilisés semblent rendre compte de manière relativement satisfaisante des phénomènes de tassement d'un sol argileux pendant les périodes de sécheresse à proximité d'une maison. Il reste cependant à acquérir des données plus fiables sur la date de survenance des sinistres afin de caler des critères objectifs pour la procédure de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, ce qui, là encore, passe par la constitution d'une base de données exhaustive à l'échelle nationale.

3. Résultats et perspectives scientifiques

3.1. INTRODUCTION

Les principales observations et les résultats scientifiques acquis dans le cadre du projet ARGIC sont détaillés dans les différentes annexes techniques du présent rapport. Seuls quelques points jugés particulièrement importants sont présentés – brièvement- dans les paragraphes suivants. Il ne s'agit pas d'un état des lieux des connaissances sur les différents sujets évoqués, pour lequel on se réfèrera plutôt aux synthèses bibliographiques réalisées dans le cadre du projet et disponibles notamment dans les annexes A5, A6, B1 et C1. Il ne s'agit pas non plus d'un résumé de l'ensemble des expérimentations et calculs effectués au long du projet par les treize organismes partenaires. L'objectif de cette partie est seulement de mettre l'accent sur certains points jugés particulièrement importants parce qu'ils font débat et méritent des développements scientifiques ultérieurs afin de mieux répondre aux questions que se posent, non seulement la communauté scientifique, mais aussi les professionnels de la construction et les pouvoirs publics, sur un sujet qui reste complexe. Dans les paragraphes suivants seront donc évoqués, d'une part les avancées obtenues dans le cadre du projet ARGIC, mais surtout les questions qui restent en suspens et sur lesquelles des investigations complémentaires sont à prévoir.

3.2. RELATIONS ENTRE L'EAU ET LES MINÉRAUX ARGILEUX

Dans un minéral argileux humide, les principales forces qui coexistent sont (van Damme, 2001) :

- les forces capillaires (attractives) qui augmentent de façon non linéaire et tendent asymptotiquement vers un maximum lorsque la succion augmente ;
- les forces (attractives) de van der Waals, à très courte distance ;
- les forces d'interaction entre doubles couches formées à la surface des particules. Ce sont généralement des forces de répulsion si la distance entre particules n'est pas trop faible mais elles peuvent devenir attractives dans le cas où les particules se rapprochent beaucoup et selon la nature des cations ;
- les forces d'hydratation des ions.

Dans le cas des smectites, des études récentes de simulation par dynamique moléculaire montrent qu'il existe trois types d'eau :

- de l'eau liée aux cations ;
- de l'eau piégée dans la cavité hexagonale de l'argile ;
- de l'eau « mobile ».

Ces études indiquent que les ions Mg^{2+} forment des complexes directement liés à la surface oxygénée de l'argile tandis que les ions Na^+ forment des complexes dans lesquels une molécule d'eau s'interpose entre le cation et la surface (van Damme, 2001). Elles montrent également que le réseau de liaisons hydrogène des molécules d'eau interfoliaire n'est que faiblement perturbé, mais que la densité de cette eau est notablement augmentée. Dans ces conditions, les modélisations indiquent que l'expansion de la smectite est essentiellement due aux forces d'hydratation des ions et de la surface lors de l'humidification qui leur permet de surmonter les interactions électrostatiques et les forces de van der Waals. Ceci n'est pas possible au sein des cristallites de minéraux à très forte charge, où l'attraction électrostatique est particulièrement forte (illites). Lorsque l'hydratation a permis de passer au-delà de l'expansion par deux ou trois couches de molécules d'eau, ce sont les mécanismes liés aux doubles couches électriques qui prennent le relais. Par la suite, dans le cas des smectites calciques, qui sont beaucoup plus répandues dans la nature que les smectites sodiques, ce sont les forces de corrélations ioniques qui l'emportent et l'expansion sera limitée à l'écartement obtenu grâce aux forces d'hydratation. Le nombre de couches d'eau semble également relativement indépendant de la contrainte totale appliquée au sol - entre 0 et 200 kPa - (Souli *et al.*, 2008).

Tant que le sol est non saturé, les forces capillaires s'opposeront aux déformations volumiques du sol lors de l'humidification. Fleureau *et al.* (1993) ont constaté en effet que l'essentiel des déformations d'une montmorillonite calcique se produisait lorsque la succion devenait inférieure à 100 kPa.

Les sols naturels possèdent généralement une texture complexe dans laquelle les argiles à caractère smectitique, qu'elles soient pures ou interstratifiées, ainsi que les mélanges argileux associant plusieurs types d'argiles, forment des agrégats hiérarchisés, plus ou moins solides. Dans ces conditions, ce sont d'abord les propriétés de la surface « externe » de l'assemblage ainsi que la solidité de ce dernier qui sont à prendre en compte. Pour autant que la rigidité de l'assemblage soit suffisante et que l'eau qu'il contient soit fortement liée, on peut penser que les interactions entre deux assemblages seront du même type que les interactions entre objets compacts (friction et force capillaire), en y ajoutant une contribution des forces d'origine électrostatique d'autant plus importante que la taille de l'agrégat sera faible et donc que sa surface spécifique externe sera élevée (van Damme, 2001). La texture du sol est encore plus complexe dans le cas d'un sol carbonaté où d'autres interactions peuvent exister entre les ions et la calcite.

Lors de l'humidification ou du séchage d'un matériau argileux, on observe de nombreuses modifications de la texture du sol aux différentes échelles, qui traduisent la complexité des interactions entre le sol et l'eau. Celles-ci dépendent de la composition, de l'état et du mode de fabrication du sol ainsi que des ions présents. Par exemple, lors de l'hydratation d'une montmorillonite calcique initialement compactée à l'optimum Proctor normal, Souli *et al.* (2008) ont noté que c'était essentiellement les macropores inter-agrégats qui participaient au processus de gonflement global du sol. Par ailleurs, la diffraction des rayons X a montré qu'il se produisait une augmentation de l'anisotropie du matériau lors de l'humidification sous charge, liée à la diminution de la succion. Ce résultat a été confirmé par des observations au MEB, qui ont montré

que les particules se regroupaient pour former des agrégats qui s'orientaient parallèlement les uns aux autres. Dans tous les cas, la contrainte extérieure appliquée au sol joue un grand rôle dans l'agrégation des particules et des feuillets, qui se traduit par une variation de la surface spécifique. D'une façon générale, ce sont tous les paramètres microstructuraux du sol qui sont affectés par le gonflement et le retrait.

3.3. CARACTÉRISATION DE LA MICROSTRUCTURE DES SOLS ARGILEUX

Le caractère argileux des sols sensibles au retrait-gonflement a été rappelé, mais il faut aussi mettre l'accent sur l'importance des surfaces spécifiques développées par les matériaux concernés et considérer les conditions d'accès des molécules d'eau dipolaires aux sites d'adsorption. Sur ces deux aspects, à la fois la nature minéralogique des constituants (types de minéraux argileux et cristallinité, présence de colloïdes, etc.) et la microstructure du sol argileux (géométrie du milieu poreux, familles dimensionnelles de pores, structuration en micro-agrégats du matériau, etc.) jouent un rôle primordial.

Signalons tout de suite que les questions de structure (plus que de microstructure) en rapport avec les interactions eau-matériau doivent aussi être considérées à l'échelle de la formation géologique et de la parcelle, échelle de référence pour les interactions ouvrage-terrain. La structuration horizontale et verticale de la formation géologique, qui présente toujours une variabilité de lithofaciès dans l'espace, est à l'origine de cheminements préférentiels pour les écoulements d'eau et les transferts hydriques. De fait, les transferts hydriques sont largement contrôlés par 1) l'interface entre l'atmosphère et la surface du sol superficiel, mais aussi 2) les nombreuses interfaces au sein de la formation géologique entre des niveaux de perméabilités variables, et 3) des interfaces que l'on pourrait qualifier de pénétratives, représentées par l'envahissement de la formation par le système racinaire d'une végétation arbustive ou arborée, lorsque celle-ci est présente non loin du bâti.

Revenons à la caractérisation de la microstructure, à l'échelle de l'échantillon. Il faut noter que les phénomènes d'adsorption et de désorption relèvent de la physico-chimie des surfaces et qu'on ne saurait donc étudier, pour les applications visées, la géométrie du milieu poreux indépendamment de la nature minéralogique des éléments constitutifs du matériau, à l'origine de ces surfaces. De plus, considérant le développement des suctions dans les sols, résultant des phénomènes d'adsorption-désorption et directement à l'origine des processus de retrait gonflement, il faut aussi caractériser la déformabilité du matériau, qui s'explique en grande partie par la microstructure : état de densité, agencement des agrégats et distribution de la taille des pores, liaisons de nature physico-chimique entre agrégats, etc. Cette déformabilité est ainsi directement contrôlée par la microstructure, la nature minéralogique des constituants intervenant aussi.

Les paramètres suivants doivent être spécialement analysés pour caractériser la microstructure et, de ce fait, la sensibilité d'un sol argileux au retrait-gonflement :

- taille des constituants et argilosité du matériau (teneur en particules de taille inférieure à 2 µm) ;

- nature des minéraux argileux (phyllosilicates) présents parmi les particules inférieures à 2 μm , teneur en phyllosilicates gonflants (smectites, interstratifiés, etc.) ;
- teneur en matière organique ;
- teneur en colloïdes ;
- caractéristiques géométriques du milieu poreux, par études porosimétriques et observations au microscope électronique à balayage (MEB) ;
- teneur en carbonates et rôle de ces carbonates dans la microstructure : d'une part, les carbonates peuvent contrarier l'accès des molécules d'eau aux sites d'adsorption et, d'autre part, les carbonates renforcent généralement les caractéristiques de déformabilité du matériau ;
- caractéristiques d'état des matériaux, en rapport avec la microstructure :
 - indice des vides, en se référant à l'étendue possible de ce paramètre : le matériau est-il du côté du pôle « état serré » ou du pôle « état lâche » et quelle est alors sa réserve de déformation possible au retrait ou au gonflement ? Un indice de densité relative permettrait de caractériser cet état ;
 - teneur en eau, en se référant à l'étendue possible de ce paramètre : le matériau est-il du côté du pôle « état sec » ou du pôle « état saturé » ? L'indice de consistance permet de caractériser cet état.

À titre d'illustration, considérons le cas des *Argiles vertes de Romainville* et celui des *Marnes bleues d'Argenteuil*, étudiées au laboratoire par Armines - Centre de Géosciences (annexe B13), sous trois états : matériaux géologiquement intacts (prélevés en carrière, au sein de la formation), matériaux de colluvions monogéniques (ayant subi divers remaniements naturels, suite à des processus alternés de retrait-gonflement ou des processus de fluage), ou matériaux remaniés au laboratoire pour lesquels les conditions de remaniement sont à préciser (pour les études réalisées : remaniement manuel sur plaque de marbre, le matériau étant porté à sa teneur en eau de liquidité, puis séchage jusqu'au retour à l'état initial de teneur en eau).

L'analyse de la microstructure par porosimétrie au mercure et microscope électronique à balayage a permis de mettre en évidence (Illustration 11) :

- un arrangement matriciel de la microstructure et une anisotropie du matériau intact, avec un arrangement préférentiel des minéraux parallèlement au litage, pour les deux formations à l'état naturel : *Argiles vertes de Romainville* et *Marnes bleues d'Argenteuil*. Cette anisotropie favorise, pour les matériaux intacts, les transferts hydriques horizontaux par rapport aux transferts hydriques verticaux ;
- la présence de carbonates, dont la répartition diffuse dans la matrice contribue à former un squelette semi-rigide, contrariant les processus de retrait-gonflement des matériaux intacts. De ce fait, les *Marnes bleues d'Argenteuil*, qui possèdent une forte teneur en carbonates, sont moins sensibles à ces processus que les *Argiles vertes de Romainville*. Cependant, le remaniement au laboratoire altère la microstructure et atténue fortement la différence de comportement entre ces deux matériaux (Tableau 6). De ce fait, pour ces matériaux remaniés au laboratoire, la sensibilité au retrait-gonflement est contrôlée principalement par la

proportion et la nature des minéraux argileux, les carbonates ne jouant plus qu'un rôle secondaire ;

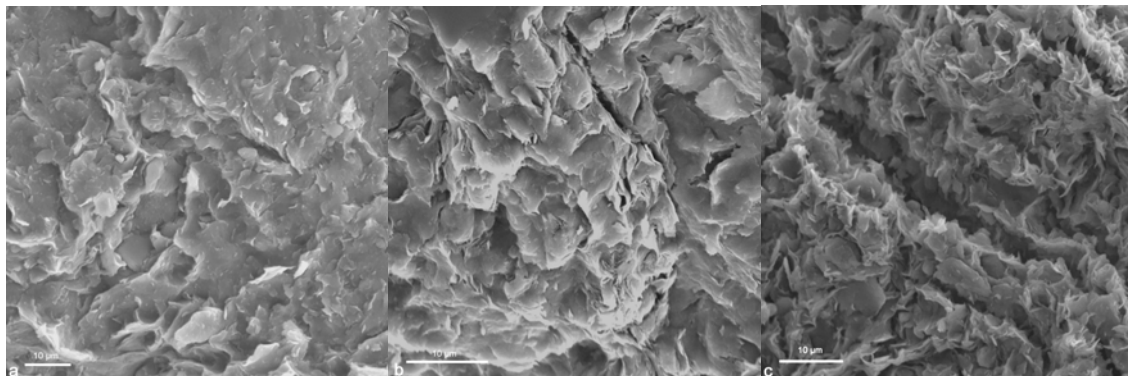


Illustration 11 - Images au MEB de l'Argile verte de Romainville : a) état sec, b) état naturel lyophilisé, c) après gonflement libre et lyophilisation (in Audiguier et al., 2007)

Tableau 6 - Gonflement libre de l'Argile verte de Romainville (AVR) et des Marnes bleues d'Argenteuil (MBA), en fonction de l'état initial intact ou remanié et de la teneur en carbonates C (AVR : C = 10%, MBA1 : C = 27%, MBA2 : C = 58%) (in Audiguier et al., 2008)

Formations	AVR (C = 10%)	MBA-1 (C = 27%)	MBA-2 (C = 58%)
<i>Échantillons intacts</i>			
Taux de gonflement libre, en %	16	4	1,5
Teneur en eau avant gonflement, en %	25	32	23
Teneur en eau après gonflement, en %	39	36	25
<i>Échantillons remaniés</i>			
Taux de gonflement libre, en %	32	26	15
Teneur en eau avant gonflement, en %	27	34	24
Teneur en eau après gonflement, en %	51	56	35

- la microstructure de ces deux formations, testées à l'état intact, évolue significativement avec les cycles successifs de séchage/humidification réalisés au laboratoire, aboutissant à une très forte déstructuration du matériau ;
- les colluvions argileuses issues des argiles vertes de Romainville présentent une microstructure voisine de celles d'échantillons intacts ayant subi des cycles de séchage/humidification (Illustration 12). On peut en conclure que la déstructuration obtenue au laboratoire après plusieurs cycles de séchage/humidification est proche de celle résultant de processus de colluvionnement (colluvions argileuses monogéniques).

