
Le retrait-gonflement des sols : les recherches récentes entreprises par le Cerema

David Mathon¹

¹ Cerema Normandie-Centre, Laboratoire de Blois, 11 rue Laplace, CS 32912, 41029 BLOIS cedex

david.mathon@cerema.fr tel : +33 (0)2 54 55 49 36

RÉSUMÉ : *Les périodes récurrentes de déficit hydrique en France ont mis en évidence la vulnérabilité des constructions sur certains sols argileux en période de sécheresse prolongée. En effet, sous l'effet de la sécheresse, certaines argiles contenues dans des sols naturels, marnes ou roches argileuses, se rétractent de manière importante et entraînent localement des mouvements de terrain non uniformes pouvant aller jusqu'à provoquer la fissuration de certaines habitations ou certaines routes. Compte tenu de l'impact financier important de ce phénomène (il constitue la deuxième cause d'indemnisation derrière les inondations en France), il a été jugé nécessaire de développer les connaissances scientifiques et techniques concernant la sécheresse. Ainsi, l'IFSTTAR et le Cerema ont mené conjointement (et successivement depuis 2006) deux opérations de recherche baptisées « Sécheresse 1 & 2 ». L'opération Sécheresse 2 avait pour objectifs d'accroître la compréhension du comportement des argiles et de leurs interactions avec le climat, la végétation, les constructions et les infrastructures routières.*

Ainsi, Sécheresse 2 a permis de collecter de nombreuses données sur des sites instrumentés dans toute la France, l'essai de retrait-gonflement simplifié développé par l'IFSTTAR a été éprouvé, une expérimentation en vraie grandeur sur une maison témoin a permis de mettre en évidence la pertinence des règles de construction actuelles et des développements méthodologiques ont été rédigés (guides méthodologiques). Les grands enseignements de cette opération sont détaillés dans l'article

MOTS-CLÉS : *retrait-gonflement des sols, argile, sécheresse, constructions, essais, cartographie, routes*

KEY WORDS: *shrink-swell soil, clay, drought, construction, testing methods, mapping, roads*

1. Introduction

Les périodes récurrentes de déficit hydrique (1976, 1989-1991, 1996-1997, 2003, 2005, 2009) ont mis en évidence, en France, la vulnérabilité des constructions sur certains sols argileux en période de sécheresse prolongée. En effet, sous l'effet de la sécheresse, certaines argiles contenues dans des sols naturels, des marnes ou des roches argileuses se rétractent de manière importante et entraînent localement des mouvements de terrain non uniformes pouvant aller jusqu'à provoquer la fissuration de certaines habitations ou certaines routes. C'est ce que l'on appelle le phénomène de retrait-gonflement des argiles.

Compte tenu de l'impact financier important de ce phénomène (il constitue la deuxième cause d'indemnisation derrière les inondations), il a été jugé nécessaire de développer les connaissances scientifiques et techniques concernant la sécheresse géotechnique, à la fois pour mieux caractériser le phénomène (et notamment faciliter la reconnaissance de conditions climatiques exceptionnelles de nature à déclencher des sinistres) et pour mieux en prévenir les conséquences.

Ainsi, l'IFSTTAR et le Cerema ont mené conjointement (et successivement depuis 2006) deux opérations de recherche baptisées « sécheresse 1 & 2 ». L'opération sécheresse 2 avait pour objectifs d'accroître la compréhension du comportement des argiles et de leurs interactions avec le climat, la végétation, les constructions et les infrastructures routières. L'opération était organisée autour de 4 axes :

- Analyse de la pénétration de la sécheresse dans le sol
- Sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement
- Cartographie de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle locale
- Comportement des constructions et de leurs fondations sous l'effet des cycles de sécheresse : pathologie, réparation, prévention

2. Le contexte scientifique et les opérations de recherche précédentes

La problématique du retrait-gonflement des sols argileux, en rapport avec les périodes de sécheresse et de ré-humidification, est partagée entre les assureurs, les responsables politiques, les bureaux d'études et les établissements de recherche. La prise de conscience de l'importance du phénomène date des années 1990 quand les premiers programmes de recherche ont débuté. On dénombrera ainsi les opérations passées suivantes :

