

ALEA ET RISQUE SECHERESSE

Analyse du comportement des sols argileux lors de cycles climatiques extrêmes
Application au risque sécheresse géotechnique
Aide au diagnostic et recommandations

Projet de recherche réalisé avec le soutien de la FONDATION MAIF



Synthèse de la Recherche

Coordonnateur du projet : ARMINES / Mines ParisTech -Centre de Géosciences

Partenaires : Ecole des Ponts ParisTech / UR Navier-Géotechnique

CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)

UPE-MLV / OTIG (Université Paris Est – Marne-la-Vallée / Equipe Observation de la Terre et Information Géographique)

Cojean R., Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Thénevin I., Cui Y.J., Tang A.M., Ta A.N.,
Heck J.-V., Taillefer N., Deffontaines B., Kaveh F., Fruneau B.

Janvier 2009

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION.....	1
2.	LA PROBLEMATIQUE DU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX.....	3
3.	LE CONTEXTE INSTITUTIONNEL, REGLEMENTAIRE, TECHNIQUE ET ASSURANTIEL.....	6
3.1	Introduction.....	6
3.2	La cartographie départementale de l'alea retrait-gonflement.....	6
3.3	Les Plans de Prévention des Risques Naturels.....	8
3.4	L'assurance face aux dommages aux constructions liés à la sécheresse.....	14
3.4.1	Le cadre général.....	14
3.4.2	L'intervention des experts d'assurance.....	17
4.	LES RESULTATS DE LA RECHERCHE.....	20
4.1	CONTRIBUTIONS D'ARMINES / MINES PARISTECH – CENTRE DE GEOSCIENCES.....	20
4.1.1	Principes des études géologiques et géotechniques orientées vers la définition de la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement.....	20
4.1.2	Résultats issus des travaux de laboratoire.....	21
4.1.2.1	Caractérisation de la variabilité des faciès lithologiques d'une formation donnée.....	21
4.1.2.2	Analyse de la microstructure et de la minéralogie.....	24
4.1.2.3	Apport de l'essai au bleu.....	25
4.1.2.4	Processus de fissuration au cours des cycles séchage-humidification.....	25
4.1.2.5	Comportement mécanique en relation avec l'état initial et la composition minéralogique.....	27
4.1.2.6	Essais cycliques de séchage-imbibition.....	27
4.2	CONTRIBUTIONS DE ECOLE DES PONTS PARISTECH / UR NAVIER - GEOTECHNIQUE.....	29
4.2.1	Résultats issus des travaux sur modèle physique, orientés vers une modélisation numérique des échanges hydriques et thermiques à l'interface sol-atmosphère.....	29
4.2.1.1	Introduction.....	29
4.2.1.2	Comportement du sol soumis à de l'infiltration.....	30
4.2.1.3	Comportement du sol au séchage.....	32
4.2.1.4	Comportement en compressibilité et conductivité thermique.....	33
4.2.2	Perspectives.....	34
4.3	CONTRIBUTIONS DE CSTB (CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT).....	35
4.3.1	Résultats issus des travaux de modélisations numériques relatives à l'analyse du comportement du bâti, variable suivant les conditions de structure et les conditions d'interface fondation-terrain.....	35
4.3.1.1	Introduction.....	35
4.3.1.2	Typologie du bâti, environnement immédiat du bâti, indices de vulnérabilité.....	35
4.3.1.3	Modélisation des interactions sol-structures.....	36
4.4	CONTRIBUTIONS DE UPE-MLV / OTIG (UNIVERSITE PARIS-EST MARNE-LA-VALLEE / OBSERVATION DE LA TERRE ET INFORMATION GEOGRAPHIQUE).....	40
4.4.1	Résultats issus des techniques de télédétection par interférométrie radar.....	40
4.4.1.1	Utilisation de la méthode d'interférométrie différentielle (DInSAR) :.....	40
4.4.1.2	Utilisation de la méthode PSI.....	40
4.4.2	L'apport des Systèmes d'Information Géographique.....	45
4.4.3	La nécessité d'un étalonnage de la méthode et d'un contrôle terrain.....	45
5.	LES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS ISSUES DE LA RECHERCHE.....	46
6.	LA COMMUNICATION REALISEE SUR LES RESULTATS DE LA RECHERCHE.....	48
7.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51

1. INTRODUCTION

D'après le GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Etude du Climat), la concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter dans l'atmosphère, principalement du fait des activités humaines (IPCC-GIEC, 2007). L'impact sur le bilan radiatif de la Terre est important. Le climat change, avec pour la période 1995-2006 : 11 des 12 années les plus chaudes depuis 1850 et une augmentation de la température moyenne à la surface du globe de 0,76°C depuis 1860, dont 0,74°C depuis 1900 et 0,20°C depuis 1990. D'ici 2100, suivant les différents scénarios possibles quant aux émissions de gaz à effet de serre, selon les prévisions des modèles et hors événement naturel exceptionnel, la température moyenne de l'air à la surface du globe devrait augmenter de 1,1 à 6,4°C par rapport à 1990. De plus, des changements significatifs pourraient apparaître quant aux caractéristiques de variabilité des climats, s'agissant de la fréquence et de l'intensité de certains événements climatiques extrêmes : précipitations et sécheresse (Bard E., 2006 ; IPCC-GIEC, 2007).

C'est dans ce cadre général que les travaux de recherche relatifs au projet « Aléa et risque sécheresse » se sont placés. Les résultats présentés dans cette Synthèse de la Recherche, établie à partir du Rapport final du projet, prennent appui sur un état des connaissances résultant d'études antérieures, présentées dans des documents à caractère professionnel ou pédagogique, parfois orientés vers le public, l'assurance ou l'entreprise. En effet, l'analyse, la mesure et la modélisation numérique du retrait-gonflement des sols argileux, de même que l'étude des mesures constructives adaptées, mobilisent depuis plusieurs années un nombre important de groupes de recherche, dans des domaines scientifiques et techniques variés : climatologie et météorologie, géologie et géomorphologie, pédologie et botanique, géotechnique et engineering geology, technologie des constructions.

Dans ces actions de recherche, les six thèmes de recherche suivants sont appréhendés pour traiter globalement de la problématique de la sécheresse géotechnique :

- Thème 1: Typologie des sécheresses. Facteurs de préparation et de déclenchement. Indicateurs climatiques. Retours d'expériences sur les caractéristiques des sécheresses passées. Changement climatique global et événements extrêmes.
- Thème 2: Minéralogie et texture des sols argileux et des marnes. Relations eau - argiles. Caractérisation de l'aptitude au retrait- gonflement des sols argileux. Caractérisations thermo-hydro-mécaniques des processus de retrait-gonflement. Approches expérimentales au laboratoire. Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux.
- Thème 3: Profils hydriques dans les sols argileux. Rôle de la végétation dans les processus de propagation de la sécheresse dans les sols argileux. Rôles du bâti et de son environnement sur les profils hydriques au voisinage du bâti. Mesures in situ et surveillance. Modélisation des échanges à l'interface sol-atmosphère et simulation numérique des profils hydriques.
- Thème 4: Impacts de la sécheresse géotechnique sur les constructions. Pathologie des constructions soumises à la sécheresse géotechnique. Dispositions constructives et reprises en sous-œuvre. Retours d'expérience.
- Thème 5: Cartographie de l'aléa sécheresse. Plans de Prévention des Risques. Politiques de gestion du risque de sécheresse géotechnique en France.
- Thème 6: Rôle du secteur assurantiel dans l'indemnisation des dommages. Retours d'expérience des experts d'assurance.

Plusieurs regroupements de compétences ont ainsi vu le jour ces dernières années et obtenu divers financements pour leurs travaux de recherche, leurs propres institutions développant parfois un axe de recherche spécifique sur le domaine concerné. Ces projets de recherche se sont épaulés mutuellement. C'est le cas, tout particulièrement, des projets « Aléa et risque sécheresse » de la Fondation MAIF, du projet ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) : projet ANR-RGCU et du projet « Sécheresse géotechnique et bâti » du R2DS (Réseau de Recherche sur le Développement Soutenable) soutenu par la région Ile-de-France. Ces différents travaux se sont inscrits dans un processus de recherche théorique, expérimentale ou appliquée.

2. LA PROBLEMATIQUE DU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX

L'origine de la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement est toujours un sujet de recherche, de même que la caractérisation des facteurs de prédisposition et des facteurs déclenchants. Il faut aussi se préoccuper de différencier, d'une part les facteurs naturels et environnementaux, d'autre part les facteurs anthropiques, responsables du retrait-gonflement et des dommages au bâti.

On sait que les processus de retrait-gonflement des sols argileux, générateurs de tassements différentiels et de dommages au bâti, trouvent leur origine dans des facteurs de prédisposition relatifs à la *composition minéralogique* et la *microstructure* des sols concernés. Ces facteurs résultent de l'histoire géologique des sols argileux - sédimentation, diagenèse, altération - et des sollicitations hydriques, thermiques et mécaniques correspondantes, passées et actuelles (Cojean, 2007).

Le déclenchement des processus de retrait-gonflement, de même que leur préparation, leur entretien ou leur réactivation, résultent de facteurs environnementaux : contexte climatique et scénarios climatiques, cadre géologique et géomorphologique, contexte hydrologique et hydrogéologique, type d'occupation du sol par le bâti, type de végétation présente à proximité du bâti. Certains de ces facteurs sont d'origine anthropique et l'homme doit parfois être reconnu comme un facteur aggravant ces processus de retrait-gonflement. Dans certains cas il faut admettre qu'il est directement à l'origine des dommages occasionnés au bâti par suite d'un manquement aux règles de l'art de la construction.

La majorité des sols argileux est sensible au phénomène de retrait-gonflement. Cette sensibilité, à l'échelle de l'échantillon de laboratoire, varie principalement en fonction de plusieurs facteurs :

- la nature et la proportion des *minéraux argileux* présents dans les sols argileux. Ces minéraux, de la famille des phyllosilicates, présentent une surface spécifique, une capacité d'échange de cations et une affinité pour les molécules d'eau dipolaires importante et très variable suivant leur espèce minéralogique.
- la *microstructure* (parfois nommée *texture*) des sols argileux et les caractéristiques géométriques du *milieu poreux*, contrôlant la plus ou moins grande facilité d'accès des molécules d'eau aux sites d'adsorption représentés principalement par les minéraux argileux et secondairement par des colloïdes.
- la présence d'*autres minéraux* (quartz, carbonates, etc.) et leur disposition en rapport avec la microstructure du sol argileux, pouvant contrarier les accès des molécules d'eau aux sites d'adsorption ou jouant un rôle dans les caractéristiques de déformabilité du matériau.
- la *densité initiale* du matériau. Plus la densité initiale du matériau est forte (ou son indice des vides faible), plus la capacité du matériau à développer des pressions de gonflement, s'il est mis en présence d'eau, est *a priori* forte, de même que l'amplitude de gonflement. A l'inverse, plus la densité initiale du matériau est faible (ou son indice des vides fort), plus son aptitude à donner lieu au phénomène de retrait en période de sécheresse est *a priori* élevée.

- la *teneur en eau initiale* du sol, par comparaison avec ses limites de retrait, de plasticité et de liquidité, qui contrôle évidemment la plus ou moins grande capacité du sol à se rétracter ou à gonfler suivant le type de sollicitation hydrique.

A l'échelle de la formation géologique et non plus de l'échantillon de laboratoire, la structure géologique contrôle également fortement l'accès de l'eau aux zones et sites d'adsorption. Des intercalations silteuses ou sableuses ou bien la présence de fissures verticales éventuellement colmatées de produits silteux favorisent les échanges hydriques, soit au sein de la formation géologique, soit au niveau de l'interface sol-atmosphère.

Les *altérations et remaniements de surface* (présence d'altérites et de colluvions argileuses, développement de profils pédologiques) conduisent également à une structuration complexe des formations superficielles argileuses, cette structuration allant généralement dans le sens d'un plus facile accès de l'eau aux zones et sites d'adsorption et donc une plus grande sensibilité de ces formations argileuses aux processus de retrait-gonflement.

Enfin l'envahissement des sols argileux, en profondeur, par le *système racinaire* de la végétation arbustive ou arborée est à mettre en rapport avec des processus d'extraction d'eau *in situ* particulièrement efficaces dans les processus de retrait des sols, cette extraction se réalisant au sein même de la formation argileuse sur de grandes profondeurs et non depuis la seule surface du terrain naturel.

Ainsi, ces différents facteurs, à considérer depuis l'échelle de l'échantillon de laboratoire jusqu'à l'échelle de la formation géologique sur le terrain, contrôlent les amplitudes et les cinétiques de retrait ou de gonflement des sols argileux.

Observons aussi que *l'état de référence des sols superficiels* est très variable suivant le *contexte climatique zonal*. Dans le cas des pays de climats tropicaux secs (régions désertiques ou semi-désertiques) et méditerranéens, où l'état de référence des sols est généralement un état de sol sec ou de faible teneur en eau la plus grande partie de l'année, la sollicitation hydrique à l'origine des dommages est très souvent représentée par un apport d'eau inhabituel, générateur de processus de *gonflement* des sols argileux. A l'inverse, dans le cas des pays de climats tempérés océaniques ou continentaux, où l'état de référence des sols est le plus souvent un état de sol humide, la sollicitation hydrique à l'origine des dommages est un assèchement des sols en surface, sollicitation d'origine climatique ou liée à l'action de la végétation, génératrice de processus de *retrait* des sols argileux.

Observons enfin que les processus de retrait et les processus de gonflement sont tous deux en cause dans la « sécheresse géotechnique », ces deux types de processus ayant évidemment leurs caractéristiques propres, à étudier spécifiquement, au travers d'essais de retrait et de gonflement conduits au laboratoire, d'essais sur modèles physiques, de suivis expérimentaux *in situ* des profils hydriques ainsi que des tassements ou des gonflements des sols, de simulations numériques adaptées.

Les travaux résumés dans cette Synthèse de la Recherche relative au projet « Aléa et Risque Sécheresse » concernent les thèmes suivants :

- l'analyse du retrait-gonflement des sols argileux sous diverses sollicitations hydriques et mécaniques, avec dans certains cas des sollicitations de nature cyclique ;
- l'analyse du comportement de l'interface sol-atmosphère, contrôlé par les conditions de succion du sol, responsable des profils hydriques à l'origine des processus de retrait-gonflement ;
- l'analyse du comportement du bâti, variable suivant les conditions de structure du bâti et les conditions d'interface fondation-terrain ;
- le suivi interférométrique des faibles déplacements des structures soumises aux sollicitations résultant des processus de retrait-gonflement des sols argileux ;
- des conclusions, d'ordre méthodologique, énoncées sous forme de recommandations pour ce qui concerne une meilleure prise en compte de l'aléa et du risque sécheresse.

3. LE CONTEXTE INSTITUTIONNEL, REGLEMENTAIRE, TECHNIQUE ET ASSURANTIEL

3.1 INTRODUCTION

Il est important de rappeler les grands principes des démarches de prévention et d'information préventive, exposés sur le site www.prim.net du MEEDDAT, en particulier dans le document : « Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? », consacré au thème de recherche de ce projet.

L'information préventive des citoyens sur les risques majeurs auxquels ils peuvent être soumis est inscrite dans la loi du 22 juillet 1987, reprise dans l'article L125.2 du code de l'environnement. Les risques majeurs auxquels sont exposés les habitants d'un département sont recensés dans le DDRM (Dossier Départemental des Risques Majeurs), établi sous l'autorité du préfet. S'appuyant sur ce document, le préfet porte à la connaissance du maire les risques auxquels sont exposés les habitants de la commune. Le maire fait alors élaborer un DICRIM (Document d'Information Communale sur les Risques Majeurs), précisant les dispositions préventives et de protection qui sont prises à l'échelle communale. Par voie d'affiches le maire fait connaître aux habitants les principaux éléments se rapportant à ces risques majeurs. De même, les propriétaires de terrains ou d'immeubles doivent procéder à cet affichage. Enfin, les vendeurs et bailleurs doivent informer les acquéreurs et locataires lorsqu'un remboursement de sinistre au titre de la déclaration de catastrophe naturelle est intervenu sur la commune concernée.

3.2 LA CARTOGRAPHIE DEPARTEMENTALE DE L'ALEA RETRAIT-GONFLEMENT

C'est la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles qui a permis la prise en compte par les compagnies d'assurances des sinistres liés à la sécheresse. Pour ce qui concerne l'Ile-de-France, région sur laquelle se sont concentrées les applications traitées par le projet « Aléa et risque sécheresse », il apparaît que les 7 départements d'Ile-de-France font partie des 20 départements présentant le plus fort coût total d'indemnisation à l'échelle nationale.

Les études de cartographie départementale de l'aléa sécheresse, réalisées par le BRGM (Programme 1998-2010), avec le soutien du MEEDDAT, ont pour objectifs 1) de mettre en évidence la relation existant entre la nature géologique des terrains et la répartition statistique des sinistres, 2) d'élaborer un document de prévention par référence à l'acte de construire, utile aux communes et à l'Etat (en particulier pour l'établissement des PPRN : Plans de Prévention des Risques Naturels), aux assureurs (pour une meilleure appréciation de l'aléa à mettre en rapport avec des sinistres constatés), aux maîtres d'ouvrages (pour qu'ils mettent en œuvre les techniques constructives permettant d'éviter les dommages aux structures en cas de retrait-gonflement des sols de fondation), 3) de mettre à disposition des experts un outil qui constitue une aide au diagnostic en cas de sinistres futurs.

Les différents rapports établis par le BRGM prennent appui sur une documentation existante issue des travaux de cartographie géologique, de travaux universitaires (thèses), de rapports d'études géotechniques, de comptes rendus de sinistres. La cartographie est réalisée à l'échelle du 1/50 000, correspondant à l'échelle de la carte géologique préexistante. Il faut souligner que de ce fait, cette cartographie ne saurait prendre en compte, dans le détail, la variabilité attachée aux formations géologiques elles-mêmes (lithofaciès, épaisseurs), qu'il s'agisse des formations du substrat ou des formations superficielles, ainsi qu'aux contextes géomorphologiques, hydrologiques et hydrogéologiques locaux. Une telle cartographie permet une première approche, à l'échelle départementale, de la problématique du retrait-gonflement des sols argileux. Néanmoins, il faut considérer que, du fait de l'échelle de la cartographie, en rapport avec les moyens alloués à une telle mission, il reste nécessaire de mettre en œuvre une étude géotechnique au niveau de la parcelle avant toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par des formations géologiques définies comme représentant un aléa moyen à fort.

