

Projet ARGIC2

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

Rapport de synthèse générale

IFSTTAR

PROJET ARGIC 2
Rapport de synthèse générale

Identification du projet

Programme	C2D2
Projet	ARGIC 2
Coordinateur du projet : <ul style="list-style-type: none">• société / organisme• nom, prénom• téléphone• adresse électronique	IFSTTAR MAGNAN Jean-Pierre 01.81.66.82.60 jean-pierre.magnan@ifsttar.fr
Période du projet (date début – date fin)	18 janvier 2011 – 18 janvier 2014
Date	28 septembre 2014

Résumé court

Ce rapport présente la synthèse des travaux réalisés dans le cadre du projet ARGIC2 relatif au retrait-gonflement des sols argileux et à leurs effets sur le bâti. Ce projet a permis de confronter les points de vue des différentes parties intervenant dans la résolution de problèmes en lien avec le retrait-gonflement des sols argileux : les universitaires, les instituts publics de recherche, les syndicats de la construction, les cabinets d'expertise, les assureurs, les porteurs de politiques publiques, etc.

Les axes de travail abordés concernent le comportement des maisons individuelles soumises à des phénomènes de retrait-gonflement, l'estimation des profondeurs de variations hydriques dans les sols, la compréhension des mécanismes de variation de volume des sols lorsqu'ils sont soumis à des variations de teneur en eau et l'évaluation de la cartographie des zones de sols sensibles au retrait-gonflement. Les travaux menés comprennent des états de l'art, des expériences à différentes échelles, des cartographies et des modélisations qui abordent des aspects théoriques et appliqués.

Trois guides destinés au grand public ont été rédigés. Ils abordent trois sujets distincts : l'expertise et la réparation d'une maison ayant subi des désordres suite à des phénomènes de retrait-gonflement, la conception et la construction d'une maison sur une parcelle où les sols sont susceptibles d'être soumis au retrait-gonflement, la caractérisation des sols d'une parcelle vis-à-vis du retrait-gonflement.

Résumé long

Ce rapport présente la synthèse des travaux réalisés dans le projet ARGIC2 entre janvier 2011 et janvier 2014. Ces travaux concernent le comportement des maisons individuelles soumises à des phénomènes de retrait-gonflement (axe 1), l'estimation des profondeurs de variations hydriques dans les sols (axe 2), la compréhension des mécanismes de variation de volume des sols lorsqu'ils sont soumis à des variations de teneur en eau (axe 3) et la cartographie concernant le zonage des sols sensibles au retrait-gonflement (axe 4).

Trois guides destinés au grand public ont aussi été réalisés. Ils abordent trois sujets distincts : l'expertise et la réparation d'une maison ayant subi des désordres suite à des phénomènes de retrait-gonflement (guide 1), la conception et la construction d'une maison sur une parcelle où les sols sont susceptibles d'être soumis au retrait-gonflement (guide 2), la caractérisation des sols d'une parcelle vis-à-vis du retrait-gonflement (guide 3).

Dans l'axe 1, les travaux sont en rapport avec le comportement structurel des maisons individuelles soumises à des phénomènes de retrait-gonflement. Des expériences ont été menées sur une maison en vraie grandeur au CER de Rouen, construite selon les règles actuelles (DTU). Grâce à un système de vérins, la structure de la maison est soumise à différentes sollicitations (retrait ou gonflement) qui peuvent être aussi cycliques. Les résultats obtenus montrent que la structure se comporte correctement. Le respect des règlements confère aux structures une résistance suffisante pour résister à la plupart des sollicitations induites par le retrait-gonflement. Une base de données relatives à des désordres survenus sur des maisons en Seine-et-Marne et Seine-Saint-Denis a été mise au point. Son exploitation a permis d'identifier les principaux facteurs impliqués dans les désordres liés au retrait-gonflement. Dans cet axe, ont aussi été abordés les problèmes de modélisation de l'interaction sol-structure dans le cas du retrait-gonflement. Une première étude bibliographique sur le procédé d'injection développée par l'entreprise URETEK a été réalisée.

Dans l'axe 2, les travaux portent sur l'instrumentation de différents sites et la mesure de teneur en eau dans les sols. Des liens entre les variations hydriques dans les sols, les conditions météorologiques et les propriétés du terrain ont été recherchés. La mesure de teneur en eau sous des surfaces imperméables (maisons, routes, etc.) et des surfaces exposées à l'évapotranspiration a aussi été effectuée. Ces mesures doivent permettre à terme de connaître le profil de variation de teneurs en eau sous et à proximité d'une maison. Ces variations étant connues, il est possible de quantifier les déformations de retrait et de gonflement que le sol impose à la maison. Les travaux menés doivent aussi permettre de valider des protocoles simples de mesure de teneur dans les sols. Différentes techniques sont comparées (TDR, diagraphies, etc.). Le calcul des déformations d'un sol soumis à des variations hydriques est considéré selon deux voies : la première consiste à prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques en jeu avec des modélisations thermo-hydro-mécaniques couplées et la seconde repose sur une séparation des différents phénomènes et la mise au point de méthodes de calcul simples.

Dans l'axe 3, le comportement des sols sensibles au retrait-gonflement est étudié. Les essais sont menés à deux échelles. Les essais menés à l'échelle microscopique ont pour objectif d'identifier le rôle des différents minéraux dans les mécanismes de retrait-gonflement. Les essais menés à des échelles plus grandes visent à définir des paramètres plus objectifs de la sensibilité d'un sol au retrait-gonflement. En particulier, un nouveau protocole d'essai est proposé.

Dans l'axe 4, les travaux réalisés concernent d'une part la réalisation de cartes de l'aléa retrait-gonflement à des échelles 1/10000 et d'autre part la mise au point de nouveaux critères plus objectifs de détermination de la sensibilité d'un sol au retrait-gonflement. Un exemple de carte à l'échelle 1/1000 a été produit sur la commune de Mougins (Alpes-Maritimes). Elle montre des écarts notables avec la carte du BRGM produite à l'échelle 1/50000. En particulier, il apparaît que cette échelle ne permet pas d'identifier certains sols spécifiques d'une zone. Ces cartes permettent aussi de mettre au point la méthodologie permettant d'établir le zonage réglementaire des évaluations de sol à la vente de terrain.

En parallèle de ces travaux de recherche, trois guides à l'attention du grand public formant une collection « Sécheresse et Construction » ont été réalisés.

Le guide 1 « **Réparer sa maison** » traite des techniques de réparation des maisons individuelles suite à des désordres imputables au phénomène de retrait-gonflement. Il aborde plus largement des sujets liés à l'expertise de ce type de sinistre, aux principales méthodes de réparation et aux procédures de prise en charge de ces réparations par les assurances.

Le guide 2 « **Construire sa maison** » présente les principes de conception d'une maison individuelle sur un site plus ou moins sensible au retrait-gonflement. Ces principes concernent à la fois l'environnement de la maison et notamment la gestion des eaux et la structure de la maison avec des recommandations sur les profondeurs des fondations. Les solutions proposées sont classées en fonction des conditions de sol sous la construction et de conditions environnementales plus ou moins favorables.

Le guide 3 « **Caractériser un site pour la construction** » propose une démarche de détermination de l'aléa de retrait-gonflement d'une parcelle (qui est celle utilisée dans le guide 2). Cette démarche est divisée en cinq étapes, qui comprennent la consultation des informations existantes (cartes, PPR, etc.), une visite du site et éventuellement la réalisation de sondages puis d'essais de laboratoire pour l'identification des sols et pour l'estimation de leur aptitude au retrait-gonflement.