- programmes du MEEDDAT (Ministère de l'Énergie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire) : soutien au BRGM pour la cartographie de l'aléa et le suivi de sites expérimentaux ; publication des PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels) Sécheresse géotechnique et de guides ;

- programme de recherche du réseau Génie civil et urbain (MEEDDAT) sur le retrait et gonflement des argiles, coordonné par le BRGM ;
- projet de la Fondation MAIF : Aléa et risque sécheresse, coordonné par le centre de géosciences d'Armines ;
- projet R2DS Ile-de-France (Réseau francilien de Recherche sur le Développement Soutenable) : Sécheresse géotechnique et bâti ;
- projet de la Fondation MAIF : Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol, coordonné par Météo-France ;
- actions de recherche du LCPC : La sécheresse et ses effets sur les constructions (sécheresse 1), précédée par d'autres travaux sur les sols gonflants, partagée avec les laboratoires régionaux des CETE (actuellement Cerema) ;
- actions de recherche de l'INRA sur la Sécheresse et la forêt ;
- projet ANR-RGCU : ARGIC : Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions, piloté par le BRGM, avec la participation de tous les acteurs français du domaine (ARGIC, 2009).

L'opération sécheresse 2 (La sécheresse et ses effets sur les constructions 2) était simultanée et adossée à un projet de recherche appelé ARGIC 2, piloté par l'IFSTTAR et regroupant 17 partenaires publics et privés (BRGM, INERIS, CSTB, CAPEB, FFB...). Le projet a été financé par deux directions générales du MEDDE (Ministère de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Énergie).

Ses résultats ont été diffusés dans le cadre du projet ARGIC2 ainsi que durant le symposium international SEC2015 organisé en juin 2015 par le Cerema et l'IFSTTAR. Les implantations du Cerema ayant participé à cette opération sont : Lille, Trappes, Rouen, Aix-en-Provence, Nice et Blois (qui en a assuré le pilotage).

3. Principaux résultats de l'opération Sécheresse 2 par axe de travail

3.1. Axe 1 : Analyse de la pénétration de la sécheresse dans le sol

Les désordres subis par les bâtiments sur fondations superficielles sont dus aux mouvements verticaux des fondations que provoquent les variations de teneur en eau en profondeur. La profondeur jusqu'à laquelle une sécheresse va modifier la teneur en eau du sol est dépendante de la géographie : dans les régions plus sèches du sud de la France, on peut s'attendre à des profondeurs plus grandes que dans les régions plus humides. La connaissance de la profondeur maximale que peut atteindre la dessiccation des sols pourrait être importante pour optimiser les règles de calcul, de construction ou de réparation des constructions.

L'estimation des profondeurs de sécheresse nécessite de résoudre au moins deux problèmes : choisir une technique de mesure de la teneur en eau dans le sol et instrumenter et suivre des sites expérimentaux.

Dans cette optique, le Cerema a instrumenté et suivi plusieurs sites répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain : Roaillan (Figure 1 - Gironde, 33), Trappes (Yvelines, 78), Merville (Nord, 59), Le Fauga (Haute-Garonne, 31), Carmaux (Tarn, 81), Mormoiron (Vaucluse, 84) et Saint-Saturnin-les-Apt (Vaucluse, 84) et les sites du Loir-et-Cher (41) et de l'Indre (36).



Figure 1. Vue de la maison instrumentée à Roaillan (33)

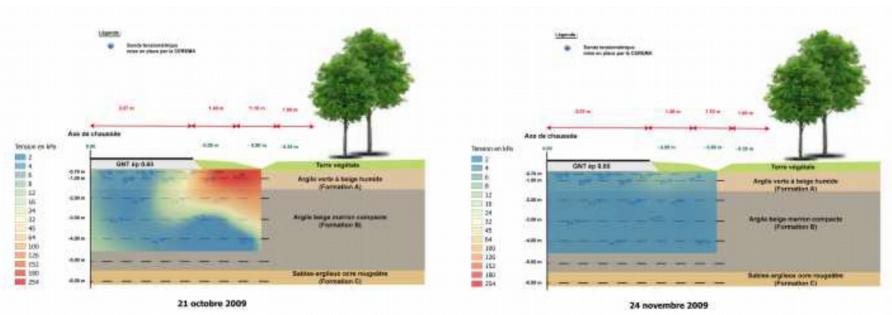


Figure 2. Profils en travers de mesures tensiométriques sur des routes de Sologne (41)

Tous ces sites ont été équipés de capteurs permettant une acquisition plus ou moins continue de l'état d'humidité du sol au cours du temps. Des enseignements ont été tirés à propos des différentes méthodes et types de sondes employées en termes de fiabilité et de durabilité.

