

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Rapport final Fondation MAIF
ALEA ET RISQUE SECHERESSE
Armines – Centre de Géosciences,
coordonnateur
Janvier 2009



SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	381
2.	RESULTATS ISSUS DE LA RECHERCHE	381
2.1	<i>Principes des études géologiques et géotechniques orientées vers la définition de la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement (Armines-Centre de Géosciences).....</i>	<i>381</i>
2.2	<i>Résultats issus des travaux de laboratoire (Armines-Centre de Géosciences) :</i>	<i>383</i>
2.2.1	Caractérisation de la variabilité des faciès lithologiques d'une formation donnée.....	383
2.2.2	Analyse de la microstructure et de la minéralogie.....	384
2.2.3	Apport de l'essai au bleu	385
2.2.4	Processus de fissuration au cours des cycles séchage-humidification.....	385
2.2.5	Comportement mécanique en relation avec l'état initial et la composition minéralogique	385
2.2.6	Essais cycliques de séchage-imbibition.....	386
2.3	<i>Résultats issus des travaux sur modèle physique, orientés vers une modélisation numérique des échanges hydriques et thermiques à l'interface sol-atmosphère (Ecole des Ponts - UR Navier – Géotechnique)</i> <i>386</i>	<i>386</i>
2.3.1	Introduction	386
2.3.2	Comportement du sol soumis à de l'infiltration	387
2.3.3	Comportement du sol au séchage.....	388
2.3.4	Comportement en compressibilité et conductivité thermique	389
2.3.5	Perspectives.....	389
2.4	<i>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 (CSTB)</i>	<i>390</i>
2.4.1	Introduction	390
2.4.2	Typologie du bâti, environnement immédiat du bâti, indices de vulnérabilité.....	390
2.4.3	Modélisation des interactions sol-structures.....	392
2.5	<i>Résultats issus des techniques de télédétection par interférométrie radar (UPE-MLV/OTIG)</i>	<i>393</i>
2.5.1	Utilisation de la méthode d'interférométrie différentielle (DInSAR) :	393
2.5.2	Utilisation de la méthode PSI.....	394
2.5.3	L'apport des Systèmes d'Information Géographique.....	395
2.5.4	La nécessité d'un étalonnage de la méthode et d'un contrôle terrain	396
2.6	<i>Recommandations et perspectives.....</i>	<i>396</i>

Rapport final Fondation MAIF
ALEA ET RISQUE SECHERESSE
Armines – Centre de Géosciences,
coordonnateur
Janvier 2009



1. INTRODUCTION

Les travaux présentés dans ce rapport final du Projet « Aléa et Risque Sécheresse » apportent des contributions aux 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.

Ces différents travaux se sont inscrits dans un processus de recherche théorique, expérimentale ou appliquée qui a interféré avec d’autres projets de recherche que nous avons cités : principalement le projet ARGIC : projet ANR-RGCU et le projet R2DS, ces projets arrivant à échéance dans la même période.

2. RESULTATS ISSUS DE LA RECHERCHE

Nous pouvons souligner les résultats suivants :

2.1 PRINCIPES DES ETUDES GEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES ORIENTEES VERS LA DEFINITION DE LA SENSIBILITE DES SOLS ARGILEUX AU RETRAIT-GONFLEMENT (ARMINES-CENTRE DE GEOSCIENCES)

Les éléments principaux relatifs à l’aptitude au retrait-gonflement des sols argileux, rappelés dans la Présentation générale de ce rapport, sont largement confirmés par l’expérience et les travaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche. 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.

Nous soulignons que, dans une spécialité comme la géologie de l'ingénieur ou « engineering geology », cette démarche globale est la norme.

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.

2.2 RESULTATS ISSUS DES TRAVAUX DE LABORATOIRE (ARMINES-CENTRE DE GEOSCIENCES) :

2.2.1 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 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.

2.2.2 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.
- 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).

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.

2.2.3 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.

2.2.4 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.

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.

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.

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

2.2.6 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.

2.3 RESULTATS ISSUS DES TRAVAUX SUR MODELE PHYSIQUE, ORIENTES VERS UNE MODELISATION NUMERIQUE DES ECHANGES HYDRIQUES ET THERMIQUES A L'INTERFACE SOL-ATMOSPHERE (ECOLE DES PONTS - UR NAVIER – GEOTECHNIQUE)

2.3.1 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. 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.

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

2.3.2 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 succions (Elcowa) et deux autres couvrent la gamme des faibles succions (psychromètre et tensiomètre). La teneur en eau volumique a été suivie avec deux types de capteurs : ThetaProbe et ECH₂O-TE. 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.

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. 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.

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 ont montré 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.

2.3.3 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 réalisé ensuite 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.

2.3.4 Comportement en compressibilité et conductivité thermique

Quatre essais oedométriques à succion contrôlée avec chargement et déchargement ont été réalisés. 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.

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 $21,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.5 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. Un 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.

2.4 RESULTATS ISSUS DES TRAVAUX DE MODELISATIONS NUMERIQUES RELATIVES A L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DU BATI, VARIABLE SUIVANT LES CONDITIONS DE STRUCTURE ET LES CONDITIONS D'INTERFACE FONDATION-TERRAIN (CSTB)

2.4.1 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.

2.4.2 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.

2.4.3 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.

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.

2.5 RESULTATS ISSUS DES TECHNIQUES DE TELEDETECTION PAR INTERFEROMETRIE RADAR (UPE-MLV/OTIG)

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 :

2.5.1 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 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.

2.5.2 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.

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.

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...

2.5.3 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.

2.5.4 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.

2.6 RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion de ce rapport, une liste de recommandations issues des travaux présentés a été établie. 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 œuvre 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.