SYNTHÈSE DES TRAVAUX

Sommaire

PREAMBULE	6
INTRODUCTION	8
AXE 1 : COMPORTEMENT DES CONSTRUCTIONS ET DE LEURS FONDATIONS : PATHOLOGIE, REPARATION, PREVENTION	10
TACHE 1 : ESSAIS SUR LA STATION EN VRAIE GRANDEUR MISS (MAISON INDIVIDUELLE SOUMISE A DES SOLLICITATIONS)	10
TACHE 2 : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DE CONSTRUCTIONS EXISTANTES SOUMISES AU RETRAIT GONFLEMENT.....	10
TACHE 3 : BASE DE DONNEES DES STRUCTURES DE REFERENCE DES CONSTRUCTIONS INDIVIDUELLES	10
TACHE 4 : DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES ET MODELISATION DES STRUCTURES ET DES INTERACTIONS SOL – STRUCTURE	10
TACHE 6 : ANALYSE ECONOMIQUE DES STRATEGIES DE GESTION DES EFFETS DE LA SECHERESSE SUR LES CONSTRUCTIONS	11
AXE 2 : ANALYSE DE LA PENETRATION DE LA SECHERESSE DANS LE SOL ET DE LA DEFINITION DES SECHERESSES ANORMALES	12
TACHE 8 : METHODES DE MESURES DES TENEURS EN EAU DANS LES SOLS : PRINCIPE, COMPARAISON, PRECISION ET LIMITES	12
TACHE 9 : INSTRUMENTATIONS ET SUIVI DES SITES EXPERIMENTAUX	12
TACHE 10 : ANALYSES DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION DE LA SECHERESSE DANS LES SOLS EN FRANCE. 13	
TACHE 11 : METHODE DE CALCUL DES DEFORMATIONS D’UN SOL SOUMIS A DES VARIATIONS DE TENEUR EN EAU	14
TACHE 12 : INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR LA PENETRATION DE LA SECHERESSE DANS LES SOLS	14
AXE 3 : SENSIBILITE DES SOLS ARGILEUX AU RETRAIT-GONFLEMENT	16
TACHE 13 : METHODE DE CARACTERISATION AU LABORATOIRE DE LA SENSIBILITE DES SOLS AU RETRAIT GONFLEMENT.....	16
TACHE 14 : COMPORTEMENT DES SOLS SENSIBLES AU RETRAIT-GONFLEMENT	16
AXE 4 : ANALYSE DE LA CARTOGRAPHIE DE L’ALEA DE RETRAIT-GONFLEMENT	18
SYNTHESE DES TRAVAUX DE REDACTION DES GUIDES	20
CONCLUSION – PERSPECTIVES	21
ANNEXES	23
REPONSES APORTEES PAR LES PORTEURS DU PROJET AUX OBSERVATIONS DES RELECTEURS – VOLET 1	24
REPONSES APORTEES PAR LES PORTEURS DU PROJET AUX OBSERVATIONS DES RELECTEURS – VOLET 2	28

Préambule

Ce rapport dresse le bilan des travaux de recherche effectués dans le cadre du projet ARGIC 2 entre janvier 2011 et janvier 2014. Il est destiné à la DGALN ainsi qu'à la DGPR qui financent le projet, à la DRI qui en assure le suivi scientifique et à un comité scientifique mandaté par la DRI qui est en charge de son évaluation.

Le projet ARGIC 2 s'inscrit dans la continuité du projet ARGIC 1 piloté par le BRGM. Il vise à fournir des solutions de conception et de construction pour les maisons individuelles soumises aux cycles de retrait-gonflement des sols induits par des variations hydriques anormales.

Le projet comporte des objectifs scientifiques liés à l'étude des sols et des constructions mais aussi des objectifs de diffusion des connaissances avec la publication, pour le grand public, de trois guides détaillant les problèmes et les solutions liés à la construction d'une maison sur un sol sensible au retrait-gonflement.

Le projet ARGIC 2 a débuté le 18 janvier 2011 lors d'une réunion au cours de laquelle une revue de projet a été réalisée. Les responsables des différents axes du projet ainsi que les pilotes de la rédaction des 3 guides ont été désignés. Les objectifs des différents axes ainsi que des guides ont été précisés.

Un espace informatique collaboratif d'échanges de documents a été mis en place (adresse du site internet : <http://or.lcpc.fr/c2d2rgcuargic2/>).

Le projet ARGIC 2 est piloté dans sa globalité par l'IFSTTAR qui en assure la cohérence. Il comprend 5 axes de recherche qui sont respectivement gérés par les organismes suivants :

- Axe 1 : INERIS (Comportement des constructions et de leurs fondations : pathologie, réparation, prévention)
- Axe 2 : I2MGCE (Analyse de la pénétration de la sécheresse dans le sol et définition des sécheresses anormales)
- Axe 3 : LGCIE INSA de Lyon (Sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement)
- Axe 4 : BRGM (Analyse de la cartographie de l'aléa de retrait-gonflement)
- Axe 5 : IFSTTAR (Synthèse des études sur l'aléa retrait-gonflement)

Ce rapport correspond à l'axe 5 du Projet ARGIC2.

Les autres partenaires financés dans le cadre du projet sont les suivants : ARMINES, CSTB, FONDASOL, LAEGO, LMSSMAT.

Le CEREMA, nouvel établissement public créé en 2014 et incluant les différents CETE, a été financé au travers d'une dotation de la DGPR dans le cadre d'une opération de recherche pilotée par l'IFSTTAR. Les contributions de l'IFSTTAR et du CEREMA sont donc présentées sous un intitulé IFSTTAR-CEREMA.

Le laboratoire LOMC est associé au projet sans financement particulier. Ce mode de collaboration n'a pas permis de présenter de travaux réellement aboutis.

D'autres partenaires interviennent notamment pour la rédaction des guides :

- des syndicats professionnels de la construction (constructeurs, experts) : FFB, CAPEB, AQC, CFEC, UMF ;
- une compagnie d'assurance : SOCABAT.

La rédaction de 3 guides destinés au monde professionnel constitue un axe supplémentaire géré par l'IFSTTAR. Cet axe a été créé de manière à pouvoir assurer la publication des guides dans le courant de l'année 2012. Chaque guide est piloté spécifiquement par les organismes suivants :

- Guide 1 (Tâche 5.1) : INERIS

- Guide 2 (Tâche 5.2) : CSTB
- Guide 3 (Tâche 15) : ARMINES et IFSTTAR

Le présent rapport comprend les éléments suivants :

- une note de synthèse présentant les travaux menés ;
- des annexes numérotées de 1 à 4 et détaillant les résultats pour chaque axe de recherche ;
- des annexes numérotées de 5 à 7 et présentant les guides 1 à 3 à l'attention du grand public.

Introduction

La synthèse des travaux des différents axes est effectuée selon les différentes tâches constituant le projet (Tableau I). Il est noté que l'axe 5 a été modifié ; il ne correspond plus à une synthèse des axes 2, 3 et 4 mais à une synthèse de l'ensemble des axes de 1 à 4. Des rapports de synthèse ont été établis afin de rassembler de manière détaillée les résultats obtenus pour chaque tâche.

L'implication des différents partenaires dans les axes et les tâches du projet est présentée dans le Tableau II.