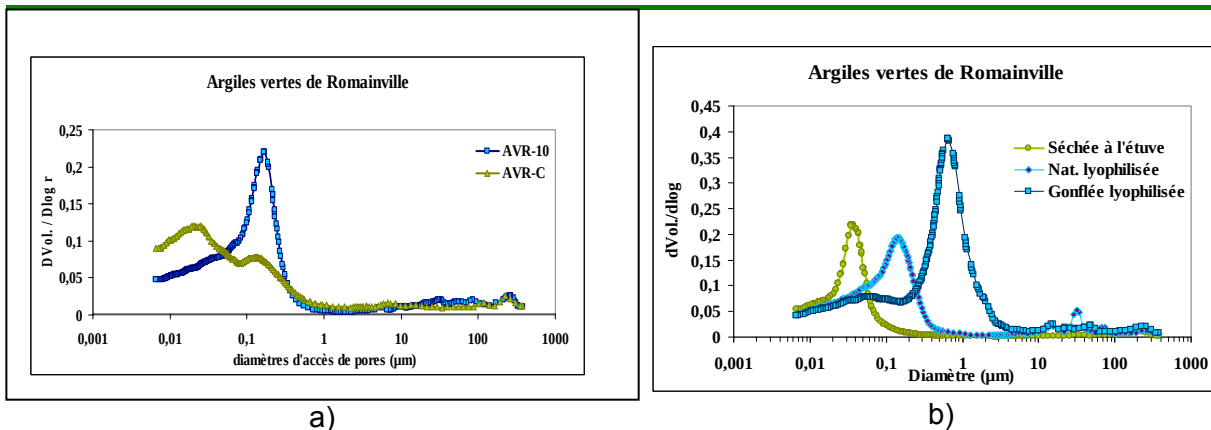


Illustration 12 - Courbes dérivées de distribution des pores de l'Argile verte de Romainville a) à l'état naturel pour un échantillon intact (AVR-10) et pour un échantillon de colluvion monogénique (AVR-C) ; b) pour trois états d'hydratation différents (in Audiguier et al., 2007)

Il faut donc retenir certes, l'importance de la minéralogie, mais aussi celle de la microstructure, sur la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement. La caractérisation de la microstructure des matériaux argileux est essentielle pour la compréhension des comportements mécaniques en général, et plus particulièrement pour les processus de retrait-gonflement. L'état intact ou remanié in situ (colluvions) des matériaux doit être bien pris en compte dans les études géologiques et géotechniques. De même, au laboratoire, les types de remaniements réalisés pour différents essais doivent être précisés.

3.4. COMPORTEMENT THERMO-HYDRO-MÉCANIQUE DES SOLS ARGILEUX

Dans la problématique liée à la sécheresse, les sols les plus concernés, les argiles, sont soumis à des sollicitations couplées thermo-hydro-mécaniques. Ainsi, dans l'analyse de leur comportement il est important de considérer ce couplage. C'est le cas dans l'élaboration de lois de comportement et c'est également le cas dans les analyses numériques. Néanmoins, sur le plan expérimental, il est en général nécessaire de découpler le problème en étudiant séparément différents aspects : thermique, hydraulique et mécanique. Dans le cadre du projet ARGIC, on a également suivi cette méthodologie. On illustre cela dans ce qui suit en présentant quelques exemples des acquis principaux issus du projet.

3.4.1. Comportement thermique

Le comportement thermique d'un sol se réfère en général à sa conductivité thermique qui est utilisée dans la description du transfert de la chaleur. Le modèle le plus utilisé est celui de De Vries (1963) qui est basé sur la pondération de la conductivité thermique de chaque constituant du sol en fonction de la fraction volumique de chaque constituant. Tang *et al.* (2008) ont montré que la relation entre la conductivité thermique et la fraction volumique d'air (V_a/V) est linéaire. Ainsi, dans le cadre du

projet, deux mesures seulement ont été réalisées sur chaque sol (annexe B10). Les sols de Bavent et de Mormoiron ont été étudiés et les résultats obtenus sont présentés sur l'illustration 13. On voit que la conductivité thermique varie de 1,2 à 0,4 W/mK.

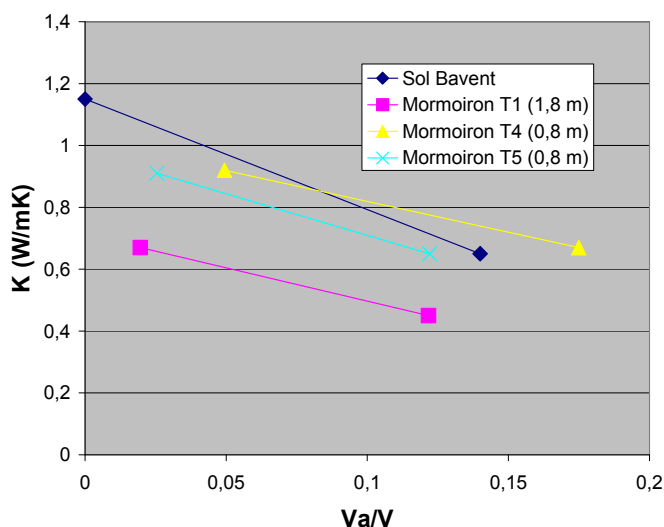


Illustration 13 - Conductivité thermique des sols argileux en fonction de la fraction volumique d'air (CERMES)

3.4.2. Comportement hydraulique

Pour décrire le transfert hydraulique des sols argileux non saturés, il est nécessaire de déterminer la variation de la perméabilité des sols en fonction de leur état hydrique (succion, degré de saturation ou teneur en eau). L'illustration 14 montre un exemple obtenu par le LAEGO sur le sol prélevé à Champenoux (annexe B14).

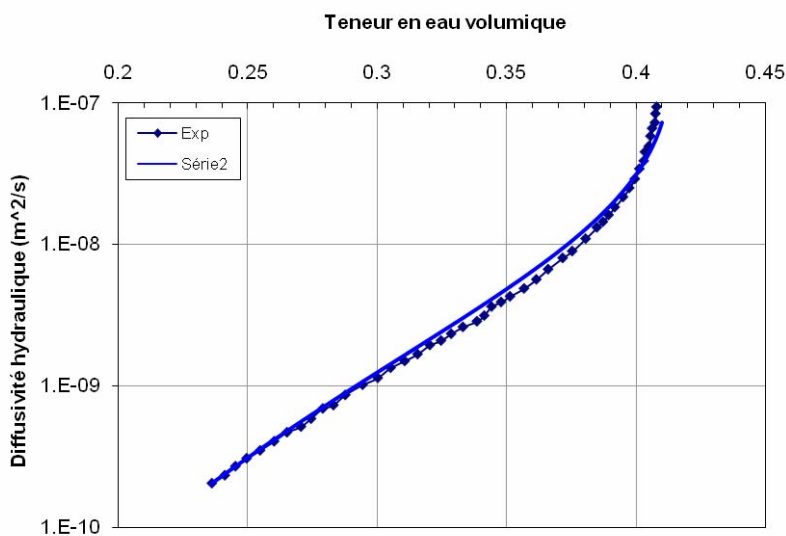


Illustration 14 - Variation de la diffusivité hydraulique avec la teneur en eau (LAEGO)

On observe bien que la diffusivité (coefficient de perméabilité multiplié par la pente de la courbe de rétention d'eau) diminue avec la baisse de la teneur en eau (ou l'augmentation de la succion). On note que les résultats expérimentaux ont été basés sur un essai d'imbibition. Sur la même figure on présente également la courbe théorique obtenue à l'aide du modèle de Van Genuchten (1980).

3.4.3. Comportement mécanique

Les aspects essentiels pour l'analyse de l'effet de la sécheresse sont d'une part le comportement de gonflement et de retrait, et d'autre part le comportement de compressibilité à l'état non saturé. Ces aspects ont fait l'objet d'une étude assez large dans le projet. Sur l'illustration 15 on montre à titre d'exemple la variation de l'indice des vides en fonction de la succion pour l'argile de Mormoiron (annexe B10). Une grande sensibilité hydrique a été identifiée puisque l'indice des vides varie dans une large gamme de 1,2 à 0,2 quand la succion augmente de 0 à 1000 MPa.

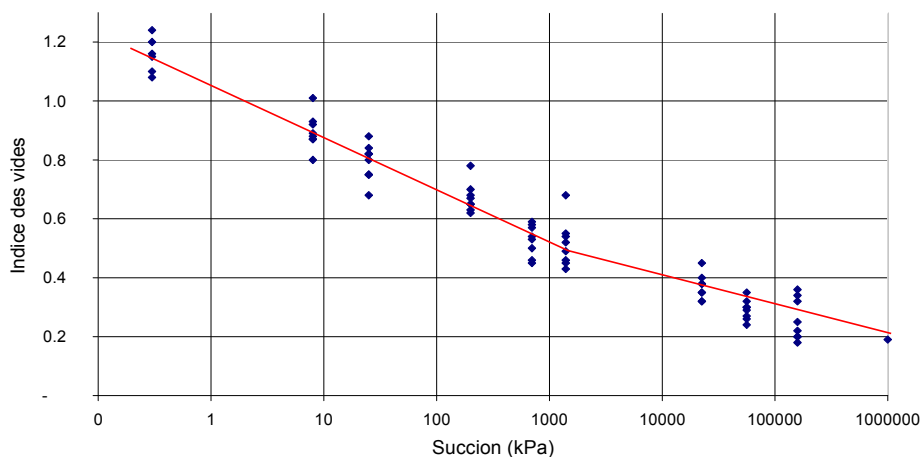


Illustration 15 - Variation de l'indice des vides avec la succion pour le sol de Mormoiron (LMSSMat)

La compressibilité de l'argile verte a été étudiée en réalisant des essais oedométriques à succion contrôlée. Quatre succions (0, 500 kPa, 9 et 39 MPa) ont été appliquées (annexe B10). Les résultats sont montrés sur l'illustration 16. On observe bien que l'augmentation de la succion diminue la compressibilité du sol, ce qui est un résultat classique pour la plupart des sols non saturés.

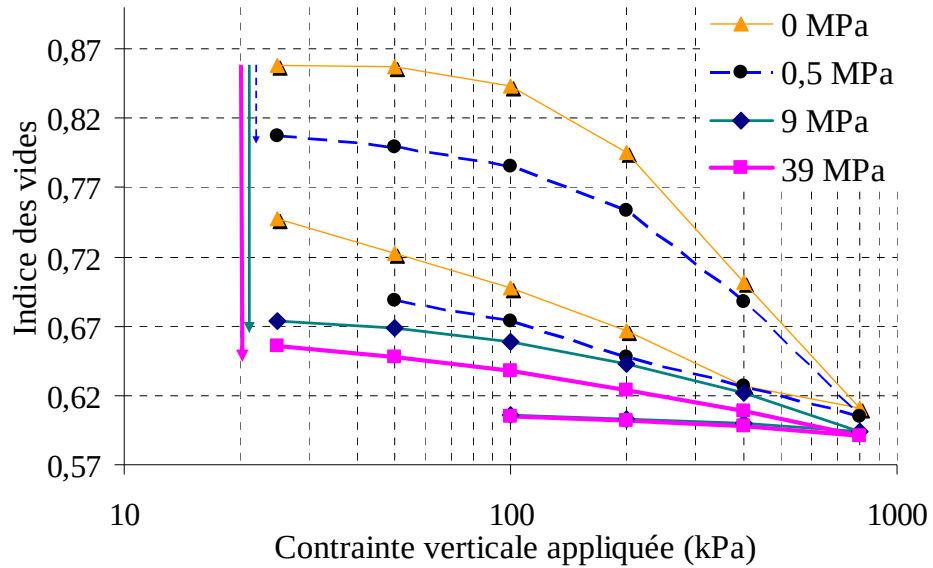


Illustration 16 - Les courbes de compression à différentes succions de l'argile verte (CERMES)

3.4.4. Analyse couplée thermo-hydro-mécanique

Comme indiqué précédemment, sur le plan numérique il est possible maintenant de réaliser des analyses thermo-hydro-mécaniques couplées en utilisant ou en adaptant des codes de calcul existant tels que Code_Bright (utilisé par le LAEGO dans le cadre du projet ARGIC, annexes A1, C2 et C7) et le code θ -Stock (utilisé par le CERMES, annexe C6). L'illustration 17 donne, à titre d'exemple, le résultat de calcul obtenu par le LAEGO sur le site de Champenoux (annexe C7). On identifie bien la profondeur d'influence sur la figure a (80 cm environ) et le tassement maximal sur la figure b (6 mm environ) au mois de décembre 2003.