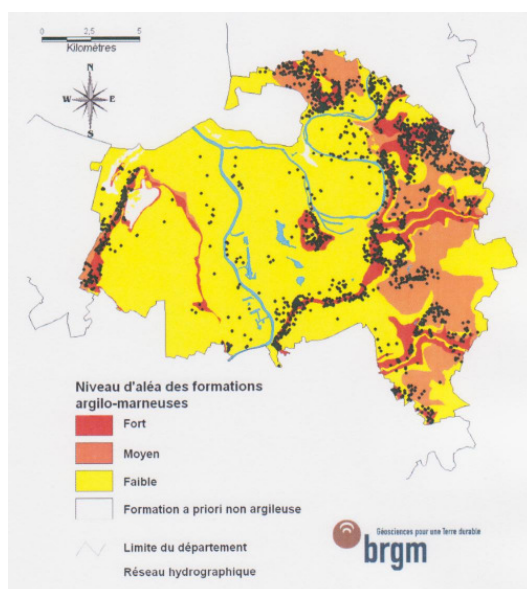


Figure 3.2.1 : Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement du Val de Marne (94)
site BRGM : www.argiles.fr

La méthodologie mise en œuvre (Vincent et al., 2007, Vincent et al., 2008) consiste à croiser plusieurs couches d'information géoréférencées. La carte géologique à l'échelle du 1/50 000 permet de délimiter les formations affleurantes (formations du substrat géologique ou formations superficielles quaternaires), tout en prenant appui sur la BSS : Banque des données du Sous-Sol). Ces formations font ensuite l'objet d'une hiérarchisation sur la base de 3 critères : nature lithologique (le caractère plus ou moins argileux au sens granulométrique étant spécialement pris en compte), composition minéralogique (la présence de minéraux argileux gonflants - smectites, interstratifiés - étant spécialement considérée), comportement géotechnique (par référence à des essais d'identification géotechnique de type : indice de plasticité, valeur de bleu, retrait linéaire). La combinaison de ces éléments permet d'établir *une carte de susceptibilité* au retrait-gonflement (3 catégories sont définies et notées, avec note 1 : susceptibilité faible, note 2 : susceptibilité moyenne, note 3 : susceptibilité forte).

Ensuite, l'analyse des sinistres identifiés comme en rapport avec la problématique du retrait-gonflement est réalisée avec, pour chaque formation argileuse, la définition d'une densité de sinistres ramenée à 100 km² de surface réellement urbanisée et l'établissement d'une *carte de sinistralité* (3 catégories sont définies et notées, avec note 1 : sinistralité faible, note 2 : sinistralité moyenne, note 3 : sinistralité forte). L'analyse de ces 2 cartes (en affectant un poids double à la note de susceptibilité par rapport à la note de sinistralité) conduit enfin à l'établissement d'une *carte d'aléa* (Figure 3.2.1).

Le retour d'expérience attaché à cette démarche méthodologique permet de dire (Vincent et al., 2008) que : 1) les secteurs classés en aléa fort correspondent à des zones où affleurent des formations argileuses riches en smectites, avec une forte sinistralité pour les zones actuellement urbanisées, 2) les secteurs classés en aléa moyen correspondent à des zones où les formations géologiques à l'affleurement sont argileuses mais plus hétérogènes, avec une sinistralité moins régulière, 3) les secteurs classés en aléa faible correspondent à des zones où les formations géologiques à l'affleurement sont très hétérogènes, seulement localement argileuses, avec une sinistralité très irrégulièrement répartie.

3.3 LES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS

Le programme de cartographie départementale relatif à l'aléa retrait-gonflement participe à la démarche d'information du public, en particulier des propriétaires et des différents acteurs de la construction. En même temps, cette cartographie est un préalable à l'élaboration des PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels) au niveau communal, à l'échelle du 1/10000. Le PPRN concerne notamment toute personne sollicitant un permis de construire, le document délimitant les zones exposées au phénomène et réglementant l'occupation des sols. Des règles constructives y sont présentées, obligatoires ou recommandées, visant à réduire l'apparition de désordres au bâti. Dans les secteurs exposés, le PPRN peut imposer la réalisation d'une étude géotechnique spécifique avant tout nouveau projet de construction. Les PPRN relatifs au retrait-gonflement ne prévoient pas d'inconstructibilité, même dans les zones d'aléa fort. Dans tous les cas, le respect des règles de l'art relatives à l'acte de construire constitue une exigence minimum pour assurer la résistance nécessaire du bâti.

Le document intitulé « Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? », disponible sur www.prim.net, donne sous forme de fiches pédagogiques les principales règles relatives à l'art de construire sur sols argileux sensibles au retrait-gonflement. Ces fiches sont classées en 2 groupes : a) des fiches permettant une adaptation du bâti, permettant de s'opposer au phénomène de retrait-gonflement et ainsi minimiser les désordres au bâti (Fiches 1, 2 et 9) et b) des fiches permettant de minimiser le risque d'occurrence et l'ampleur du phénomène de retrait-gonflement (Fiches 3 à 8 et 10). On y trouve ainsi les fiches suivantes :

- Fiche 1 : Adaptation des fondations ;
- Fiche 2 : Rigidification de la structure du bâtiment ;
- Fiche 3 : Réalisation d'une ceinture étanche autour du bâtiment ;
- Fiche 4 : Eloignement de la végétation du bâtiment ;
- Fiche 5 : Création d'un écran anti-racines ;

- Fiche 6 : Raccordement des réseaux d’eaux au réseau collectif ;
- Fiche 7 : Etanchéification des canalisations enterrées ;
- Fiche 8 : Limitation des conséquences d’une source de chaleur en sous-sol ;
- Fiche 9 : Désolidarisation des différents éléments de structure ;
- Fiche 10 : Réalisation d’un dispositif de drainage.

Pour chaque fiche, le problème à résoudre est présenté, le dispositif adapté est décrit et illustré, les conditions de mise en œuvre et les mesures d’accompagnement ou alternatives sont indiquées.

Ce document reprend ou actualise des documents déjà publiés, en particulier :

- CEBTP. 1991. *Guide pratique : Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse*. Sous l’égide de AQC, APSAD, AFAC, CCR, FNB. Fascicule 1 : *Bases de référence*. 48 p., Glossaire, Fascicule 2 : *Principes et méthodologie* : 8 p., Tableaux guides, Tableaux des solutions élémentaires, Schémas de désordres et de principe de réparation, Glossaire. Fascicule 3 : *Annexes techniques*, 123 p. Edition SEDITTA, Paris.
- DPPR. 1993. *Sécheresse et construction : Guide de prévention*. 51 p. La Documentation Française.
- FFSA et GEMA. 2001. *Fascicule sécheresse*. 24 p.
- AQC (Agence Qualité Construction). 2004. *Fondations de maisons individuelles. Principales pathologies* – avec CD Rom pédagogique à partir d’études de cas concrets. *Diaporama retrait gonflement des sols argileux et brochure d’information*.

Les Plans de Prévention des Risques Naturels comportent un zonage réglementaire et un règlement. Pour l’aléa retrait-gonflement, on dispose d’un « Modèle de règlement » sur lequel notre groupe de recherche a été consulté.

En l’état, le modèle de règlement comporte 4 Titres et se présente comme suit, les points les plus importants étant repris, selon document du MEEDDAT (extraits) :

Titre I : Portée du règlement

Article 1 : Champ d’application

Le principe du zonage est décrit. Le plan de zonage comprend deux zones exposées au risque de retrait-gonflement, définies en fonction du niveau d’aléa : une zone très exposée (B1) et une zone faiblement à moyennement exposée (B2).

Les principes réglementaires sont précisés : le règlement définit :

- les conditions de réalisation, d’utilisation et d’exploitation des projets d’aménagement et de construction ;
- les mesures relatives aux biens et activités existant en vue de leur adaptation au risque ;
- les mesures plus générales de prévention, de protection et de sauvegarde qui incombent aux particuliers ou aux collectivités.

Article 2 : Effets du PPRN

Le PPRN approuvé vaut servitude d’utilité publique. A ce titre il doit être annexé au Plan Local d’Urbanisme (PLU). Les mesures prescrites dans le règlement doivent être mises en œuvre sous la responsabilité du maître d’ouvrage et du maître d’œuvre.

Article 3 : Dérogations aux règles du PPRN

Les dispositions du règlement ne s'appliquent pas si l'absence d'argile sur l'emprise de la totalité de la parcelle est démontrée par sondage selon une étude géotechnique au minimum de type G11 (étude géotechnique préliminaire de site) au sens de la norme NF P 94-500.

Titre II : Réglementation des projets

Chapitre 1 - Mesures générales applicables aux projets de construction de bâtiments

Article 1 : Est prescrit en zones B1 et B2

Une série d'études géotechniques sur l'ensemble de la parcelle est prescrite afin de définir les dispositions constructives et environnementales nécessaires pour assurer la stabilité des bâtiments vis-à-vis du risque de tassement différentiel. Ces études correspondent à des missions géotechniques de type G12 (étude géotechnique d'avant-projet), G2 (étude géotechnique de projet) et G3 (étude et suivi géotechnique d'exécution) au sens de la norme géotechnique NF P 94-500. Toutes les dispositions et recommandations issues de ces études doivent être appliquées.

Chapitre 2 - Mesures particulières applicables aux constructions de maisons individuelles et de leurs extensions

Maison individuelle s'entend au sens de l'article L.231-1 du Code de la Construction et de l'Habitation : construction d'un immeuble à usage d'habitation ou d'un immeuble à usage professionnel et d'habitation ne comportant pas plus de deux logements.

Article 2 : Est prescrit en zones B1 et B2 : en l'absence d'études géotechniques, il est prescrit la réalisation de l'ensemble des règles forfaitaires définies aux articles 2-1 et 2-2.

Article 2-1 : Règles de construction

Article 2-1-1 : Est interdit : l'exécution d'un sous-sol sous une construction d'un seul tenant, sauf mise en place d'un joint de rupture.

Article 2-1-2 : Sont prescrites les mesures suivantes :

- Des fondations d'une profondeur minimum de 1,20 m en zone B1 et 0,80 m en zone B2, sauf rencontre de terrains rocheux insensibles à l'eau à une profondeur inférieure.
- Des fondations plus profondes à l'aval qu'à l'amont pour les terrains en pente, afin d'assurer une homogénéité de l'ancrage.
- Des fondations continues, armées et bétonnées à pleine fouille, dimensionnées selon les préconisations du DTU 13-12 « Règles pour le calcul des fondations superficielles » et réalisées suivant les préconisations du DTU 13-11 « Fondations superficielles – cahier des clauses techniques » lorsqu'elles sont sur semelles.
- Toutes parties de bâtiment fondées différemment et susceptibles d'être soumises à des tassements différentiels doivent être désolidarisées et séparées par un joint de rupture sur toute la hauteur de la construction.

- Les murs porteurs doivent comporter un chaînage horizontal et vertical liaisonné, dimensionné et réalisé suivant les préconisations du DTU 20-1 « Ouvrages de maçonnerie en petits éléments : Règles de calcul et dispositions constructives minimales ».
- Si le plancher bas est réalisé sur radier général, la réalisation d'une bêche périphérique est prescrite. S'il est constitué d'un dallage sur terre plein, il doit être réalisé en béton armé, après mise en œuvre d'une couche de forme en matériaux sélectionnés et compactés selon les préconisations du DTU 13-3 : « Dallages : conception, calcul et exécution ». Des dispositions doivent être prises pour atténuer le risque de tassements différentiels vis-à-vis de l'ossature de la construction et de leurs conséquences, notamment sur les refends, cloisons, doublages et canalisations. Les solutions de type plancher porté sur vide sanitaire et sous-sol total doivent être privilégiées.
- En cas d'implantation d'une source de chaleur en sous-sol (chaudière ou autre), celle-ci ne devra pas être positionnée le long des murs périphériques du sous-sol. A défaut, il devra être mis en place un dispositif spécifique d'isolation des murs.

Article 2-2 : Dispositions relatives à l'environnement immédiat des projets de bâtiments

Les dispositions suivantes réglementent l'aménagement des abords immédiats des bâtiments à la fois pour les zones B1 et B2. Elles ont pour objectif de limiter les risques de retrait-gonflement par une bonne gestion des eaux superficielles et de la végétation.

Article 2-2-1 : Sont interdits : toute plantation d'arbre ou d'arbuste à une distance de tout bâtiment existant, ou du projet, inférieure à leur hauteur à maturité (1,5 fois en cas d'un rideau d'arbres ou d'arbustes) sauf mise en place d'un écran anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m interposé entre la plantation et les bâtiments.

Article 2-2-2 : Sont prescrits :

- La mise en place de dispositifs assurant l'étanchéité des canalisations d'évacuation des eaux usées et pluviales (raccords souples notamment).
- La récupération et l'évacuation des eaux pluviales et de ruissellement des abords du bâtiment par un dispositif d'évacuation de type caniveau éloigné à une distance minimale de 1,50 m de tout bâtiment.
- Le captage des écoulements de faible profondeur, lorsqu'ils existent, par un dispositif de drainage périphérique à une distance minimale du bâtiment de 2 m.
- Le rejet des eaux pluviales et usées et des dispositifs de drainage dans le réseau collectif lorsque cela est possible. En cas d'assainissement autonome, le rejet doit être fait à l'aval du bâtiment et à une distance minimale d'éloignement de 10 m de tout bâtiment.
- La mise en place sur toute la périphérie du bâtiment, à l'exception des parties mitoyennes avec un terrain déjà construit ou revêtu, d'un dispositif s'opposant à l'évaporation (terrasse ou géomembrane enterrée par exemple) et d'une largeur minimale de 1,5 m.
- La mise en place d'écrans anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m entre le bâtiment projeté et tout arbre ou arbuste existant situé à une distance inférieure à sa propre hauteur à maturité ou, à défaut, l'arrachage des arbres concernés.

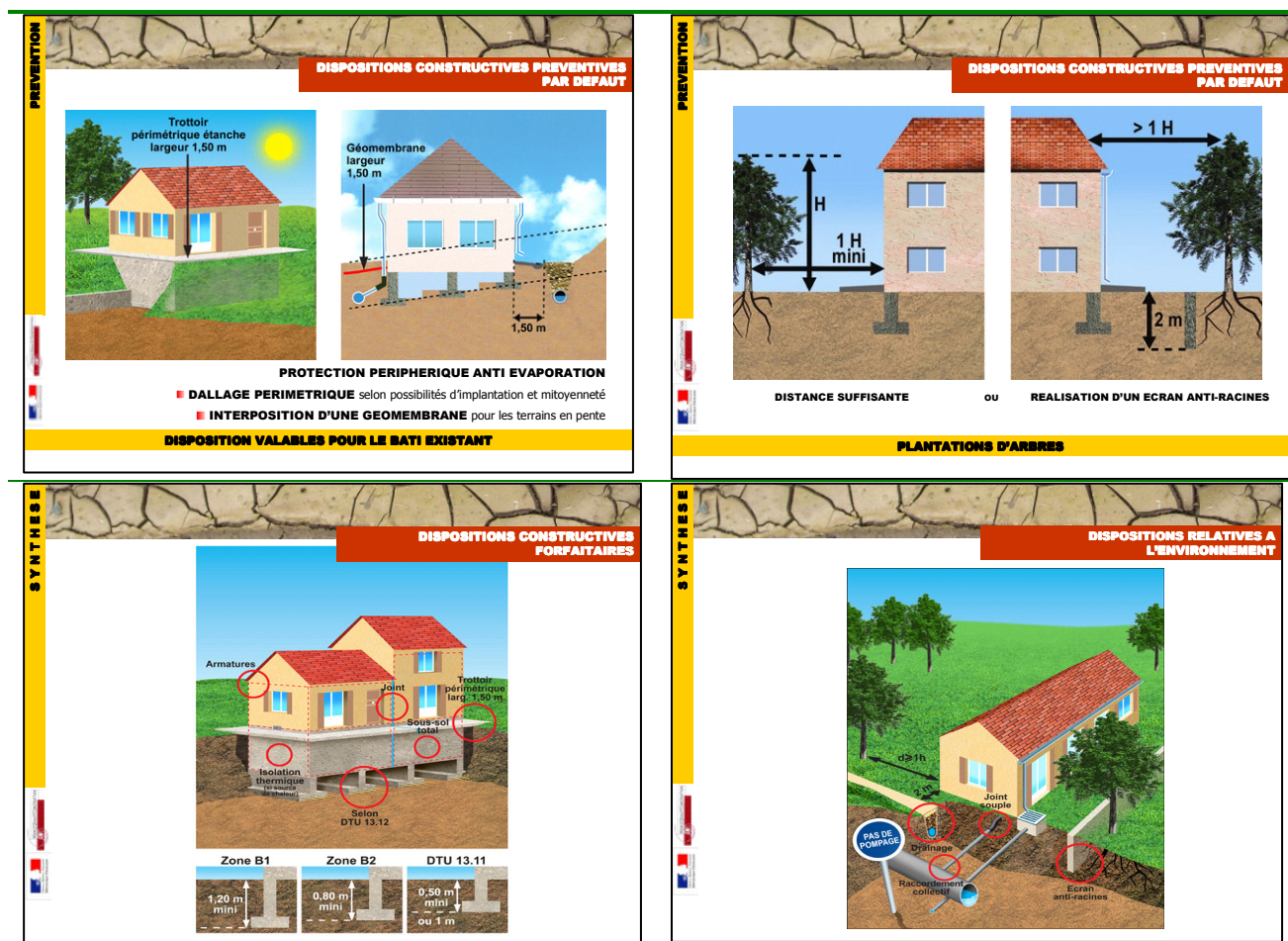


Figure 3.3.1: Fondations de maisons individuelles. Des désordres aux bonnes pratiques. CD Rom AQC (Agence Qualité Construction), novembre 2004. <http://www.qualiteconstruction.com>

Article 3 : Est recommandé

Le respect d'un délai minimal de 1 an entre l'arrachage des arbres ou arbustes situés dans l'emprise du projet et à son abord immédiat et le démarrage des travaux de construction, lorsque le déboisement concerne des arbres de grande taille ou en nombre important.

Titre III : Mesures applicables aux biens et activités existants

Cette partie du règlement définit les adaptations qui doivent être effectuées par les propriétaires sur les biens construits ou aménagés avant l'approbation du PPRN. Il s'agit de dispositions visant à diminuer les risques de désordres par le retrait-gonflement des argiles en limitant les variations de teneur en eau dans le sol sous la construction et à sa proximité immédiate. Les mesures indiquées n'incombent qu'aux propriétaires des biens de types « maisons individuelles » au sens de l'article L.231-1 du Code de la Construction et de l'Habitation.

Article 1 : Sont prescrites dans un délai de 5 ans en zone B1 et recommandées en zone B2 : la collecte et l'évacuation des eaux pluviales des abords du bâtiment par un système approprié dont le rejet sera éloigné à une distance minimale de 1,50 m de tout bâtiment.

Article 2 : Sont recommandées en zones B1 et B2 les mesures suivantes :

- La mise en place d'un dispositif s'opposant à l'évaporation (terrasse ou géomembrane enterrée) et d'une largeur minimale de 1,50 m sur toute la périphérie du bâtiment, à l'exception des parties mitoyennes avec un terrain déjà construit ou revêtu.

Titre IV : Mesures de prévention, de protection et de sauvegarde

Article 1 : Est prescrit en zone B1 et recommandé en zone B2 : L'élagage régulier (au minimum tous les 3 ans) de tous arbres ou arbustes implantés à une distance de toute maison individuelle inférieure à leur hauteur à maturité, sauf mise en place d'un écran anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m interposé entre la plantation et les bâtiments.