Tableau I : Intitulé des axes et des tâches du projet ARGIC2

Axes	Tâches	Intitulé
Axe 1	1	Essais sur la station en vraie grandeur MISS (Maison individuelle soumise à des sollicitations)
	2	Analyse du fonctionnement de constructions existantes soumises au retrait gonflement
	3	Base de données des structures de référence des constructions individuelles
	4	Dimensionnement des structures et modélisation des structures et des interactions sol – structure
	5	Guide 1 : recommandations pour réparer les structures endommagées suites à des tassements différentiels Guide 2 : pratique de conception et dimensionnement de maisons individuelles sur sol sujet au phénomène de retrait-gonflement
	6	Analyse économique des stratégies de gestion des effets de la sécheresse sur les constructions
	7	Synthèse des études de l'axe 1
Axe 2	8	Méthodes de mesures des teneurs en eau dans les sols : principe, comparaison, précision et limites
	9	Instrumentations et suivi des sites expérimentaux
	10	Analyses de la profondeur de pénétration de la sécheresse dans les sols en France
	11	Méthode de calcul des déformations d'un sol soumis à des variations de teneur en eau
	12	Influence de la végétation sur la pénétration de la sécheresse dans les sols
Axe 3	13	Méthode de caractérisation au laboratoire de la sensibilité des sols retrait gonflement
	14	Comportement des sols sensibles au retrait-gonflement
	15	Guide 3 : caractérisation des sites de construction en termes de retrait et de gonflement
Axe 4	16	Analyse des méthodes de cartographie de l'aléa retrait gonflement
Axe 5	17	Rapport de synthèse des études sur l'aléa (axes 2, 3 et 4)

Tableau II : Implication des partenaires dans les différents axes et tâches du projet ARGIC2

	Axe 1 – INERIS							Axe 2 – I2MGCE					Axe 3 – LGCIE			Axe 4 – BRGM
	Tâches							Tâches					Tâches			Tâche
Partenaires	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
ARMINES													X	X		X
BRGM						X	X	X	X	X	X					X
CSTB		X		X		X	X									
FONDASOL						X	X				X		X			
IFSTTAR	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
INERIS		X	X	X		X	X						X			
I2MGCE								X	X	X	X		X	X		X
LAEGO				X			X							X		
LGCIE							X	X			X		X	X		
LMSSMAT								X					X	X		

Axe 1 : Comportement des constructions et de leurs fondations : pathologie, réparation, prévention

La tâche 5 relative à la rédaction des guides 1 et 2 n'est pas présentée. Les guides illustrent directement les travaux réalisés.

La tâche 7 correspondant à la synthèse de l'axe 1 est présentée dans un document annexé à ce rapport de synthèse générale.

Tâche 1 : Essais sur la station en vraie grandeur MISS (Maison individuelle soumise à des sollicitations)

Partenaires : IFSTTAR-CEREMA

Synthèse des travaux : Les travaux réalisés comprennent différentes expérimentations sur la maison individuelle construite au CER. Cette maison construite selon les normes et règlements en vigueur sur un système de vérins peut subir des sollicitations similaires à celles induites par le retrait-gonflement du sol. Les travaux entrepris concernent surtout les effets cycliques du retrait-gonflement. Différents cycles de mouvement ont donc été appliqués à la maison et son comportement a été observé et analysé. Les observations montrent qu'une exécution soignée de la maison lui confère une résistance satisfaisante vis-à-vis des sollicitations que peut générer le retrait-gonflement des sols. Vu ces résultats, il est très étonnant d'observer tant de désordres dus au retrait-gonflement en France. Néanmoins, il est important d'avoir à l'esprit que des fuites d'eau accidentelles ou la présence de végétations peut accroître les déformations de retrait ou de gonflement.

Tâche 2 : Analyse du fonctionnement de constructions existantes soumises au retrait gonflement

Partenaires : CSTB, IFSTTAR-CEREMA, INERIS

Synthèse des travaux : Cette tâche a pour objectif la constitution de bases de données permettant de mettre en évidence les causes de désordres imputables au retrait-gonflement (végétation, profondeur des fondations, forme de la construction, pentes, etc.). Le CEREMA a entrepris l'élaboration puis l'analyse d'une base de données issue des dossiers de demandes d'indemnisation des départements de Seine-et-Marne et de Seine-Saint-Denis liés à la sécheresse de 2003. Les informations extraites des dossiers ont permis de réaliser des études statistiques sur la répartition des sinistres et leurs variations en fonction de différents critères. Aucune conclusion évidente n'a pu toutefois être mise en évidence. De nombreuses incertitudes demeurent notamment la nature des sols situés sous les constructions.

Tâche 3 : Base de données des structures de référence des constructions individuelles

Partenaires : IFSTTAR-CEREMA, INERIS

Synthèse des travaux : Cette tâche n'a pas été réalisée faute de moyens.

Tâche 4 : Dimensionnement des structures et modélisation des structures et des interactions sol – structure

Partenaires : CSTB, IFSTTAR-CEREMA, INERIS, LAEGO

IFSTTAR : Un module de calcul développé dans CESAR-LCPC permet de prendre en compte des déformations du sol. Des calculs d'interaction sol-structure resteraient à réaliser.

INPL-LAEGO : Des modèles en deux et trois dimensions avec des poutres et des plaques ont été réalisés. Le bâti est considéré selon 4 typologies. Les calculs sont réalisés avec des modèles

élastoplastiques comprenant des surfaces de charge incorporant des mécanismes d'écroutissage isotrope. L'objectif est de calculer la déflexion relative des maisons à partir d'exemples de la base de données du CEBTP. Des courbes de vulnérabilité des maisons individuelle construites sur des sols gonflants et subissant une période de sécheresse ont été développées.

CSTB : Une structure posée sur un sol modélisé par des lois d'interaction locale de type de Pasternak a été proposée. Elle doit permettre de mieux cerner les mécanismes de déformation des constructions individuelles.

Tâche 6 : Analyse économique des stratégies de gestion des effets de la sécheresse sur les constructions

Partenaires : BRGM, IFSTTAR-CEREMA, INERIS

Synthèse des travaux : Cette tâche n'a pas débuté faute de moyens, mais a été traitée dans l'axe 4. Des difficultés importantes sont apparues pour rassembler toutes les informations nécessaires à la réalisation de cette tâche. En particulier, la très grande diversité des acteurs de la construction (assureur, constructeur, expert, syndicat) nuit à un tel travail.

Axe 2 : Analyse de la pénétration de la sécheresse dans le sol et de la définition des sécheresses anormales

Tâche 8 : Méthodes de mesures des teneurs en eau dans les sols : principe, comparaison, précision et limites

Partenaires : BRGM, IFSTTAR, I2MGCE, LGCIE, LMSSMAT

Synthèse des travaux :

BRGM : Des systèmes de mesure de variation de teneur en eau ont été mis en place depuis 2004 sur le site expérimental de Mormoiron avec 2 cannes Humitub (24 capteurs au total) et 3 sondes ThetaProbe pour les mesures automatiques toutes les 3 heures. Le dispositif est opérationnel.

IFSTTAR : Les mesures de teneur en eau dans le sol in situ posent toujours autant de problème en termes de tenue à long terme et de précision. En janvier 2012, de nouveaux essais croisés en diagraphie nucléaire entre le LR Autun, le LTHE Grenoble et le CETE Ile de France ont été effectués. Un forage a été réalisé sur le CETE Méditerranée pour tester une sonde capacitive Diviner 2000. Toutefois, les mesures sont limitées à 1.8 m de profondeur. Ce type de sonde s'est révélé difficile à entretenir et à utiliser dans le temps.

Une étude de faisabilité pour développer avec le CER Rouen un nouvel appareil diagraphique à source contrôlée (radioactivité uniquement pendant les mesures) a été lancée sans succès.

I2MGCE : Des systèmes de mesure de variation de teneur en eau ont été mis en place depuis 2008 sur le site expérimental de Pessac :

- 3 sondes TDR pour l'établissement de profils hydriques jusqu'à 3 m de profondeur avec un relevé manuel des mesures ;
- 3 sondes FDR (Frequency Domain Reflectometry) ThetaProbe ML2x et 4 sondes ECH2O-EC5 pour les mesures automatiques toutes les 3 heures jusqu'à 3 mètres de profondeur.