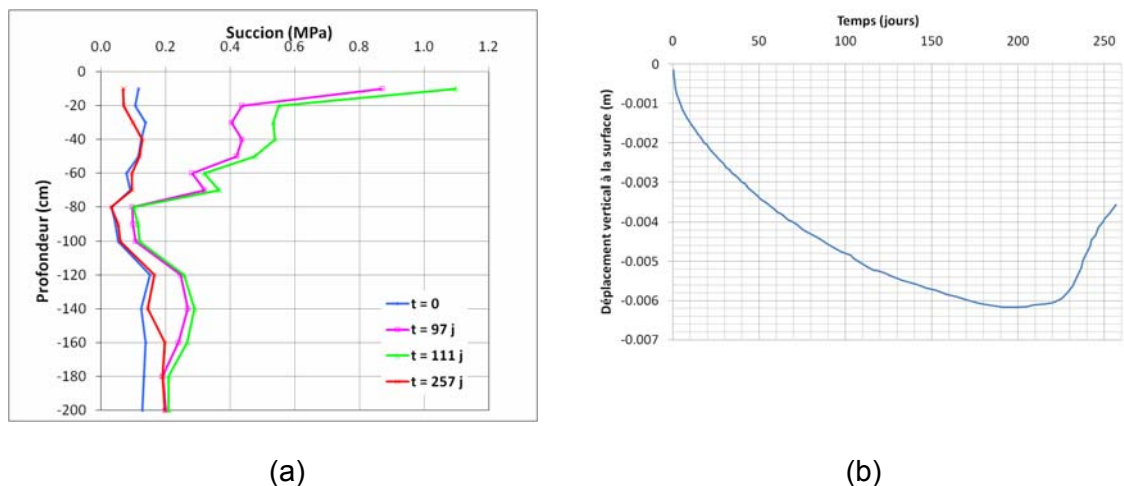


Illustration 17 - Évolution du profil de suction (a) et du tassement (b) sur le site de Champenoux entre le 7 mai 2003 et le 19 janvier 2004 (LAEGO)

3.4.5. Perspectives

Dans le cadre du projet, on a identifié les traits principaux du comportement thermo-hydro-mécanique des sols argileux. Mais les identifications effectuées sont découplées et il est difficile d'apprécier le couplage fort entre l'aspect thermique, l'aspect hydraulique et l'aspect mécanique. Ces couplages pourraient être étudiés en réalisant des essais hydrauliques à différentes températures et des essais mécaniques à températures constantes ou variables. Les résultats obtenus permettraient d'améliorer les lois de comportement utilisées jusqu'alors et de rendre ainsi les résultats de calcul plus pertinents.

3.5. ANALYSE DES PROFILS HYDRIQUES DES SOLS ET DE LEUR ÉVOLUTION

Plusieurs sites ont fait l'objet d'un suivi dans le cadre du projet ARGIC (annexe B6). L'instrumentation mise en œuvre et les nombreux sondages réalisés ont permis d'établir un certain nombre de profils hydriques, avec des résolutions verticales allant de quelques centimètres à quelques décimètres. Ce paragraphe présente d'une part les différents types de profils qui ont pu être obtenus et d'autre part, à titre d'illustration, les principales conclusions issues de ces observations.

3.5.1. Origine des profils

On peut distinguer différents types de profils hydriques suivant les techniques mises en œuvre, les conditions de mise en œuvre *in situ* étant détaillées dans les différentes annexes techniques du présent rapport (annexe B6 en particulier).

Profils établis en laboratoire

On peut distinguer les profils hydriques issus d'analyses de laboratoire sur échantillons de ceux correspondant à un suivi de l'humidité par instrumentation sur site. En effet, les premiers correspondent à une méthode destructive et constituent une information relative à un état du sol à un instant donné : un suivi par cette méthode s'avère délicat du fait des éventuelles disparités lithologiques sur le terrain. En effet, chaque profil établi par cette méthode correspond à un point différent sur le terrain, et les profils hydriques ainsi établis sont donc prioritairement utilisés pour un calage des instruments ou pour indiquer une tendance générale dans l'évolution de l'humidité du sol, dans le temps et suivant la profondeur. Ce type de profils est souvent réalisé lors de l'implantation de nouveaux sondages, en effectuant des prélèvements (intacts ou remaniés) à différentes profondeurs. Le sondage doit respecter un certain nombre de précautions et les analyses doivent être réalisées rapidement.

Profils établis in situ par suivi de l'humidité en continu

À l'inverse, les profils hydriques établis par un suivi en continu sur le terrain reflètent quant à eux l'évolution de l'état du sol en un point donné. Ce suivi en continu de

l'humidité du sol nécessite l'utilisation de capteurs spécifiques dont le fonctionnement est généralement fondé sur le comportement électromagnétique du sol (TDR, sondes capacitatives...). Relativement peu onéreuses, ces sondes nécessitent cependant le respect de précautions particulières lors de leur mise en œuvre. Implantées en forage ou en tranchées, elles fournissent, après étalonnage, des mesures d'humidité volumique avec un pas vertical dépendant du nombre de capteurs installés (typiquement quelques décimètres). Les profils qui en sont issus peuvent parfois correspondre à des profils hydriques « reconstitués », si les sondes ne sont pas toutes implantées sur une même verticale.

L'ensemble des dispositifs de suivi en continu utilisés dans le cadre d'ARGIC a permis de visualiser l'influence des précipitations sur l'état hydrique du sol. En effet, chaque épisode pluvieux significatif s'accompagne d'une rapide augmentation de la teneur en eau volumique pour les horizons de surface, s'atténuant progressivement en profondeur.

Profils établis in situ par suivi ponctuel de l'humidité

Les dispositifs de mesure ponctuelle *in situ* ne permettent quant à eux de visualiser que les grandes tendances dans les variations de l'état hydrique du sol, dans le sens où l'intervalle de temps entre deux mesures est nécessairement plus long que pour un suivi continu. La résolution de ces méthodes peut être cependant nettement plus fine qu'avec les dispositifs de suivi en continu (échantillonnage vertical de l'ordre de quelques centimètres à quelques décimètres).

Toutefois, un couplage entre les deux types de dispositif peut permettre d'optimiser la fréquence des mesures ponctuelles en ciblant les dates d'intervention à partir du dispositif de suivi continu afin de garantir la représentativité des levés. À défaut, une mesure tous les mois semble un critère minimal à respecter pour visualiser les variations annuelles d'humidité. Certains dispositifs se révèlent assez souples pour une utilisation aisée et fréquente (sondes TDR pour diagraphie dans des sondages tubés par exemple), alors que d'autres sont plus coûteux et plus lourds à mettre en œuvre (diagraphie nucléaire, géophysique...). Les observations réalisées par ce moyen dans le cadre du projet sont pour l'instant de courte durée et ne permettent pas à ce jour de visualiser l'intégralité d'un cycle hydrique.

3.5.2. Principaux résultats issus de l'analyse des profils

Le suivi des humidités dans les sols dans le cadre du projet ARGIC a permis de mettre en évidence un certain nombre d'observations. Les profils hydriques du sol peuvent être représentés soit dans le domaine temporel (évolution pour une profondeur donnée), soit en fonction de la profondeur (ensemble du profil pour une date donnée). L'analyse de ces profils dépend principalement de leur fréquence. Cette partie traite essentiellement des profils hydriques réalisés selon une périodicité maximale d'un mois.

Évolutions annuelles de l'humidité

Un premier intérêt de la réalisation de profils hydriques du sol est de déterminer l'évolution annuelle voire interannuelle de l'humidité des sols.

Sur deux des sites expérimentaux suivis dans le cadre du projet (sites de Mormoiron et du Deffend, annexe B3), la durée d'observation a été suffisamment longue pour permettre de visualiser l'influence des cycles saisonniers sur l'humidité du sol sur plusieurs années (exemple du site de Mormoiron sur l'illustration 18).

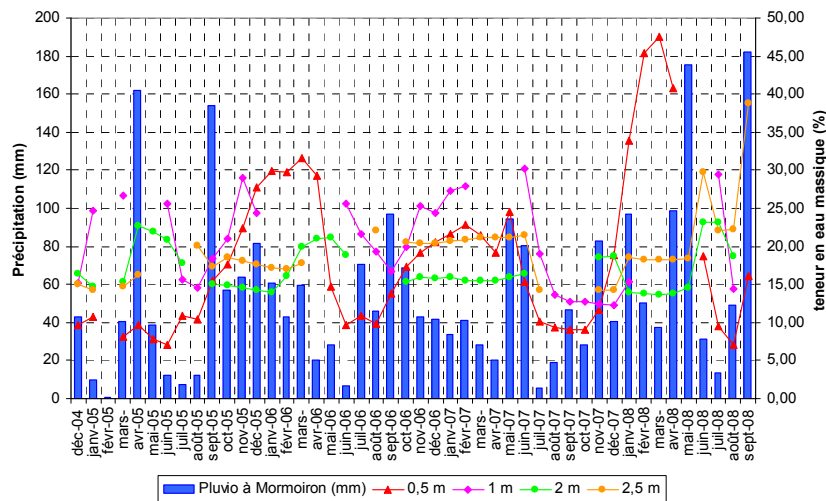


Illustration 18 – Teneurs en eau massique mensualisées enregistrées sur le site de Mormoiron (BRGM)

L'observation de l'évolution des humidités aux différentes profondeurs montre l'existence de variations sensiblement cycliques, d'amplitude décroissante avec la profondeur, alors que les évolutions présentent un certain déphasage. L'amplitude de ces évolutions et les dates des extrema sont variables selon les conditions météorologiques des années. Ainsi, sur le site de Mormoiron, en climat méditerranéen, les humidités maximales en surface ont été enregistrées, depuis décembre 2004, typiquement entre les mois de février et de mars, alors que le sol se révèle particulièrement sec durant les mois d'été, avec une dessiccation pouvant se prolonger durant plusieurs mois (jusqu'en décembre-janvier en 2004 et 2007). Sur le site du Deffend (climat océanique), les maxima d'humidité en surface ont été enregistrés entre janvier et avril, et les périodes les plus sèches correspondent aux mois d'été, avec une réhumectation s'amorçant dès le mois de septembre. Il faut toutefois noter que la durée d'observation sur ce dernier site est plus courte (décembre 2005 à juin 2008).

Cinétique de la réhumectation

Un autre intérêt des profils hydriques du sol, s'ils sont réalisés de manière suffisamment rapprochée, est de permettre la détermination des cinétiques de séchage et de réhumidification du sol. L'ensemble des observations effectuées avec les

dispositifs de suivi testés montre une bonne réactivité de l'humidité du sol superficiel avec la pluviométrie, les épisodes pluvieux significatifs entraînant de rapides augmentations de l'humidité jusqu'à des profondeurs assez significatives, supérieures à 1,5 m (Illustration 19). Cette cinétique rapide semble incohérente avec les niveaux de perméabilité attendus dans les matériaux argileux. Les observations menées sur le terrain, en particulier sur le site de Pessac, permettent d'expliquer la rapidité de ces réhumectations par l'existence d'une part d'une macroporosité correspondant essentiellement à une fissuration d'échelle décimétrique (premier réseau) à métrique (second réseau) sur trois mètres de profondeur, et d'autre part à la présence de lentilles et passées silteuses constituant des chemins préférentiels pour l'infiltration de l'eau en profondeur. Ces circulations préférentielles corroborent l'observation de mouvements verticaux du sol significatifs observés jusqu'à des profondeurs supérieures à 1,5 m sur les sites du Deffend et de Mormoiron (annexe B3).

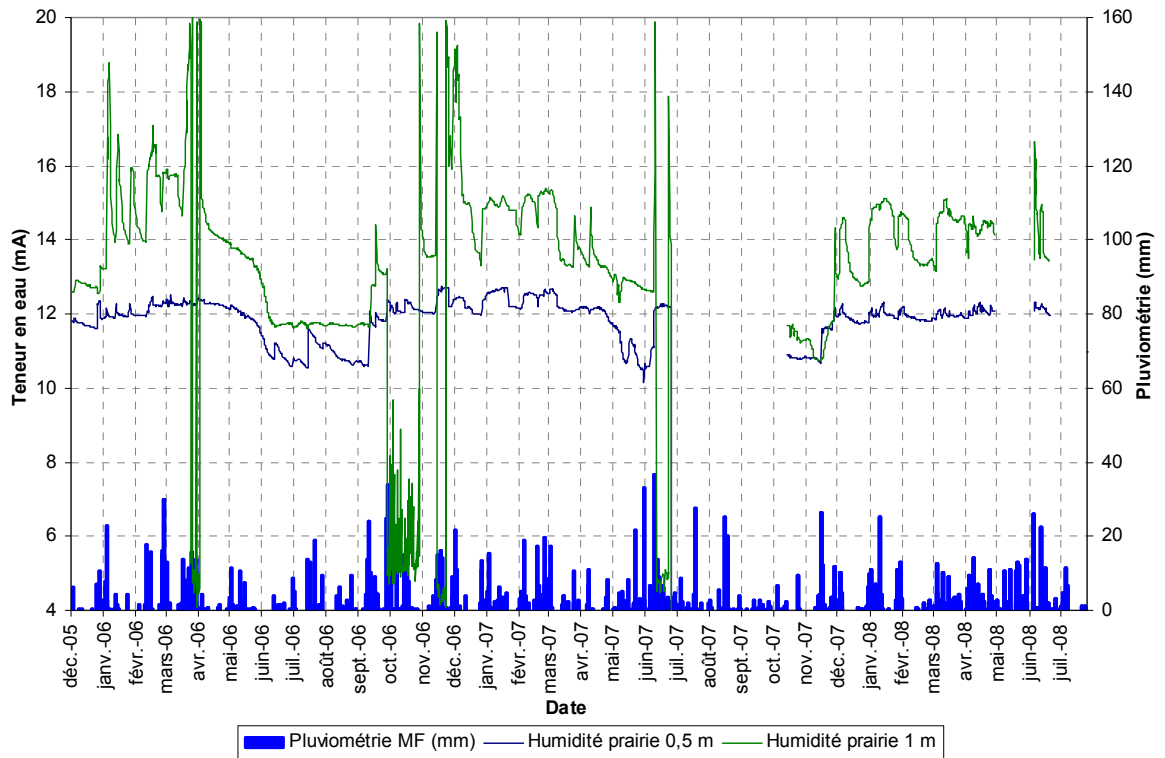


Illustration 19 – Suivi de l'humidité en prairie à 0,5 et 1 m de profondeur sur le site du Deffend (BRGM)

Profondeur de la dessiccation

Une autre information intéressante qu'il est possible d'obtenir de ces profils est l'épaisseur superficielle de sol affectée par l'influence des conditions météorologiques, et donc la profondeur de dessiccation du sol en période de sécheresse.

Les observations menées dans le cadre du projet ARGIC s'intéressent aux premiers mètres du sol. Au vu des résultats obtenus, il semble que l'on puisse estimer l'épaisseur de sol sensible aux variations hydriques à quelques mètres, bien que cette observation dépende fortement de la lithologie du site concerné. En effet, un sol plus grossier favorise la circulation de l'eau dans le sol et la réhumidification en profondeur. À titre indicatif, le dispositif TDR utilisé sur le site de Pessac permet de mettre en évidence des variations significatives de l'humidité jusqu'à 3 m de profondeur, en l'absence toutefois de mesures plus profondes (Illustration 20).