Article 2 : Sont prescrites les mesures suivantes en zones B1 et B2 et sont immédiatement applicables :

- Toute nouvelle plantation d'arbres doit respecter une distance d'éloignement par rapport à tout bâtiment au moins égale à la hauteur de la plantation à maturité (1,5 fois en cas d'un rideau d'arbres ou d'arbustes) ou être accompagnée de la mise en place d'un écran anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m interposé entre la plantation et les bâtiments.
- La création d'un puits pour usage domestique doit respecter une distance d'éloignement de tout bâtiment d'au moins 10 m.
- En cas de remplacement des canalisations d'évacuation des eaux usées et/ou pluviales, il doit être mis en place des dispositifs assurant leur étanchéité (raccords souples notamment).
- Tous travaux de déblais ou de remblais modifiant localement la profondeur d'encastrement des fondations doivent être précédés d'une étude géotechnique de type G12 au sens de la norme NF P 94-500, pour vérifier qu'ils n'aggraveront pas la vulnérabilité du bâti.

Article 3 : Sont recommandés en zones B1 et B2

- Les contrôles réguliers d'étanchéité des canalisations d'évacuation des eaux usées et pluviales existantes et leur étanchéification en tant que de besoin, cette recommandation concernant les particuliers et les gestionnaires de réseaux.
- Ne pas pomper d'eau entre mai et octobre, dans un puits situé à moins de 10 m d'un bâtiment existant, lorsque la profondeur du niveau de l'eau (par rapport au terrain naturel) est inférieure à 10 m.

Plusieurs des prescriptions ou recommandations de ce règlement sont illustrées en Figure 3.3.1

3.4 L'ASSURANCE FACE AUX DOMMAGES AUX CONSTRUCTIONS LIES A LA SECHERESSE

3.4.1 Le cadre général

L'importance des dommages dus aux phénomènes de retrait/gonflement des sols argileux depuis 1989 et la quasi-certitude de leur renouvellement en cas de nouveaux épisodes de sécheresse intense et durable, ont conduit à la mise en œuvre d'une politique de prévention destinée à réduire le niveau de sinistralité (Toulemont M. et Cojean R., 2007).

Les principales périodes de sécheresse ayant entraîné des dommages au bâti clairement identifiés sont connues : période 1989/1992, période 1996/1997, année 2003.

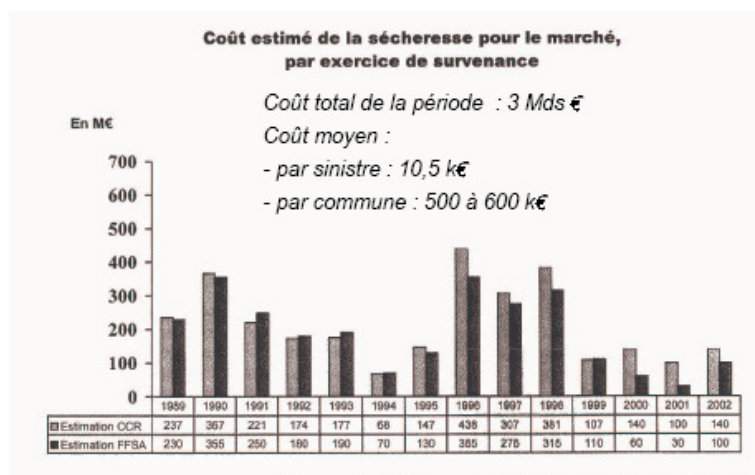


Figure 3.4.1: Coût estimé de la sécheresse entre 1989 et 2002 (estimations CCR et FFSA), in R. Nussbaum (ppt, séance technique CFGI-CFMS, 18-01-2007)

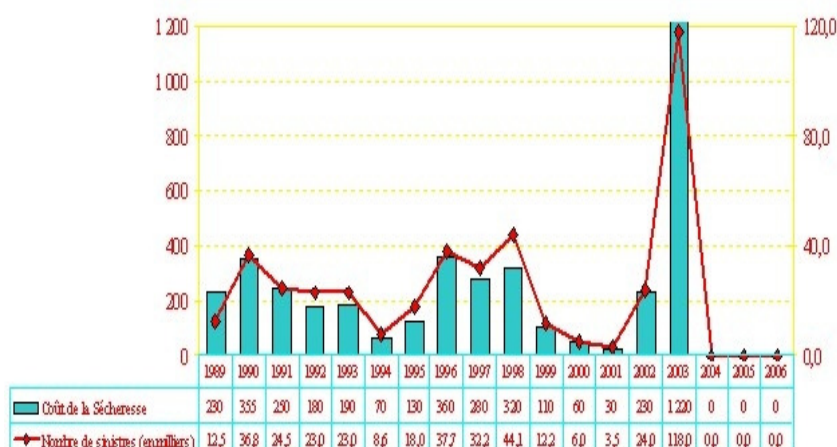


Figure 3.4.2: Coût de la sécheresse (échelle gauche, en millions d'euros) et nombre de sinistres (échelle droite, en milliers de sinistres), entre 1989 et 2006, d'après FFSA

De 1989 à 2002, le coût global d'indemnisation (dans le cadre du régime d'indemnisation Catastrophes Naturelles ou Cat-Nat) a été d'environ 3 milliards d'euros, selon la CCR (Caisse

Centrale de Réassurance), en deuxième poste de dépenses après les indemnités concernant le risque inondation (Figure 3.4.1, Figure 3.4.2).

La profession : maîtres d'œuvre, entreprises, géotechniciens, assureurs, s'est très tôt intéressée à ce sujet technique avec différentes actions entreprises sous l'égide des ministères de l'environnement ou de l'écologie. Ainsi, il faut rappeler que l'Agence Qualité Construction (AQC) a fait réaliser en 1990, par un réseau d'experts, une enquête statistique sur 356 bâtiments sinistrés, afin de préciser les causes de pathologie des maisons individuelles. En 1991, le CEBTP (Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics) a réalisé une enquête sur 412 bâtiments endommagés par la sécheresse géotechnique. Ces études ont permis d'identifier le profil de la construction sinistrée. Il s'agit d'une maison individuelle en rez-de-chaussée (72%), avec dallage sur terre plein (68%), fondée entre 0,40 m et 0,80 m de profondeur (77%), sur un sol argileux (97%) et avec des arbres à proximité (30%). Il en a résulté, sous l'égide des organismes : AQC, APSAD, AFAC, CCR et FNB, l'édition d'un guide pratique sur « La détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse » (CEBTP, 1991). La Revue Française de Géotechnique a publié un article consacré au retrait-gonflement des argiles dans le N° 57 (octobre 1991) puis un ensemble de cinq articles dans le N° 58 (janvier 1992) passant en revue les aspects scientifiques et techniques du problème et présentant les conditions d'application de la loi du 13 juillet 1982 sur l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles.

En 1993, la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) du Ministère de l'Environnement a publié, à la Documentation Française, un guide de prévention « Sécheresse et construction » (DPPR, 1993) présentant des recommandations à l'usage des constructeurs et énonçant les principes d'une cartographie de l'aléa et du risque sécheresse géotechnique. Ce guide, tiré à 5000 exemplaires, a été transmis en 1998 aux préfets des départements concernés et à l'ensemble des maires des communes reconnues sinistrées par arrêté interministériel portant constatation de l'état de catastrophe naturelle.

En 1993, la DPPR a établi un document présentant la méthodologie d'une cartographie de l'aléa « sensibilité des sols à la sécheresse » et la carte correspondante au 1/1.000.000. Quatre classes d'aléa étaient distinguées, prenant en compte les caractéristiques lithologiques et géotechniques des formations géologiques ainsi que leur degré d'homogénéité et prenant appui sur l'analyse en retour des conséquences des événements « sécheresse géotechnique » disponibles à cette époque, au vu des dossiers des communes reconnues sinistrées par arrêté interministériel dans le cadre du régime d'indemnisation Cat-Nat (Toulemont et al., 1994). Cette cartographie préfigurait la cartographie départementale actuellement en cours sur l'ensemble du territoire. En 1995, dans le cadre de la procédure spécifique de prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire, au plan réglementaire, la DPPR du Ministère de l'Ecologie et du développement durable (MEDD) a lancé la réalisation des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN). A la suite des sécheresses pluriannuelles de 1989-1992, de 1996-1997, puis de la canicule de 2003, le MEDD (devenu MEEDDAT) a mandaté le BRGM afin d'établir la cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement au 1/50 000ème sur la France entière (Vincent, 2003).

Les assureurs ont aussi progressivement apporté leur contribution à cette démarche d'information (MAIF, 2000, FFSA et GEMA, 2001).

Enfin, le document intitulé « Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? », disponible sur www.prim.net, paru en 2008, donne sous forme de fiches pédagogiques les principales règles relatives à l'art de construire sur sols argileux.

Le Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement (CFGIE) a réalisé plusieurs séances techniques relatives au thème des sols sensibles à la sécheresse : en janvier 1991 sur le thème « Sécheresse, terrains argileux et fondations », puis en janvier 2003 sur le thème « Sols sensibles à l'eau, retours d'expérience ». En janvier 2007 une journée technique CFGIE-CFMS était organisée sur le thème « Sécheresse géotechnique », accueillant plus de 150 participants. En novembre 2008 a été organisé le symposium international Sécheresse et Constructions 2008 (SEC 2008) qui a conduit à l'édition d'un ouvrage rassemblant 54 communications couvrant tous les thèmes techniques et scientifiques en rapport avec la sécheresse géotechnique.

L'établissement des PPR Sécheresse géotechnique et la définition d'un règlement adapté à ce type d'aléa reste aujourd'hui encore un sujet de concertation entre spécialistes. Il faut noter que l'importance des dégâts immobiliers durant les dernières décennies et les risques de nouvelles périodes de sécheresse ont conduit à prendre en compte la nécessité d'une politique d'information volontariste en direction des collectivités territoriales, compte tenu de leur responsabilité en matière de prévention.

Depuis la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels, les maires doivent en effet informer périodiquement, tous les 2 ans, la population dans le cas de l'existence d'un PPRN, pour une meilleure prise en compte des mesures de prévention. En situation d'attente de réalisation de PPRN, il a été jugé important de signaler à l'ensemble des maîtres d'ouvrage, constructeurs de pavillons, professionnels du bâtiment, assureurs, les dispositions de prévention et de protection des constructions par une information systématique et des actions de communication adaptées. C'est pourquoi le MEDD (devenu MEEEDDAT) a décidé en 2004 de conduire des actions concertées avec l'Agence Qualité Construction (AQC) dont la mission essentielle est de réduire la sinistralité du bâti dans les années à venir et d'améliorer la qualité des constructions. L'AQC informe, sensibilise et motive l'ensemble des professionnels engagés dans l'acte de construire en leur faisant connaître les dispositions techniques d'ordre préventif spécifiques au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.

Aujourd'hui, compte tenu de la quasi certitude, selon le GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Etude du Climat), du réchauffement climatique et de ses répercussions sur les phénomènes de sécheresse, il apparaît nécessaire, par mesure de précaution, d'accélérer les mesures de prévention et de protection actuellement en cours, afin de diminuer, à l'avenir, les effets de la sécheresse (Durand, 2007). D'une façon générale, d'après ce rapport, la concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter dans l'atmosphère, en particulier du fait des activités humaines (IPCC-GIEC, 2007). L'impact sur le bilan radiatif de la Terre est important. Le climat change, avec pour la période 1995-2006 :

11 des 12 années les plus chaudes depuis 1850 et une augmentation de la température moyenne à la surface du globe de 0,76°C depuis 1860, dont 0,74°C depuis 1900 et 0,20°C depuis 1990. D'ici 2100, suivant les différents scénarios possibles quant aux émissions de gaz à effet de serre, selon les prévisions des modèles et hors événement naturel exceptionnel, la température moyenne de l'air à la surface du globe devrait augmenter de 1,1 à 6,4°C par rapport à 1990. De plus des changements significatifs pourraient apparaître quant aux caractéristiques de variabilité des climats, s'agissant de la fréquence et de l'intensité de certains événements climatiques extrêmes : précipitations et sécheresse (Bard, 2006 ; IPCC-GIEC, 2007).

On peut donc craindre, sous les latitudes des pays tempérés, que des processus actuellement connus mais se présentant avec de faibles intensités et des effets limités, viennent à se développer dans le futur avec de plus fortes intensités et des effets autrement dommageables, analogues à ce qui est observé aujourd'hui sous de plus basses latitudes.

3.4.2 L'intervention des experts d'assurance

C'est dans ce contexte, d'une grande complexité technique, que doivent intervenir les experts d'assurance. L'expert d'assurance doit s'appuyer sur un savoir-faire technique (connaissances de la pathologie du bâti, des interactions terrain-fondation, de la géotechnique) mais aussi sur des qualités d'observation, ainsi que de pédagogie dans ses échanges avec les différents intervenants et en particulier les assurés (Roume, 2007).

La mise au point du Guide méthodologique de l'expertise sécheresse (MAIF, 2000), puis celle du Fascicule Sécheresse 2001 (FFSA, GEMA) ont permis de structurer l'intervention de l'expert d'assurance. Celui-ci doit élaborer un rapport-type dans lequel il doit décrire la pathologie du bâti constaté et argumenter les causes possibles de cette pathologie, en rapport ou non avec la sécheresse géotechnique. Ce document facilite la gestion des dossiers, de même que les relations entre assureurs lorsque, le sinistre s'étendant sur une longue période, plusieurs assureurs successifs sont intervenus (Roume, 2007). L'expert d'assurance doit gérer plusieurs types de questions, techniques ou non, dans sa relation avec l'assuré.

C. Roume rappelle que les arrêtés CatNat, stipulent dans leur préambule que : « La garantie CatNat est accordée lorsque les dommages matériels directs, qui résultent de la sécheresse, ont eu pour cause déterminante l'effet de cet agent naturel, et que les mesures habituelles à prendre, pour prévenir ces dommages, n'ont pas pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises ».

Ainsi il est indiqué que relèvent des « dommages directs » :

- Les frais d'études géotechniques pour instruire le sinistre de l'habitation considérée ;
- Les travaux de remise en état ;
- Les travaux de confortement destinés à éviter l'aggravation immédiate des désordres ;
- Les travaux de déblai et de démolition ;
- Les honoraires d'architecte, de bureau d'études et de contrôle technique, si entérinés par l'expert d'assurance ;
- Le coût de la prime « assurance-ouvrage ».

A l'inverse, ne relèvent pas des « dommages directs » :

- Les pertes de loyers ;
- Les pertes d'usage ;

- Les frais de déplacement du mobilier ;
- Les honoraires d'expert d'assuré.

C. Roume souligne que l'identification de « la cause déterminante » et des « mesures habituelles ... » constitue un défi majeur pour l'expert d'assurance, avec des conséquences très fortes pour l'assuré. Ce diagnostic de l'expert d'assurance doit être établi en concertation avec le géotechnicien, l'étude géotechnique, une fois réalisée, restant soumise à l'appréciation de l'expert.

Dans le détail, l'expert d'assurance est conduit à classer les désordres observés en 5 catégories :

- Cat.1 : Désordres non imputables à la sécheresse ;
- Cat. 2 : Désordres ne nécessitant qu'un traitement des fissures ;
- Cat. 3 : Désordres nécessitant de réparer les fondations et/ou les superstructures ;
- Cat. 4 : Désordres nécessitant de créer des fondations spéciales ou de mettre en œuvre tout autre moyen permettant de stabiliser le sol ;
- Cat. 5 : Sinistre total : bâtiment économiquement irréparable.

Suivant l'importance des dommages, l'expert établit un « rapport simplifié » (désordres de catégories 1 ou 2) ou un « rapport de reconnaissance sécheresse » plus détaillé, pouvant orienter vers des investigations in situ (vérification des réseaux, reconnaissance des fondations), des mesures conservatoires (rebouchage de fissures en cas de risques d'infiltration, réparations de canalisations, abattage d'arbres), une mise en observation de l'immeuble sur un cycle de saisons (avec pose de jauges de déformation), une intervention d'un géotechnicien jouant le rôle de sapiteur pour l'expert (mission géotechnique de type G0 pour les sinistres de catégorie 2, voire 1, mission géotechnique de type G5 partielle pour les sinistres de catégorie 3, 4 ou 5). Le déroulement de l'expertise conduit ensuite à la préconisation de solutions techniques de réparation (traitement des conséquences dommageables, renforcement des superstructures, reprise en sous-œuvre des fondations, réalisation de trottoirs périphériques, réparation des canalisations, mise en place d'écrans anti-racines, abattage d'arbres ou arbustes). Des entreprises qualifiées sont ensuite consultées.

Le rapport d'expertise définitif présente *in fine* des informations à caractère administratif, des précisions sur la construction, son environnement et les désordres constatés, l'avis de l'expert sur les suites à donner au sinistre. Ce rapport conduit l'expert et son mandant à présenter au sociétaire les conclusions d'une expertise réalisée suivant les règles de l'art.

Roume (2007) signale tout un ensemble de points durs à lever, dans son intervention, face à l'assuré :

- Un arrêté de catastrophe naturelle étant pris sur une commune, les désordres au bâti ne sont pas nécessairement dus à la sécheresse, même si ces désordres sont apparus pendant la période visée par l'arrêté.
- Une mise sous observation du bâti peut s'avérer nécessaire pour affiner le diagnostic.
- Une neutralisation de la végétation, qui peut s'avérer essentielle, est toujours mal acceptée, d'autant plus si cette végétation est dans la parcelle mitoyenne.

- La mise en œuvre de solutions techniques, telles que trottoir périphérique ou écran anti-racines, contribuant à limiter les effets de la sécheresse sans les supprimer totalement, est difficile à préconiser.
- Les contrôles sur les réseaux de distribution d’eaux pluviales et/ou d’eaux usées enterrés rallonge l’établissement du diagnostic.
- Des configurations particulières (effets de groupe sur des ensembles pavillonnaires, de fondation identique, avec des désordres liés à la sécheresse variables, entre pavillons au centre de l’ensemble et pavillons en bordure) conduisent à des préconisations complexes, difficiles à expliquer aux assurés.
- Une mise en œuvre des études géotechniques, si nécessaires, allonge les délais d’expertise.
- La complexité de certaines situations pour lesquelles le diagnostic final peut être techniquement difficile.

Il y a donc un partage des responsabilités, en théorie bien établi, entre les différents intervenants dans une situation de dommages au bâti en rapport avec la sécheresse, situation dans laquelle l’expert d’assurance joue un rôle clé.

4. LES RESULTATS DE LA RECHERCHE

4.1 CONTRIBUTIONS D'ARMINES / MINES PARISTECH – CENTRE DE GEOSCIENCES

4.1.1 Principes des études géologiques et géotechniques orientées vers la définition de la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement

Les éléments principaux relatifs à l'aptitude au retrait-gonflement des sols argileux, rappelés dans la Problématique du retrait-gonflement des sols argileux, sont largement confirmés par l'expérience et les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche « Aléa et risque sécheresse ». Les points fondamentaux suivants doivent être soulignés :

Certes, le caractère argileux des sols sensibles au retrait-gonflement doit être rappelé, mais il faut surtout mettre l'accent sur les surfaces spécifiques développées par les matériaux concernés et sur les conditions d'accès des molécules d'eau dipolaires aux sites d'adsorption : composition minéralogique et microstructure interviennent directement pour rendre compte de ces processus d'adsorption qui peuvent être décrits et mesurés à l'échelle de l'échantillon de laboratoire.