Les résultats obtenus montrent que ces appareils de mesure sont les plus efficaces et permettent de suivre les variations de teneur en eau dans le sol sur des périodes de l'ordre de 5 ans au moins. Les mesures réalisées avec ce type de matériel restent donc à poursuivre notamment dans l'objectif de constituer une base de données du retrait-gonflement.

LGCIE INSA Lyon : Une sonde hydrique PR2 (mesure de la permittivité du sol) est en phase de recalibration pour une argile moyennement gonflante et très gonflante. Les premiers résultats montrent une assez bonne cohérence entre le signal de la sonde et la teneur en eau. Cette sonde sera utilisée lors d'essai réalisé sur une nouvelle version du pilote.

LMSSMAT : le travail a surtout consisté à mettre au point et tester différents dispositifs expérimentaux et capteurs et à valider la démarche par des essais sur un limon naturel assez plastique. Les résultats encourageants obtenus permettent de poursuivre le travail par une étude systématique des paramètres qui interviennent dans le phénomène, de manière à disposer d'une base expérimentale suffisante pour tester des modèles proposés dans la littérature.

SOCABAT : Des systèmes de mesure de variation de teneur en eau ont été mis en place sur le site expérimental de Roaillan. Les mesures sont réalisées manuellement avec 3 sondes TDR. Le dispositif a été installé au second semestre de l'année 2011.

Tâche 9 : Instrumentations et suivi des sites expérimentaux

Partenaires : BRGM, IFSTTAR, I2MGCE,

Synthèse des travaux :

BRGM : Un suivi des mesures de variation de teneur en eau a été réalisé depuis 2004 jusqu'à aujourd'hui en continu avec quelques lacunes dans les données correspondant aux phases de pannes et maintenance. Un bilan de l'évolution de la sécheresse sur cette période est intégrée dans différents rapports d'étude (le dernier en date : BRGM/RP-60404-FR).

Un autre site a été instrumenté à Roaillan avec des sondes ThetaProbe (cf. SOCABAT) afin de voir l'influence de la végétation et l'efficacité des écrans anti-racine.

IFSTTAR : La sonde diagraphique neutron-neutron a été abandonnée du fait de l'absence d'autorisation pour son utilisation, seule la sonde gamma-gamma est autorisée à circuler sur les sites.

Le bilan des mesures réalisées est le suivant :

- Site de Trappes (78) : poursuite des mesures 3 ou 4 fois par an (sonde diagraphique gamma-gamma).
- Sites de Loir et Cher et de l'Indre : poursuite des mesures par tensiomètres sur les 3 chaussées du Loir-et-Cher (Lamotte Beuvron, Choussy et Vernou – enregistrement depuis avril 2009 – 14 sondes sur chaque site – une valeur toutes les 4 h avec relevé météo). Un rapport comprenant les premières mesures a été remis à la fin de l'année 2010. Trois autres sites dans l'Indre ont été instrumentés sur une même portion de route qui a fait l'objet d'un chantier test (mise en place d'une barrière anti racine) (7 sondes par site – enregistrement depuis octobre 2011)
- Site de Merville : Réalisation de différents sondages carottés avec mesure de teneur en eau en laboratoire pour apprécier la variation hydrique dans le sol d'un terrain partiellement imperméabilisé au cours de l'année.
- Site du Fauga (collaboration du LR Toulouse avec Météo France et l'Université Polytechnique de Catalogne) : instrumentation réalisée, 7 mois de mesures disponibles (phase de calcul prévue ultérieurement).
- Site de Carmaux : possibilité d'une mise à jour des données de suivi sur plusieurs années.
- Site de Mormoiron : aucun passage depuis le début d'ARGIC 2 pour des relevés diagraphiques sur les 4 tubages mis en place compte tenu des problèmes rencontrés avec la sonde.
- Site de Saint-Saturnin-les-Apt : aucun passage depuis le début d'ARGIC 2 pour des relevés diagraphique sur les 2 tubages mis en place chez un particulier sinistré (difficulté car un des sondages est rempli d'eau et les têtes de tubage ont été abimées).
- Site de Roaillan : les 14 sondes tensiométriques autour de la maison sinistrée de Roaillan (33) ont permis de mettre en évidence l'influence de la végétation, notamment d'un arbre situé à quelques mètres.

Ces sites permettent de commencer à mettre en œuvre une première base de données du retrait-gonflement en France. Néanmoins, les moyens mis en œuvre sont trop faibles pour vraiment tirer profit des mesures réalisées.

I2MGCE : Un suivi des variations de teneur en eau et des mouvements du terrain a été réalisé, sur le site de Pessac, depuis 2008 (ARGIC1) jusqu'à aujourd'hui, soit 3 années de mesures en continu (sondes TDR et mesure de résistivité électrique). Un bilan de l'évolution de la sécheresse sur 5 ans est intégré dans les résultats de thèse de C. Andrieux (2009-2012). Ce bilan prend en compte l'évapotranspiration et les pluies efficaces. Les mouvements de terrain mesurés restent quant à eux inférieurs à ceux déduits des résultats d'essais de laboratoire. Des efforts sont à produire pour assurer une cohérence entre les observations aux échelles locales et globales.

SOCABAT : Un suivi des mesures de variation de teneur en eau sur la maison de Roaillan a été mené dans le cadre d'une collaboration entre l'Université Bordeaux 1 et SOCABAT.

Tâche 10 : Analyses de la profondeur de pénétration de la sécheresse dans les sols en France

Partenaires : BRGM, IFSTTAR, I2MGCE

Synthèse des travaux :

I2MGCE : Les mesures de variation de la température de l'air et du sol jusqu'à 5 mètres de profondeur, comme de la pluviométrie (station météorologique) ont permis d'avoir une approche méthodologique de la profondeur de pénétration de la sécheresse à partir de la relation de Philip (1957).

IFSTTAR : les mesures réalisées sur le site de Trappes grâce à la sonde gamma-gamma (profils de densité humide enregistrés en février-mars, mai-juin et septembre-octobre) montrent pour 2009, 2010 et 2011 une bonne corrélation des variations de teneurs en eau qui affecteraient le sol jusqu'à environ 1,30 m de profondeur. Le critère basé sur l'évapotranspiration et les pluies efficaces semble être prometteur pour mettre en évidence des sécheresses anormales mais sa validation sur d'autres sites reste à réaliser.

BRGM : Les variations de températures dans le sol sont très bien maîtrisées et les valeurs mesurées in situ sont conformes aux valeurs obtenues via des formules de diffusion thermique classique à partir des mesures de surface. Sur la période d'observation (depuis 2007), sur le site de Mormoiron, les déplacements enregistrés à 1,7 m sont encore significatifs puisqu'ils atteignent 2 cm d'amplitude annuelle. Les interprétations sont encore en cours mais la période de mesure des données commence à être satisfaisante pour une interprétation.

Tâche 11 : Méthode de calcul des déformations d'un sol soumis à des variations de teneur en eau

Partenaires : BRGM, FONDASOL, IFSTTAR, I2MGCE, LGCIE

Synthèse des travaux :

I2MGCE : Des mesures ont été publiées dans la thèse de M. Chrétien (2007–2009) et se poursuivent avec la thèse de C. Andrieux (2009–2012). Elles doivent permettre l'établissement de corrélations entre les déformations du sol et ses variations de teneur en eau. Des mesures de déformation ont été réalisées avec des sondes GLÖTZ et TELEMAT. La seconde technique s'avère plus performante.

BRGM : Plusieurs tentatives de corrélations des déformations et des variations de teneur en eau voire de déformations et de météorologies ont été mis en œuvre :

- des études de corrélations à l'aide de méthodes empiriques (stage de E. Sulcas en 2009 et de M. Degrotte en 2011) ;
- des études à l'aide d'un logiciel de traitement et modélisation des séries temporelles (TEMPO) (stage de M. Degrotte, 2011) ;
- dans le cadre d'une thèse encadrée par le BRGM et le CERMES avec le logiciel ThetaStock.