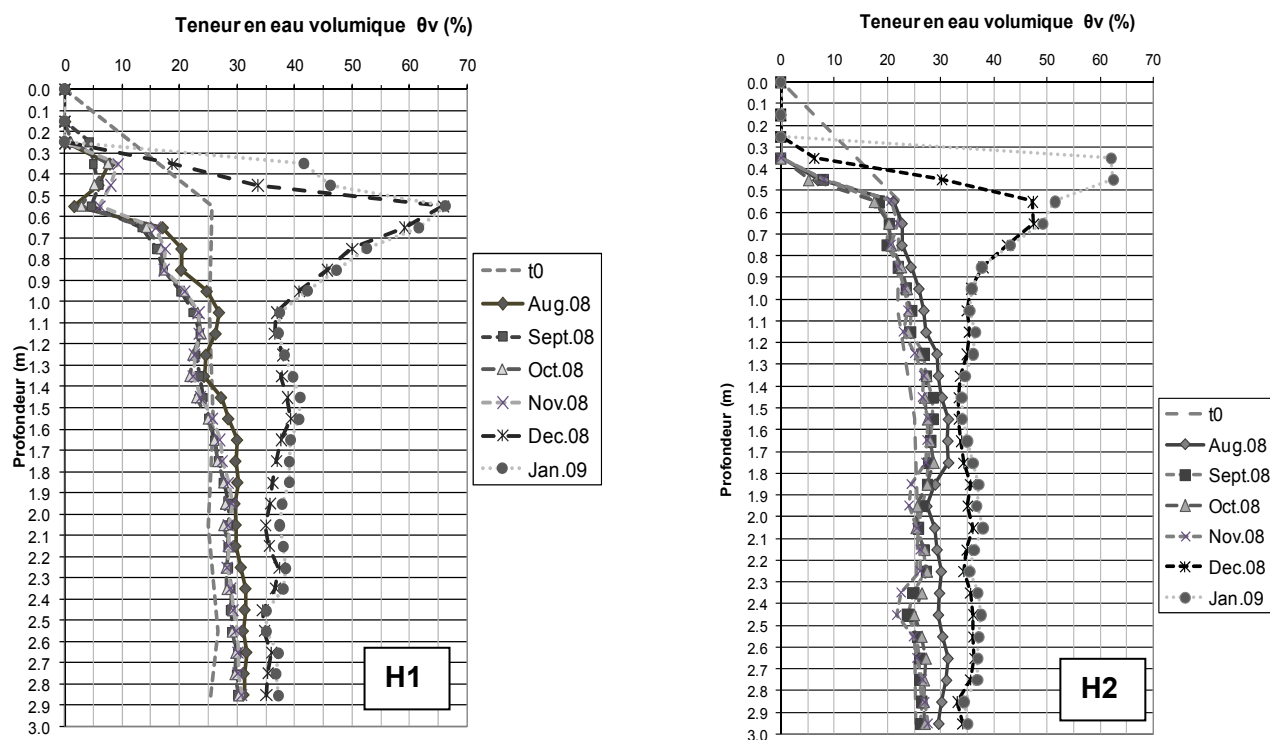


Illustration 20 – Profils hydriques espacés de 2 mètres sur le site expérimental de Pessac montrant les valeurs moyennes mensuelles de la teneur en eau volumique sur 6 mois entre août 2008 et janvier 2009 (de 0 à 0,6 m : sol sableux organique ; de 0,6 à 3,0 m : argile bariolée) (GHYMAC)

Sur le site de Mormoiron, les mesures de diagraphie nucléaire (annexe B5) enregistrent des variations d'humidité sur toute la hauteur des profils investigués, soit jusqu'à plus de 6 m de profondeur (Illustration 21), mais seules trois dates de mesures sont disponibles à ce jour (juin et septembre 2008, février 2009), ce qui oblige à traiter avec prudence ces résultats préliminaires. On peut noter cependant que le suivi en continu sur le même site par sondes capacitatives confirme des variations importantes d'humidité au moins jusqu'à 1,5 m de profondeur, sans toutefois que les capteurs plus profonds ne permettent de fixer une profondeur de dessiccation très précise.

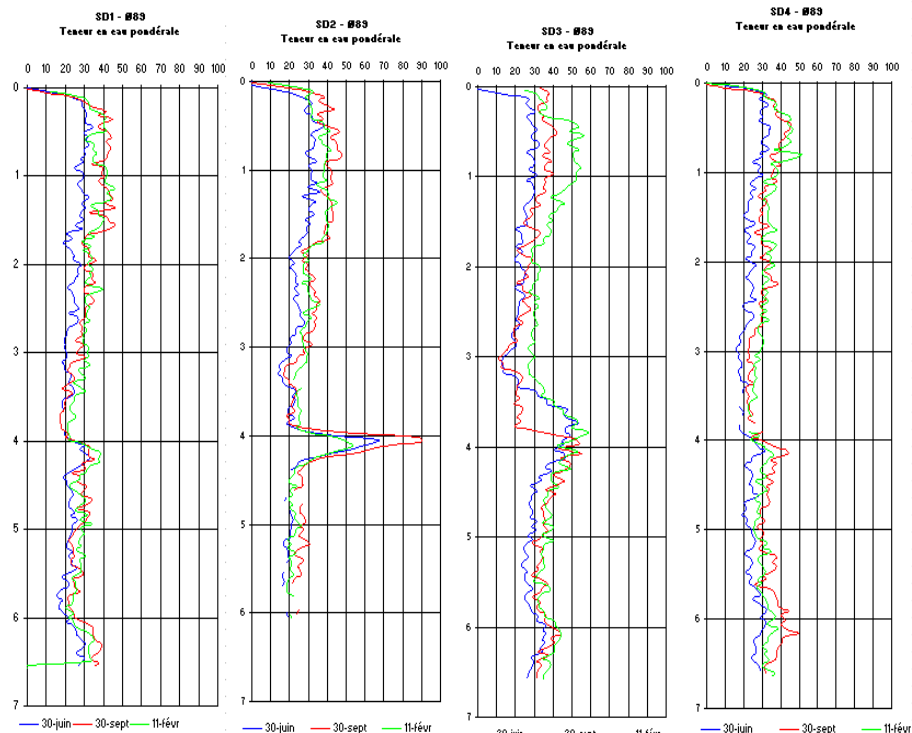


Illustration 21 - Suivi au cours du temps de la teneur en eau dans le sol par diagraphie neutron-neutron en fonction de la profondeur, dans quatre sondages du site de Mormoiron (LCPC)

Sur le site du Deffend, les mesures par sondes capacitatives (annexe B3) montrent également quelques variations d'humidité au-delà de 3,5 m de profondeur, avec cependant des amplitudes assez faibles (Illustration 22).

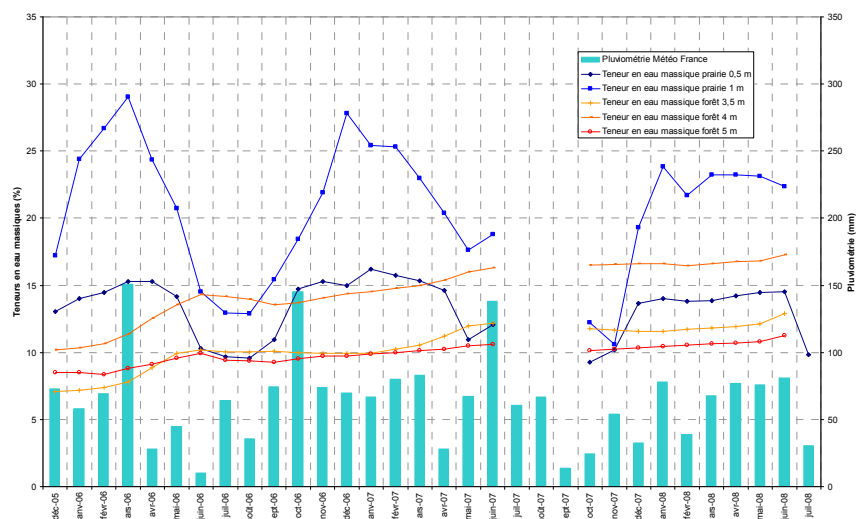


Illustration 22 – Suivi de l'humidité à différentes profondeurs sur le site du Deffend par sondes capacitatives (BRGM)

Il n'est toutefois pas exclu qu'en cas de sécheresse sévère, la dessiccation se propage au-delà de ces profondeurs, puisque les premiers mois de mesure, qui correspondaient à une période très sèche, se traduisent par les mesures d'humidité les plus faibles obtenues à ces profondeurs.)

3.5.3. Perspectives

En plus d'être un paramètre indispensable au calage de modèles analytiques et à la calibration des sondes d'humidité, le suivi des profils hydriques constitue un enjeu majeur dans la compréhension du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Bien que leur interprétation s'avère encore délicate pour caractériser le retrait-gonflement des sols argileux en termes de sinistralité, certains résultats se révèlent particulièrement intéressants. Par exemple, la corrélation entre les mesures d'humidité à 0,5 m de profondeur et les déformations enregistrées entre 0,2 et 1 m de profondeur sur le site de Mormoiron (Illustration 23) a permis d'identifier les différents états du matériau, et semble confirmer la réversibilité du phénomène de retrait-gonflement dans le plan « teneur en eau-déformation ».

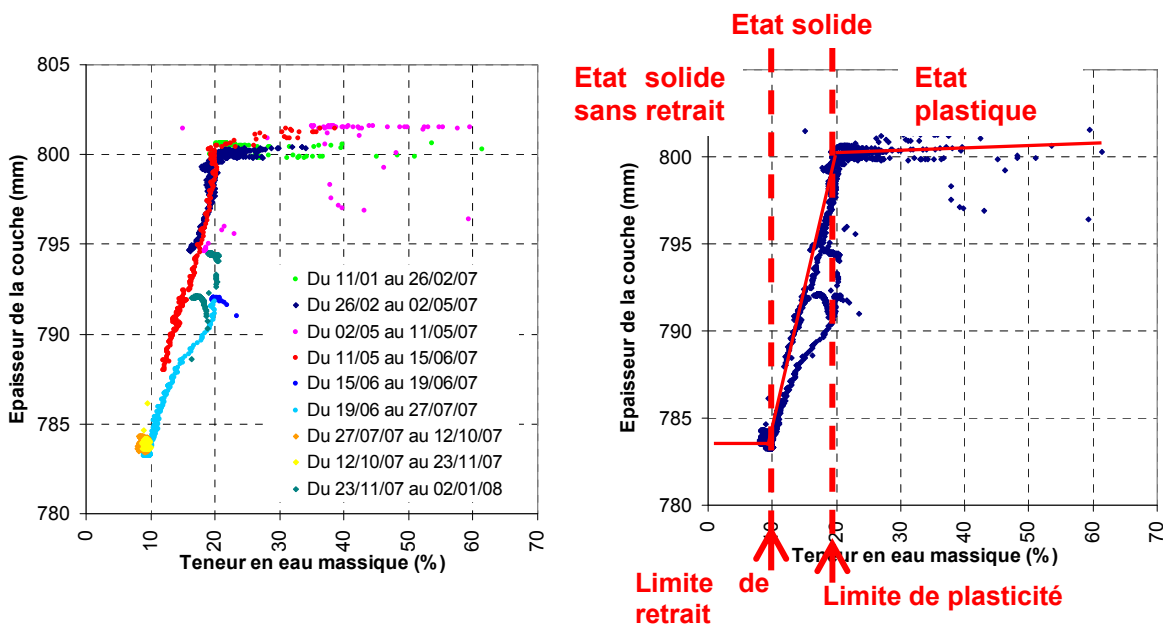


Illustration 23 – Corrélations entre les déformations du sol entre 0,2 et 1 m et la teneur en eau massique mensualisée, mesurées in situ à Mormoiron (BRGM)

3.6. TECHNOLOGIE DES MESURES DE TERRAIN : DÉFORMATIONS VERTICALES ET VARIATIONS HYDRIQUES D'UN SOL ARGILEUX

Les dispositifs de mesures sur site expérimental contribuent à déterminer et caractériser le phénomène de retrait ou de gonflement en termes de profondeur affectée, d'amplitude et de cinétique, et d'en déduire le comportement de la zone

active sous une fondation. Cette partie décrit les techniques de mesures qui peuvent être mises en œuvre dans de tels dispositifs et s'appuie sur l'annexe B6 du présent rapport (relative aux recommandations pour l'équipement de sites expérimentaux), ainsi que sur les contributions détaillées des différents partenaires. Elle traite essentiellement des techniques de mesure des déformations verticales et des teneurs en eau dans les sols.

3.6.1. Techniques de mesure des déformations verticales

Extensomètres en forage

Le principe de fonctionnement est que chaque capteur mesure un déplacement vertical absolu cumulé ΔH entre la tête du capteur, solidaire du sol à une profondeur assez superficielle, *a priori* soumise au retrait-gonflement, et la pointe du capteur, ancrée à une profondeur plus importante où le sol est supposé stable. Des systèmes simplifiés composés de tiges et tubes scellés au sol peuvent être utilisés, mais leur utilisation dans le cadre d'ARGIC est restée trop limitée pour juger de leur efficacité. Deux types de dispositifs, tous deux mis en œuvre dans le cadre de ce projet, peuvent être distingués suivant les niveaux de référence et la possibilité de colocalisation des capteurs.

• Dispositifs « colocalisés » à référence en surface

a. Principe

Deux dispositifs différents, mais basés sur un même principe, ont été installés sur le site de Pessac (annexe B6). Il s'agit d'une part de matériel distribué par Télémac, nécessitant un relevé manuel (hebdomadaire), et d'autre part d'un système automatisé distribué par Glötzl. Ils permettent des mesures de déplacement par rapport à une référence (la surface du sol) à différentes profondeurs (de 0,50 à 3 m) avec une précision de l'ordre de 0,003 mm. L'ensemble des points de mesure de chaque dispositif est situé sur une même verticale, avec des capteurs indépendants (Illustration 24). Ce type de système est modulable en fonction du besoin (nombre de capteurs, longueur d'ancrage, diamètre de forage).

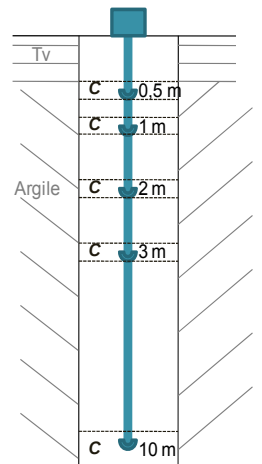


Illustration 24 - Schéma de principe des extensomètres de forage (GHYMAC)

b. Mise en œuvre dans le cadre d'ARGIC

Les deux dispositifs sont installés dans des forages de diamètre 63 mm. Les cannes extensométriques sont scellées au sol au niveau des capteurs, les espaces entre les scellements ayant été comblés à la bentonite. La course totale doit être de plusieurs centimètres et la position initiale ajustée suivant la saison d'installation. Afin d'obtenir des déplacements verticaux absolus, il convient également de veiller à disposer d'un ancrage suffisamment profond pour garantir un niveau de référence supposé fixe (profondeur déterminée par les reconnaissances préalables).

c. Mesures et résultats

En pratique, chaque mesure fournit, pour chacun des capteurs, la différence ΔH entre la profondeur de référence (en l'occurrence la surface du sol) et la profondeur de suivi, par rapport à l'instant initial. Une augmentation de cette différence traduit donc un gonflement de la couche de sol comprise entre la surface et le capteur, alors qu'une diminution reflète un tassement.