De plus, il faut analyser les interactions eau-matériau à l'échelle de la formation géologique et de la parcelle, échelle de référence pour l'interaction 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 des écoulements d'eau et des transferts hydriques. De fait, les transferts hydriques sont largement contrôlés par 1) l'interface entre l'atmosphère et la surface du sol, mais aussi 2) les nombreuses interfaces au sein de la formation géologique entre 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.

De ce fait, les paramètres suivants doivent être spécialement analysés pour caractériser la sensibilité d'un sol argileux au retrait-gonflement :

- 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) ;
- Teneur en matière organique ;
- Teneur en colloïdes ;
- Caractéristiques de la microstructure favorisant ou non l'accès des molécules d'eau dipolaires aux sites d'adsorption ;
- Teneur en carbonates et rôle de ces carbonates dans la microstructure : les carbonates peuvent contrarier l'accès des molécules d'eau aux sites d'adsorption ; les carbonates renforcent généralement les caractéristiques de déformabilité du matériau.
- Caractéristiques d'état des matériaux :

- indice des vides, en se référant à l'étendue possible de ce paramètre : le matériau est-il du côté du pôle état serré ou état lâche et quelle est alors sa réserve de déformation possible au retrait ou au gonflement ?
- teneur en eau, en se référant à l'étendue possible de ce paramètre : le matériau est-il du côté du pôle état sec ou état saturé ? L'indice de consistance permet de caractériser cet état.

Tous ces paramètres doivent être analysés à l'échelle du laboratoire sur des échantillons représentatifs, ce qui sous-entend une connaissance raisonnée du contexte géologique et des caractéristiques de variabilité verticale et latérale de la formation géologique concernée.

Comme indiqué ci-dessus, une deuxième démarche s'impose pour analyser les conditions d'échange entre sol et eau à l'échelle de la parcelle. Une connaissance régionale des formations géologiques concernées constitue un préalable incontournable et relève de l'expertise géologique. Cela n'aurait aucun sens d'analyser finement au laboratoire des échantillons sans connaître avec suffisamment de détail la structuration des terrains entre niveaux imperméables et niveaux perméables, ces derniers contrôlant, à l'échelle de la parcelle, l'accès de l'eau aux matériaux les plus argileux en fondation. La connaissance géologique régionale permet de bien définir les moyens de reconnaissance nécessaires et suffisants pour caractériser cette structure à l'échelle de la parcelle : sondages carottés ou destructifs, excavations à la pelle hydraulique, reconnaissances géophysiques de sub-surface.

Il faut donc conclure, en présence de sols argileux sensibles au retrait-gonflement à la nécessité d'une étude géologique et géotechnique qui prenne appui sur les principes énoncés : 1) étude de la variabilité verticale et horizontale de la formation géologique à l'échelle de la parcelle et 2) analyse de la composition minéralogique et de la microstructure à l'échelle des échantillons de laboratoire.

Le Centre de Géosciences a étudié et caractérisé de façon approfondie un certain nombre de paramètres expérimentaux jouant un rôle dans la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux.

4.1.2 Résultats issus des travaux de laboratoire

4.1.2.1 Caractérisation de la variabilité des faciès lithologiques d'une formation donnée

Suivant les principes énoncés ci-dessus il est important de caractériser cette variabilité à l'échelle de la formation géologique et de la parcelle. Nous avons ainsi étudié cette variabilité verticale et latérale, pour la formation des Argiles vertes de Romainville, à partir de deux campagnes d'échantillonnage menées, l'une dans la carrière de Villeparisis-Le Pin à l'Est, et l'autre dans la carrière de Cormeilles-en-Parisis à l'Ouest, établissant deux profils détaillés.

La synthèse des résultats des analyses minéralogiques concernant les deux profils (Figure 4.1.1) met en évidence une continuité de faciès entre l'Est et l'Ouest du bassin de Paris : les diagrammes présentent une répartition identique des minéraux le long des profils des deux sites :

- Une distribution du quartz en plusieurs séquences et une diminution progressive vers le sommet de la formation ;

- Un enrichissement en carbonates vers le sommet de la formation, composés pour la moitié inférieure de calcite seule et pour la moitié supérieure de dolomite majoritairement ;
- Une diminution du pourcentage en quartz et en feldspath au profit des carbonates du bas vers le haut de la formation ;
- Un enrichissement en argiles de types illite et smectite ou interstratifié illite/smectite et un appauvrissement en kaolinite vers le sommet de la formation.

La distribution minéralogique des profils des Argiles vertes de Romainville des deux sites met en évidence une continuité de faciès et la présence de niveaux repères carbonatés entre l'Est et l'Ouest du bassin de Paris. Les minéraux détritiques (quartz, feldpaths, kaolinite), témoignant d'un apport sédimentaire d'origine continentale, diminuent de la base vers le sommet de la formation au profit d'une sédimentation à caractère marin plus prononcé (carbonates, smectite), accompagnée d'un enrichissement en magnésium (dolomite). Ces analyses permettent de souligner une variabilité verticale de faciès dans la formation des Argiles vertes de Romainville. Cette variabilité verticale est significative d'un point de vue sédimentologique.

L'analyse des caractéristiques géotechniques met aussi en évidence une certaine homogénéité des matériaux étudiés, avec cependant quelques variations enregistrées de la base au sommet de la formation :

- Le taux de particules inférieures à 2 μm augmente progressivement de la base au sommet ;
- Les limites d'Atterberg varient de la base jusqu'au niveau repère carbonaté avec de légères fluctuations et augmentent ensuite de façon significative vers le sommet ;
- De même les valeurs de bleu varient suivant les mêmes règles, augmentant de façon significative vers le sommet.

Ainsi les résultats des caractéristiques géotechniques sont en accord avec les résultats de l'identification minéralogique. Les limites d'Atterberg témoignent de matériaux plus plastiques vers le sommet de la formation en relation avec une augmentation du taux de particules inférieures à 2 μm et un pourcentage de minéraux argileux plus important, plus particulièrement celui des argiles gonflantes. Les matériaux prélevés sur les 2 sites se classent parmi les sols à fort ou très fort potentiel de gonflement.

Nous faisons donc le constat que la formation des Argiles vertes de Romainville (matériau géologiquement en place qui doit être bien différencié des colluvions argileuses en contexte de formations de pente) présente une faible variabilité latérale entre les deux sites étudiés et une variabilité verticale significative sur le plan sédimentologique et notable sur le plan géotechnique. Ce constat est à mettre en rapport avec des conditions de dépôt relativement homogènes dans l'espace et régulières dans le temps.

Il faut souligner que, pour d'autres types de formations argileuses, on pourrait être confronté à des variabilités verticales et horizontales bien plus importantes.

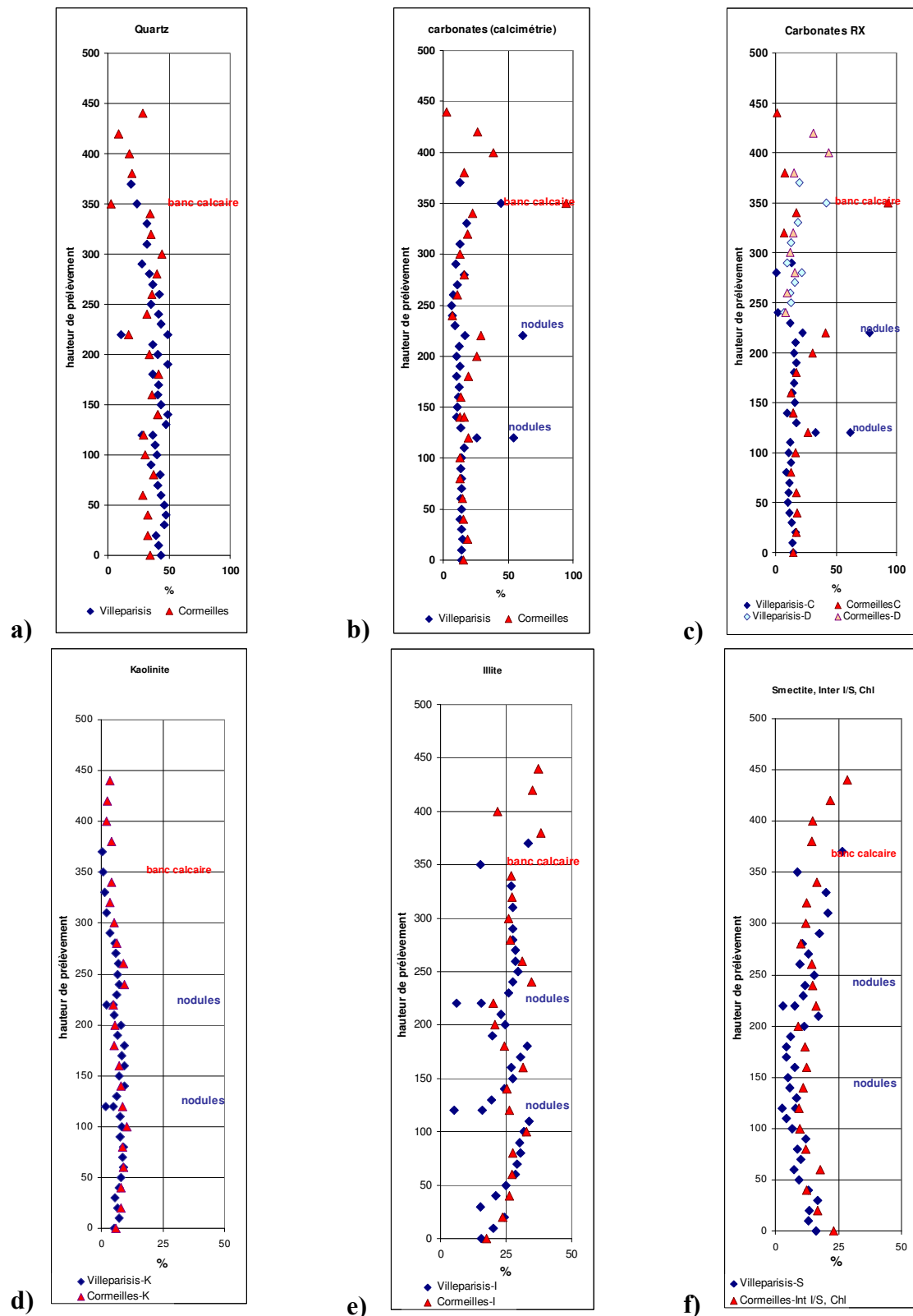


Figure 4.1.1 : Répartition des principaux minéraux le long des profils de l'Argile verte de Romainville réalisés à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) ; quartz (a), carbonates (b) et (c), kaolinite (d), illite (e), smectites et interstratifiés (f)

4.1.2.2 Analyse de la microstructure et de la minéralogie

L'analyse de la microstructure par porosimétrie au mercure et microscope électronique à balayage met en évidence :

- Un arrangement matriciel de la microstructure et une anisotropie du matériau avec un arrangement préférentiel des minéraux parallèlement au litage, pour les deux formations étudiées à l'état naturel : Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil.
- 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, avec une forte teneur en carbonates, sont moins sensibles à ces processus que les Argiles vertes de Romainville. Le remaniement au laboratoire de ces deux types de matériaux altère fortement ce squelette. Ainsi, pour ces matériaux remaniés la sensibilité au retrait-gonflement est contrôlée principalement par le taux et la nature des minéraux argileux, les carbonates ne jouant plus qu'un rôle secondaire.
- 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.

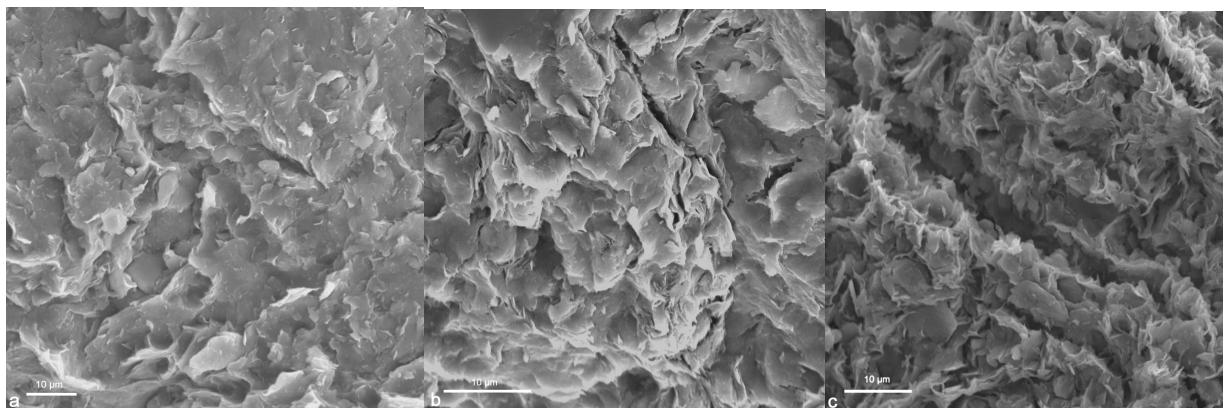


Figure 4.1.2 : Images au MEB de l'Argile verte de Romainville : a) état sec, b) état naturel lyophilisé, c) après gonflement libre et lyophilisation (in M. Audiguier et al., 2007)

- 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. 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 (pour des colluvions argileuses monogéniques, provenant du seul remaniement de la formation argileuse).

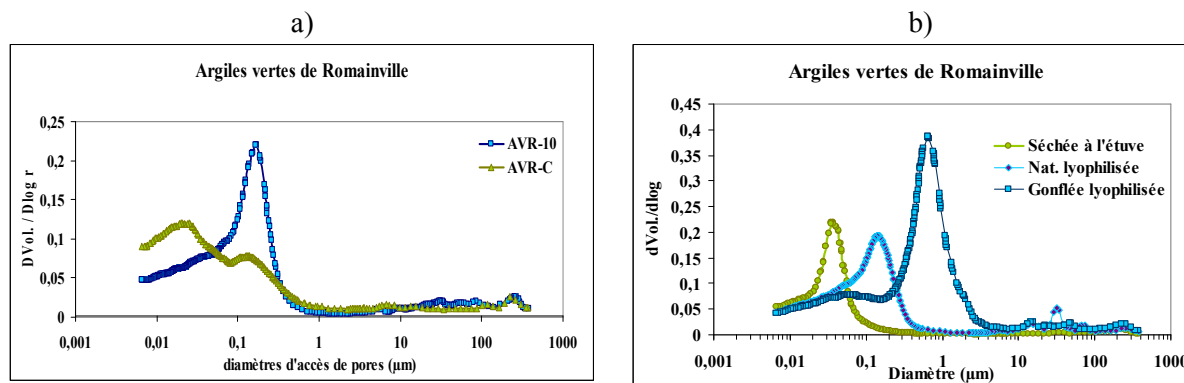


Figure 4.1.3 : Courbes dérivées de distribution des pores de l'Argile verte de Romainville a) à l'état naturel pour un échantillon intact (AVR-10) et pour un échantillon de colluvion monogénique (AVR-C) ; b) pour trois états d'hydratation différents (in M. Audiguier et al., 2007)

Il faut retenir l'importance de la minéralogie, mais aussi de la microstructure, sur la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement. De ce fait, l'état intact ou remanié (colluvions) des matériaux doit être bien pris en compte dans les études géologiques et géotechniques.

4.1.2.3 Apport de l'essai au bleu

Les préoccupations relatives à l'analyse des processus d'adsorption ou de désorption entre eau et matériau ont conduit naturellement à s'intéresser à la mesure des surfaces spécifiques des sols argileux par des techniques rapides, peu onéreuses, susceptibles d'être mises en œuvre dans des laboratoires de chantier. L'essai d'adsorption de bleu de méthylène (essai au bleu), l'une des méthodes permettant d'accéder à la mesure des surfaces spécifiques, a ainsi fait l'objet de plusieurs travaux expérimentaux.

Nos expérimentations ont montré que cet essai, bien que normalisé, est très sensible aux conditions expérimentales. Celles-ci doivent donc être très précisément contrôlées.

4.1.2.4 Processus de fissuration au cours des cycles séchage-humidification

Les deux formations étudiées, Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil, ne présentent pas le même comportement vis-à-vis de la fissuration au cours de cycles drainage-imbibition (Figure 4.1.4).

Dans le cas des Argiles vertes intactes, ces cycles successifs révèlent d'anciennes surfaces de micro-cisaillement ou « slickensides » qui s'ouvrent à nouveau sous l'effet des sollicitations hydriques, ce qui conduit à une altération irréversible de la structure du matériau pour des teneurs en eau supérieures à la limite de retrait.

A l'opposé, les Marnes bleues d'Argenteuil intactes ne présentent aucune fissuration au cours des cycles successifs, même pour des teneurs en eau supérieures à la limite de retrait. Ce phénomène peut être attribué à la présence d'un squelette semi-rigide formé par les carbonates.

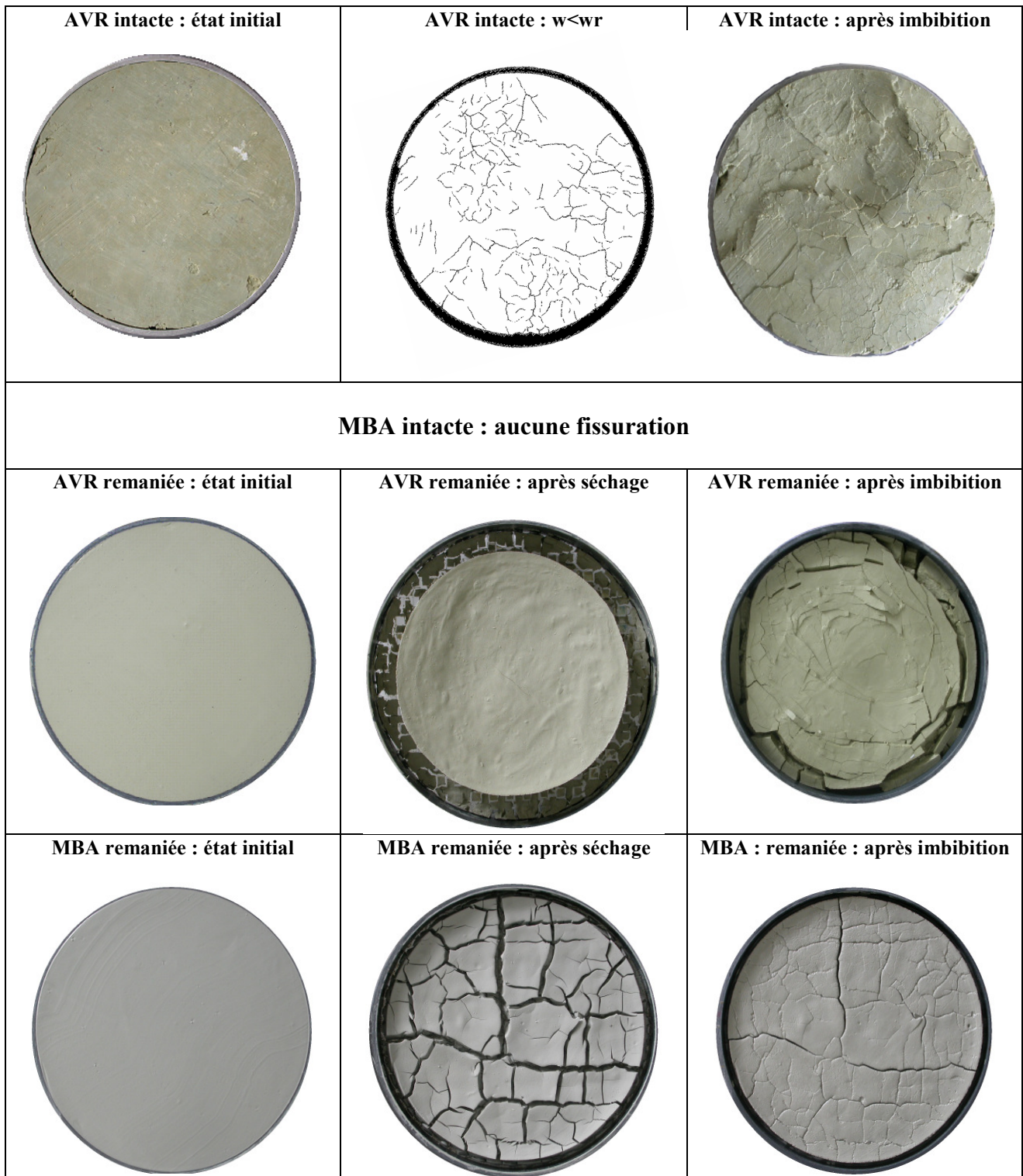


Figure 4.1.4 : Processus de fissuration. Comparaisons entre état intact et état remanié

On observe donc à nouveau un effet de la microstructure ou de la structure sur le comportement des matériaux argileux, effet qui porte à conséquence sur les interactions eau-

matériau et contrôle l'évolution des profils hydriques in situ pour des sols soumis à diverses sollicitations hydriques.