LMSSMAT : Des essais ont été réalisés sur des matériaux argileux reconstitués pour étudier l'évolution de la succion en fonction de la variation de teneur en eau. Le principe est d'utiliser une colonne de diamètre de 30 à 40 cm et de 1 mètre de hauteur dans laquelle le sol reconstitué subit des cycles d'humidification et de séchage tout en contrôlant la densité du matériau par prélèvements. L'étude de la cinétique d'infiltration de l'eau dans une colonne de sol instrumentée est ainsi analysée.

LGCIE : Cette tâche a commencé en janvier 2012. Un essai sur maquette permettant de connaître le déplacement en surface en fonction de la variation de teneur en eau est en cours de réalisation avec la sonde hydrique PR2 (mesure de la permittivité du sol) sur une argile moyennement gonflante. La mise en place du pilote étant délicate, un second pilote plus aisé dans son montage et plus instrumenté a été réalisé.

Tâche 12 : Influence de la végétation sur la pénétration de la sécheresse dans les sols

Partenaires : BRGM, IFSTTAR, I2MGCE, SOCABAT

Synthèse des travaux : Cette tâche a été traitée dans le cadre des travaux des autres tâches de cet axe. La végétation a clairement un rôle dans les mécanismes de retrait-gonflement mais leur compréhension précise n'a pu être abordée dans ce projet. Des discussions avec des agronomes pourraient être envisagées dans de futurs projets de recherche.

Axe 3 : Sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement

Tâche 13 : Méthode de caractérisation au laboratoire de la sensibilité des sols au retrait gonflement

Partenaires : ARMINES, FONDASOL, IFSTTAR, INERIS, I2MGCE, LGCIE, LMSSMAT

Synthèse des travaux :

ARMINES : Les argiles plastiques du Sparnacien, prélevées en région parisienne, ont fait l'objet de caractérisations minéralogiques, microstructurales et géotechniques. Une argile du Lias de l'est de la France a été rajoutée au champ d'étude. Les caractéristiques minéralogiques, géotechniques ainsi que les résultats des caractéristiques mécaniques (pression de gonflement et potentiel de gonflement) sur sols intacts et remaniés (remaniement d'origine anthropique au laboratoire) associés aux caractérisations microstructurales correspondantes sont présentées.

FONDASOL : Différents essais sont réalisés sur des échantillons provenant de dossiers post-sinistres :

- des essais d'identification (sur des échantillons remaniés), teneur en eau, limites d'Atterberg, granulométrie, sédimentométrie, valeur au bleu,
- des essais de gonflement (sur échantillons intacts) : masse volumique, degré de saturation, mesure de la pression de gonflement (gonflement tenu, gonflement libre, oedomètre normalisé, essai de gonflement en trois points),
- des essais de retrait (sur échantillons intacts) : limite de retrait et coefficient de retrait.

IFSTTAR : Deux méthodes d'essai de caractérisation de la sensibilité des sols au retrait-gonflement ont été développées et sont en cours de publication. La base d'essais de retrait-gonflement du CEREMA a été complétée. Les sols denses sont peu sensibles au retrait mais montrent une tendance au gonflement. Pour les sols lâches, c'est l'inverse. La compacité d'un sol a été identifiée comme une donnée essentielle dans la cinétique de retrait-gonflement.

INERIS : Deux essais de caractérisation du retrait/gonflement de la Montmorillonite grecque et de la smectite MX80 au sein du microscope électronique à balayage environnemental ont été réalisés. Ceux-ci ont permis de définir la relation qui existe entre la teneur en eau du matériau et sa capacité à changer de volume (transformation d'une variation surfacique selon certaines hypothèses).

I2MGCE : Le travail porte sur la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement et la recherche de paramètres influant. Des procédures d'essais de caractérisation de la sensibilité des sols en laboratoire pour les sols de la région Aquitaine (formation de Brach) sont en cours.

LGCIE : Le développement d'un essai de retrait avec suivi des déformations par capteur à balayage est en cours.

LMSSMAT : Des propositions sont à l'étude pour la définition d'un indice de sensibilité au retrait-gonflement basé, non pas sur la mesure d'un paramètre physique lié de façon plus ou moins indirecte au phénomène (comme la limite de liquidité, la valeur de bleu, la CEC, etc.) mais au contraire d'un paramètre mécanique directement représentatif du retrait-gonflement. Le travail se poursuit actuellement par l'utilisation d'une nouvelle technique de caractérisation rapide de ce paramètre.

Tâche 14 : Comportement des sols sensibles au retrait-gonflement

Partenaires : ARMINES, IFSTTAR, I2MGCE, LAEGO, LGCIE, LMSSMAT

Synthèse des travaux :

ARMINES : Les travaux portent sur l'établissement des courbes de rétention d'eau caractérisant le comportement hydrique des sols et l'étude de l'influence sur le phénomène de retrait-gonflement de cycles humidification-séchage sont en cours de réalisation. Des comparaisons sont en cours avec les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil préalablement étudiées. L'un des objectifs est de préciser le rôle spécifique de la microstructure des sols argileux dans les processus de retrait-gonflement.

IFSTTAR : L'étude est en rapport avec l'influence du remaniement, de la densité sur le retrait dans les sols argileux ainsi que marneux et de l'impact des cycles de retrait gonflement.

I2MGCE : L'étude est relative à l'influence de la proportion en argile gonflante et certains minéraux sur le comportement de la formation de Brach.

LAEGO : Les travaux portent sur des études hydro-mécaniques multi-échelle des argiles gonflantes traitées à la chaux en fonction de leur état initial.

LGCIE : La caractérisation géotechnique d'un second sol supposé très gonflant s'achève. Des essais classiques (limite de liquidité, plasticité, retrait) seront effectués sur ce sol et sur celui du projet ARGIC1 qui est moyennement gonflant. Les traitements sont en cours de définitions (polymères).

LMSSMAT : Le travail porte sur la détermination de courbes de retrait-gonflement sur des pâtes et matériaux compactés à différents teneur en eau et densité et l'analyse des textures lors du séchage par porosimétrie au mercure, diffraction X, et MEB.

Axe 4 : Analyse de la cartographie de l'aléa de retrait-gonflement

Partenaires : ARMINES, BRGM, IFSTTAR, I2MGCE

Synthèse des travaux :

Cet axe ne comprend qu'une tâche. Le programme porte sur l'analyse de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. La cartographie réalisée par le BRGM à l'échelle départementale sert de référence. L'objectif est de disposer du maximum de retour d'expérience sur la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols disponible sur www.argiles.fr.

ARMINES : Par le passé plusieurs types de cartographies détaillées ont été réalisés : cartographies des formations superficielles et cartographies géotechniques. Certaines d'entre elles ont pu être utilisées pour les cartographies de l'aléa retrait-gonflement du BRGM(département de l'Essonne en particulier). Les données collectées lors de ces cartographies sont comparées aux cartes d'aléa retrait-gonflement établies par le BRGM. L'influence de la démarche de « généralisation » (inhérente à toute cartographie) sur la cartographie de l'aléa retrait-gonflement sera analysée, avec retour aux « minutes de terrain ». Cette analyse est en cours à partir des cartes géologiques de Rambouillet et Corbeil-Essonnes (Ile-de-France) ainsi que Hérisson (Massif central).