Suivant ce principe, la déformation maximale ΔH est enregistrée sur le capteur le plus profond, qui cumule la somme de toutes les déformations subies depuis la surface. Afin d'exploiter ces mesures, il convient de les convertir en valeurs absolues, exprimées par rapport à une profondeur de référence supposée fixe. On rapporte pour cela les mesures des différents capteurs au scellement le plus profond : $\Delta H_{\text{réf à } X \text{ m}} = \Delta H_0$ à réf - ΔH_0 à X m.

Le graphique de gauche de l'illustration 26 présente un exemple des résultats ainsi obtenus sur le site de Pessac par le dispositif manuel (Télémac) par rapport à la profondeur de référence supposée fixe de 10 m. Les déplacements enregistrés correspondent donc à une amplitude maximale de quelques millimètres.

• Dispositif individuel à référence en profondeur

a. Principe

Ce dispositif est basé sur un principe très similaire à ceux présentés dans le paragraphe précédent. Il a été utilisé sur les sites du Deffend et de Mormoiron par le BRGM (annexe B3). Conçu et assemblé par Minaus SA à partir de capteurs distribué par Sensorex et de tubes PVC, ce dispositif automatisé permet des mesures de déplacement par rapport à un scellement profond de référence pour une seule profondeur de suivi. Le suivi de plusieurs profondeurs nécessite donc l'installation d'autant de capteurs, d'où une nécessaire « non-colocalisation » des points de mesure. Ce type de système est également modulable en fonction du besoin (longueur d'ancrage, diamètre de forage).

b. Mise en œuvre dans le cadre d'ARGIC

Les capteurs sont installés dans des forages de diamètre 63 mm, réalisés en diamètre 100 mm jusqu'à la profondeur de mesure de manière à créer un épaulement (Illustration 25). Les cannes extensométriques sont scellées au sol au fond du sondage et au niveau de cet épaulement. Comme pour les dispositifs précédents, la course des capteurs doit être de plusieurs centimètres et la position initiale doit être ajustée selon l'amplitude des déplacements attendus. Le fond du sondage servant de référence à la mesure, il doit être suffisamment profond pour être supposé fixe.

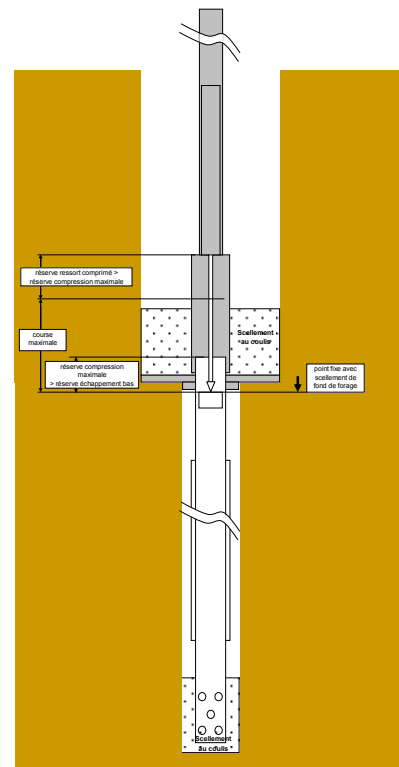


Illustration 25 - Schéma de principe des dispositifs extensométriques individuels (BRGM)

c. Mesures et résultats

Chaque mesure fournit cette fois la différence ΔH entre la profondeur de référence (le fond du sondage, supposé fixe) et la profondeur instrumentée, par rapport à l'instant initial (date de l'installation). Une augmentation de cette différence ΔH traduit donc là encore un gonflement de la couche de sol comprise entre la surface et le capteur, alors qu'une diminution reflète un tassement.

À la différence des dispositifs précédents, avec ce système de mesure, la déformation maximale ΔH est enregistrée sur le capteur le plus superficiel

L'illustration 26 présente un exemple des résultats ainsi obtenus sur le site de Mormoiron par rapport à la profondeur de référence supposée fixe de 6 m. Les déplacements enregistrés correspondent ici à une amplitude maximale de quelques centimètres.

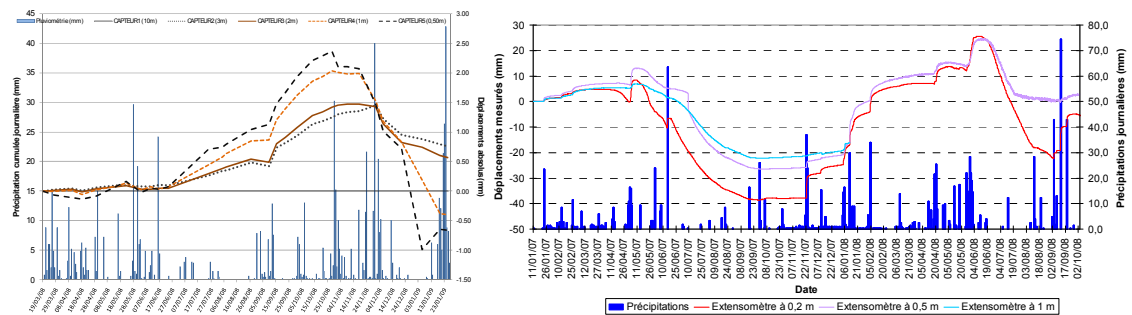


Illustration 26 – Exemples de déformations enregistrées par des dispositifs colocalisés (site de Pessac, dispositif TELEMAT, profondeurs de mesure de 0,50 m, 1 m, 2 m, 3 m) à gauche (GHYMAC) et par des dispositifs individuels (site de Mormoiron, profondeurs de mesure de 0,2 m, 0,5 m et 1 m) à droite (BRGM)

Levers topographiques

Afin de contrôler les mesures de déplacement enregistrées par les dispositifs automatisés, des levers topographiques ont été effectués sur le site du Deffend (annexe B3). Ces mesures, qui ont utilisé comme références fixes des têtes de sondages profonds ancrés à plusieurs dizaines de mètres de profondeur, visaient à estimer les mouvements des têtes de capteur et de bornes fondées superficiellement. Les résultats sont cependant apparus comme douteux, des mouvements latéraux injustifiés des différents points ayant été enregistrés et des différentiels de mouvements entre les différents points supposés fixes étant apparus. Toutefois, d'après les géomètres, le choix d'une technique de lever adaptée à la problématique devrait permettre d'atteindre une précision suffisante. Cette méthode n'a donc pu être validée dans le cadre du projet ARGIC, mais de nouveaux essais pourraient permettre de mieux juger de la fiabilité de cette technique.

3.6.2. Techniques de mesure des teneurs en eau du sol : les sondes capacitives, FDR, TDR

Le projet ARGIC a permis de mettre en œuvre différentes techniques de mesure des teneurs en eau du sol (annexes B3, B4, B5 et B6). Ce paragraphe revient sur les principes de base qui les sous-tendent.

Méthodes électromagnétiques

Le principe de ces méthodes repose sur la relation existant entre la constante diélectrique ϵ des sols et la teneur en eau volumique θ_v . La teneur en eau volumique peut être mesurée à partir de divers types de sondes, fondées sur diverses méthodes : méthode capacitive ou FDR, méthode TDR, géophysique...

La permittivité du sol étant *a priori* surtout fonction de sa teneur en eau pour une fréquence fixée (la permittivité relative de l'eau, de l'ordre de 81, étant très supérieure aux permittivités relatives des autres constituants du sol, 1 pour l'air et entre 2 et 6 pour la matière solide), on peut suivre les évolutions de teneur en eau en mesurant cette permittivité. De nombreuses formules empiriques ont été proposées pour établir une relation générale entre la permittivité d'un sol et sa teneur en eau volumique, supposées fonctionner pour tout type de capteur et de sol, mais il apparaît que ces relations ne s'appliquent pas directement aux sols argileux, en raison de plusieurs facteurs liés notamment aux propriétés électriques des minéraux argileux (Cosenza *et al.*, 2004).

Méthode capacitive ou FDR

Le principe de la méthode consiste à mesurer la capacité d'un condensateur, qui se forme quand on introduit deux électrodes dans le sol et qu'on applique un champ électrique sinusoïdal par leur intermédiaire. On mesure ainsi la fréquence d'oscillation liée au sol qui constitue le diélectrique d'un condensateur dont les armatures sont les électrodes situées dans le capteur. Cette capacité est donnée par la relation $C = a k \epsilon_0$, où ϵ_0 est la constante diélectrique du vide, k la permittivité électrique relative du sol et a est un coefficient lié à la géométrie de la sonde capacitive employée. La fréquence de fonctionnement des sondes capacitives est généralement limitée, entre 10 MHz et quelques centaines de MHz. Ces sondes ont initialement été développées pour des usages agronomiques afin de suivre l'évolution de l'humidité dans des parcelles agricoles, généralement à faible profondeur. Leur utilisation nécessite de réaliser un étalonnage de chaque capteur dans le sol concerné, ce qui constitue une opération longue et délicate, exigeant plusieurs mesures pondérales de la teneur en eau sur échantillons non remaniés.

Différents capteurs capacitifs ont été utilisés dans le cadre du programme ARGIC ou dans des projets connexes et les limites d'utilisation de chacun ont pu être en grande partie identifiées (annexes B2 et B3). Il ressort des expérimentations menées que, parmi les sondes testées, la sonde ThetaProbe ML2X (Delta-T) semble fiable vis-à-vis de la problématique du suivi à long terme des teneurs en eau dans les sols argileux,

bien que d'autres sondes puissent être utilisées, avec divers avantages et inconvénients selon les conditions et les objectifs des mesures : EC-5 (Décagon), Hydraprobe (Stevens), Humitub (Iris Instruments), etc.

Méthode TDR

La méthode TDR repose sur l'introduction d'une antenne, appelée guide d'onde, dans le sol, et sur l'émission d'une onde électromagnétique à travers ce guide d'onde. La mesure du temps de transit de l'onde après réflexion permet de déterminer sa vitesse de propagation, caractéristique de la constante diélectrique du milieu, et donc de l'humidité du sol. D'autre part, en plus de la constante diélectrique du sol, la mesure TDR permet la détermination de l'impédance du sol. En effet, l'atténuation subie par l'onde électromagnétique est exprimée par le coefficient de réflexion, qui dépend de l'impédance du sol au bout du guide d'onde. Cette impédance dépend fortement de la conductivité du liquide interstitiel. La conductivité électrique du sol peut être déterminée lorsque l'on connaît la constante géométrique du guide d'onde. La mesure de ce coefficient de réflexion permet le calcul de l'impédance du sol au bout du guide d'onde.

De nombreux fabricants commercialisent ce type de capteurs, et des capteurs spécifiques, mis en place par fonçage, ont même été développés spécifiquement dans le cadre du projet ARGIC (annexe B4) afin de caractériser des profils hydriques grâce à des dimensions et un traitement adapté. Comme pour les sondes capacitives, il est impératif de réaliser pour chaque capteur un étalonnage spécifique au sol concerné, pour garantir la fiabilité des mesures.

Méthodes géophysiques

L'application de méthodes géophysiques à des fins de suivi de l'humidité du sol n'a pas été utilisée dans le cadre du projet ARGIC. Toutefois, dans le cadre de thèses extérieures au projet, des essais de tomographie de résistivité électrique ont été réalisés (LCPC, GHYMAC), l'objectif étant de réaliser des acquisitions périodiques avec un dispositif invariant (ou installé à demeure) et d'attribuer les modifications de propriétés électriques enregistrées ponctuellement aux variations d'humidité du sol (annexe B5). Le traitement des données nécessite toutefois la prise en compte de nombreux paramètres pour permettre la visualisation de résultats probants. Les résultats ne sont pas à ce jour suffisamment avancés pour conclure sur ces méthodes.

Diagraphies nucléaires

Les sondes de diagraphie nucléaire à radioactivité provoquée de type gamma-gamma et neutron-neutron, développées dans les années 1970 par le LRPC de Rouen, sont désormais mises en œuvre avec leur base d'étalonnage au Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien (annexe B5). La technologie nucléaire mise en œuvre par ces sondes n'autorise pas de suivi en continu mais seulement des mesures ponctuelles exigeant l'intervention de techniciens spécialisés et spécifiquement habilités, ce qui ne permet pas d'en multiplier la fréquence au-delà d'une certaine limite (périodicité mensuelle).

- **La sonde gamma-gamma γ - γ**

La sonde diagraphique gamma-gamma permet de mesurer dans un forage tubé les masses volumiques humides, liées à la densité apparente du sol ou densité humide, suivant la profondeur. Le principe de la mesure repose sur la détection des photons émis par une source radioactive émettant dans toutes les directions (Césium 137). Ces photons interagissent avec les électrons périphériques des matériaux environnants par effet Compton. L'intensité du rayonnement diffusé, mesurée en nombre de coups par seconde, est liée à la densité du milieu ausculté : plus cette intensité est faible, plus le matériau est dense (masse volumique élevée).

Le rayon d'investigation de la sonde varie de 15 à 20 cm selon le matériau encaissant. L'association de deux détecteurs permet, par le biais de l'étalonnage, de s'affranchir des variations de diamètre du forage qui influent sur les mesures. Seul le détecteur le plus éloigné de la source est utilisé pour l'exploitation des mesures, car il possède le rayon d'action le plus important et est par conséquent le plus sensible aux variations de densité.

- **La sonde neutron-neutron N-N**

Utilisée sur sol non saturé dans un forage tubé, elle permet de mesurer les variations de teneur en eau volumique, qui peuvent être corrigées et converties en teneurs en eau pondérales à partir d'un double calibrage de la sonde sur un réseau de dalles de référence. Dans le principe, la sonde N-N émet des neutrons rapides qui sont ralentis par collision avec les noyaux des atomes du matériau jusqu'à une limite correspondant à l'énergie d'agitation thermique du milieu. Ces neutrons dits « thermiques » sont alors absorbés par le matériau. Or l'atome d'hydrogène influe sur le ralentissement et la diffusion, ce qui permet de relier la teneur en eau volumique à la mesure (par comptage) de la densité de neutrons thermiques.