4.1.2.5 Comportement mécanique en relation avec l'état initial et la composition minéralogique

Les résultats de retrait-gonflement sont très fortement influencés par les paramètres d'état initiaux (teneur en eau, densité), la composition minéralogique (en particulier le taux de carbonates) et l'état de remaniement du matériau.

- A composition minéralogique identique, les Argiles vertes prélevées dans la carrière de Villeparisis-Le Pin (Est) ont un potentiel de gonflement plus important que celles de la carrière de Cormeilles-en-Parisis (Ouest) dont la teneur en eau de prélèvement est plus forte ;
- Le taux de gonflement des Marnes bleues intactes est très faible (en général moins de 3 %), cela malgré une large gamme de teneurs en eau initiale (23 % à 40 %) et un indice de plasticité supérieur à celui des Argiles vertes ;
- Les matériaux remaniés présentent un gonflement important ; il passe de 15 % à 31 % pour les Argiles vertes et de moins de 1 % à 15-26 % pour les Marnes bleues.

Tableau 4.1.1 : Gonflement libre de l'Argile verte de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil, en fonction de l'état initial intact ou remanié et de la teneur en carbonates (AVR : C = 12%, MBA1 : C = 27%, MBA2 : C = 58%) (in M. Audiguier et al., 2008)

Formations	AVR (C = 12%)	MBA-1 (C = 27%)	MBA-2 (C = 58%)
<i>Echantillons 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>Echantillons 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

Ces résultats sont en accord avec les conclusions tirées de l'étude microstructurale et de l'analyse minéralogique.

4.1.2.6 Essais cycliques de séchage-imbibition

Les résultats obtenus sur des éprouvettes soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet montrent :

- Le rôle joué par la fissuration observée au cours du premier séchage. En augmentant la perméabilité du sol, elle influence la cinétique de gonflement lors du cycle suivant ;

- Une amorce de la stabilisation des déformations à partir du troisième cycle ;
- Cependant, l'ensemble des échantillons présente une augmentation du gonflement cumulé avec les cycles.

Les déformations dues au retrait-gonflement ne sont donc pas complètement réversibles.

Il y a donc, pour les formations argileuses proches de la surface, soumises à des cycles hydriques successifs, une évolution irréversible au cours du temps. Cette évolution est d'autant plus forte que le matériau est déjà en contexte de formation de pente, car dans ce cas se surimpose l'influence du fluage, d'origine purement mécanique.

4.2 CONTRIBUTIONS DE ECOLE DES PONTS PARISTECH / UR NAVIER - GEOTECHNIQUE

4.2.1 Résultats issus des travaux sur modèle physique, orientés vers une modélisation numérique des échanges hydriques et thermiques à l'interface sol-atmosphère

4.2.1.1 Introduction

Bien que de nombreuses études théoriques, expérimentales et numériques aient été réalisées sur l'interaction sol-végétation-atmosphère, une analyse bibliographique approfondie, réalisée dans le cadre du projet, a montré que les mécanismes d'interaction entre le sol et l'atmosphère restent mal connus et qu'il est nécessaire de les clarifier afin de pouvoir développer des approches théoriques plus rationnelles. C'est ainsi que, dans le cadre du projet « Aléa et Risque sécheresse » a été développée une chambre environnementale de grande dimension (800 x 1000 x 1000 mm) pour étudier le comportement thermo-hydro-mécanique d'un sol argileux soumis à de l'infiltration en rapport avec des conditions climatiques données.

Le matériau étudié est l'argile verte de Romainville. Cette argile a été prélevée en 2007 à Villeparisis-Le Pin, transportée au laboratoire, séchée à l'air, broyée et tamisée à 2 mm à l'aide d'un concasseur mécanique. Le sol a été mis en place dans la chambre par compactage par couche, ce qui constitue à l'évidence un point faible de l'essai car l'objectif du projet est d'étudier l'effet des argiles gonflantes naturelles intactes sur les constructions alors que de nombreuses études ont montré un comportement particulier des sols compactés. Ce choix est principalement lié à la difficulté, voire l'impossibilité de préparer un massif d'argile intacte de grande dimension. On note néanmoins que ce choix a l'avantage d'ouvrir des perspectives intéressantes comme, par exemple, la possibilité de comparaison entre le comportement de l'argile compactée et le comportement de cette argile proche de l'état in-situ.

La chambre environnementale développée avec de nombreux capteurs pour les mesures d'humidité, de succion, de teneur en eau volumique, de température et du déplacement vertical du sol permet de répondre, en plus de l'objectif principal évoqué précédemment, à plusieurs attentes (Figure 4.2.1). Premièrement, grâce aux mesures croisées par différents types de capteurs, les avantages et les inconvénients de chaque type ont été établis, ce qui permettra de mieux guider les futures instrumentations aussi bien en laboratoire qu'in-situ. Deuxièmement, les données obtenues couvrent presque la totalité des paramètres, et une série de données aussi complète sera précieuse pour des développements futurs, théoriques ou numériques. Troisièmement, différentes propriétés de base telles que la rétention d'eau et la conductivité hydraulique en non-saturé peuvent être déduites directement. Enfin, un phénomène majeur sur une argile gonflante soumise au séchage : la fissuration, ainsi que son effet sur le transfert hydraulique et thermique, peut aussi être étudié.

En parallèle à l'essai avec la chambre environnementale, des essais complémentaires ont été réalisés tels que les essais de compression à l'oedomètre à succion contrôlée et la mesure de conductivité thermique. Encore une fois pour être cohérent avec l'essai en chambre environnementale, ces essais ont été réalisés sur les échantillons compactés. Il sera nécessaire

de réaliser sur des échantillons proches de l'état intact si l'essai en chambre environnementale est complété avec un massif de sol de même état.

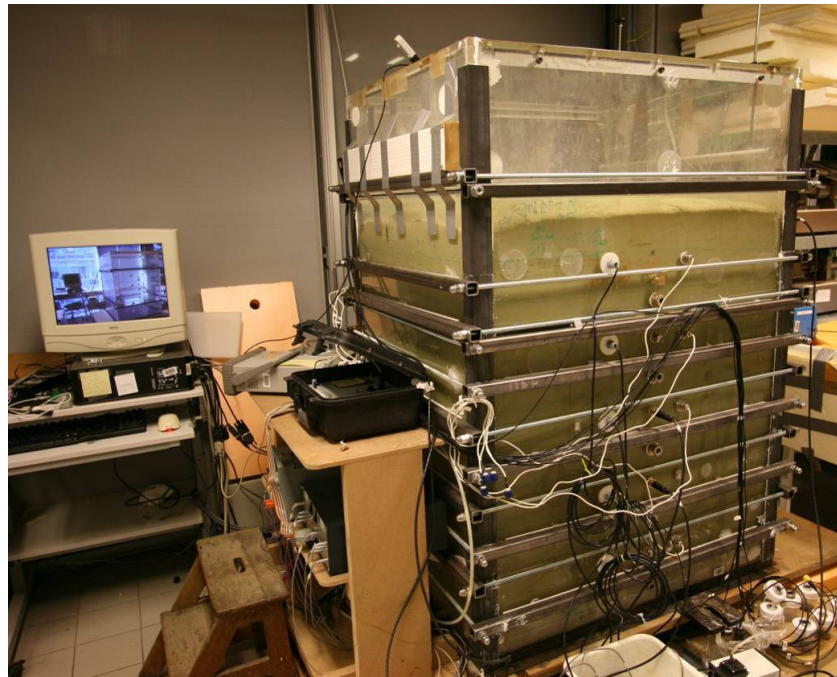


Figure 4.2.1: Chambre environnementale, avec ses différents capteurs. Pour les teneurs en eau volumique : 5 ThetaProbe + 5 ECH2O-TE, pour les suctions : 10 Hygromètres Elcowa, 8 Psychromètres Wescor, 10 Tensiomètres ENPC, pour les déplacements : 15 LVDT, pour les températures : 10 Pt1000 et 10 Thermistance. Un système d'air chaud et un système d'aspersion.

Les acquis principaux liés à la chambre environnementale sont détaillés dans ce qui suit.

4.2.1.2 Comportement du sol soumis à de l'infiltration

Après la mise en place du massif et l'installation des capteurs, une phase d'infiltration a été appliquée ; elle a duré 338 jours. Pendant cette phase, on a suivi les variations de la succion avec trois types de capteurs différents, un type couvre la gamme des fortes suctions (Elcowa) et deux autres couvrent la gamme des faibles suctions (psychromètre et tensiomètre). La teneur en eau volumique a été suivie avec deux types de capteurs : ThetaProbe et ECH₂O-TE (Figure 4.2.2). La température a été suivie par des capteurs de température spécifiques d'une part et par des mesures de température intégrées dans Elcowa d'autre part. Le gonflement du sol a été suivi à l'aide d'un réseau de LVDT sur la surface du sol.

Une bonne compatibilité a été obtenue entre les mesures de succion par différents capteurs. Mais on note un temps d'équilibre important pour le tensiomètre utilisé pour la mesure de succion dans de sols gonflants comme l'argile verte de Romainville.

Enterrer intégralement les capteurs de teneur en eau volumique dans le sol s'est avéré être un bon choix puisque ce mode d'installation permet un déplacement libre des capteurs avec les déformations du sol ; la déformation n'est pas empêchée et l'effet sur le transfert hydraulique est

minimisé. Il est clair qu'il faut un volume de sol suffisamment important pour pouvoir négliger raisonnablement la présence des capteurs sur les transferts hydrauliques et thermiques, ce qui explique le choix de la grande dimension de la chambre.

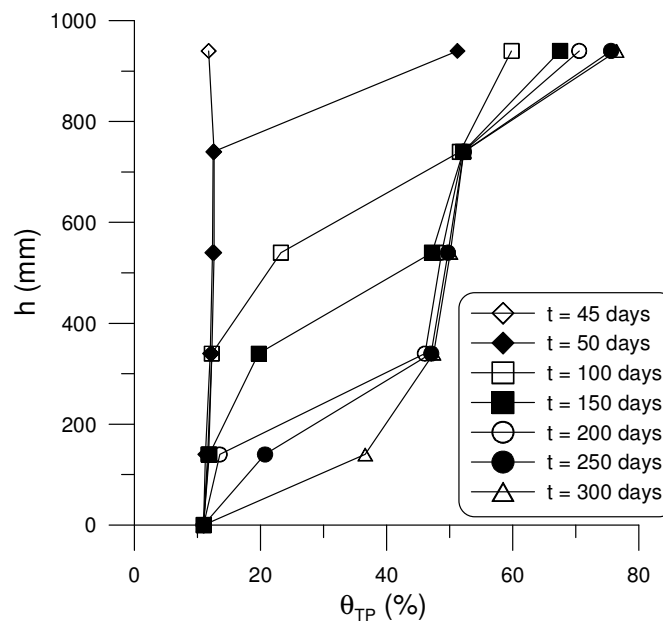


Figure 4.2.2 : Profils des teneurs en eau volumiques mesurées par les capteurs ThétaProbe

Le gonflement relevé à différents points sur la surface du sol montre un effet important du frottement entre le sol et les parois : le gonflement au milieu de la surface est double par rapport au gonflement aux coins (Figure 4.2.3). On en conclut que c'est le gonflement de la partie centrale qui est représentatif du gonflement de l'argile étudiée. Ainsi dans des analyses liées au gonflement de l'argile verte, on ne considérera que les mesures dans cette zone.

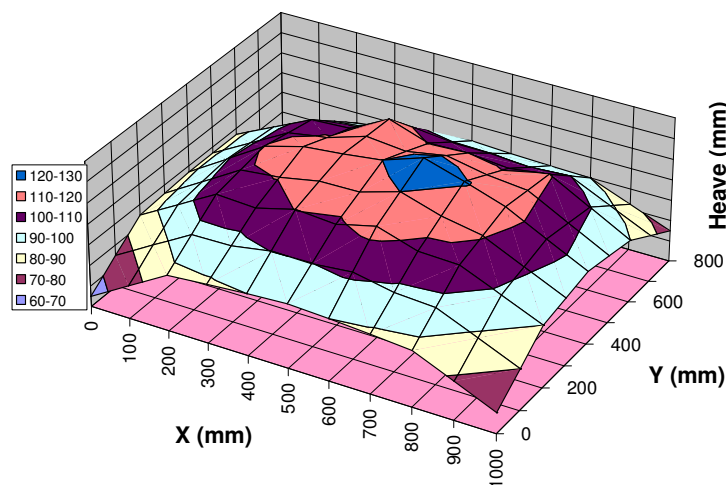


Figure 4.2.3 : Représentation 3D du gonflement à la surface de la chambre environnementale, à $t = 283$ jours

La comparaison entre les mesures par ThetaProbe et celles par ECH₂O-TE montre que dans la gamme de teneurs en eau volumique inférieures à 50%, une bonne compatibilité existe entre les deux mesures et qu'en revanche, dans la gamme de teneurs en eau volumique supérieures, les réponses des capteurs ECH₂O-TE présentent quelques anomalies. Ce problème pourrait être résolu par un étalonnage spécial.

En ce qui concerne la courbe de rétention d'eau, une relation quasi-linéaire est obtenue dans un plan semi-logarithmique $\theta - \log(s)$. A noter que la courbe obtenue correspond à un chemin d'humidification. On note aussi la succion initiale très élevée du massif compacté : de l'ordre de 100 MPa.

La variation de la conductivité hydraulique en fonction de la succion a été déterminée en utilisant la méthode des profils instantanés qui fait appel aux évolutions des profils de succion et de teneur en eau volumique. Les résultats ont montré une très faible perméabilité de cette argile, variant de 10^{-11} m/s à l'état saturé à 5×10^{-14} m/s quand la succion est supérieure à 80 MPa.

4.2.1.3 Comportement du sol au séchage

Un système capable de reproduire les conditions atmosphériques extrêmes a été mis au point. Dans ce système, la température, l'humidité et la vitesse du vent sont contrôlées. De plus, le système permet de déterminer le taux d'évaporation en considérant la température et l'humidité relative à l'entrée et à la sortie de la chambre environnementale.

L'essai de séchage a été démarré avec de l'eau maintenue en surface du sol. Cette toute première phase permet de déterminer le taux potentiel d'une part et, d'autre part de valider le dispositif expérimental et la méthode de calcul développée.

Le séchage proprement dit est ensuite réalisé en laissant l'eau s'évaporer. Comme pour la phase d'infiltration, les mesures de succion, de température et de teneur en eau volumique sont faites pendant le séchage.

Afin de pouvoir interpréter les résultats obtenus pendant le séchage, il a été nécessaire de développer une approche rationnelle. Pour ce faire, les mécanismes de l'évaporation ont été étudiés afin de les décrire par des approches physiques. Le travail a débuté en considérant les différentes méthodes proposées dans la littérature, en commençant par des méthodes simples avec un seul paramètre comme la température, jusqu'à des méthodes plus complexes dans lesquelles la vitesse du vent, la température, la teneur en eau en surface sont prises en compte. La teneur en eau a fait l'objet de plusieurs études antérieures : on a cherché surtout à établir la corrélation entre la teneur en eau d'une couche proche de la surface et le taux d'évaporation ou avec une résistance qui est inversement proportionnelle avec le taux d'évaporation.

Une première analyse a montré que les problèmes de ces méthodes sont les mêmes. Premièrement, il manque dans la plupart des cas, une base physique en arrière plan. Deuxièmement, il s'agit d'approches empiriques ou semi empiriques dont le champ de validité dépend de la nature du sol. Enfin, la teneur en eau en surface joue un rôle primordial dans ces approches ; or elle est moyennée dans une couche de sol proche de la surface, dont l'épaisseur est un choix arbitraire et confus. De plus, cette teneur en eau est elle-même

fonction de cette épaisseur. Les analyses des données existantes nous ont amené à proposer une autre approche basée sur la succion. En effet, la succion est un paramètre plus physique que la teneur en eau dans le processus d'évaporation : elle représente la capacité de rétention d'eau du sol.

4.2.1.4 Comportement en compressibilité et conductivité thermique

Quatre essais oedométriques à succion contrôlée avec chargement et déchargement ont été réalisés (Figures 4.2.4 et 4.2.5). Les résultats ont montré un faible effet de la succion sur les paramètres de compressibilité comme l'indice de gonflement et l'indice de compression.



Figure 4.2.4 : Essais oedométriques à succion contrôlée

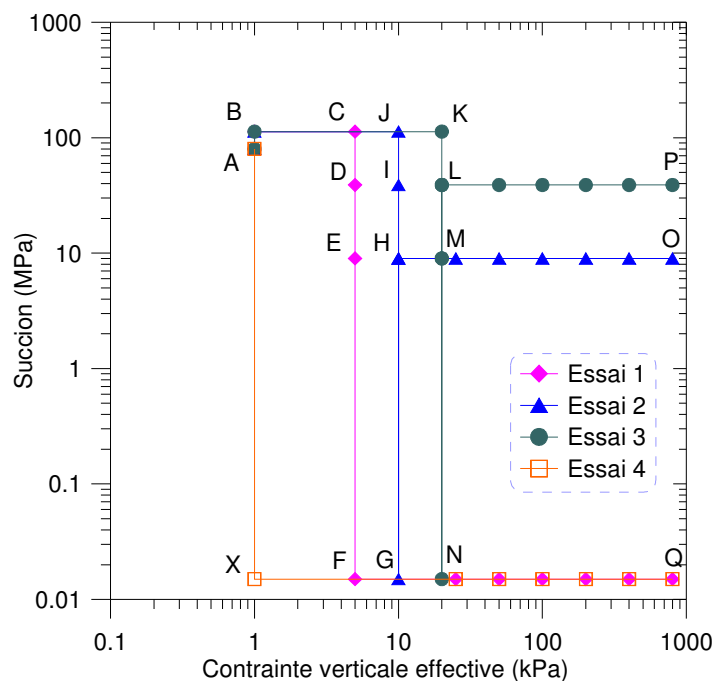


Figure 4.2.5 : Programme des essais (chemins des sollicitations mécaniques et hydriques)

La conductivité thermique a été mesurée à la teneur en eau initiale de 6%. La valeur obtenue est de $0,3 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ à une température de $21,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2.2 Perspectives

La phase de séchage n'étant pas terminée, l'expérimentation en chambre expérimentale se poursuivra. De plus, un système d'images a été mis au point récemment, permettant de suivre en continu la fissuration en surface du sol. A l'aide d'un logiciel de traitement d'image, la fissuration sera caractérisée et quantifiée. Ces données seront ensuite utilisées dans l'étude de l'influence des fissures sur l'évaporation et sur les transferts hydraulique et thermique dans le sol.