BRGM : Le BRGM effectue actuellement l'analyse des cartes et l'étude des différents cas de cartographie de l'aléa retrait-gonflement recensés en France ou à l'étranger. Différents points sont à retenir :

La méthodologie des cartes départementales d'aléa disponibles sur www.argiles.fr à partir des cartes géologiques au 1/50 000 n'a pas été remise en cause par la présente étude. Les retours d'expériences présentés dans le présent document mettent bien en évidence ces limites méthodologiques (liées au processus de généralisation cartographique notamment).

Les expériences étrangères ou autres expériences françaises sont confrontées aux mêmes limites méthodologiques (par exemple, la carte réalisée au Texas sur une superficie de 274 ha ne peut être utilisée à l'échelle du site). La norme australienne fournit une approche intéressante qui a vocation à être réalisée plutôt à l'échelle du site et consiste à traduire le résultat en termes de mouvement attendu du sol. Cette démarche a été reprise dans le cadre du guide 3 d'ARGIC2.

Enfin, l'analyse à l'échelle nationale montre que dans l'ensemble, le pourcentage de bâti sinistré augmente avec le niveau d'aléa (en moyenne, l'aléa faible compte environ 1,5 % de bâti sinistré, l'aléa moyen, 6,5 % et l'aléa fort 13 %) avec des disparités. Cette croissance est respectée pour 74 des 95 départements traités. Pour 18 départements, la progression n'est pas strictement respectée mais l'écart est faible (entre les niveaux faible et moyen ou moyen et fort pour 17 d'entre eux). 3 départements présentent une progression non respectée avec un écart important et notamment un pourcentage de bâtiments sinistrés en aléa nul. Il s'agit de 3 départements du sud-ouest (Haute-Garonne, Gers et Tarn-et-Garonne). L'étude de ces singularités montre que, à l'exception de quelques incohérences relativement mineures de contour (liée à la digitalisation manuelle dans le cadre de ces études anciennes), il n'existe pas d'erreur majeure d'interprétation. Pour certains départements d'Ile-de-France notamment, le pourcentage de bâti sinistré calculé est biaisé par le coût moyen des sinistres qui n'a pas été départementalisé (donnée non disponible au BRGM) ce qui induit, pour certains départements, des taux de bâti sinistrés plus importants que la moyenne notamment en aléa moyen.

IFSTTAR : Avec la collaboration du CEREMA, les points abordés sont les suivants, deux cartes d'aléa retrait-gonflement à l'échelle des communes de Mougins et Mouans-Sartoux ont été produites. La comparaison avec la cartographie de l'aléa du département des Alpes-Maritimes proposée par le BRGM montre des écarts locaux à l'échelle de la parcelle qui peuvent être significatifs. Le changement d'échelle et l'utilisation de données plus précises expliquent ce phénomène.

I2MGCE : Dans le cadre de la thèse de C.Andrieux, plusieurs cartographies notamment avec des outils géophysiques sont réalisées sur une étendue de 5 ha correspondant au site expérimental de Pessac (cartographie à l'échelle de la parcelle). L'interpolation des résultats d'essais géotechniques (limites d'Atterberg, V_{BS} , C_2) utilise la méthode de tomographie électrique et électromagnétique sur la parcelle

expérimentale de Pessac. Cette méthode a permis de mettre en évidence, avec une bonne précision, la limite entre deux faciès d'une formation géologique (sable/argile).

Synthèse des travaux de rédaction des guides

Ces guides, de 30 à 50 pages chacun, doivent permettre, à l'attention du grand public, la diffusion des connaissances acquises durant les différents projets de recherche réalisés sur la thématique du retrait-gonflement des sols. Leurs objectifs sont de proposer des démarches pour traiter trois problèmes essentiels du retrait-gonflement des sols : la reconnaissance des terrains de construction, la conception ainsi que la construction des maisons et enfin leur réparation suite à des désordres.

Les groupes de travail mis en place pour leur rédaction servent aussi de support à la DGALN et à la DGPR pour la préparation de la loi et des décrets modifiant la prise en charge des sinistres liés au retrait-gonflement dans le cadre des procédures de « catastrophe naturelle ».

La rédaction de ces guides associe donc un grand nombre de personnes aux points de vue parfois différents. La confrontation entre les résultats des recherches académiques et les observations de terrain rapportées par les professionnels de la construction est riche d'enseignements mais reste très complexe à transcrire en termes de recommandations pour le grand public.

Ces guides ont toutefois été achevés et il ne reste plus qu'à les publier. Le guide 3 est déjà prêt pour la publication. Les versions actuelles des guides sont disponibles dans les annexes 5, 6 et 7.

Conclusion – Perspectives

Le projet ARGIC 2 a permis de réaliser un nombre important de travaux dans les 4 axes de recherche qui avaient été définis :

- Axe 1 : Comportement des constructions et de leurs fondations : pathologie, réparation, prévention
- Axe 2 : (Analyse de la pénétration de la sécheresse dans le sol et définition des sécheresses anormales)
- Axe 3 : Sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement
- Axe 4 : Analyse de la cartographie de l'aléa de retrait-gonflement

Les principaux résultats de ces travaux sont synthétisés dans des rapports de synthèse relatifs à chaque axe. Le présent document présente aussi quelques résultats significatifs obtenus par chacun des partenaires.

Les tableaux de synthèse III et IV ci-dessous présentent les résultats du projet par rapport aux objectifs et aux apports définis lors de la phase de montage.

Les trois guides réalisés constituent des livrables majeurs pour ce projet. Ils permettent de valoriser pour les acheteurs et les propriétaires de maisons individuelles très concernés par le risque de retrait-gonflement les travaux de recherche des instituts de recherche et des universités. Les collaborations avec les professionnels de la construction ont permis très probablement d'avancer dans la prise en compte et le traitement de l'aléa de retrait-gonflement.

Les perspectives de ce projet de recherche restent importantes. À long terme, on peut penser que les différents travaux engagés peuvent se poursuivre pour continuer à amasser des données et des connaissances. Les mécanismes de retrait-gonflement des sols sont complexes et les interactions avec les constructions accentuent encore plus cette complexité. Il est toutefois important de noter que, selon les professionnels, le retrait-gonflement des sols n'est pas exclusivement lié aux phénomènes de sécheresse mais à un problème global de gestion de l'eau durant la construction et l'utilisation des maisons individuelles. Une sensibilisation du monde de la construction est de première importance. À ce titre, l'AQC en collaboration avec l'IFSTTAR et le CEREMA va organiser un cycle de conférences d'une demi-journée pour sensibiliser les professionnels de la construction sur ce sujet. La première séance est prévue le 17 juin 2015 juste avant un congrès international de deux jours sur le thème du retrait et gonflement des sols en lien avec le climat et la construction. Ces conférences permettront sans doute de faire émerger de nouvelles questions sur le retrait-gonflement des sols et d'initier de nouveaux projets.