Le rayon d'investigation de la sonde est de l'ordre de 15 cm. La sonde est constituée de deux détecteurs de neutrons thermiques, le premier situé à proximité immédiate et le second à 40 cm de la source de rayonnement (constituée de 3 sources Am-Be). La quantité de neutrons qui parvient au deuxième détecteur dépend principalement de la teneur en eau des matériaux, mais aussi de leur composition chimique (présence d'atomes d'hydrogène). Par conséquent, l'interprétation des mesures est assez délicate. Elle nécessite le recours à des étalonnages sur des matériaux simulant des teneurs en eau contrôlées et variées.

- **Étalonnage et exploitation des mesures de diagraphie**

Le mode d'acquisition des données sur le site et le traitement de celles-ci sont identiques pour les deux sondes. Un étalonnage des sondes est réalisé au LROP à partir d'une base d'étalonnage composée d'un réseau de dalles de référence, ce qui permet de convertir les comptages des détecteurs en masse volumique sèche ou teneur en eau pondérale selon la sonde utilisée, en s'affranchissant du diamètre du forage ainsi que de la nature et de la géométrie du tubage. Les résultats sont obtenus avec une précision de $\pm 0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ pour la masse volumique sèche, et de $\pm 2 \%$ (voire 5%) pour la teneur en eau pondérale. La résolution verticale des mesures est de l'ordre de la dizaine de centimètres (pour un pas de mesure de 5 ou 10 cm), avec un

lissage inévitable lié au recouvrement des portions verticales mesurées. Afin de contrôler les mesures *in situ* puis le calcul des teneurs en eau pondérales, des mesures de teneur en eau au laboratoire sont réalisées sur un carottage de sol intact à proximité du forage tubé.

3.6.3. Conclusions : Organisation d'un site expérimental de suivi du retrait-gonflement

L'équipement de sites expérimentaux à des fins de suivi du phénomène ou de recherche fera *a priori* appel à ces différentes techniques qui sont complémentaires. Toutefois, afin de garantir la qualité des résultats et la longévité du site, il convient de judicieusement sélectionner les parcelles à instrumenter vis-à-vis des contraintes environnementales et de la géologie (annexe B6). Les reconnaissances de terrain et les sondages d'instrumentation donneront lieu à des prélèvements d'échantillons, en vue d'analyses et de l'étalonnage des capteurs d'humidité. L'instrumentation doit comporter une station météorologique, un dispositif de suivi des déplacements verticaux du sol parmi ceux présentés ci-dessus et un ou plusieurs dispositifs de suivi de l'humidité choisi(s) en fonction des éventuelles difficultés spécifiques de mise en œuvre.

La fréquence d'acquisition des mesures pourra être variable selon la finalité des sites expérimentaux, mais les observations effectuées dans le cadre du projet ARGIC indiquent que les variations peuvent être rapides selon les conditions météorologiques, ce qui justifie la nécessité d'un suivi en continu avec plusieurs mesures par jour. Des contrôles plus espacés (de périodicité mensuelle et au minimum 3 à 4 fois par an) par des méthodes jugées plus fiables et plus globales (diagraphie nucléaire ou mesures directe en laboratoire de teneurs en eau massique) sont par ailleurs nécessaires pour déterminer les profils hydriques sur toute la profondeur investiguée et caler les résultats des mesures ponctuelle effectuées en continu. L'ensemble de l'installation devra, dans la mesure du possible, respecter les recommandations rassemblées dans l'annexe B6.

3.7. MODÉLISATION DES ÉCHANGES SOL-ATMOSPHÈRE-VÉGÉTATION

Les résultats obtenus ont montré l'intérêt d'une approche par modélisation du problème de sécheresse géotechnique. L'originalité du consortium de recherche mis en place dans le projet ARGIC était de provoquer le rapprochement inédit de communautés de recherche différentes. Il a permis la confrontation entre les modèles développés par les mécaniciens du sol, qui couplent les processus hydriques, thermiques et mécaniques dans les sols, et les modèles développés par les biophysiciens du sol, qui couplent les processus hydriques, thermiques et biologiques dans les sols. Les résultats obtenus montrent l'intérêt d'introduire dans les modèles de mécanique des sols non saturés la composante biologique liée à la présence de la végétation, qui va d'une part intercepter l'eau de pluie pour la redistribuer à la surface du sol et d'autre part absorber l'eau du sol par ses racines.

Les modèles utilisés dans le cadre du projet ARGIC reproduisent correctement les dynamiques hydriques observées expérimentalement, en particulier sur les sites de Mormoiron et de Poitiers. Les résultats obtenus montrent l'importance d'une prise en compte pluriannuelle de la dynamique hydrique des sols. Ainsi, les simulations pluriannuelles mettent en évidence les périodes de sécheresse des sols observées en 1988-92 et 1997-99. Ces périodes correspondent à une accumulation pluriannuelle du déficit hydrique des sols, avec notamment une recharge hivernale très insuffisante. La sinistralité de l'année 2003 est moins nettement mise en évidence par les modèles simulant uniquement la dynamique hydrique du sol. En revanche, le code θ -Stock (développé au CERMES), qui simule de manière couplée la déformation des sols et leur dynamique hydrique, rend bien compte du caractère exceptionnel de la sécheresse de 2003, avec une amplitude de déformation maximale verticale atteignant 12 cm pour le premier mètre d'épaisseur du sol. D'autre part, les simulations réalisées sur le site de Mormoiron entre 2006 et 2008 décrivent correctement les mesures expérimentales (Illustration 27), même si certaines divergences restent encore inexplicables.

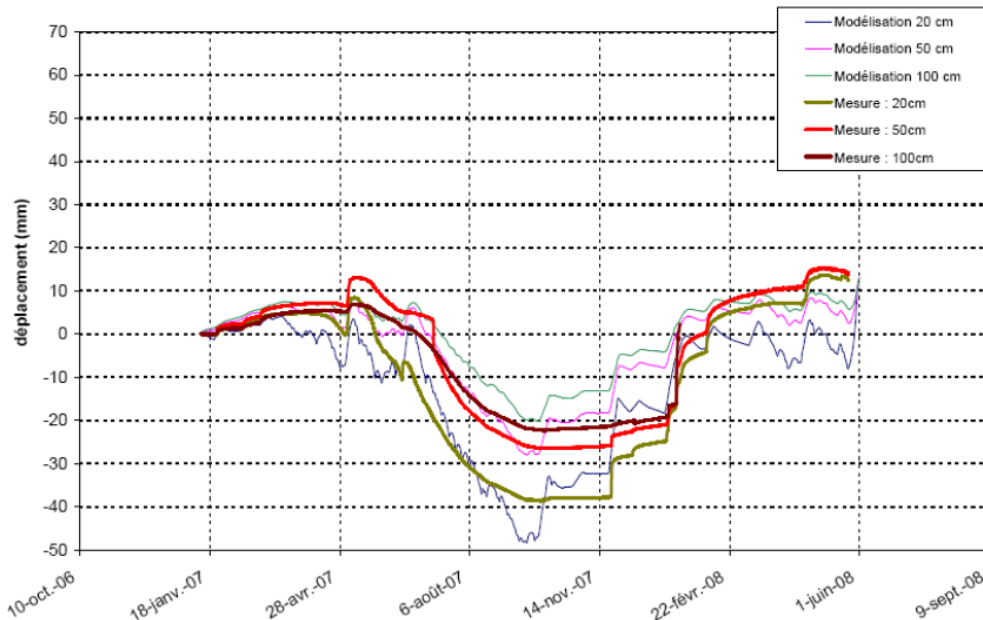


Illustration 27 - Simulation des déformations du sol de Mormoiron à l'aide du modèle θ -Stock (CERMES)

Les approches de modélisation utilisées dans ARGIC ont montré l'intérêt d'une description mécaniste unifiée des processus, basée sur l'utilisation de la notion de potentiel d'énergie de l'eau dans le sol. C'est en effet par des variations de ce potentiel que l'eau est transférée du sol vers l'atmosphère en passant éventuellement par la végétation (évapotranspiration). L'incorporation des effets de la végétation dans le code θ -Stock par le CERMES a montré qu'il était possible de rendre compte des déformations du sol occasionnées par la présence de plantes. L'utilisation d'un tel modèle, dans une version simplifiée, serait un outil très utile pour l'anticipation des

risques de sécheresse géotechnique, dans un dispositif de surveillance du type de ceux mis en place par Météo-France et le ministère en charge de l'environnement.

Toutefois, les travaux de modélisation réalisés dans le cadre du projet se sont heurtés au petit nombre de données expérimentales mesurées *in situ*, indispensables au calage des modèles de simulation, en particulier sur des durées suffisantes (pluriannuelles). Ils ont révélé aussi le manque de données relatives à l'enracinement (profondeur, distribution, réponse aux contraintes physiques du sol), au fonctionnement hydrique (régulation de la consommation en eau) des végétaux couramment rencontrés au voisinage des bâtis (végétations arbustives). Un réel effort métrologique sur le long terme d'une part, et sur une diversité de végétations ornementales d'autre part, semble indispensable pour le développement d'une surveillance fiable des risques de sécheresse géotechnique à l'échelle du territoire.

3.8. INTERACTIONS ENTRE LE SOL, LES FONDATIONS ET LES CONSTRUCTIONS

Les mécanismes de dégradation des structures d'habitation par les phénomènes de retrait/ gonflement des sols argileux sont aujourd'hui mieux connus. L'analyse de ces mécanismes révèle les fortes interactions qui existent entre le sol, les fondations qui transmettent (ou filtrent) la perturbation naturelle vers la structure et la structure elle-même. Les méthodes de prévention visant à limiter l'amplitude des déformations du sol ou à en réduire les effets sur la structure agissent positivement dans une certaine mesure sans toutefois pouvoir annihiler complètement le phénomène.

Ainsi, la solution qui consiste à augmenter/améliorer la résistance des structures pour s'opposer aux différents mécanismes de rupture reste le dernier rempart pour se protéger de ce type d'agression.

L'expérimentation en vraie grandeur qui a été menée dans le cadre de ce programme semble montrer que le simple respect des normes ou des documents techniques unifiés (DTU) en vigueur pourrait suffire, dans de nombreux cas, à se protéger du phénomène redouté.

Il est clair qu'un effort doit probablement être consenti au niveau de la mise en œuvre et du contrôle de réalisation des maisons individuelles. Mais il est également légitime de s'interroger sur le fait que de nombreuses habitations, construites à des époques différentes, selon des processus variés et par des constructeurs multiples, soient endommagées sur tout le territoire français (mais également à l'étranger).

Aussi, il convient de pousser plus avant les expérimentations et investigations pour s'assurer que des phénomènes liés au vieillissement des matériaux (joints de maçonnerie) ainsi qu'aux cycles saisonniers de retrait et de gonflement ne parviendraient pas à endommager une structure pourtant réalisée selon les règles de l'art ?

C'est pourquoi, nous préconisons de poursuivre l'expérimentation en vraie grandeur engagée par le LCPC dans le cadre du programme ARGIC et de mener, en parallèle, des opérations visant à éprouver les solutions techniques complémentaires proposées dans le cadre de ce programme.

Il s'agit, par exemple, de tester à une échelle réduite, via un modèle physique adapté, différentes configurations de radier en demi-gaufre pour pouvoir en définir le dimensionnement sur une base expérimentale et numérique. L'INERIS dispose de moyens expérimentaux adaptés qui pourraient être utilisés pour éprouver les différentes propositions techniques dans le cadre d'un nouveau programme de recherche.

3.9. TYPES DE SÉCHERESSES GÉOTECHNIQUES ET CINÉTIQUES DE LA RÉPONSE HYDRIQUE DES SOLS

L'analyse des dates de survenance des sinistres survenus en France du fait du retrait-gonflement des sols argileux connaît de nombreuses lacunes, faute d'un système permettant un recensement systématique de ces données. Néanmoins, toutes les données disponibles, notamment au travers des enquêtes effectuées à partir d'un échantillon de maisons sinistrées (annexe A6) ou à partir de l'étude de cas concrets, tendent à indiquer que la majorité des désordres constatés se produit au cours ou en fin de période estivale. Il existe certes des sinistres liés au gonflement par humidification des sols, notamment en cas d'apport ponctuel d'eau consécutif à une fuite de canalisation, avec en particulier une forte vulnérabilité des dallages construits sur terre-plein. Néanmoins, il semble avéré que les maisons individuelles en climat tempéré sont surtout sensibles au tassement du sol d'assise, lequel se traduit par un déficit ponctuel d'appui sous les semelles de fondation, notamment aux angles des constructions et dans les secteurs soumis à une dessiccation plus intense (d'où le rôle aggravant des arbres ou de drainages trop proches).

Par ailleurs, les premières mesures disponibles sur les sites expérimentaux (Illustration 28) confirment bien les analyses théoriques du phénomène et les essais en laboratoire, à savoir que le sol argileux gonfle, de manière très rapide (généralement en 24 à 48 h), après un épisode pluvieux et qu'il tasse, de manière plus lente et progressive, lors d'un épisode sec prolongé. Les corrélations entre les conditions météorologiques, l'état hydrique du sol et ses mouvements verticaux de gonflement et de tassement sont donc assez clairement établies et l'on dispose désormais de modèles qui permettent d'en rendre compte au moins de manière qualitative. La quantification de ces phénomènes reste cependant difficile dans le détail, même à une échelle très locale sur la base d'une identification précise des caractéristiques mécaniques et hydriques du sol. La prise en compte de l'effet des arbres commence à être bien cernée (annexes C1, C7 et C8) mais les modélisations effectuées rendent encore mal compte, dans le détail, de la cinétique des mouvements du sol.

Dans ce contexte, deux questions majeures méritent d'être approfondies. La première concerne l'évolution au cours du temps et en fonction des conditions météorologiques de la propagation en profondeur du front de dessiccation ou de réhumidification. La

seconde concerne les critères qui doivent être fixés pour identifier, à partir de cette analyse, quelles sont les périodes où l'état de dessiccation du sol en profondeur doit être considéré comme suffisamment exceptionnel pour justifier le déclenchement de la procédure d'indemnisation en cas de sinistre signalé.