Les sondes TDR TRIME sont remarquablement robustes sur une durée de 5 ans au moins, de même que les sondes ThétaProbe ML2x. Les sondes capacitives Humitub sont souvent plus fragiles à long terme et doivent être révisées et parfois remplacées dès 3 ou 4 ans. Les mesures réalisées par diagraphie nucléaire donnent également des résultats intéressants mais leur nature implique des dispositions de sécurité important (donc des coûts importants). Enfin les mesures par tensiométrie permettent une acquisition en continu de la succion des sols qui met en évidence le

caractère dynamique des phénomènes (Figure 2). Toutefois, cette méthode bien que peu coûteuse présente des limites : plages de mesure limitée (1 à 200 kPa) et durée de vie de la sonde limitée à 4 ou 5 ans.

L'ensemble des données de variations de teneur en eau recueillies dans les sols argileux de plusieurs sites expérimentaux de France, indique **des valeurs de pénétration de la sécheresse importantes, de l'ordre de 3 m en général, mais pouvant atteindre 5 m**. Les principaux paramètres dictant cette profondeur de sécheresse sont la lithologie, la météorologie, les aménagements de surface et l'existence de végétation.

Sur ce dernier point, l'influence importante de la végétation est mise en lumière par les travaux de sécheresse 2. Du reste, la complexité de la compréhension des phénomènes du fait du caractère vivant des végétaux et de leurs possibilités d'adaptation laisse des perspectives de recherche importantes.

Sur certains sites, les données collectées permettent d'établir des méthodes de calcul théoriques des déformations d'un sol soumis à des variations de teneur en eau.

3.2. Axe 2 : Sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement

La caractérisation du retrait-gonflement d'un sol peut être obtenue selon différentes méthodes adaptées au contexte des études techniques.

3.2.1. Mesure directe du retrait-gonflement

Pour connaître l'amplitude totale des déformations induites par les variations de teneur en eau d'un sol, il est nécessaire de réaliser simultanément un essai de retrait et un essai de gonflement (Figures 3, 4 et 5). Ces deux essais simplifiés ont fait l'objet d'une méthode d'essai rédigée par l'Ifsttar lors de l'opération ARGIC 1. Lors d'ARGIC 2, de nombreux essais ont été menés sur différents sols argileux afin de les caractériser géotechniquement et de rechercher des corrélations entre différents paramètres (teneur en eau initiale et potentiel de retrait ; indice des vides initial et potentiel de retrait).



Figure 3. Préparation de l'éprouvette

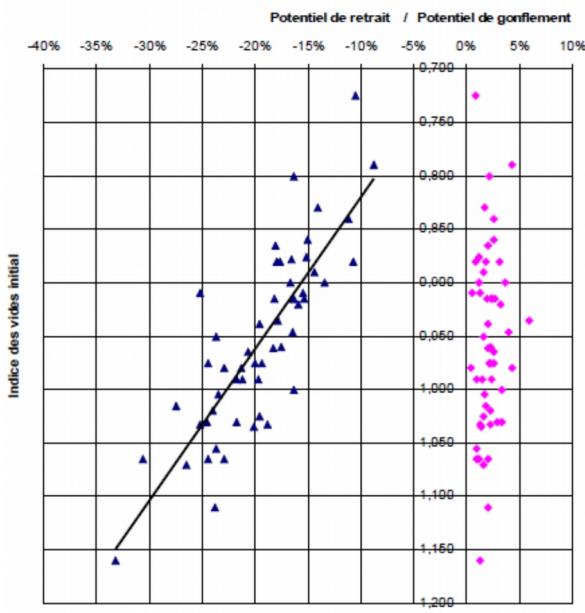
Figure 4. Essai de retrait

Figure 5. Essai de gonflement libre

Sur ce point, les résultats obtenus par le Cerema de Lille sur plus de 70 échantillons sont très explicites (Figure 6) : le potentiel de retrait (c'est-à-dire la

diminution de volume du matériau lors de son assèchement) est clairement corrélé à l'indice des vides initial (c'est-à-dire la compacité) du matériau testé. Il est également corrélé à la teneur en eau initiale du matériau.