Tableau III : Analyse des objectifs atteints par le projet ARGIC2

Objectifs	Commentaires
1 – Finaliser les travaux du projet ARGIC en allant jusqu'à des produits utilisables dans la pratique de la construction	Production de guides en collaboration avec la profession
2 – Approfondir les connaissances sur le comportement des constructions et de leurs fondations	Expérimentations sur la MISS Bases de données en cours de construction Modélisations numériques
3 – Analyse de la pénétration de la sécheresse dans le sol et la définition des sécheresses anormales	Expérimentations sur différents sites
4 – Améliorer la connaissance de la sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement	Nombreux essais réalisés
5 – Proposer une analyse de la cartographie de l'aléa de retrait-gonflement	Comparaison de cartes Proposition de méthodes de cartographie

Tableau IV : Analyse des apports fournis par le projet ARGIC2

Apports	Commentaires
1 – Mieux comprendre le phénomène de retrait-gonflement et la pénétration de la sécheresse	OUI partiellement Les mouvements de retrait ou de gonflement sont liés à des variations de teneur en eau lentes et des cycles pluriannuels viennent se superposer aux cycles saisonniers.
2 – Quantifier de manière fiable l'évolution des teneurs en eau	OUI partiellement Des comparaisons entre les différents outils de mesure ont été effectuées.
3 – Relier les variations de teneur en eau aux déformations du sol en profondeur	NON Il semble qu'un écart existe entre les mesures en laboratoire et les mesures sur site.
4 – Comprendre le comportement des structures	OUI Les expérimentations sur la MISS ont permis d'acquérir de nombreuses données
5 – Identifier des critères mieux adaptés de caractérisation de la susceptibilité des sols	OUI partiellement Des discussions entre les différents partenaires ont eu lieu et des synthèses des différentes approches sont disponibles. La procédure choisie pour le guide 3 est le fruit de ces travaux.
6 – Étudier les critères de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement et notamment l'impact de la végétation	NON L'interaction entre le sol et la végétation s'est révélée très complexe à analyser. Par ailleurs, ce sujet est peu abordé hormis pour des fins liées à l'agronomie.
7 – Proposer une définition quantitative du caractère normal ou anormal de la pénétration de la sécheresse dans le sol	OUI Le critère reste à généraliser et à valider
8 – Réfléchir aux méthodes de cartographie de l'aléa retrait gonflement	OUI Proposition de méthodes de cartographie

Annexes

- Annexe 1 : Rapport de synthèse de l'Axe 1 (rapport)
- Annexe 2 : Rapport de synthèse de l'Axe 2 (rapport)
- Annexe 3 : Rapport de synthèse de l'Axe 3 (rapport + annexes)
- Annexe 4 : Rapport de synthèse de l'Axe 4 (rapport)
- Annexe 5 : Guide 1
- Annexe 6 : Guide 2
- Annexe 7 : Guide 3

Réponses apportées par les porteurs du projet aux observations des relecteurs – Volet 1

Pour chaque observation listée ci-après, précisez la réponse apportée par les partenaires du projet et, le cas échéant, les corrections opérées dans le rapport.

Observations générales

§ Le rapport de synthèse final rassure par sa cohérence scientifique, la richesse de ses annexes et la qualité globale des guides produits. Bien présenté, très concis, il reprend l'apport des différents partenaires pour chacune des tâches considérées. On regrettera toutefois qu'il n'y ait pas eu de mise en parallèle des objectifs initiaux avec les objectifs finalement atteints, et qu'aucune explication n'ait été apportée sur l'abandon de certaines tâches initialement prévues.

Réponse

Ce point a été corrigé dans la version finale du rapport.

§ Un bilan des avancées scientifiques du projet relativement aux cinq objectifs et huit apports initialement proposés aurait été apprécié. Par exemple, quels sont les critères obtenus du projet concernant le déclenchement du phénomène de retrait-gonflement, qui est initialement le 6ème apport scientifique potentiel ? A-t-on obtenu une définition quantitative du caractère normal ou anormal de la pénétration de la sécheresse dans le sol, qui est le 7ème apport scientifique pressenti ? Concernant cette dernière question, il est certes mentionné dans le rapport final de l'axe 2 que « la connaissance de l'état hydrique climatique ou EH (PE-ETP) sur plusieurs années peut être un indicateur performant pour établir des périodes de sécheresse extrême » mais le caractère performant de cet indicateur ne semble avoir été ni discuté ni démontré.

Réponse

Dans la mesure du possible, un bilan relatif aux cinq objectifs et huit apports initialement proposés a été proposé. Néanmoins, pour un certain nombre d'objectifs, il est évident que des travaux restent à mener notamment par l'acquisition de données et qu'il n'est donc pas possible de conclure formellement sur la pertinence des conclusions et des résultats acquis.

§ Les résultats des essais sur la maison expérimentale MISS du CER sont très intéressants, voire frustrants : si les maisons individuelles étaient strictement construites selon les règles de l'art, on n'observerait quasiment pas de dégâts dus à la sécheresse. Il est très dommage néanmoins que les autres études expérimentales initialement prévues n'aient pu être conduites, en particulier celles sur cas réel, sur des fondations, sur simulateur et sur pilote.

Réponse

Le programme du projet ne prévoyait pas de faire toutes les études expérimentales citées. Il comprenait :

- des études sur la maison expérimentale de Rouen ;
- des études sur pilote (échelle réduite) à l'INSA de Lyon.

Les observations sur une maison existante ont été effectuées à Roaillan. Cette activité est apparue pendant la réalisation du programme ARGIC2, sur proposition d'un expert.

Une maison vient d'être construite à Pessac en dehors d'ARGIC2 mais elle n'a pas encore fourni de mesures.

Il n'a pas été question de travaux sur fondations ou sur simulateur.

Comme pour d'autres parties du projet, la réduction des financements, notamment des EPIC, n'a pas permis de suivre des ambitions plus grandes.

§ L'analyse économique des dommages liés à la sécheresse, qui devait être une contribution nouvelle importante du projet, n'a finalement été que peu traitée.

Réponse

Il s'est avéré que les données économiques sont très dispersées entre les acteurs de la construction. Les coûts de réparation sont très variables d'une maison à l'autre et d'une région à l'autre et il n'a pas paru possible de faire une évaluation globale du coût des réparations par rapport au coût des études géotechniques qui auraient pu les éviter. Ce sujet a été abandonné pour cette raison.

§ Dans les rapports des axes 1 à 4, on regrette l'absence de publications significatives dans les congrès et les revues à caractère scientifique.

Réponse

Les partenaires du projet le regrettent aussi mais la réalisation des guides a monopolisé le temps de la plupart des personnes impliquées dans ce projet et beaucoup de travaux expérimentaux qui ont été réalisés sont encore en attente de mesures, donc non publiables.

Remarques particulières

Sur le rapport de l'axe 2

§ Le rapport semble avoir été largement négligé ; sans doute n'a-t-il pas été relu ; les annexes ne sont pas fournies, les nombreuses erreurs orthotypographiques n'en facilitent pas la lecture ; il manque des tableaux récapitulatifs de ce qui a été réalisé, où et par qui.

Réponse

Ce reproche est fondé. Le rapport de l'axe 2 va être revu.

§ Il n'est pas fait le lien entre teneur en eau (massique) et profondeur de pénétration de la sécheresse. Il aurait été intéressant d'avoir, en introduction par exemple, une définition des grandeurs utilisées (« profondeur de pénétration de la sécheresse », sécheresse « normale », etc.).

Réponse

Cette suggestion sera prise en compte lors de la révision.

§ Le travail réalisé sur le site de Pessac est très intéressant et apporte des éléments nouveaux sur la notion de sécheresse normale et anormale. En revanche, il n'est pas fourni de proposition d'extrapolation, ni de discussion sur la limite de ces travaux.

Réponse

Les sols étant très hétérogènes par nature, il est très difficile de conclure quant aux caractères généraux des résultats acquis. Ces derniers viennent enrichir l'expérience acquise. L'instrumentation d'autres sites reste à mener.

§ Un bilan des mesures sur le site expérimental de Roillan de la tâche 8 de l'axe 2 pendant les deux années de fonctionnement potentiel en 2012 et 2013 aurait été apprécié.

Réponse

Ce travail n'a pas été réalisé car les mesures se poursuivent encore. Il aurait néanmoins dû être fait sur la base des mesures acquises. Il a été fait pour le symposium SEC2015.

§ Le rapport gagnerait à inclure une synthèse présentant les résultats tant en termes de mesure in situ (performance et intérêt des instrumentations testées) que de définition et d'extension au territoire national de la notion de sécheresse normale ou anormale.

Réponse

Cette remarque sera considérée lors de la révision.