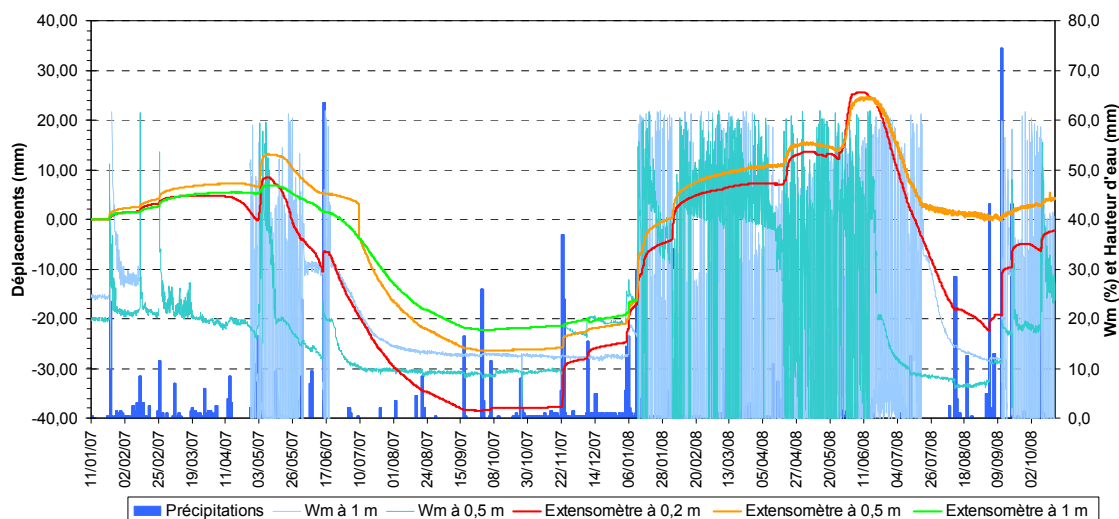


Illustration 28 - Déplacements et teneurs en eau enregistrés à 0,2 m, 0,5 et 1 m de profondeur sur le site de Mormoiron (BRGM)

Le premier point, à savoir la détermination du déficit hydrique des sols en fonction des conditions météorologiques, devrait connaître prochainement des développements positifs avec la mise en œuvre opérationnelle, par Météo-France, de la chaîne de calcul SIM et le calcul du SWI uniforme (Soubeyroux et Blanchard, 2008). Bien qu'encore en cours de validation et de calage avec les données expérimentales disponibles (Illustration 29), cette amélioration permettra en effet de répondre en partie à certaines des insuffisances de l'approche actuelle (basée sur un simple modèle de bilan hydrique à double réservoir), notamment grâce à la prise en compte de l'ensemble des données de précipitations disponibles sur le territoire national, selon un calcul spatialisé avec des mailles carrées de 8 km de côté (annexe C5). La caractérisation du déficit hydrique dans le sol en tout point du territoire devrait en être ainsi considérablement précisée.

D'autres possibilités ont été évoquées pour évaluer l'évolution dans le temps de la teneur en eau dans les sols en fonction des conditions météorologiques de surface. Certaines d'entre elles se veulent plus simples que la modélisation selon un modèle maillé tel que le propose Météo-France, et suggèrent d'évaluer un indice de sécheresse en tenant compte essentiellement de la température du sol et du nombre de jours écoulés depuis le début de la sécheresse, paramètres qui peuvent être facilement déterminés selon un réseau de mesures relativement dense (Magnan et Zadjaoui, 2008).

D'autres approches, au contraire, proposent de préciser le mode d'évaluation de la teneur en eau dans les sols en introduisant dans la chaîne de calcul SIM la prise en compte de paramètres complémentaires. Ceci concerne notamment les modalités de

pénétration de l'eau dans un sol argileux, en particulier après une période de sécheresse prolongée, lorsque le sol est durci en surface tout en présentant un réseau de fentes de retrait : ces dernières accroissent fortement la macroporosité du sol, qui devient alors le facteur prépondérant pour expliquer les transferts d'eau en profondeur (Vincent *et al.*, 2006a), phénomène qui peut être partiellement modélisé en utilisant des outils tels que MACRO (annexe C4). Mais il convient également de prendre alors en compte la part des précipitations qui ruisselle et qui ne pourra donc participer à la réhumidification en profondeur (ce qui suppose de tenir compte de la morphologie du terrain, ainsi que de son état de surface).

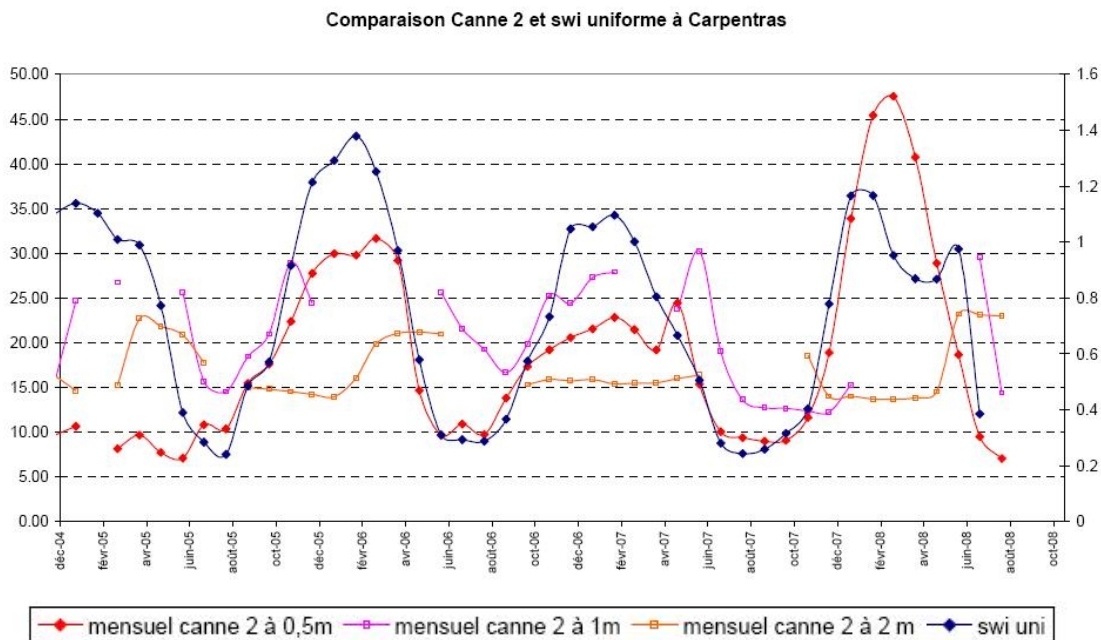


Illustration 29 – Comparaison des mesures de teneur en eau mensualisées à Mormoiron (BRGM) et de l'indice SWI à Carpentras (Météo-France)

La végétation joue alors aussi un rôle très important sur l'interception de l'eau de pluie et son évaporation après pompage parfois à plusieurs mètres de profondeur (Bréda *et al.*, 2008), avec des effets souvent très localisés (annexe C1 et C8). Cette interférence est prépondérante mais peut difficilement être prise en compte dans le cadre d'un modèle maillé à échelle nationale. On peut néanmoins s'interroger sur la pertinence de simuler, pour le calcul du SWI uniforme, un état de surface recouvert uniformément d'un gazon alors qu'un recouvrement forestier pourrait probablement conduire à une meilleure identification des périodes de sécheresse exceptionnelles telles qu'elles peuvent se manifester dans une parcelle comprenant des arbres.

D'autres voies paraissent également devoir être explorées pour évaluer les évolutions temporelles de la teneur en eau des sols, même si les premières investigations ne sont pas d'emblée concluantes. L'une d'elle consiste à s'appuyer sur la vitesse annuelle de croissance des arbres qui semble un indicateur fiable des conditions d'accès à l'eau dans le sol : la croissance radiale des arbres (étudiée par dendrochronologie, qui consiste à analyser conjointement les conditions climatiques et les caractéristiques des

cernes de croissance en se basant sur de longues séries chronologiques) est en effet directement limitée par l'intensité du déficit hydrique du sol et constitue donc un bon marqueur (Bréda, 2008). Néanmoins, cette méthode est assez lourde à mettre en œuvre, suppose l'établissement de corrélations locales à partir d'espèces représentatives, et exige un délai minimum d'une année après l'épisode étudié. Il s'agit donc a priori d'une piste prometteuse, qui peut aider à caler d'autres approches mais qui, pour être exploitée de manière opérationnelle, suppose l'acquisition préalable de bases de données fiables et exhaustives.

Une autre voie qui pourrait s'avérer fructueuse consiste à suivre par interférométrie radar sur réflecteurs permanents les mouvements verticaux d'éléments fixes à fort pouvoir réfléchissant (dont des constructions) entre deux passages satellitaires. Cette voie a déjà été testée par différents opérateurs (Meisina *et al.*, 2006 ; Kaveh *et al.*, 2008 ; Plat *et al.*, 2009) et permet effectivement d'identifier des mouvements verticaux du sol de périodicité annuelle (avec tassement en période estivale) et dont l'amplitude atteint quelques dizaines de mm dans le Val-de-Marne. Il reste néanmoins un travail important de validation de cette approche avant d'espérer pouvoir l'utiliser de manière opérationnelle pour ce type d'usage.

Enfin, une autre approche qui mériterait d'être développée consiste à tenter de relier directement, pour un sol de caractéristiques données, les conditions météorologiques aux déformations verticales du terrain sous l'effet du retrait-gonflement. Plusieurs tentatives ont été faites dans ce sens avec l'utilisation de modèles couplés thermo-hydro-mécaniques (annexes C6 et C7). Les premiers résultats semblent prometteurs, mais la difficulté à caler les nombreux paramètres exigés par de tels modèles ne permet pas d'en envisager la mise en œuvre de manière opérationnelle et à l'échelle du territoire national dans un proche avenir.

Concernant l'amélioration des critères actuellement utilisés pour la reconnaissance des états de catastrophe naturelle sécheresse (et en particulier le critère hivernal qui ne repose sur aucune justification théorique sérieuse), des recherches complémentaires semblent nécessaires pour en améliorer la pertinence tout en les rendant plus facilement compréhensibles. Cela suppose cependant l'acquisition de données complémentaires pour caler de manière objective la détermination de ces critères. Pour lever ce verrou, deux pistes d'action sont proposées :

- la première consiste à multiplier les observations *in situ* en équipant une quarantaine de sites judicieusement répartis sur le territoire national pour intégrer des situations géologiques, climatiques et de couvert végétal variées. Une dizaine de tels sites a d'ores et déjà été identifiée mais seule une minorité est équipée. L'instrumentation de ces sites doit permettre l'acquisition de données météorologiques locales ainsi que le suivi périodique des teneurs en eau et déplacement verticaux du sol à différentes profondeurs dans les 3 à 5 premiers mètres. L'acquisition doit se poursuivre sur une durée minimale de 5 ans pour obtenir les données nécessaires pour valider les modélisations, mais il est recommandé un équipement pérenne pour certains de ces sites afin de constituer un réseau permanent d'alerte et de calage ;
- la seconde consiste à élaborer une base de données actualisée de tous les sinistres retrait-gonflement déclarés, qu'ils fassent ou non l'objet d'une

indemnisation, avec renseignement de la date d'apparition et d'aggravation des désordres mais aussi caractérisation du sol, du bâti et de l'environnement proche. L'analyse de la sinistralité est en effet rendue actuellement très difficile faute de données fiables et exhaustives, et le phénomène risque de s'aggraver du fait des évolutions récentes des critères de reconnaissance de l'état de catastrophes naturelle sécheresse qui, en réduisant considérablement les périodes éligibles à indemnisation, pourrait conduire à introduire des biais systématiques dans les déclarations de sinistres. Il y a donc urgence à mettre en place les conditions pour alimenter de manière systématique une base de données de sinistres actualisée afin de fournir aux scientifiques les éléments de calage nécessaires pour ajuster de manière objective les critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

3.10. CONCLUSION

Sur un plan scientifique, les travaux de recherche appliquée effectués dans le cadre du projet ARGIC ont permis de dresser un état des connaissances relativement complet sur les causes et les mécanismes du phénomène de retrait-gonflement, ainsi que sur les moyens de diminuer la vulnérabilité des constructions face à ce risque naturel, au vu notamment de l'examen de l'expérience d'autres pays confrontés au même problème.

Plus que sur les mécanismes du retrait-gonflement, déjà bien connus au travers de travaux antérieurs, les actions de recherche se sont surtout focalisées sur les facteurs de prédisposition et de déclenchement du phénomène, ainsi que sur l'interaction entre les sols argileux soumis à tassement différentiel et les structures bâties.

Concernant la susceptibilité des sols vis-à-vis du retrait-gonflement, les résultats du projet ARGIC confirment l'importance de la granulométrie et de la minéralogie (teneur en éléments fins et nature des minéraux constituant la phase argileuse) mais mettent aussi l'accent sur d'autres facteurs qui jouent un rôle important, parmi lesquels le taux de carbonates (mais aussi la manière dont ces carbonates sont distribués au sein de la matrice), la texture du sol et son degré de remaniement. Il est ainsi montré que des sols colluvionnés peuvent présenter une aptitude très supérieure au retrait-gonflement que les mêmes sols restés en place. Par ailleurs, l'analyse de différentes formations géologiques sujettes au retrait-gonflement confirme que l'agencement local des couches joue un rôle important, en particulier dans le cas de formations présentant des alternances de faciès variés dans lesquels des circulations temporaires à la faveur de lentilles plus perméables influent sur l'amplitude des variations saisonnières de teneur en eau en profondeur et, partant, sur les mouvements du sol. Il en ressort que la prédisposition au retrait-gonflement à l'échelle d'une parcelle doit être évaluée par une approche géologique globale en complément des analyses en laboratoire.

Pour ce qui est des facteurs de déclenchement, le projet ARGIC a permis d'acquérir, sur plusieurs sites instrumentés, des données factuelles sur l'évolution des teneurs en eau et des mouvements de tassement et de gonflement de sols argileux en fonction des conditions météorologiques, et ceci sur des périodes de plusieurs années. Ces

mesures, qui se poursuivent et demandent à être étendues à d'autres sites dans des configurations variées, ont permis de confirmer que les sols argileux réagissent de manière très rapide en cas de pluie et se tassent de manière plus lente et progressive pendant les périodes de sécheresse, avec des amplitudes annuelles de tassement qui peuvent atteindre plusieurs centimètres par an. L'interaction entre mécaniciens du sol, météorologues et écophysiologistes a permis de développer des modélisations numériques en vue de quantifier l'impact d'une période de sécheresse sur les mouvements d'un sol argileux à proximité d'une maison en prenant en compte non seulement le rôle de l'évaporation mais aussi celui des arbres dont les racines puisent l'eau dans le sol en profondeur. Ces modélisations, calées sur les chroniques de mesures expérimentales et intégrant le couplage entre comportement mécanique et hydrique du sol, donnent des éléments quantitatifs utiles sur l'évolution des mouvements d'un sol argileux sous l'effet des conditions climatiques, même si les modèles restent à affiner et à tester dans des configurations diverses.