Comme évoqué au début, la grande discussion sur l'essai réalisé en chambre environnementale concerne l'utilisation du sol compacté à la place du sol intact. En effet, de nombreux résultats trouvés dans la littérature ont montré que le comportement thermo-hydro-mécanique des sols compactés est fortement lié à sa microstructure caractérisée par la présence de double porosité, inter - agrégats et intra - agrégats. On a montré également que cette microstructure de double porosité pourrait être détruite par l'humidification : à la saturation, un sol gonflant présente une microstructure assez homogène. Dans le prolongement de cette idée, on peut espérer que, dans la chambre environnementale, la première phase de saturation a détruit la microstructure initiale créée par la mise en place et qu'on retrouve après cette phase un massif relativement homogène, proche de l'état intact du sol en place. Ainsi, le comportement du sol au séchage devrait représenter le comportement d'un sol proche de l'état in-situ. De plus, si on réalise une deuxième infiltration, on aura aussi le comportement d'un sol proche de l'état in-situ. Ainsi on va pouvoir déterminer les paramètres correspondant au sol « intact » d'une part et d'autre part, montrer l'effet du compactage en comparant les résultats entre la première et la deuxième infiltration. Une troisième cycle d'humidification-séchage serait aussi intéressant à réaliser pour confirmer ou infirmer les conclusions tirées.

Si les résultats de l'essai en chambre environnementale se révèlent concluants, on réalisera des essais oedométriques à succion contrôlée sur des échantillons ayant été soumis à des cycles d'humidification – séchage.

Les mesures de conductivité thermique sont à poursuivre aussi, en les étendant à d'autres teneurs en eau, et à des échantillons ayant été soumis à des cycles d'humidification-séchage.

4.3 CONTRIBUTIONS DE CSTB (CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT)

4.3.1 Résultats issus des travaux de modélisations numériques relatives à l'analyse du comportement du bâti, variable suivant les conditions de structure et les conditions d'interface fondation-terrain

4.3.1.1 Introduction

L'étude bibliographique a confirmé la part importante de la maison individuelle dans le cadre bâti actuel ainsi que sa sensibilité au phénomène de retrait-gonflement des argiles. Pour autant, des statistiques portant sur des informations techniques utilisables dans le cadre des plans de prévention des risques font nettement défaut. Souvent, l'interaction entre sol et bâtiment est trop succinctement étudiée dans les recherches en cours sur ce thème. C'est pourtant une des clés du phénomène et le levier principal d'une stratégie d'adaptation et de prévention efficace.

4.3.1.2 Typologie du bâti, environnement immédiat du bâti, indices de vulnérabilité

Afin de compléter l'information disponible sur les conséquences des mouvements de terrain sur les constructions, on s'est attaché à développer un outil méthodologique adapté. L'objectif de cet outil est de disposer d'une information spécifique sur les caractéristiques des bâtiments, en l'occurrence des maisons individuelles, et de leur environnement immédiat, en rapport avec leur vulnérabilité face au risque présenté par les mouvements de terrain. En effet, l'obtention de statistiques nécessite en amont une définition claire des caractéristiques recherchées. Comme l'a montré la revue bibliographique, il est difficile d'utiliser des bases de données développées pour un autre usage (statistiques économiques, urbanisme), car ces dernières se révèlent inopérantes pour le but visé.

En conséquence, la démarche adoptée, pour compléter l'information technique manquante sur les maisons individuelles, au travers d'une approche fonctionnelle du phénomène et d'une enquête de terrain à l'échelle d'une commune (Villiers-sur-Marne), a été orientée dès son origine vers l'objectif de servir au calibrage de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments. En particulier, la méthode de calcul que nous avons initiée dans cette étude portant sur le comportement de la structure des bâtiments selon une approche probabiliste.

L'enquête effectuée sur une commune de grande taille a permis de tester la faisabilité d'une telle collecte d'information. On retiendra particulièrement l'importance de l'analyse préalable du phénomène, qui permet de limiter le champ des données collectées. Il est également nécessaire de réfléchir à la manière dont certaines données techniques peuvent être obtenues. L'exemple de la commune choisie a montré qu'il est souvent difficile d'obtenir des données précises sur le mode constructif des maisons. Des informations statistiques portant sur l'aléa, la forme des bâtiments ou la présence d'arbres sont en revanche accessibles. Elles pourraient être utilement complétées par des études de sensibilité sur d'autres facteurs plus difficiles à observer comme la nature des matériaux ou le type de fondations.

Une estimation à dire d'experts a permis de construire un indice de vulnérabilité destiné à classer les maisons de la zone étudiée. La valeur de l'indice en elle-même n'est pas la finalité

de la démarche. Cet indice sert avant tout à différencier les constructions, de manière à établir une typologie de maisons, représentative des constructions d'une commune, sur laquelle pourront porter les études de sensibilité des différents facteurs.

En se basant sur les notes de vulnérabilité obtenues pour les maisons (et leur environnement) de l'échantillon observé sur le site de Villiers-sur-Marne, il est apparu possible de mettre en évidence quatre types dont la vulnérabilité est particulièrement importante :

1. Aléa fort + végétation proche + forme irrégulière en plan ;
2. Aléa fort + végétation proche + joint discontinu + différence de niveaux ;
3. Aléa fort + joint absent + différence de niveaux + forme irrégulière en plan ;
4. Aléa moyen + végétation proche + sous-sol partiel.

De ces quatre types on peut extraire un type unique global en conservant simplement la combinaison : aléa fort, végétation proche et forme irrégulière (en plan ou en élévation). Des considérations mécaniques permettraient alors de faire apparaître différentes irrégularités susceptibles d'être particulièrement néfastes et surtout de fixer des seuils permettant d'évaluer la sévérité de l'irrégularité constatée.

L'extension de la méthode adoptée pour récolter l'information n'est pas directement envisageable à l'échelle régionale ou nationale, compte tenu du nombre d'informations nécessaires. Néanmoins, en affinant la définition des types de maisons, il est envisageable de chercher à obtenir la représentativité des types à grande échelle. Pour cela de nouveaux outils seront testés dès 2009 car les travaux sur ce thème seront prolongés dans le cadre du programme de recherche en propre du CSTB. À cet égard, la commune retenue de Villiers-sur-Marne pourra servir de zone pilote pour calibrer d'autres méthodes de plus grande envergure, car les informations recueillies sont nombreuses et précises.

Le travail effectué a permis de comprendre que l'aléa et la présence de végétation proche des maisons ne pouvaient pas, à eux seuls, être des facteurs discriminants pour la tenue des maisons en cas de sécheresse. Cela souligne la nécessité de continuer à rechercher des solutions constructives qui favorisent une bonne adaptation de la maison à son environnement. Un effort particulier sera porté prochainement sur l'examen de l'efficacité d'un système de fondation plus profond et solidaire, la généralisation du vide sanitaire et une structure porteuse moins sensible aux tassements différentiels. Une autre voie consiste également à imaginer des solutions de protection des maisons existantes en cherchant à limiter les déséquilibres hydriques (écran anti-racines, drainage ou revêtement). Il s'agit là de solutions complémentaires qui ne peuvent se substituer pour les constructions neuves à l'adoption de techniques constructives adaptées au risque.

Notre étude bibliographique a également mis en évidence le caractère essentiellement qualitatif des dispositions structurales et environnementales préconisées pour diminuer la vulnérabilité du bâti vis-à-vis du retrait-gonflement des argiles.

4.3.1.3 Modélisation des interactions sol-structures

Pour compléter, et tenter de rationaliser par une approche mécanique quantitative, le lien entre mouvements de sol et pathologie des bâtiments établi à partir de nombreuses expertises in situ, nous avons développé deux outils numériques destinés à modéliser les phénomènes d'interaction sol-structure selon des degrés de raffinement très différents.

La première démarche de modélisation, développée sur le code général de calculs aux éléments finis MARC (MSC-SOFTWARE), décrit assez précisément la structure et est dédiée à une analyse ou un diagnostic détaillé d'un ouvrage selon une approche déterministe pour laquelle les hypothèses d'étude sont réputées connues (Figures 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 et 4.3.4, Tableau 4.3.1).

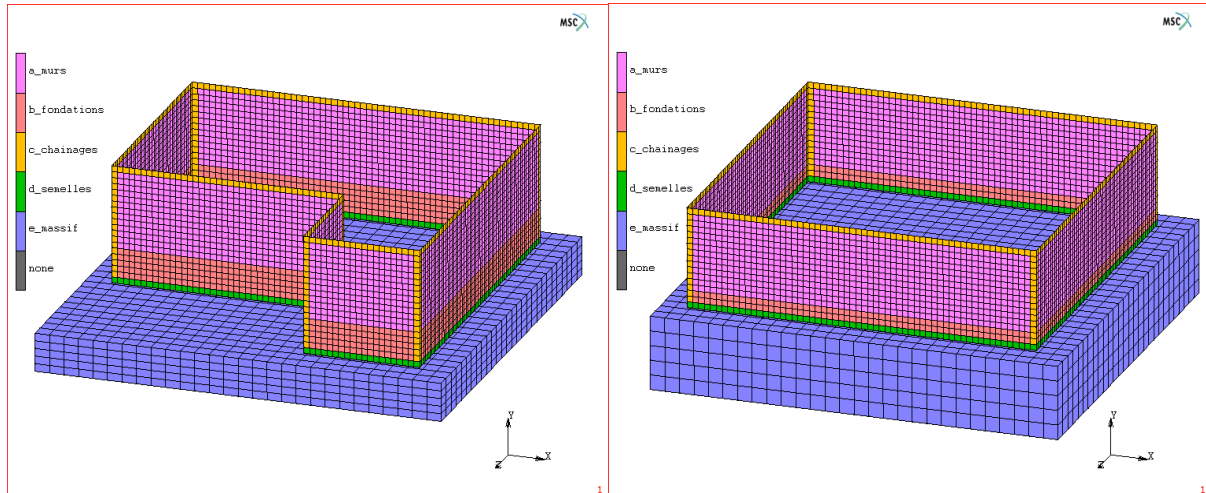


Figure 4.3.1 : Maisons étudiées : maison irrégulière de 112 m² (12×8 m² + 4×4 m²) et maison régulière de 144 m² (12×12 m²)

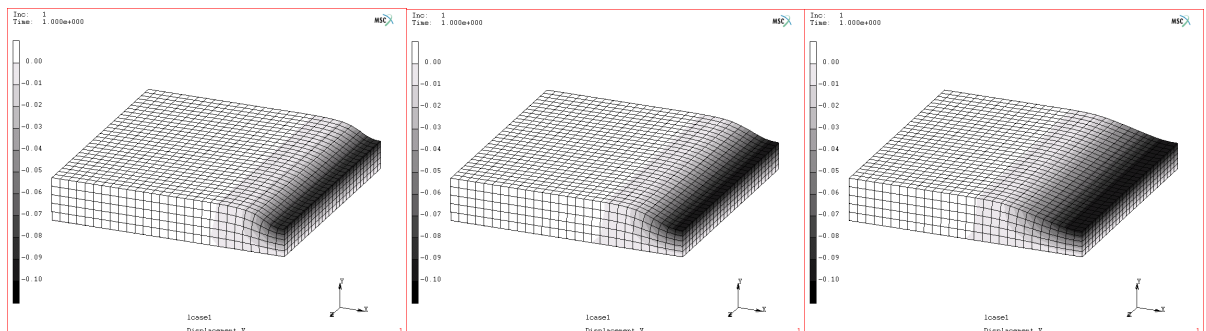


Figure 4.3.2 : Tassement du sol en bord de bâtiment (facteur 10 sur la déformée) – amplitude de la zone intermédiaire 1 m, 2 m et 4 m. La zone intermédiaire correspond à la partie supérieure du profil de sol soumis à dessiccation

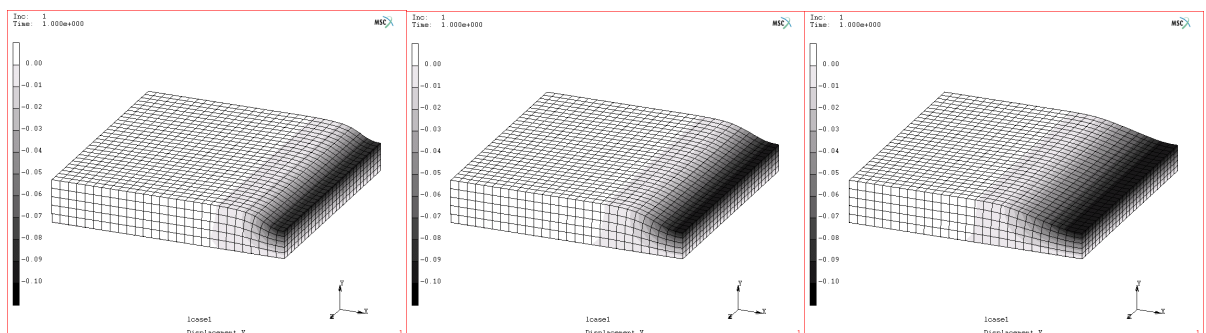


Figure 4.3.3 : Tassement du sol en bord de bâtiment (facteur 10 sur la déformée) – amplitude de la zone intermédiaire 1 m, 2 m et 4 m

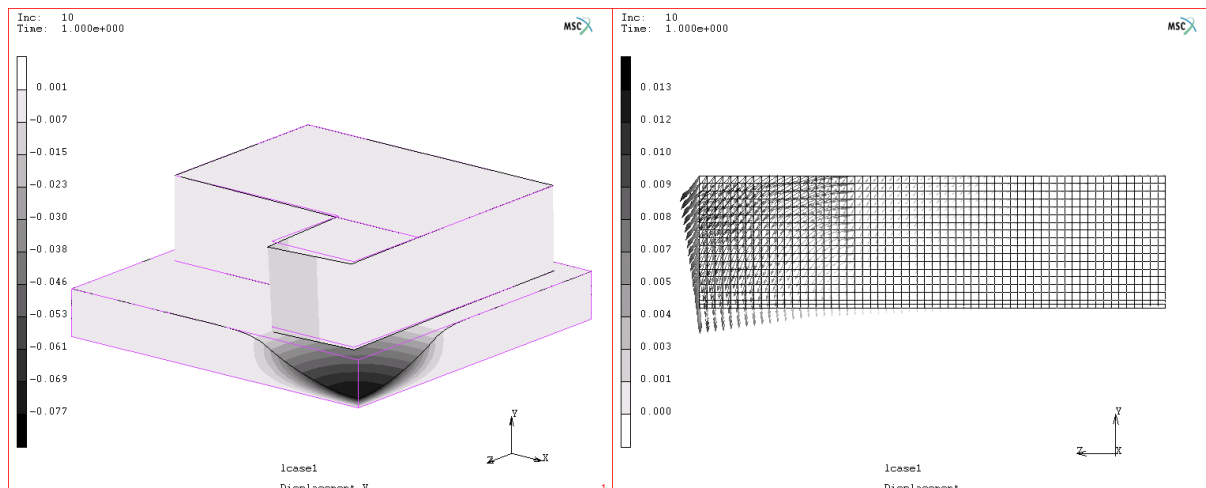


Figure 4.3.4 : Maison irrégulière – fondations à 0,6 m – tassement en coin - amplitude de la zone intermédiaire 4 m – maçonnerie linéaire – champ de déplacements (facteur 20 sur la déformée)

Tableau 4.3.1 : Synthèse des simulations numériques de l'effet du tassement d'un sol argileux sur un ouvrage maçonné aux murs de façades dépourvus d'ouverture.

Comportement de la structure en fonction de l'amplitude du tassement en surface		Type de maison			
		irrégulière		régulière	
		Profondeur des fondations			
		0,6 m	1,2 m	0,6 m	1,2 m
Forme du tassement	En bord sur 1 m	Ruine peu après le démarrage du tassement	Ruine à 0,7 cm	Ruine à 0,8 cm	Ruine à 1,6 cm
	En coin sur 1 m	Rien à signaler à 10 cm	Rien à signaler à 10 cm	Rien à signaler à 10 cm	Rien à signaler à 10 cm
	En coin sur 2 m	Rien à signaler à 10 cm	Rien à signaler à 10 cm	Rien à signaler à 10 cm	Rien à signaler à 10 cm
	En coin sur 4 m	Ruine peu après le démarrage du tassement	Ruine à 1,2 cm	Ruine à 8,4 cm	Rien à signaler à 10 cm

Il semble qu'en l'état, moyennant une confrontation complémentaire aux données de terrain et à des essais de laboratoire en vraie grandeur, le modèle puisse donner des éléments d'appréciation intéressants dans les situations suivantes :

- la conception de règles de dimensionnement simples s'appuyant sur les modes de ruine observés ;
- la validation d'une solution constructive ou la comparaison de différentes solutions afin de déterminer celle conduisant au risque de fissuration le plus faible ;

- l’expertise après sinistre qui permettrait de statuer si celui-ci est dû uniquement au mouvement du sol ou à la conjonction de ce mouvement avec une malfaçon ;
- le dimensionnement d’ouvrages neufs ou l’évaluation de procédés de renforcement en réhabilitation.

La deuxième approche, mise en œuvre en un outil spécifique reposant également sur la technique des éléments finis, suit une tout autre logique puisque son intérêt réside dans sa faculté à proposer des calculs suffisamment simples et rapides pour permettre une analyse probabiliste d’un ensemble d’ouvrages à l’échelle d’une zone d’aléa.

Cette approche, pour être pleinement opérationnelle, nécessite de nombreux travaux complémentaires qui sont menés dans le cadre d’une thèse de doctorat démarrée pendant le projet « Aléa et risque sécheresse ». En parallèle des travaux de développement, nous avons réalisé une première analyse comparative du ferrailage des semelles de fondation auquel conduisent, d’une part les règles classiques de dimensionnement, et d’autre part le logiciel d’interaction sol-structure que nous avons développé. Cette comparaison montre que, même en cas de faible retrait, les règles de dimensionnement traditionnelles conduisent dans bien des cas à une quantité d’armature insuffisante pour empêcher l’apparition de rotules plastiques dans les semelles, causes de désordre dans la superstructure. Également, les calculs effectués ont clairement montré que l’usage habituel des coefficients de sécurité n’est pas pertinent dans le contexte de l’interaction sol-structure. En effet, nous avons vérifié que, dans certaines situations loin d’être marginales, mettre un coefficient de sécurité sur les actions avait pour conséquence de modifier les zones de contact de manière telle que certains endroits du système de fondation voyaient leurs sollicitations diminuer. Cette situation très inhabituelle devra être prise en compte dans les démarches de dimensionnement à venir. Ces deux points nouveaux ne sont pas présentés dans le présent rapport car ont été obtenus trop récemment. Ils feront l’objet d’une publication prochaine.