Figure 6. Corrélation entre indice des vides initial et potentiel de retrait



3.2.2. Méthodes indirectes

Les autres méthodes de caractérisation de l'amplitude de retrait-gonflement reposent sur l'utilisation de corrélations à partir de paramètres indirectement liés au phénomène. Les plus utilisés sont les limites d'Atterberg (indice de plasticité I_p), la valeur d'adsorption de bleu de méthylène VBS et, dans une moindre mesure, les mesures de gonflement à l'océdomètre. D'autres paramètres comme l'activité des argiles définie comme le rapport entre la VBS (ou l' I_p) et le passant à 2 μm obtenu par une analyse sédimentométrique peuvent être utilisés. Des corrélations sont alors établies pour définir des échelles de sensibilité au retrait-gonflement à partir des variations de ces différents paramètres. Ces classements permettent d'identifier de manière pertinente les sols sensibles au retrait-gonflement mais ne donnent pas d'information sur les déformations et les mouvements que la construction devra reprendre lorsqu'elle sera soumise aux déformations de retrait et de gonflement du sol.

Cette démarche a été reprise et synthétisée lors de la rédaction du guide « Retrait et gonflement des argiles – Caractériser un site pour la construction » élaboré dans le cadre d'ARGIC2 et dont un extrait est présenté en Figure 7.

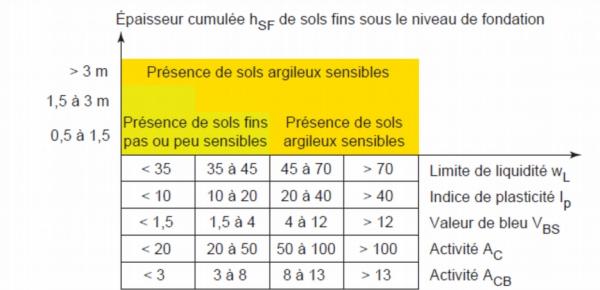


Figure 7. Extrait du guide ARGIC 2 « caractériser un site pour la construction »

La densité d'un sol a une influence certaine sur l'aptitude d'un sol au retrait ou au gonflement. Les sols denses vont ainsi avoir une tendance au gonflement alors que les sols lâches vont avoir une tendance au retrait et ne semblent pas en mesure de présenter des gonflements. De plus, l'amplitude du retrait suit une courbe de tendance liée à l'indice des vides initial de l'échantillon (Figure 8).

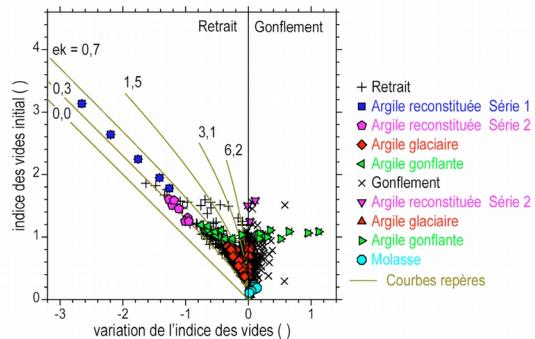


Figure 8. Extrait du rapport d'étude du Cerema Aix-en-Provence

3.3. Axe 3 : Cartographie de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle locale

La cartographie du phénomène de retrait-gonflement est établie en France par le BRGM à l'échelle départementale. Toutefois, l'échelle de cette cartographie s'avère insuffisante pour réaliser des documents d'aménagement ou d'urbanisme (type PPR) ou pour relier directement les niveaux d'aléa à des dimensionnements de construction. Les raisons sont multiples : méthode de généralisation cartographique, traduction d'une carte géologique en carte d'aléa, défaut de données disponibles, prise en compte de la sinistralité...