Quant à l'impact des mesures de prévention, les approches utilisées au cours du projet ARGIC sont à la fois expérimentales et numériques. Des observations ont été faites d'une part sur une maquette de taille réduite pour évaluer l'impact d'une réhumidification sous la base des fondations en période de sécheresse, et d'autre part sur une maison individuelle en vraie grandeur afin d'observer son endommagement sous l'effet de tassements différentiels sous ses fondations. Cette dernière expérience, que le LCPC compte poursuivre au-delà du projet ARGIC, confirme en première analyse le bon comportement d'une maison construite selon les règles de l'art mais il subsiste des interrogations quant à l'impact de cycles de tassement-gonflement et du vieillissement de la structure. Par ailleurs, différents modèles numériques ont été mis en œuvre qui confirment notamment la forte vulnérabilité des structures sur fondations superficielles face à des tassements différentiels, mais aussi l'intérêt d'augmenter la rigidité du bâti (par des chaînages) et l'impact positif de trottoirs périphériques anti-évaporation.

4. Conclusion générale

Le projet ARGIC, qui s'inscrit dans la continuité de projets de recherche antérieurs et qui a été mené en parallèle à d'autres projets connexes sur la thématique de l'impact du retrait-gonflement des sols argileux sur les structures bâties, présente l'originalité de rassembler des chercheurs de spécialités diverses (géologie, mécanique des sols, génie civil, pédologie, minéralogie, météorologie, écophysiologie, etc.) issus de treize organismes partenaires. Cette synergie entre disciplines variées a été mise à profit pour tenter d'apporter des éléments de réponse, tant sur le plan opérationnel (à l'attention des pouvoirs publics, des professionnels de la construction et des assureurs) que sur le plan scientifique, à des questions qui portent d'une part sur les moyens de diminuer la vulnérabilité des maisons face au risque de retrait-gonflement des sols argileux, d'autre part sur les moyens de caractériser la susceptibilité d'un sol vis-à-vis de ce type d'aléa, et enfin sur la manière de quantifier l'impact d'une période de sécheresse exceptionnelle sur le déclenchement du phénomène.

Concernant la vulnérabilité du bâti, et particulièrement des constructions de type maisons individuelles, le projet ARGIC a permis d'établir une revue détaillée des techniques de prévention et de réparation disponibles, tout en analysant l'expérience développée en matière de prévention de ce risque dans d'autres pays également exposés à ce risque naturel. Des expérimentations originales, dont la sollicitation d'une maison en vraie grandeur soumise à tassements différentiels sous ses fondations, ont permis de confirmer qu'une structure de ce type construite dans le respect des règles en vigueur résiste finalement assez bien même en cas de perte d'appui sur la moitié de son périmètre. Ces observations, complétées par différentes approches de modélisation numériques, confirment globalement l'intérêt des mesures préventives habituellement préconisées en la matière, portant notamment sur la rigidification de la structure, en particulier au niveau des semelles de fondation, du soubassement et des chaînages tant verticaux qu'horizontaux (les dispositions prévues dans les normes actuelles semblant en première analyse plutôt bien adaptées, à condition d'être respectées). L'efficacité de mesures complémentaires visant à réduire les variations hydriques près des bâtiments exposés est également confirmée tant par l'analyse de nombreux dossiers de sinistres que par certaines modélisations numériques couplées.

Pour ce qui est de la susceptibilité des sols vis-à-vis du retrait-gonflement, le projet a conduit à caractériser de manière très fine, *in situ* et en laboratoire, une douzaine de formations géologiques réputées sujettes au phénomène. Ces investigations mettent en avant la nécessité d'une approche géologique globale pour caractériser l'aptitude au retrait-gonflement à l'échelle d'une parcelle, dans la mesure où le degré de remaniement des matériaux et la présence de circulations temporaires d'eau peuvent influencer de manière significative. Par ailleurs, il apparaît, au travers de ces observations, que certains paramètres comme la densité du sol ou son taux de carbonates, doivent être pris en compte, au même titre que sa granulométrie ou la composition minéralogique de sa phase argileuse. Les très nombreuses analyses effectuées à cette occasion ont permis d'évaluer de manière comparative la pertinence des différentes

techniques de caractérisation de la susceptibilité d'un sol au retrait-gonflement ainsi que celle des nombreuses classifications proposées dans la littérature. Des propositions concrètes sont ainsi formulées à l'attention des bureaux d'études géotechniques et des experts d'assurance en vue d'optimiser les investigations géotechniques dans le cadre d'une étude avant construction ou d'un diagnostic post-sinistre.

Par ailleurs, le projet ARGIC a permis de poursuivre, sur plusieurs sites, l'acquisition de données concernant l'évolution, en fonction des conditions météorologiques, des teneurs en eau et des déformations verticales dans des sols argileux, confirmant ainsi les ordres de grandeur à attendre, tant en termes d'amplitude que de cinétique du phénomène. Ces chroniques de mesures expérimentales ont servi à caler des modélisations numériques en vue de quantifier l'impact d'une période de sécheresse sur les mouvements d'un sol argileux à proximité d'une maison en prenant en compte non seulement le rôle de l'évaporation mais aussi celui des arbres dont les racines puisent l'eau dans le sol en profondeur. Ces modélisations, qui intègrent le couplage entre les comportements mécanique et hydrique du sol, donnent des éléments quantitatifs utiles quant à l'évolution des mouvements d'un sol argileux sous l'effet des conditions climatiques, même si les modèles restent à affiner et à tester dans des configurations diverses. Elles pourront servir de base à l'objectivation des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse, dont la version actuelle est jugée peu représentative de la réalité telle qu'elle peut être observée sur le terrain.

Plusieurs des actions de recherche engagées dans le cadre du projet ARGIC se poursuivent et d'autres méritent d'être développées au vu des résultats déjà acquis. Les expérimentations effectuées sur la maison construite à Rouen par le LCPC doivent être continuées, notamment pour évaluer l'impact de cycles de tassement-gonflement. Elles devront être complétées par des observations sur modèles réduits et par des modélisations numériques afin de tester le rapport coût/efficacité des mesures structurelles envisagées pour réduire la vulnérabilité des futures maisons individuelles vis-à-vis des tassements différentiels attendus, y compris en cas d'aggravation de leur amplitude du fait du changement climatique global. Par ailleurs, il est recommandé de constituer une base de données nationale exhaustive des sinistres déclarés afin de disposer des éléments d'analyse nécessaires pour identifier les mesures de prévention économiquement et techniquement justifiées, tant pour les constructions neuves que pour l'existant. Cette base de données sera aussi nécessaire pour progresser dans l'analyse des facteurs de déclenchement et valider un ajustement des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse sur une base plus objective. Pour cela, il est également recommandé de poursuivre l'identification et l'équipement de nouveaux sites expérimentaux sur lesquels seront enregistrés l'évolution des teneurs en eau et des déplacements verticaux du sol en fonction des conditions météorologiques, et ceci dans des environnements variés afin de constituer un réseau de suivi à l'échelle nationale.

5. Bibliographie

Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Cojean R. (2007) - Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux. *Revue Française de Géotechnique*, n° 120-121, pp. 67-82

Audiguier M., Geremew Z., Cojean R. (2008) - Relation entre les microstructures de deux sols argileux de la région parisienne et leur sensibilité au retrait-gonflement. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008*, éd. du LCPC, Paris, pp. 235-244

Boutin C. (2007) – Rapport du Gouvernement au Parlement sur l'indemnisation des dommages aux bâtiments causés par la sécheresse survenue durant l'été 2003. Étude en application de l'article 68 de la loi n° 2007-290 du 5 mars 2007 instituant le droit au logement opposable et portant diverses mesures en faveur de la cohésion sociale. 66 p., 9 ann.

Bréda N. (2008) – Sécheresse et forêt : les arbres comme détecteurs de sécheresse. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008*, éd. du LCPC, Paris, pp. 33-40

Bréda N., Zapater M., Barlet C., Lefèvre Y., Granier A. (2008) – An efficient pump: contribution of fine roots of forest trees in clay layer drying out during drought events. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008*, éd. du LCPC, Paris, pp. 103-111

Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., avec la collaboration de **Ducieux G.H.** (1995) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) dans la région de Manosque (Alpes de Haute Provence). Échelle communale et départementale. Approche méthodologique. *Rapport BRGM R 38695*

Cojean R. (2008) – Présentation de projets de recherche récents ou en cours se rapportant à la sécheresse géotechnique. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008*, éd. du LCPC, Paris, pp. 427-430

Cosenza P., Tabbagh A. (2004) - Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity. *Applied Clay Science* n° 26, pp. 21-36

De Vries D.A. (1963) - Thermal properties of soils, in: *Van Wijk, W.R. (Ed.), Physics of Plant Environment. North-Holland Publishing Company, Amsterdam*, pp. 210-235

Driscoll R. (1983) – The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*, vol. 33, pp. 93-105

Exbrayat L. (2001) - Dispositions constructives de nature à prévenir et/ou supprimer les effets de la dessiccation/réhydratation des sols - évaluation des coûts – *Rapport SOLEN GEOTECHNIQUE* n°G01339GT, 15 p., 2 ann.

Fleureau J.M., Kheirbek-Saoud S., Soemitro R., Taibi S. (1993) - Behaviour of clayey soils on drying-wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, n° 2, pp. 287-296

Gouvenot D., Modaressi A. (2007) – L'état de sécheresse exceptionnelle et ses conséquences sur l'habitat. *Experts*, n° 75, juin 2007, pp. 54-58

IGF/CGPC/IGE (2005) – Rapport Particulier sur les risques de subsidence dus à la sécheresse. *Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles*. Rapport rédigé par Philippe Dumas et Alexandre Macaire (Inspection générale des Finances, n°2005-M-020-07), André Chavanot, Christo Dimitrov et Christian Queffelec (Conseil général des Ponts et Chaussées, n°2004-0304-01), Henri Legrand et Xavier Martin (Inspection générale de l'Environnement, n°IGE/05/006), 65 p.

Kaveh H. F., Fruneau B., Deffontaines B., Duro J., Arnaud A. (2008) – Apports de l'interférométrie radar (DINSAR et PSI) à l'étude du retrait-gonflement d'argile dans l'est du bassin de Paris. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 97-102

Kazmierczak J.B., Laouafa F., Maison T. (2008) – Étude d'adaptation des fondations de maisons individuelles dans les zones exposées au retrait-gonflement. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 337-342

Lautrin D. (1989) – Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 160, pp. 29-41

Magnan J.P., Zadjiaoui A. (2008) – Stratégie d'évaluation de la gravité des sécheresses géotechniques. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 433-442

Makki L., Duc M., Droniuc N., Reiffsteck P., Maloula A., Magnan J.P. (2008) – Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 257-264

Meisina C., Zucca F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J. (2006) – Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique : The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology*, n° 88, pp. 240-259

Plat E., Vincent M., Le Roy S., Fleureau J.-M., Masrouri F., Pantet A. (2008) – Suivi expérimental des profils hydriques et des déformations dans deux sols argileux sujets

au retrait-gonflement. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 195-201

Plat E., Carnec C., Raucoules D. avec la collaboration de Vincent M., Iannicella I., Novali F. et Fumagalli A. (2009) – Projet de démonstration : suivi des déformations induites par le phénomène de retrait-gonflement des argiles à partir d'interférométrie radar PSI – Site de Nogent-sur-Marne. Rapport d'avancement. Rapport BRGM/RP-56832-FR, 64 p., 45 ill.

Soubeyroux J.-M., Blanchard M. (2008) – Reconnaissance de l'intensité de la sécheresse du sol à partir du modèle SAFRAN/ISBA/MODCOU. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 17-23

Souli H., Soemitro R., Fleureau J.-M. (2008) - Apport de la physicochimie à l'étude du retrait-gonflement d'une argile plastique compactée. *Revue Française de Géotechnique*, n° 120-121, pp. 131-142

Tang A.M., Cui Y.J. et Le T.T. (2008) - A study on the thermal conductivity of compacted bentonites. *Applied Clay Sciences*, Vol. 41, pp. 181-189

Tessier D., Coquet Y., Lefèvre Y., Bréda N. (2007) - Rôle de la végétation dans les processus de propagation de la sécheresse dans les sols argileux. *Revue Française de Géotechnique*, n° spécial « Sécheresse géotechnique », 120-121, 35-44

Tessier D., Blaise F., Coquet Y., Courbet C., Priem J., Lemaire Y., Trillaud, S. (2006) – Analyse comparative de politiques de prévention du risque de « sécheresse géotechnique » - Modélisation et visualisation du phénomène. Rapport final. *INRA, Unité de Sciences du Sol, Versailles*, 288 p.

Van Damme H. (2001) - Chapitre 1 : L'eau et sa représentation, in "Mécanique des sols non saturés", O. Coussy & J.M. Fleureau eds.. Collection MIM « Mécanique et Ingénierie des Matériaux », Hermès, pp. 28-68

Van Genuchten M.T. (1980) - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, n° 44(5), pp. 892-898

Vincent M., Bouchut J., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006a) – Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 1. Rapport BRGM/RP-54567-FR, 189 p., 127 ill.

Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M. (LMSSMat), Masrouri F. (LAEGO), Oppenheim E. (CEBTP-Solen), Heck J.-V. (CSTB), Ruaux N. (CSTB), Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006b) - Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport final. BRGM/RP-54862-FR, 378 p., 308 ill.

Vincent M., Hédou F., Chirouze M., Plat E., Le Roy S. (2008) – Cartographie à l'échelle départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à des fins préventives. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 55-62

XP P94-011 (août 1999) - Sols : reconnaissance et essais – Description – Identification –Dénomination des sols – Terminologie – Éléments de classification. *Norme AFNOR*

XP P94-090-1 (décembre 1997) - Sols : reconnaissance et essais - Essai œdométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers. *Norme AFNOR*

XP P94-091 (décembre 1995) - Sols : reconnaissance et essais - Essai de gonflement à l'œdomètre - Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvette. *Norme AFNOR*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service Risques Naturels et sécurité du stockage de CO₂
Risques Mouvements de Terrain
117, avenue de Luminy – BP 167
13 276 Marseille cedex 09
Tél. : 04 91 17 74 74