Au-delà des avancées significatives que le CSTB a pu connaître dans sa connaissance et son analyse de l’impact sur le bâti du phénomène de retrait-gonflement des argiles grâce à sa participation au projet « Aléa et risque sécheresse », il est important de mentionner que ce projet a été l’occasion de nouer ou de renforcer des contacts sur ce thème. Ainsi, il est prévu qu’un groupe de travail soit monté prochainement, avec la FFB (Fédération Française du Bâtiment), afin de travailler à l’élaboration de règles de dimensionnement. Également, conscients qu’hommes de bâtiment nous avons donné la part belle aux structures dans nos travaux, nous avons décidé que la thèse de Doctorat engagée soit suivie par un comité de pilotage constitué de membres de l’Université de Marne la Vallée, de l’École des Mines de Nancy, et de l’INERIS, ceci afin d’orienter nos efforts vers des modélisations dans lesquelles les niveaux de description des comportements des structures et du sol seront mieux équilibrés.

4.4 CONTRIBUTIONS DE UPE-MLV / OTIG (UNIVERSITE PARIS-EST MARNE-LA-VALLEE / OBSERVATION DE LA TERRE ET INFORMATION GEOGRAPHIQUE)

4.4.1 Résultats issus des techniques de télédétection par interférométrie radar

Cette application interférométrique au retrait gonflement d'argile (RGA) a permis de préciser la façon d'aborder et d'étudier cette problématique. En effet, nous y avons notamment montré les principaux résultats suivants :

4.4.1.1 Utilisation de la méthode d'interférométrie différentielle (DInSAR) :

La faible cohérence observée sur les interférogrammes, liée à l'occupation du sol, n'est pas propice à l'utilisation de l'interférométrie différentielle sur les zones de bâti pavillonnaire individuel (cf classification IAURIF et l'orthophotographie de l'IGN). En effet, la présence de bruit et le manque de continuité dans le signal ne permettent pas de suivre les faibles déformations dans le temps. Il s'avère que les zones qui sont le plus affectées par le retrait gonflement d'argiles, en l'occurrence les zones jardinées et arborées, caractérisées par une forte évaporation et évapotranspiration, sont mal révélées par cette méthode. Ainsi, le suivi (pluri)-annuel et donc sur du long terme n'est pas envisageable par DInSAR.

Toutefois, des événements de type sécheresse ou forte précipitation sur une période de temps courte peuvent être étudiés ; certains bâtiments se déforment, et localement, certaines déformations sont soulignées par cette méthode. Nous avons ainsi révélé des déformations très probablement liées au RGA sur les versants de Nogent-sur-Marne (Figure 4.4.1) et dans la plaine alluviale de la Marne à Gagny (cf. article en annexe).

Remarquons que si la cohérence radar est élevée sur des étendues spatiales suffisamment importantes, comme c'est le cas sur un habitat urbain dense et peu végétalisé (exemple d'une ville), cette méthode fonctionne parfaitement sur le long terme. Il faut éviter de suivre dans les temps les environnements végétalisés de type agricoles ou forestiers ou mixtes.

4.4.1.2 Utilisation de la méthode PSI

La seconde méthode que nous avons appliquée est établie à partir de l'évolution des Points Stables, remarquables par leur forte rétrodiffusion radar, et qui sont beaucoup plus intéressants et prometteurs en terme de suivi et d'étude des faibles déformations de surface. En effet, il est maintenant possible, sur cet environnement urbain et semi-urbain, de suivre des centaines de points et ainsi donc de localiser, de caractériser et de quantifier les déplacements en ces points dans le temps et ce depuis le lancement du satellite radar ERS-1 en 1992 (Figure 4.4.2).

Nous avons ainsi mis en évidence que les faibles déformations ne sont pas strictement limitées aux épisodes de sécheresse ou de précipitation mais correspondent bien à un phénomène continu dans le temps : les faibles déplacements sont permanents et fonction des paramètres cités dans cette étude (Figure 4.4.3).

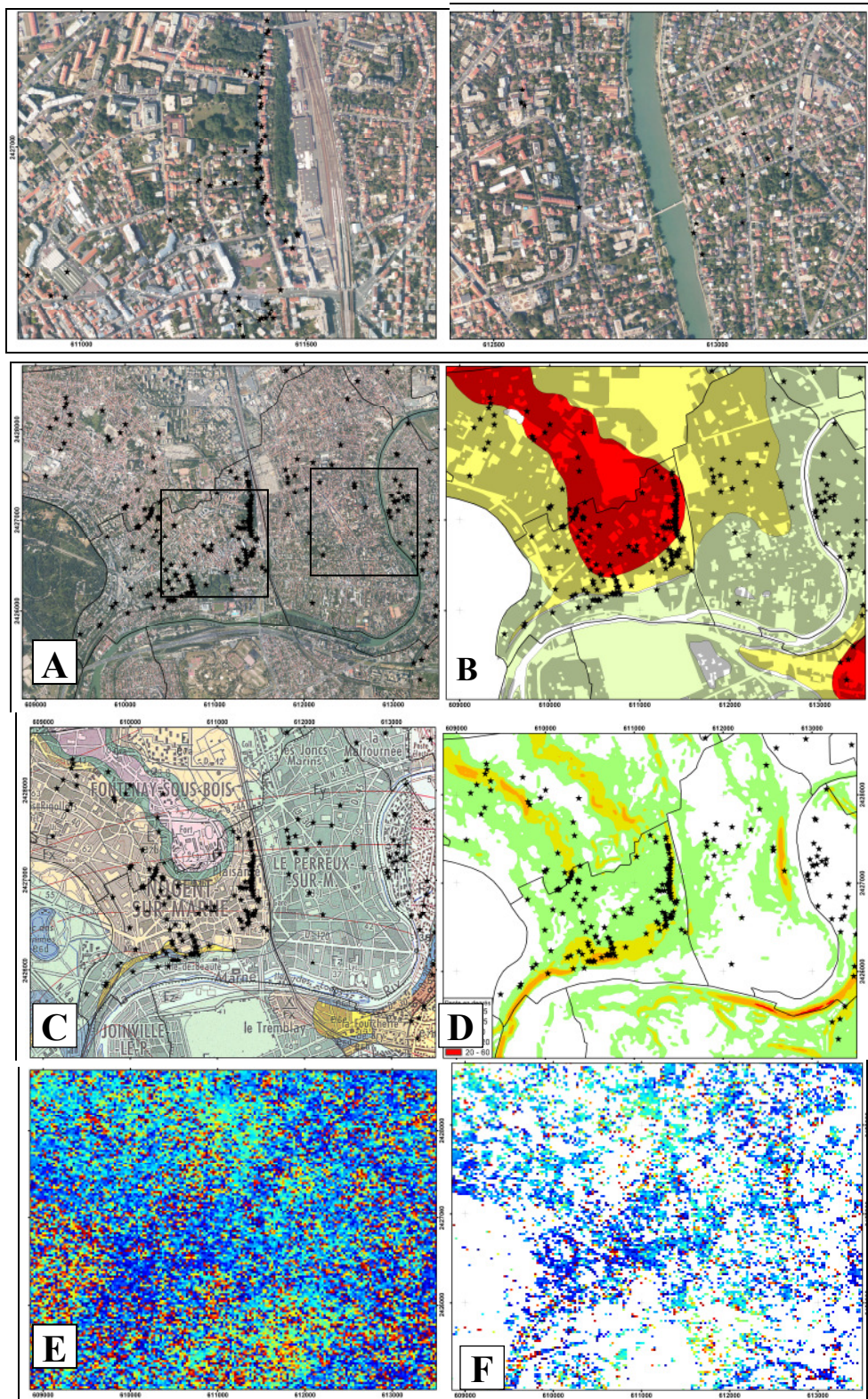


Figure 4.4.1 : Illustration de la méthodologie DInSAR mise en œuvre sur la zone de Nogent sur Marne. A, A1, A2 : Ortho photographie, B : aléa BRGM avec le bâti (MOS IAURIF) C : Carte géologique, D : Carte de pente, E et F : interférogramme 7334_20360 avec et sans masque de cohérence de 0.6

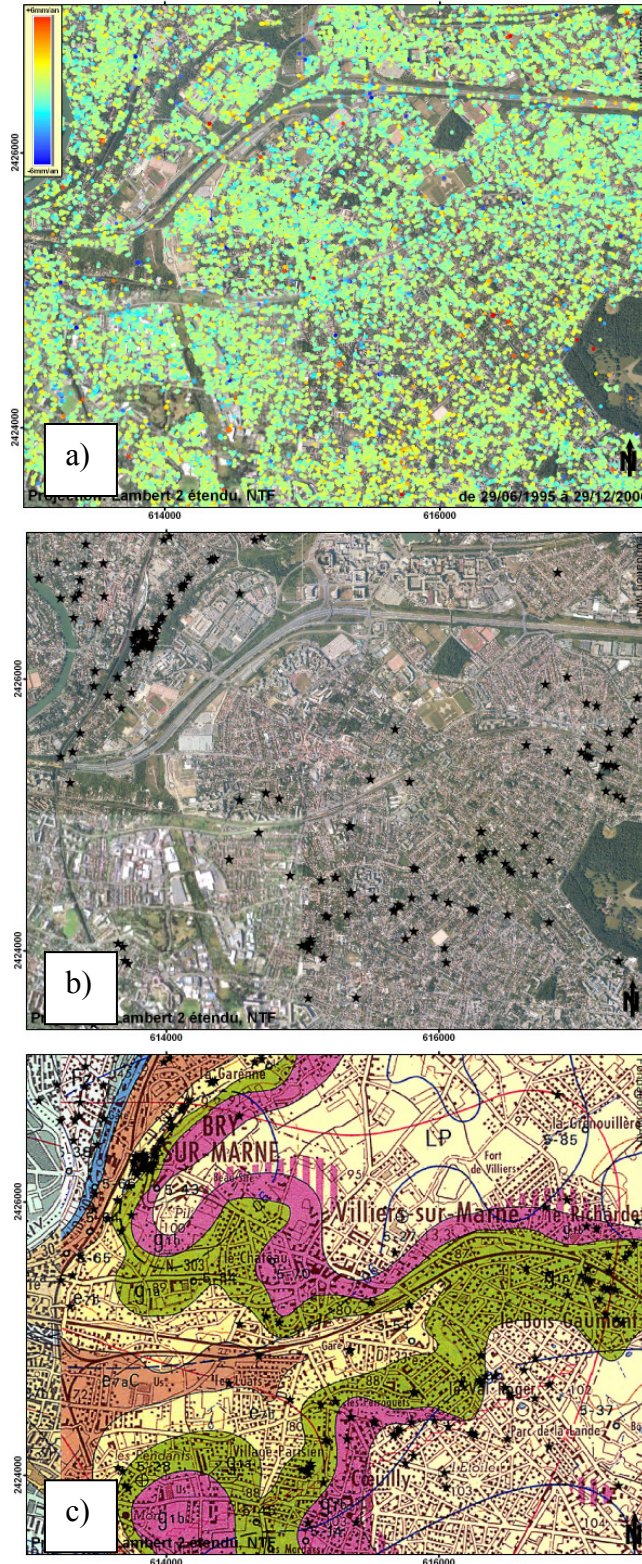


Figure 4.4.2 : Illustration de la méthodologie PSI mise en œuvre sur le plateau de Villiers-sur-Marne et de Bry-sur-Marne. a) Vitesse moyenne linéaire des PS ascendant en mm/an (bleu : négatives de -6mm/an, vers rouge positive de +6mm/an) avec fond de carte Ortho-photographie IGN. Emprise sur la zone 2 de Villiers sur Marne. b) Ortho-photographie IGN et sinistralité (étoiles noires). Emprise sur zone de Villiers-sur-Marne. c) Extrait de la carte géologique du BRGM au 1:50000 et sinistralité

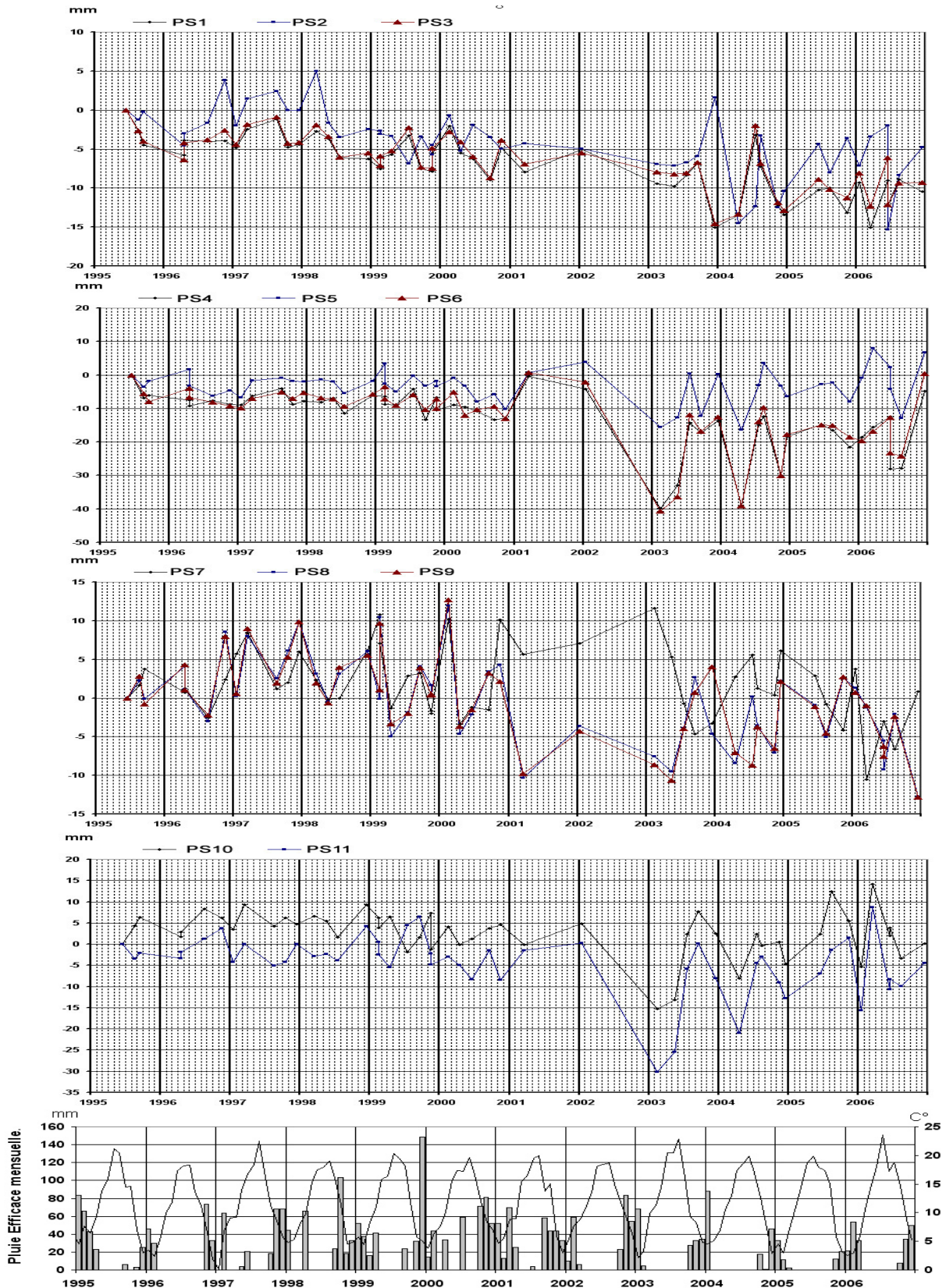


Figure 4.4.3 : Plaine alluviale de Gagny. Profils PS situés à proximité des pavillons individuels fissurés (observation terrain).

Cependant la technique que nous avons utilisée n'est pas réellement opérationnelle immédiatement : des recherches doivent encore être développées pour des applications industrielles et opérationnelles pour le milieu industriel et assurantiel.

Les principales limites sur lesquelles nous travaillons actuellement sont les suivantes :

Tout d'abord de premières limites sont liées aux données disponibles :

1. Nous disposons d'un faible choix avec des dates et des heures imposées (images à 35 jours, images ascendantes acquises à 22 heures, et images descendantes acquises à 10 heures du matin), avec un plus faible nombre d'images ascendantes que descendantes. Les images de nuit sont néanmoins plus intéressantes car limitent les effets thermiques de chaleur sur les structures des bâtiments et les déplacements associés. Les événements sécheresse et précipitation sont souvent des événements courts dans le temps et ne sont pas forcément bien encadrés par des acquisitions d'archives. Notons enfin que les artéfacts atmosphériques affectent potentiellement le signal radar susceptible d'entraîner un bruit sur les profils de déplacements des PS.
2. Des limites aussi dans les archives d'image : l'année 1994 n'est pas couverte, et la période 2000-2002 est problématique pour les images acquises par ERS-2 (problème de Doppler lié à une panne de gyroscopes).
3. La faible résolution décimétrique des images radar ERS.

TerraSAR-X, le nouveau satellite radar allemand qui a été lancé en 2007 et qui est pleinement opérationnel viendra y remédier fortement avec sa période de 11 jours (au lieu de 35 jours) et une très grande amélioration de sa résolution (3 m au sol au lieu de 20 m pour ERS et ENVISAT). Mais ce gain se fait avec des coûts images bien supérieurs (3000 euro/image) à la place de quelques centaines pour les satellites de l'Agence Spatiale Européenne...

D'autres limites sont liées au relief et à l'environnement urbain :

1. Si le terrain est penté, la déformation se fera en 3 dimensions, or nous ne mesurons la déformation que le long de la ligne de visée du satellite, c'est-à-dire en une dimension. Pour s'affranchir partiellement de cette limitation nous développons une méthode permettant de croiser les orbites ascendantes et descendantes différentes (angle de l'ordre de 20° dans les azimuts de défilement du satellite) mais qui sous-tend d'autres limites. En effet ce ne sont généralement pas les mêmes points stables qui seront observés en orbites ascendante et descendante. La mise en place de coins réflecteurs à géométrie connue et visibles sur les deux orbites est la solution la plus simple retenue par les industriels actuellement. Le problème est qu'il n'y a pas d'images d'archives : il faut attendre d'avoir une acquisition d'une vingtaine d'images pour mener une étude par PSI.
2. Les problèmes de décorrélation temporelle et spatiale liée à l'évolution de la végétation, de l'augmentation de l'occupation du sol et de la pression urbaine, de la modification des plans locaux d'urbanisme, etc.