Sur le rapport de l'axe 3

§ Les travaux, coordonnés théoriquement par le LGCIE avec la participation de tous les partenaires, semblent avoir été réalisés pour l'essentiel par l'IFSTTAR et l'ancien réseau des LPC. Quelles ont été les contributions des autres partenaires au projet ?

Réponse

Les faibles financements alloués à chaque entité n'a permis de traiter en détail toutes les tâches. L'animation de l'axe 3 n'a pas été optimale.

Sur le rapport de l'axe 4

§ Il semble que la phase de mise au point de la méthodologie de cartographie n'ait pas été nécessaire puisque la méthodologie utilisée est celle « élaborée par le BRGM depuis 1995 ». Pourquoi avoir alors proposé une « mise au point » ? Des limites méthodologiques sont présentées mais a priori aucune modification de la méthodologie n'est proposée.

Réponse

Des réflexions ont encore lieu notamment avec la DGPR. Il est donc difficile de statuer sur les modifications à apporter.

§ La synthèse bibliographique est relativement pauvre. A minima, un tableau comparatif des approches menées dans les différents pays cités (extension de la zone d'étude, méthode utilisée, etc.) aurait été apprécié.

Réponse

Une étude bibliographique avait été faite dans le cadre du projet ANR ARGIC. Il conviendra de la compléter dans les travaux futurs pour évaluer plus précisément les pratiques des autres pays.

§ Des comparaisons sont faites avec les travaux réalisés « par les différents organismes qui ont participé à cet axe ». Les rapports correspondants ne sont pas fournis.

Réponse

Ce point sera pris en compte ultérieurement. Ces questions ont été traitées dans le symposium SEC2015, postérieur à l'envoi du rapport.

§ En conclusion du chapitre 4, il aurait été utile de regarder le coût du « mieux » : sur la ville de Toulouse, par exemple, comparer le nombre de jours passés à l'analyse BRGM et le nombre de jours passés à l'analyse GIPEA, nombre de sondages, etc... pour fournir aux décideurs des comparatifs en fonction du degré de précision attendu.

Réponse

La question n'a pas été jugée « mûre » lors de la rédaction du rapport.

Sur le guide 1 : « caractériser un site pour sa construction »

§ Le guide est bien découpé et est écrit dans un langage aisément compréhensible. Il semble accessible au plus grand nombre. Néanmoins, si on souhaite le rendre encore plus accessible, il conviendra d'augmenter les illustrations explicatives (schémas notamment sur les « informations à rechercher » - partie 1).

Réponse

Ce point pourra être considéré lors d'une dernière revue du guide.

§ Les encarts synthétiques dans la Partie 2 « moyens d'étude » sont très appréciables. Il serait toutefois judicieux d'opérer une classification des sources documentaires de la plus accessible au particulier (prescriptions du PPR ou site www.argiles.fr, non cité explicitement) à la moins exploitable

pour ce même individu, par exemple la banque des données du sous-sol (une carte géologique du BRGM ne peut pas être considérée comme simple d'accès au plus grand nombre).

Réponse

Ce point pourra être considéré lors d'une dernière revue du guide.

§ Pour les figures 7 et 8, la réalisation de la limite de plasticité avec une surface en bois, absorbante, est étonnante. Pourquoi encore présenter la coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité alors que les nouveaux référentiels s'appuient sur le cône ?

Réponse

Ce point pourra être considéré lors d'une dernière revue du guide.

§ En partie 3, il conviendrait d'ajouter en introduction la nécessité d'inclure une interprétation des éléments recueillis par un professionnel.

Réponse

Ce point pourra être lors d'une dernière revue du guide.

§ Au 3.1.4. il serait sans doute plus pertinent pour le public considéré de reprendre la définition de la granulométrie à partir des normes internationales de première intention : argile – pas de sensation de particule au toucher ; pas d'éjection d'eau lors du malaxage dans la main ; limon – etc.

Réponse

Ce point pourra être considéré lors d'une dernière revue du guide.

Sur le guide 2 : « Protéger sa maison... »

§ La classification présentée dans les tableaux 1 et 2 pourrait aussi faire l'objet d'une discussion dans le guide explicitant le phénomène de retrait et gonflement.

Réponse

Ce point pourra être considéré lors d'une dernière revue du guide.

Sur le guide 3 : « Analyse des désordres... »

§ Dans la partie 4 « analyse des désordres », il est surprenant que le 4.2 soit intitulé « diagnostic de l'expert » alors que tout le chapitre concerne ce point. Il est par ailleurs recommandé d'inverser les 4.1 et 4.2 pour faciliter la compréhension et la lecture de cette partie.

Réponse

Ce point pourra être considéré lors d'une dernière revue du guide, à titre de complément.

Réponse générale pour les 3 guides

Pour les 3 guides, de nombreuses relectures ont déjà eu lieu pour obtenir l'accord de tous les parties prenantes, notamment les Directions Générales du MEDDE et les syndicats professionnels. Les modifications seront apportées dans la mesure où elles ne risquent pas de compromettre cet accord.

Réponses apportées par les porteurs du projet aux observations des relecteurs – Volet 2

Pour chaque observation listée ci-après, précisez la réponse apportée par les partenaires du projet et, le cas échéant, les corrections opérées dans le rapport.

Remarques particulières

Cette mise en parallèle et les explications relatives à l'abandon de certaines tâches initialement prévues n'ont pu être aisément identifiées dans le rapport final. Les auteurs sont invités à surligner les parties du rapport concernées.

Réponse

Les parties modifiées du rapport sont désormais surlignées.

Les auteurs sont invités à surligner les parties du rapport final concernant le « bilan relatif aux cinq objectifs et huit apports initialement proposés ». S'il est légitime scientifiquement de ne pouvoir « conclure formellement sur la pertinence des conclusions et des résultats acquis » par manque de données, il serait toutefois utile d'explicitier les raisons objectives expliquant cette insuffisance de données au terme de quelque six années de travail engagé (ARGIC et ARGIC2). Par ailleurs, les deux questions précises sur l'obtention d'une définition quantitative du caractère normal ou anormal de la pénétration de la sécheresse dans le sol et sur le caractère performant de l'indicateur comme la connaissance de l'état hydrique climatique ou EH (PE-ETP) sur plusieurs années ne semblent pas avoir trouvé de réponse dans le nouveau rapport de synthèse générale.

Réponse

Les parties modifiées du rapport sont désormais surlignées.

Un bilan détaillé sur les cinq objectifs et les huit apports initialement proposés a été établi à la fin du rapport.

Concernant le manque de données, deux types de problèmes peuvent être mis en avant. Le premier est en relation avec le temps de suivi des sites qui s'avère trop court compte tenu de la cinétique des mouvements en jeu. A peine un cycle de retrait-gonflement a été mesuré. Le second touche à la nature des sites et à la difficulté de tirer des conclusions à partir de quelques cas qui ne sont pas assez nombreux. Néanmoins, les conclusions obtenues permettent de mieux appréhender le phénomène du retrait-gonflement.

La définition quantitative du caractère normal ou anormal de la pénétration de la sécheresse dans le sol se heurte aux deux problèmes évoqués précédemment. Par ailleurs, un lien entre ce critère et les désordres sur les constructions resteraient à établir.

Les auteurs invoquent à plusieurs reprises dans leurs réponses les communications issues de SEC 2015 : une synthèse de ce congrès présentant les compléments utiles à ARGIC2 sera-t-elle faite ? Si oui, quand et par qui ?

Réponse

Les actes du congrès SEC2015 ont été publiés puis transmis sous format électronique à la DRI. Ils constituent à la fois une synthèse des travaux du Projet ARGIC2 et une présentation des travaux qui pourraient être entrepris dans le cadre de futures actions en lien avec le retrait-gonflement des argiles.