Différents travaux ont donc été entrepris avec l'objectif d'améliorer les méthodes de cartographie existantes.

Une étude spécifique à l'échelle de deux communes des Alpes-Maritimes montre des écarts parfois importants selon l'échelle d'acquisition des données et le détail d'analyse qui en découle (Figures 9 et 10).

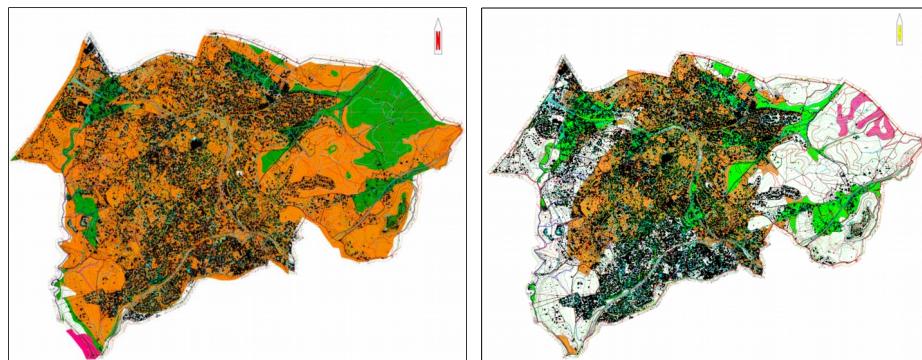


Figure 9. Cartographie d'après carte à 1/50 000

Figure 10. Cartographie d'après carte à 1/10 000

Des différences significatives proviennent :

- de l'échelle de rendu des deux cartes ;
- de la précision apportée à la description des différentes formations géologiques : certaines formations géologiques ne sont pas différencier dans la cartographie au 50 000^{ème} alors qu'une analyse lithologique plus fine le permettrait et induirait :
 - une réduction notable des zones cartographiées en aléa moyen et faible.
 - une identification plus précise des formations géologiques réellement actives.

Enfin, les travaux réalisés par le Cerema (avec Ifsttar, Brgm, Fondasol et Armines) dans le cadre du guide ARGIC 2 « caractériser un site pour la construction » proposent une méthodologie d'étude adaptée à l'échelle de la parcelle.

3.4 Axe 4 : Comportement des constructions et de leurs fondations sous l'effet des cycles de sécheresse : pathologie, réparation, prévention

Cet axe de travail a consisté en 3 principales actions :

3.4.1 Expérimentation en vraie grandeur (Cerema Rouen) :

Une maison a été construite par un maçon selon les normes et règlements en vigueur sur un système de vérins (Figure 11) capable de reproduire des sollicitations similaires à celles induites par le retrait-gonflement du sol. Différents cycles de déplacement 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, selon les règles de l'art, lui confère une résistance satisfaisante vis-à-vis des sollicitations que peut générer le retrait-gonflement des sols.



Figure 11. Vue d'ensemble de la MISS (Maison Instrumentée Sinistrée par la Sécheresse)

3.4.2 Établissement d'une base de données (Cerema IDF)

Cette tâche avait pour objectif la constitution d'une base de données permettant de mettre en évidence les causes des désordres imputables au retrait-gonflement (végétation, profondeur des fondations, forme de la construction, pentes, etc.).

Le Cerema a donc entrepris l'élaboration puis l'analyse d'une base de données issues des dossiers de demande d'indemnisation 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.

Ainsi, sur les populations étudiées :

- la fréquence des désordres est plus importante pour les maisons construites entre 1960 et 2000 et les habitations construites en parpaings semblent souvent impactées.
- il n'a pas été mis en évidence de lien entre les caractéristiques géométriques des biens sinistrés et la fréquence ou l'importance des dommages subis.
- les niveaux d'endommagement semblent plus directement conditionnés par le contexte géologique.

3.4.3 Expérimentations sur des routes sinistrées

Les travaux du Cerema sur les routes sinistrées par la sécheresse ont été financés par ARGIC 2 et une autre opération de recherche portant sur l'impact du changement climatique sur les chaussées (CCLEAR – Opération IFSTTAR).