Enfin de dernières limites sont liées à la technique de suivi des PS :

1. En effet actuellement tous les algorithmes de traitement des PS font l'hypothèse d'un mouvement linéaire dans les temps des points à étudier. Face à des comportements non linéaires, on assistera donc soit à une perte totale d'information, soit à un

« lissage » du déplacement, en ne conservant que la composante de premier ordre. Or il existe peu de phénomènes géologiques linéaires : le retrait-gonflement des sols argileux par définition n'est pas un processus linéaire puisqu'il dépend de l'humidité de l'air, de l'ensoleillement, de la température extérieure, de la végétation, du type et de la qualité des constructions, etc. Nous arrivons à nous affranchir partiellement de ce problème en sélectionnant les points soumis aux plus forts écarts à cette linéarité. Cependant les points (et donc les zones) bougeant le plus sont mal renseignés. Nous travaillons activement sur des algorithmes permettant de s'affranchir ou de limiter cette contrainte.

Il n'en reste pas moins que les méthodes interférométriques DinSAR et PSI restent actuellement et de loin les méthodes les plus intéressantes pour étudier les faibles déformations de surface et donc le RGA et avec le plus de potentialités. En effet toutes les méthodes classiques (comparaisons de nivellement, de MNT, etc.) sont beaucoup plus onéreuses, moins couvrantes spatialement, moins précises pour l'étendue des surfaces étudiées, sans archives, etc...

4.4.2 L'apport des Systèmes d'Information Géographique

L'importance des Systèmes d'Informations Géographiques et la compréhension des mouvements et des déformations sur le terrain sont absolument à souligner dans cette conclusion.

Intégration des données sous SIG pour l'analyse et l'interprétation des phénomènes à l'origine des déplacements : Il est particulièrement important d'intégrer et de combiner les différentes données pertinentes (orthophotographies, occupation du sol, géologie, formation superficielles, sinistralités, relief, pente, proximité du réseau hydrographique, nappes phréatiques, réseaux urbains et limites administratives, localisation des déplacements observés et calculés...) pour faciliter l'analyse et l'interprétation des déplacements. C'est seulement ainsi que nous pourrions comprendre les phénomènes géologiques complexes qui en sont à l'origine (Figures 4.4.1 et 4.4.2).

4.4.3 La nécessité d'un étalonnage de la méthode et d'un contrôle terrain

De même il faut souligner la nécessité d'un étalonnage de la méthode et d'un contrôle terrain.

Importance des mesures sur le terrain et de l'intérêt de définir une typologie des déformations urbaines : L'expérience acquise par l'équipe en néotectonique et tectonique active en Asie du Sud-est pour l'étude des failles actives à travers le dense tissu urbain nous a permis de définir une typologie des déformations des bâtiments en fonction de leur qualité de construction, de la vitesse de la déformation et nous permet ainsi de valider les approches plus quantitatives effectuées en interférométrie.

Ce n'est que par la conjonction et la complémentarité des approches mécaniques, expérimentales, de terrain, et de quantification des déformations que nous arriverons mieux à contraindre les zones à faible, moyen et fort aléas retrait gonflement d'argiles.

5. LES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS ISSUES DE LA RECHERCHE

A l'issue de cette recherche, une liste de recommandations issues des travaux présentés a été établie en conclusion du rapport final. Il ne s'agit pas de poser les bases d'un « génie para-sécheresse », comme il existe un génie para-sismique pour d'autres contextes, mais de souligner les points novateurs apportés par les recherches développées dans le projet « Aléa et risque sécheresse ». Peut-être dans un futur proche pourra-t-on poser véritablement les bases complètes d'un génie para-sécheresse, à condition de rassembler plus largement toutes les équipes de recherche qui ont développé, ces dernières années, des travaux sur les différentes facettes de la sécheresse géotechnique.

Dix recommandations principales ont été définies :

1. Principes des reconnaissances géologiques et géotechniques de l'environnement du bâti

Il est primordial de caractériser la formation géologique, à l'échelle de l'échantillon, comme à l'échelle de la parcelle, en se focalisant sur :

- la structuration en niveaux de perméabilités variables ;
- la présence de discontinuités verticales ou obliques (principalement dans le cas des argiles raides surconsolidées) ;
- la présence de surfaces de micro-cisaillement ou « slickensides » en rapport avec l'histoire diagénétique de la formation géologique ;
- la présence d'un système racinaire au sein de la formation.

Cette caractérisation doit prendre appui sur une expertise géologique, en concertation avec l'expertise géotechnique.

2. Mise en oeuvre des moyens de reconnaissance

Les moyens de reconnaissances doivent être adaptés à l'enjeu concerné, mais doit prendre appui sur les interventions suivantes :

- Mise en œuvre d'une connaissance géologique régionale (expertise géologique) ;
- Réalisation de sondages destructifs et/ou carottés ;
- Réalisation de mini-tranchées à la pelle hydraulique ;
- Réalisation, le cas échéant, de reconnaissances géophysiques de sub-surface ;
- Prélèvement d'échantillons intacts pour essais au laboratoire.

3. Contenu d'un rapport d'expertise, pour la partie relative au sol

Le rapport d'expertise doit rendre compte de toutes les interactions possibles entre eau et matériau, depuis l'échelle de l'échantillon jusqu'à l'échelle de la formation géologique, en passant par l'échelle de la parcelle. C'est une condition nécessaire pour bien diagnostiquer l'aléa et les conséquences sur le bâti.

4. Caractérisations minéralogiques, microstructurales et géotechniques des sols argileux

La gamme des essais nécessaires pour caractériser la sensibilité d'un sol argileux au retrait gonflement est connue et a été largement explicitée, en particulier à l'occasion de ce projet de recherche.

Il faut souligner l'importance d'une identification géologique précise des matériaux argileux : argiles géologiquement en place, altérites argileuses ou colluvions argileuses monogéniques ou polygéniques.

5. Améliorer la connaissance des interactions sol-atmosphère

L'amélioration des connaissances relatives aux processus physiques, de nature hydrique, thermique et mécanique, en cause dans les échanges sol-atmosphère reste nécessaire. Pour cela, à l'issue des résultats acquis dans le cadre du projet « Aléa et risque sécheresse » il reste nécessaire de :

- Poursuivre l'étude expérimentale (modèle physique de laboratoire) du comportement thermo-hydro-mécanique d'un sol argileux soumis à de l'infiltration ou de l'évaporation en rapport avec des conditions climatiques données ;
- Développer les modélisations numériques adaptées, prenant appui sur un retour expérimental.

6. Définition d'indices de vulnérabilité du bâti

La caractérisation de la vulnérabilité doit être améliorée par la définition d'indices de vulnérabilité prenant en compte le niveau d'aléa, la nature du bâti et son environnement proche.

7. Définition de systèmes de fondation adaptés au risque de retrait-gonflement

Les résultats apportés par le projet « Aléa et risque sécheresse » montrent que des avancées sont à concrétiser dans le domaine du dimensionnement des fondations sur sol sensible au retrait-gonflement. Des études spécifiques sont à poursuivre pour mieux définir ou mieux préciser :

- Les règles de dimensionnement des fondations, à adapter au cas du retrait-gonflement ;
- Le dimensionnement de fondations profondes dans des sols sensibles au retrait-gonflement ;
- La prise en compte d'un vide sanitaire dans le dimensionnement des fondations ;
- Le dimensionnement-même de la structure porteuse, avec les renforcements et chaînages adaptés.

Indépendamment de ces questions, le respect des règles de l'art de construire, en situation « standard », doit être un préalable absolu à rappeler aux entreprises et le contrôle de la mise en œuvre de ces règles de construction doit être vérifié dans toute situation de dommage au bâti.

8. Contrôle de l'environnement immédiat

En cas de bâti existant sinistré, un contrôle de l'environnement immédiat peut constituer une alternative, avec :

- Mise en place d'écrans anti-racines ;
- Drainages à réaliser conformément aux règles de l'art ;
- Revêtements imperméables périmétraux, à réaliser autour du bâti.

Cependant, le dimensionnement de plusieurs de ces dispositifs reste encore un objet de recherche.

9. Modélisation des interactions sol-structure

La modélisation des interactions sol-structure doit se développer, avec comme objectifs :

- Améliorer la conception de règles de dimensionnement simples s'appuyant sur les modes de ruine observés ;
- Permettre la validation d'une solution constructive ou la comparaison de différentes solutions afin de déterminer celle conduisant au risque de fissuration le plus faible ;
- Appuyer l'expertise après sinistre qui permettrait de statuer si celui-ci est dû uniquement au mouvement du sol ou à la conjonction de ce mouvement avec une malfaçon ;
- Améliorer le dimensionnement d'ouvrages neufs ou l'évaluation de procédés de renforcement en réhabilitation.

10. Développement des applications de l'interférométrie radar PSI

La surveillance satellitaire des sites sujets à de faibles déplacements en rapport avec les processus de retrait-gonflement des sols argileux peut se développer avec les techniques de l'interférométrie radar PSI. Le suivi temporel des déplacements au sol qu'elles autorisent devrait permettre d'améliorer les diagnostics relatifs aux effets de la sécheresse sur le bâti.

La nécessité de prendre en compte, pour l'analyse, un ensemble de paramètres géoréférencés rend nécessaire de mettre en œuvre des Systèmes d'Information Géographique.

Les contrôles terrain s'avèrent nécessaires pour la validation : analyse du contexte géologique et géomorphologique, analyse des dommages au bâti, instrumentation et surveillance in situ des déplacements et déformations du sol.

6. LA COMMUNICATION REALISEE SUR LES RESULTATS DE LA RECHERCHE

L'ensemble des sujets, présentés dans cette Synthèse de la Recherche, a fait l'objet de travaux de recherche dont beaucoup de résultats ont déjà été présentés dans diverses publications. Le groupe de recherche engagé dans le projet « Aléa et risque sécheresse » soutenu par la Fondation MAIF, ainsi que dans d'autres actions voisines, a directement contribué à des actions d'information et de communication.

Notre groupe de recherche a contribué directement à l'organisation d'une journée technique, commune aux associations CFGI (Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement) et CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique) qui a rassemblé plus de 150 participants en janvier 2007. Le coordonnateur du projet « Aléa et risque sécheresse » était co-responsable de la séance technique pour le CFGI. Par la suite, l'édition d'un N° spécial de la Revue Française de Géotechnique (N° 120-121) a été réalisée, sous la direction du coordonnateur du projet « Aléa et risque sécheresse ». Ce numéro a rassemblé 23 communications dont 6 issues du groupe de recherche du projet « Aléa et risque sécheresse ».

Par ailleurs, notre groupe de recherche a contribué, via Armines / Mines ParisTech - Centre de Géosciences et Ecole des Ponts ParisTech / UR Navier-Géotechnique, à l'organisation du Symposium international Sécheresse et Construction 2008 (SEC 2008), constituant, avec le LCPC, la présidence du Comité scientifique de ce symposium. Ce symposium a rassemblé plus de 200 personnes et a conduit à l'édition d'un ouvrage de 444 p, rassemblant 54

communications, parmi lesquelles 8 communications issues du groupe de recherche du projet « Aléa et risque sécheresse ».

Notre groupe de recherche a publié un certain nombre de résultats au cours des trois années de recherche. La liste des publications est la suivante :

- 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 Constructions « SEC 2008 », vol.1 pp.235-244.
- CSTB 2008. *Risques naturels et technologiques (Partie III – Sécheresse)*, Ed. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 978-2-85978-436-2, Mars 2008.
- CSTB 2008. *Vulnerability evaluation of dwelling houses due to shrinkage-swelling effect in clayey soils: a probabilistic framework*, soumis (mai 2008) à Computers & Geotechnics.
- CSTB 2008. *Vulnérabilité des bâtis de maisons individuelles sur sols argileux*, Symposium International « Sécheresse et Constructions » (SEC 2008, Paris), 1-3 sept 2008.
- CSTB 2008. *A proposed mechanics-reliability coupling method to evaluate the soil-foundation vulnerability*, International Symposium on Safety Science and technology (ISSST 2008 à Beijing), 24-27 sept 2008.
- Cojean R. 2008. *Présentation de projets de recherche récents ou en cours se rapportant à la sécheresse géotechnique*. Symposium International Sécheresse et Constructions « SEC 2008 », vol.1 pp.427-430.
- Cui Y.J., Lu Y.F. & Gao Y.B. 2007. *Modélisation des échanges à l'interface sol-atmosphère et simulation numérique des profils hydriques*. Revue Française de Géotechnique (ISSN – 0181-0529), N° 120-121, 59-66.
- Geremew Z., Audiguier M., Cojean R. 2008. *Comportement de sols argileux soumis a des sollicitations hydriques cycliques*. Symposium International Sécheresse et Constructions « SEC 2008 », vol.1 pp.245-256.
- Geremew Z., Audiguier M., Cojean R. 2009. *Analyse du comportement d'un sol argileux sous sollicitations hydriques cycliques*. Accepté par Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

- Kaveh H.F., Fruneau B., Deffontaines B., Duro J. et Arnaud A., 2008. *Apports de l'interférométrie radar (DINSAR ET PSI) à l'étude du retrait gonflement d'argile dans l'est du bassin Paris*. Symposium SEC 1,2 et 3 septembre 2008 Paris Marne la Vallée.
- Kaveh H. F., Deffontaines B., Fruneau B. 2007. *Apports d'un Système d'Information Géographique et de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain induits par l'aléa sécheresse : Applications à l'Est de l'Île-de-France*. Revue Française Géotechnique n°120-121, pp. 201-214.
- Kaveh H.F., Fruneau B., Deffontaines B., Duro J. et Arnaud A., 2009. *Swelling soils monitoring through PSI and DINSAR interferometry : Applications on eastern Paris surroundings (France)*, submitted to G15/NH11.4 Symposium EGU Vienne april 2009 egu2009@copernicus.org.
- Laribi S., Cojean R., Audiguier M., Grambin-Lapeyre C., Geremew Z. 2007. *Essai d'adsorption de bleu de méthylène : influence de paramètres du protocole expérimental sur la valeur au bleu en fonction de la minéralogie des argiles*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, pp.83-90.
- Laribi S., Audiguier M., Cojean R. 2008. *Assessing shrink/swell properties of two argillaceous soils from the Paris Basin: a comparison of cation exchange determination methods*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 67, n°3.
- Laribi S., Audiguier M., Cojean R. 2008. *Influence du mode de séchage des sols argileux sur la détermination de la capacité d'échange cationique*. Symposium International Sécheresse et Constructions « SEC 2008 », vol.1 pp.215-222.
- Mehdi Ben Hassen, Heydar Frédéric Kaveh, Benoît Deffontaines, 2008. *Contributions of interferometry radar for the study of the weak deformations generated by the behaviour of argillaceous materials under extreme climate: Application to the area of Lagny (East Paris,France)*, International Conference “URBISTICS AND DEVELOPMENT”: Today's Challenges and Paths of the Future Hammamet, Tunisia, from March 9th until March 12th, 2008
- Ta A.N., Tang A.M., Cui Y.J. 2008. *Suivi du profil hydrique dans le sol par mesures directes de teneur en eau*. Int. Sym. on drought and constructions SEC 2008, Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), IST – Diffusion des Editions, ISBN: 978-2-7208-2527-1, 129-134.
- Ta A.N., Tang A.M., Cui Y.J., Thiriart J. 2009. *A large-scale infiltration test in compacted expansive clay*. Asia-Pacific Unsat 2009, Newcastle, Australia.
- Ta A.N., Tang A.M., Cui Y.J. 2009. *Hydro-mechanical characterisation of a compacted expansive clay by suction controlled oedometer tests*. Asia-Pacific Unsat 2009, Newcastle, Australia.

- Tang A.M., Ta A.N., Cui Y.J. and Thiriat J. 2008. *An infiltration chamber for the studies of water transfer in compacted expansive clays*. Geotechnical Testing Journal. Under second review.
- Toulemont M., Cojean R. 2007. *La prévention des risques liés à la sécheresse géotechnique : une expérience transposable à d'autres aléas naturels*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, pp.215-220.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AQC (Agence Qualité Construction). 2004. *Fondations de maisons individuelles. Principales pathologies* - CD Rom Pédagogique à partir d'études de cas concrets. Diaporama retrait gonflement des sols argileux et brochure d'information.

Bard E. 2006. *L'Homme face au climat*. Collège de France, Odile Jacob éd . 446p., Paris.

CEBTP. 1991. *Guide pratique : Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse*. Sous l'égide de AQC, APSAD, AFAC, CCR, FNB. Fascicule 1 : Bases de référence. 48p., Glossaire. Fascicule 2 : Principes et méthodologie : 8p., Tableaux guides, Tableaux des solutions élémentaires, Schémas de désordres et de principe de réparation, Glossaire. Fascicule 3 : Annexes techniques, 123p. Edition SEDITTA, Paris.

Cojean R., 2007. *Introduction : la sécheresse géotechnique*. Revue Française de Géotechnique n° 120-121. pp. 7-9.

Cojean R., 2008. *Présentation de projets de recherche récents ou en cours se rapportant à la sécheresse géotechnique*. Symposium international Sécheresse et Constructions (SEC 2008). Editions LCPC, Paris, pp. 427-430.

DPPR. 1993. *Sécheresse et construction : Guide de prévention*. 51p. La Documentation Française.

Durand F. 2007. *Le réchauffement climatique en débats*. 188p. Collection Ellipse.

FFSA et GEMA. 2001. *Fascicule sécheresse*. 24p.

IPCC – GIEC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. 18p.

Magnan J.P., Cojean R., Cui Y.J., Mestat P. Ed. 2008. *Symposium international Sécheresse et Construction (SEC 2008)*. Volume 1. Publication du LCPC. 444p.

MAIF. 2000. *La méthodologie de l'expertise « sécheresse »*. 19p. et Annexes.

MEEDDAT. 2008. *Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ?*. 28p.

Nussbaum R. *Diaporama* Séance technique CFGI-CFMR, 18 janvier 2007.

Roume C. 2007. *Retour d'expérience en matière d'expertise dans le cadre des dossiers « Sécheresse et réhydratation des sols » relatifs à l'habitat pavillonnaire*. Revue Française de Géotechnique n° 120-121. pp 221-224.

Toulemont M., Cojean R., Faccendini J-P. 1994. *Cartographie prévisionnelle des sols sensibles à la sécheresse : un outil d'information préventive*. Mappemonde 4/94. pp2-5.

Toulemont M., Cojean R. 2007. *La prévention des risques liés à la sécheresse géotechnique : une expérience transposable à d'autres aléas*. Revue Française de Géotechnique n° 120-121. pp 215-219.

Vincent M. 2003. *Retrait-gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR*. 3^{ème} Conférence SIRNAT – Forum des Journées pour la Prévention des Risques Naturels, Orléans, janv. 2003. Actes du Colloque, 7 p.

Vincent M., Plat E., Le Roy S. (2007) – *Cartographie de l'aléa Retrait-Gonflement et Plans de Prévention des Risques*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, 189-200.

Vincent M., Hédou F., Chirouze M., Plat E., Le Roy S. – *Cartographie à l'échelle départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à des fins préventives*. Symposium international Sécheresse et constructions SEC 2008. 1-3 septembre 2008. LCPC. Ed. J-P. Magnan, R. Cojean, Y-J Cui, P. Mestat. Volume 1. pp. 55-62.