Les désordres relevés sur les routes sont de deux natures (Figure 12) : il s'agit de fissures longitudinales, avec des affaissements marqués au niveau des rives de la chaussée (fissures d'adaptation). Le plus souvent, en France, le phénomène est observé à proximité de végétation (haies arbustives, forêts).



Figure 12. Exemple de pathologies de chaussées liées au retrait-gonflement

Les travaux menés par le Cerema montrent un assèchement des sols argileux allant des bordures de la route (bas-côtés ou même fossé) vers le centre de celle-ci entraînant des tassements différentiels entre le centre de la chaussée et les bas-côtés.

Plusieurs méthodes de réparation ont été testées par les gestionnaires des voiries. Certaines ont fait l'objet d'un suivi par le Cerema et donnent des résultats encourageants qui ont fait l'objet d'une publication lors de SEC 2015.

4. Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés par le Cerema dans le cadre de Sécheresse 2 ont apporté des résultats significatifs dans les 4 axes. Toutefois, les perspectives de recherche restent importantes tant sur un plan purement scientifique liés à la connaissance du phénomène (impact de la végétation, etc.) que sur un plan opérationnel voire réglementaire (amélioration de la cartographie, définition des essais et études de sol, définition de critères de caractérisation d'une sécheresse géotechnique...).

Les échanges survenus lors du symposium SEC 2015 ont également mis en lumière des problématiques communes et des perspectives de collaboration sur les routes. Le changement climatique et la nécessaire rationalisation des coûts d'entretien constituent des arguments pertinents pour poursuivre les efforts de recherche et d'expérimentation sur ce point.

5. Bibliographie

ARGIC (2009) Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions. Rapport final : BRGM/RP-57011-FR, mai 2009, 92p

ARGIC 2. Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions - Rapport de synthèse générale du Projet ARGIC2. IFSTTAR, octobre 2015, 29p.

KREZIAK C., HEUMEZ S., VILLERS F., LY H. Influence des caractéristiques des constructions sur les dommages occasionnés par la canicule de 2003. *Actes du Symposium International SEC 2015*, Marne-La-Vallée, 17-19 juin 2015, p405-414

MAGNAN J.P., BURLON S., Panorama des projets de recherche Français en lien avec le retrait-gonflement des sols. *Actes du Symposium international SEC 2015*, Marne La Vallée, 17-19 juin 2015, p53-66

MATHON D., GODEFROY A. Suivi expérimental d'une maison instrumentée à Langon (33), *Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – JNGG2016*, Nancy, 6-8 juillet 2016 p1288-1298.

MATHON D. La sécheresse et les routes : suivi de la dessiccation des sols sur trois sites tests en Sologne. *Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – JNGG2010*, Grenoble, 7-9 juillet 2010 p497-504.

MATHON, D. Suivi instrumenté de plusieurs sections de routes touchées par la sécheresse en région Centre de la France. *Actes du Symposium international SEC 2015*, Marne La Vallée, 17-19 juin 2015, p425-434

MATHON, D , GODEFROY, A. Impact de la sécheresse sur les routes françaises Suivi d'un chantier de réparation, *Actes du Symposium international SEC 2015*, Marne La Vallée, 17-19 juin 2015, p435-442

MAURIN P., TRIELLI E., PEREZ J.L. Importance de l'échelle de cartographie pour la caractérisation de l'aléa retrait et gonflement des sols. *Actes du Symposium International SEC 2015*, Marne-La-Vallée, 17-19 juin 2015, p525-534

SERRATRICE J.F. Quelques illustrations du retrait et du gonflement des argiles d'après des essais de laboratoire. *Actes de la 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique CMIG'13*, Alger, 18-19 novembre 2013, 6p.

SERRATRICE J.F. Une représentation des courbes de retrait des sols argileux. *Actes du Symposium international SEC 2015*, Marne La Vallée, 17-19 juin 2015, p179-186

VINCESLAS G. Expérimentation en vraie grandeur d'une maison soumise au retrait-gonflement de sa fondation. *Actes du Symposium International SEC 2015*, Marne-La-Vallée, 17-19 juin 2015, p453-460